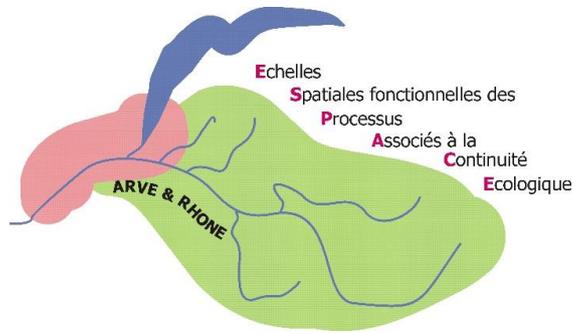




h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



RAPPORT FINAL

INTERREG IV A ESPACE ARVE ET RHONE

VERS UNE CONTINUITE ECOLOGIQUE AU-DELA DES FRONTIERES



Avec la participation financière de :

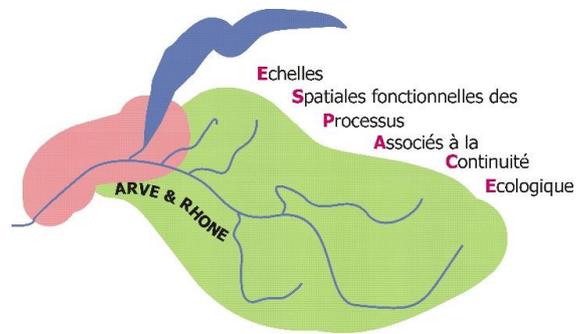


Conseils techniques et participation de :



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



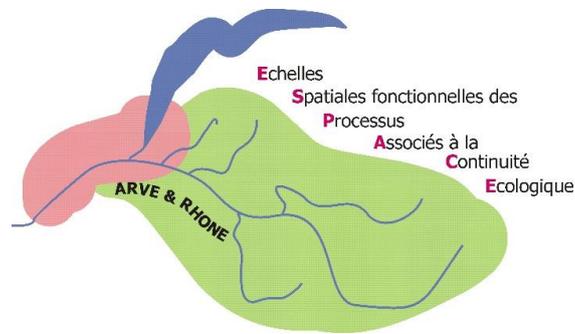
Ce rapport doit être référencé comme suit :

CHASSERIEAU, C., BEAUFILS, M., GRIMARDIAS, D., LIZEE, MH., DUMOUTIER, Q., FROSSARD, PA., BOVY, V., HUCHET, P., GRENIER, R., MEGLE CZ, E., CHAPPAZ, R., DUBUT, V. & CATTANEO, F., 2015. Interreg IV A ESPACE Arve & Rhône – Vers une continuité écologique au-delà des frontières. *Rapport final*, 318 p. + annexes.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Auteurs

- BEUFILS Morgane - Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- BOVY Victor - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- CATTANEO Franck - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- CHASSERIEAU Céline – Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- DUMOUTIER Quentin - SAGE Environnement
- FROSSARD Pierre-André - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- GRIMARDIAS David - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- HUCHET Philippe - Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- LIZEE Marie-Hélène – Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique

Collaborateurs

- BINI Guillaume - Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- CATINAUD Ludovic - Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- CAUDRON Arnaud – Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- CHATELARD Martine - Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- MONNIER Gilles - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- DIZAR Daniel, Président de la Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- DUBUT Vincent – Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie
- FEBVRE Naïs - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- GUERRAZ Didier, Président Technique de la Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- HARRANG Estelle - Institut National de la Recherche Agronomique
- INGOLD Sylvain - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- KARASINSKI Camille - Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
- LAFORGE Philippe
- LEUZINGER Yves, Directeur de la Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- O'ROURKE Jane - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- RAMELET Sébastien - Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève
- TRISCONNE Gilles – Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève

Remerciements

- BERGER Julien – Syndicat Mixte Interdépartemental d'Aménagement du Chéran
- DONJOUX Yann et KHODABANDEH Arash – vues aériennes
- FAUCON-Mouton Philippe – Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
- Geneva Street Fishing
- Les pêcheurs bénévoles de Bonneville
- LOZE Laurent – Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage
- MENZLER Stephan – Propriétaire riverain
- OLIVER Isabelle – Propriétaire riverain
- Régie des Eaux de Bonneville
- Syndicat des Eaux de Rocaille et de Bellecombe

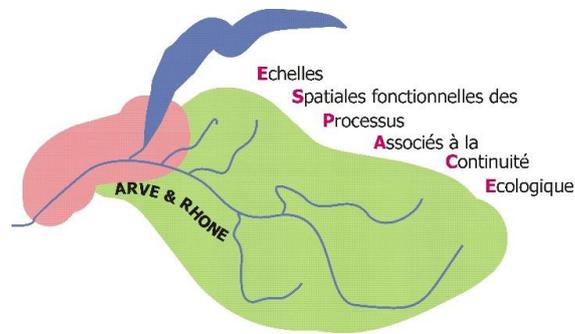
Financeurs et partenaires techniques

- Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)
- Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse
- Services Industriels de Genève (SIG)
- Société des Forces Motrices de Chancy-Pougny
- Canton de Genève (SFMCP)
- Fédération Nationale de la Pêche en France
- Electricité de France (EDF)
- Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords (SM3A)
- Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA)



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



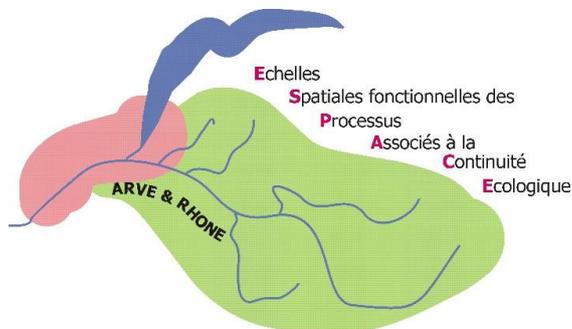
SOMMAIRE

CHAPITRE 1 AVANT-PROPOS - CONTEXTE DE L'ETUDE	1
I. INTRODUCTION.....	1
1) <i>Des milieux aquatiques « sous pressions »</i>	1
2) <i>Fragmentation et connectivité</i>	2
3) <i>Contexte législatif</i>	4
A. En France.....	4
B. En Suisse.....	6
4) <i>Aperçu de la gestion de l'eau à l'échelle locale</i>	7
A. Dépendance amont-aval en zone transfrontalière.....	7
B. Organes de gestion français.....	9
C. Organes de gestion suisses.....	10
D. Une volonté commune transfrontalière et des outils opérationnels.....	11
II. ZONE D'ETUDE : LE BASSIN DE L'ARVE ET LE RHONE GENEVOIS.....	13
1) <i>L'Arve et son bassin versant</i>	13
2) <i>Le Rhône genevois</i>	15
III. BIBLIOGRAPHIE.....	17
CHAPITRE 2 AIRES DE VIE, DEPLACEMENTS ET FRANCHISSEMENTS DE 4 ESPECES CIBLES : LA TRUITE FARIO (SALMO TRUTTA), LE BARBEAU FLUVIATILE (BARBUS BARBUS), LE CHEVAINE (SQUALIUS CEPHALUS) ET L'OMBRE COMMUN (THYMALLUS THYMALLUS).	18
I. OBJECTIFS.....	20
II. MATERIEL ET METHODES.....	21
1) <i>Les espèces piscicoles suivies</i>	21
A. L'Ombre commun (<i>Thymallus thymallus</i> LINNAEUS, 1758).....	21
B. La Truite fario (<i>Salmo trutta fario</i> LINNAEUS, 1758).....	22
C. Le Barbeau fluviatile (<i>Barbus barbus</i> LINNAEUS, 1758).....	22
D. Le Chevaine (<i>Squalius cephalus</i> LINNAEUS, 1758).....	23
2) <i>Principe des techniques de télémétrie</i>	23
3) <i>Matériel utilisé et dispositifs de suivi mis en œuvre</i>	24
A. Radiotélémétrie.....	24
B. Technologie RFID ou PIT-tag.....	36
4) <i>Evaluation du fonctionnement des dispositifs de suivi</i>	39
A. Stations fixes.....	39
B. Radiopistage.....	39
5) <i>Procédure de marquage des individus</i>	39
A. Echantillonnage des individus.....	40
B. Le marquage.....	42
6) <i>Analyses génétiques des truites fario</i>	46
A. Extraction d'ADN et génotypage des individus de truite fario.....	46
B. Analyse des données.....	47
7) <i>Traitement des données et métriques calculées pour les déplacements et domaine vital</i>	47
A. Distances au point de relâcher.....	49
B. Domaine vital.....	49



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

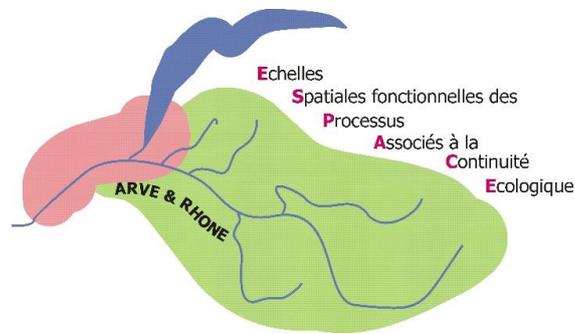


C.	Distances de déplacement.....	49
D.	Significativité des distances de déplacement	50
E.	Vitesses individuelles de déplacement	50
F.	Taux de déplacement	50
8)	<i>Analyse des données et variables calculées pour l'efficacité de franchissement des ouvrages</i>	51
A.	Concept général d'étude du franchissement.....	51
9)	<i>Mesures des paramètres environnementaux</i>	54
A.	Débit	54
B.	Température.....	54
C.	Variables caractéristiques retenues pour les analyses	55
10)	<i>Tests statistiques utilisés</i>	55
III.	RESULTATS	57
1)	<i>Contexte environnemental lors des suivis</i>	57
2)	<i>Analyses des biais méthodologiques</i>	59
A.	Efficacité des dispositifs télémétriques	59
B.	Taux de détection et précision de localisation des émetteurs en radiopistage.....	64
C.	Biais opérateur	65
3)	<i>Bilan des marquages</i>	67
4)	<i>Déplacements et domaines vitaux</i>	71
A.	La truite fario	71
B.	Le barbeau fluviatile	84
C.	Le chevaine	99
D.	L'ombre commun.....	112
5)	<i>Conséquences de la crue centennale d'Arve sur les mouvements des poissons</i>	115
6)	<i>Franchissements d'ouvrages</i>	117
A.	Capacité et efficacité de franchissement des grands ouvrages du Rhône.....	119
B.	Capacité et efficacité de franchissement des autres ouvrages du Rhône et de l'Arve	127
C.	Franchissement des seuils du bassin de l'Arve	134
IV.	DISCUSSION ET CONCLUSION.....	140
1)	<i>Apports et limites des méthodes utilisées</i>	140
A.	L'échantillonnage des individus / contraintes liées du milieu	140
B.	L'opération de marquage	141
C.	Les contraintes du milieu pour l'utilisation de la technologie radio	144
D.	Contraintes liées aux sites d'implantation des stations de suivi télémétrique	144
E.	Le traitement des données	147
2)	<i>Comportement des poissons</i>	148
A.	Distances de déplacement post marquage.....	148
B.	Domaine vital spécifique annuel.....	149
C.	Activité au cours d'une journée	151
D.	Homing et génétique	152
E.	Place des affluents et annexes dans le fonctionnement des populations piscicole de l'Arve	153
3)	<i>Franchissement piscicole et continuité écologique</i>	154
V.	PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS.....	159
VI.	BIBLIOGRAPHIE	161



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



CHAPITRE 3 FONCTIONNEMENT DES POPULATIONS DE CHABOTS (*COTTUS GOBIO*) - DIVERSITE ET STRUCTURATION GENETIQUE DE L'ESPECE LE LONG DE L'ARVE ET DE SES AFFLUENTS..... 168

I.	INTRODUCTION.....	169
II.	MATERIEL ET METHODES	172
	1) <i>Echantillonnage</i> :	172
	2) <i>Extraction de l'ADN et amplification des marqueurs microsatellites</i> :	173
	A. Mise au point de 2 kits d'amplification multiplexée :	173
	B. Extraction de l'ADN et analyses génétiques :	175
	3) <i>Traitements de données et analyses statistiques</i>	176
	A. Descripteurs à l'échelle des 45 stations.....	176
	B. Structuration génétique et taux de migrations entre stations :	177
	C. Calcul des effectifs efficaces et détection de goulots d'étranglement :	179
III.	RESULTATS ET DISCUSSION	180
	1) <i>Diversité génétique à l'échelle des 45 stations</i> :	180
	2) <i>Différenciation génétique</i> :	184
	3) <i>Structuration génétique des 45 stations</i> :	187
	4) <i>Flux de gènes entre stations</i> :	195
IV.	MISE EN EVIDENCE DE 14 UNITES EN TERMES DE GESTION.....	198
V.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	203
	1) <i>Une échelle de fonctionnement de l'ordre de l'affluent, voire du tronçon</i> :	203
	2) <i>Des unités fonctionnelles vulnérables</i> :	204
	3) <i>Perspectives</i> :	204
VI.	BIBLIOGRAPHIE	205

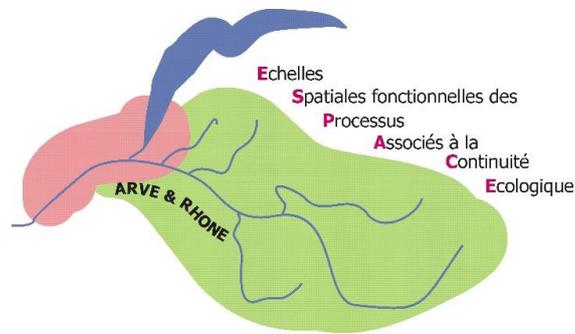
CHAPITRE 4 : PROJET DE RESTAURATION DE LA PARTIE AVAL DU BORNE..... 209

I.	INTRODUCTION/CONTEXTE	210
II.	DIAGNOSTIC HYDROMORPHOLOGIQUE	212
	1) <i>Découpage des tronçons à aménager</i>	212
	2) <i>Etude hydromorphologique</i>	214
	▪ Ecomorphologie – Niveau R.....	214
	▪ Méthode	214
III.	SCENARI DE RESTAURATION	232
	1) <i>Fiches mesures</i>	232
	2) <i>Coûts estimés</i>	246
	3) <i>Plans détaillés de l'avant-projet</i>	252
IV.	METHODOLOGIE DE SUIVI DE TRAVAUX APRES RESTAURATION	260
	1) <i>Choix des stations et temporalité du suivi</i>	260
	2) <i>Diagnostic écologique</i>	264
	A. Etude de la qualité du milieu	264
	B. Etude du compartiment macrobenthique	267
	C. Etude de la faune piscicole	268
	3) <i>Analyse des résultats</i>	270
V.	BIBLIOGRAPHIE.....	270



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



CHAPITRE 5 TRANSFERT VERS UNE GESTION TRANSFRONTALIERE	272
I. CONTEXTE ET OBJECTIFS	273
II. METHODOLOGIES EXISTANTES ET METHODOLOGIE RETENUE DANS LE CADRE DU PROGRAMME INTERREG ESPACE	274
III. PRESENTATION DU MODELE MATHEMATIQUE	275
1) <i>Principe général</i>	275
2) <i>Calcul des indices de connectivité</i>	277
3) <i>Algorithme de recherche de la solution : Greedy Algorithm</i>	282
4) <i>Données structurantes</i> :	284
A. La valeur d'habitat	284
B. La constante de dispersion de l'espèce piscicole (d_0)	285
C. La probabilité de montaison et de dévalaison d'un obstacle	286
D. Prise en compte de l'espèce cible	287
5) <i>Stratégie d'utilisation</i>	288
A. Niveau de précision des données sources	288
B. Analyse des résultats	289
C. Test de robustesse	290
IV. PRESENTATION ET FONCTIONNEMENT DE L'OUTIL INFORMATIQUE	294
1) <i>Articulation du classeur Excel®</i>	294
A. Table tronçons	295
B. Table obstacles	297
C. Table projets	299
2) <i>Lancement du module de modélisation</i>	300
A. Calcul simple de connectivité	302
B. Recherche du meilleur scénario d'effacement pour un budget donné	302
C. Etablissement de la courbe du gain de connectivité en fonction du budget	302
3) <i>Retour d'expérience sur le fonctionnement du programme</i>	303
V. EXEMPLE SUR LE BORNE	304
1) <i>Alimentation de la table tronçon (Figure 125)</i>	305
2) <i>Alimentation de la table obstacles (Figure 126, Figure 127 et Figure 128)</i>	311
3) <i>Alimentation de la table de projets</i>	312
4) <i>Constante de dispersion de la truite fario</i>	312
5) <i>Résultats</i>	314
VI. BIBLIOGRAPHIE	317
ANNEXES.....	329



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

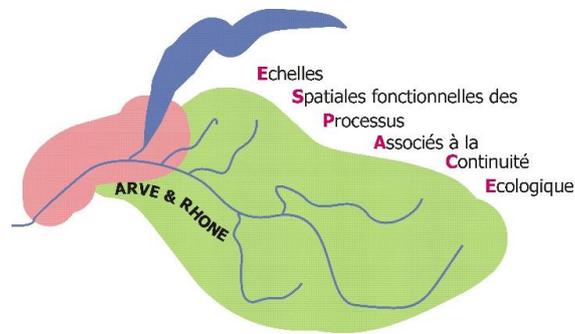


TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : SCHEMA CONCEPTUEL SIMPLIFIE DES DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES ASSOCIEES AU FONCTIONNEMENT D'UN ECOSYSTEME ANTHROPISE.	8
FIGURE 2 : SITUATION DE L'ESPACE ARVE & RHONE QUI INTEGRE LES STRUCTURES GESTIONNAIRES LOCALES POUR ABOUTIR A UNE GESTION COORDONNEE DU BASSIN.	10
FIGURE 3 : MORPHOLOGIE DE L'ARVE AU COURS DU 20 ^{EME} SIECLE.	13
FIGURE 4 : CARTE DES BASSINS VERSANTS DE L'ARVE ET DU RHONE GENEVOIS, ET PRINCIPALES UTILISATIONS DU SOL.	15
FIGURE 5 : OMBRE COMMUN PECHE DANS L'ARVE A ANNEMASSE (LT = 368 MM ; 467 G).	21
FIGURE 6 : TRUITE FARIO PECHEE DANS L'ARVE A ANNEMASSE (LT = 275 CM ; 230 G).	22
FIGURE 7 : BARBEAU PECHE DANS L'ARVE A BONNEVILLE (LT = 585 MM ; 2312 G).	22
FIGURE 8 : CHEVAINE PECHE DANS LA MENOGE A VETRAZ-MONTHOUX (LT = 416 MM ; 955 G).	23
FIGURE 9 : PERIODES DE REPRODUCTION DES 4 ESPECES PISCICOLES ETUDIEES.	23
FIGURE 10 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES DEUX METHODES TELEMETRIQUES UTILISEES DANS LE CADRE DU PROGRAMME ESPACE ARVE ET RHONE.	24
FIGURE 11 : LES 3 TAILLES D'EMETTEURS INTERNES UTILISES.	25
FIGURE 12 : EXEMPLE DE CONFIGURATION DE STATION RADIO FIXE.	27
FIGURE 13 : LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI PISCICOLE MISES EN PLACE POUR LE PROGRAMME ESPACE ET DES OUVRAGES TRANSVERSAUX PRESENTS SUR LE BASSIN, QU'ILS SOIENT IMPACTANT OU NON (RECENSEMENT NON EXHAUSTIF : SOURCE ONEMA ET FDPPMA 74).	28
FIGURE 14 : ZONE DE DETECTION DE L'ANTENNE OMNIDIRECTIONNELLE DE LA STATION FIXE RADIO IMPLANTEE A LA CENTRALE EDF D'ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME (LINEAIRE COUVERT : 200 M).	30
FIGURE 15 : ZONE DE DETECTION DES STATIONS FIXES RADIO IMPLANTEES AU BARRAGE SIG DE VESSY.	30
FIGURE 16 : ZONE DE DETECTION DES STATIONS FIXES RADIO IMPLANTEES AU BARRAGE SIG DU SEUJET.	31
FIGURE 17 : ZONE DE DETECTION DES STATIONS FIXES RADIO IMPLANTEES AU BARRAGE SIG DE VERBOIS.	31
FIGURE 18 : ZONE DE DETECTION DES STATIONS FIXES RADIO IMPLANTEES AU BARRAGE SIG DE CHANCY-POUGNY.	32
FIGURE 19 : ZONES DE DETECTION DES DEUX ANTENNES YAGI DIRECTIONNELLES (3 ELEMENTS) DE LA STATION FIXE RADIO DE BONNEVILLE.	32
FIGURE 20 : POSITIONNEMENT DE LA STATION RADIO FIXE SUR LE SITE DE LA STATION D'EPURATION DE SCIENTRIER.	33
FIGURE 21 : MODE DE RADIOPISTAGE (A) A PIED, (B) EN CANOË ET (C) EN BATEAU DE TOURISME POUR LE RHONE.	34
FIGURE 22 : LINEAIRES PROSPECTES DE MANIERE HEBDOMADAIRE OU EXCEPTIONNELLE, PRESENTES SELON LES SECTEURS EN FONCTION DU MODE DE PISTAGE UTILISE.	34
FIGURE 23 : INTENSITE DU SIGNAL CROISSANT DETECTE PAR LE RECEPTEUR AU FUR ET A MESURE DU RAPPROCHEMENT DE L'EMETTEUR.	35
FIGURE 24 : ILLUSTRATIONS DE LA METHODE DE RADIOPISTAGE PAR « HOMING-IN » ET DE L'INTENSITE DU SIGNAL RADIO EN FONCTION DE LA DISTANCE ANTENNE – EMETTEUR.	35
FIGURE 25 : COMPOSITION D'UNE STATION PIT-TAG TYPE – MATERIEL OREGON RFID.	37
FIGURE 26 : DISPOSITION DES ANTENNES PIT-TAG INDIQUEES PAR UNE FLECHE ROUGE (A) DANS LE CAS D'UNE PASSE A POISSONS A FENTES VERTICALES ; (B) D'ANTENNES TRANSVERSALES A PLAT ; (C) D'ANTENNES TRANSVERSALES VERTICALES.	38
FIGURE 27 : LES DIFFERENTES ETAPES DE LA PROCEDURE DE MARQUAGE.	40
FIGURE 28 : CAPTURE DES POISSONS PAR PECHE ELECTRIQUE DANS LES HABITATS ATTRACTIFS SUR LE PLAN PISCICOLE ;	41
FIGURE 29 : LOCALISATION DES SECTEURS PROSPECTES PAR PECHE ELECTRIQUE DE SONDAGE POUR CAPTURER LES POISSONS A MARQUER.	42



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

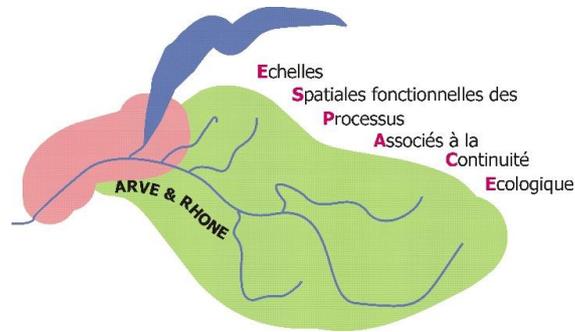


FIGURE 30 : DISPOSITIF DE MARQUAGE AVEC SYSTEME D'OXYGENATION (A) PAR FLUX GRAVITAIRE ; (B) PAR UNE POMPE DE SURFACE SUR BATTERIE.	43
FIGURE 31 : PROCEDURE DE MARQUAGE EXTERNE SUR UN OMBRE COMMUN.	44
FIGURE 32 : PROCEDURE DE MARQUAGE POUR L'IMPLANTATION D'UN EMETTEUR RADIO INTERNE.	45
FIGURE 33 : MARQUAGE INTERNE D'UNE TRUITE AVEC UN PIT-TAG DE 23 MM ;	46
FIGURE 34 : PROJECTION DES POINTS GPS ISSUS DES CAMPAGNES DE TERRAIN SUR LA LIGNE DE RESEAU HYDROGRAPHIQUE CARTOGRAPHIE ET ATTRIBUTION D'UN POINT METRIQUE A CHAQUE DONNEE DE PISTAGE.	48
FIGURE 35 : PARAMETRES ETUDIEES (A) ET DISPOSITIF-TYPE DE DETECTION RADIO ET PIT-TAG EQUIPANT LES OUVRAGES (B).	52
FIGURE 36 : LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI DE DEBIT ET DE TEMPERATURE UTILISEES POUR CARACTERISER LES CONDITIONS ABIOTIQUES DU MILIEU, ASSOCIEES AUX PRODUCTEURS DES DONNEES.	55
FIGURE 37 : EVOLUTION DES DEBITS (COURBE BLEUE) ET DES TEMPERATURES (COURBE ROUGE) MOYENS JOURNALIERS DE CHAQUE COURS D'EAU (A : ARVE ; B : BORNE ; C : GIFFRE ; D : MENOGE ET E : RHONE) DURANT LA PERIODE DE SUIVI DES POISSONS..	59
FIGURE 38 : ETAT DE FONCTIONNEMENT DES 3 STATIONS FIXES RADIO FRANÇAISES ;.....	60
FIGURE 39 : EFFICACITE DU FONCTIONNEMENT DE CHAQUE ANTENNE COMPOSANT LES DISPOSITIFS PIT-TAG DE SUIVI.....	61
FIGURE 40 : EFFICACITE DU FONCTIONNEMENT DE CHAQUE ANTENNE COMPOSANT LE DISPOSITIF PIT-TAG DE LA MENOGE AVAL A VETRAZ-MONTHOUX - PTME, MIS EN RELATION AVEC LES EFFECTIFS D'INDIVIDUS DETECTES PAR CES DISPOSITIFS.	62
FIGURE 41 : EFFICACITE DU FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF PIT-TAG DES OUVRAGES DE CHANCY-POUGNY (A) ET VERBOIS (B)...	63
FIGURE 42 : TAUX DE DETECTION HEBDOMADAIRE GLOBAL (INDIFFERENCIE SELON LE MODE DE SUIVI) ENTRE JUIN 2014 (P25) ET JANVIER 2015 (P58) MIS EN RELATION AVEC LE DEBIT ET LA CONDUCTIVITE DE L'ARVE.	64
FIGURE 43 : DISTANCES DE DETECTION (EN M) DEFINIES POUR UN PANEL DE 14 EMETTEURS-TESTS LOCALISES LORS DES PROSPECTIONS HEBDOMADAIRES EN MODE A PIED ET EN CANOË.....	65
FIGURE 44 : MARGE D'ERREUR DE LOCALISATION DES EMETTEURS-TESTS PAR CHACUN DES OPERATEURS INTERVENANT SUR POUR LE RADIOPISTAGE POUR LES 2 MODES DE PROSPECTION UTILISES COTE FRANCE.	66
FIGURE 45 : EFFECTIFS DE POISSONS MARQUES PAR ESPECE ET EN CUMULE SUR TOUTE LA DUREE DU PROGRAMME ET PAR LES DEUX STRUCTURES PORTEUSES (A) AVEC LES EMETTEURS RADIO ; (B) AVEC LES PIT-TAGS.....	68
FIGURE 46 : LOCALISATION DES EFFECTIFS DE POISSONS MARQUES SUR LA ZONE D'ETUDE PRESENTES PAR ESPECE (A) EQUIPES D'UN EMETTEUR RADIO ; (B) EQUIPES D'UN PIT-TAG.....	69
FIGURE 47 : FREQUENCE CUMULEE DES DEBITS DE L'ARVE A GENEVE (STATION OFEV N°2170) SUR LA PERIODE HIVERNALE (DE JANVIER A MARS) POUR LES ANNEES 2010 A 2015.....	70
FIGURE 48 : HISTOGRAMMES RECAPITULATIFS DES EFFECTIFS MARQUES DE TRUITES FARIO EN FRANCE ET EN SUISSE AINSI QUE LES EFFECTIFS SUIVIS.....	72
FIGURE 49 : CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES DE LA TOTALITE DES TRUITES MARQUEES PAR COURS D'EAU : (A) TAILLE (MOYENNE = 388 ± 71 MM) ; (B) POIDS (MOYENNE = 715 ± 949 G) ET (C) AGE (MOYENNE = 5 ANS ± 1 AN).	72
FIGURE 50 : BOXPLOT DES DUREES DE SUIVI (EN JOURS) DES TRUITES FARIO.....	73
FIGURE 51 : SCATTERGRAM (A) DES DISTANCES PARCOURUES (M) ENTRE CHAQUE PROSPECTION ET POUR CHAQUE TRUITE SUIVIE ; (B) DES VITESSES MOYENNES (M/I) PARCOURUES ENTRE CHAQUE PROSPECTION ET POUR CHAQUE TRUITE SUIVIE.....	74
FIGURE 52 : DEPLACEMENTS DES TRUITES SEDENTAIRES (EN ORDONNEES, LES PM) DURANT TOUTE LA PERIODE DE SUIVI (DATE EN ABSCISSES).	75
FIGURE 53 : DEPLACEMENTS DES TRUITES MIGRANTES (EN ORDONNEES, LES PM) DURANT TOUTE LA PERIODE DE SUIVI (DATES EN ABSCISSES) A L'EXCEPTION DES TRUITES DE L'ARVE MIGRANT DANS LE BORNE.	76
FIGURE 54 : DEPLACEMENTS DES 8 TRUITES MIGRANTES DANS LE BORNE (EN ORDONNEES, LES PM) DURANT TOUTE LA PERIODE DE SUIVI (DATES EN ABSCISSES).	77
FIGURE 55 : MOYENNES MENSUELLES DES DISTANCES HEBDOMADAIRES (POUR LES MOUVEMENTS VALIDES) POUR LES TRUITES MIGRANTES ET SEDENTAIRES.	79



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

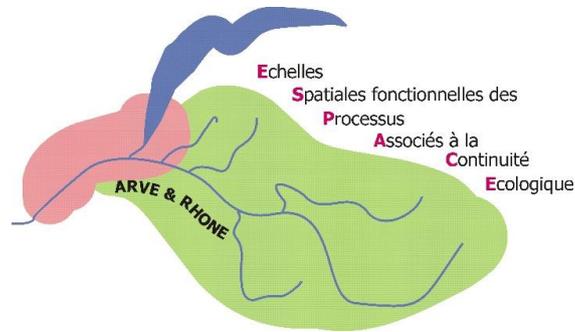


FIGURE 56 : NOMBRE D'INDIVIDUS EN FONCTION DE LEUR SOUCHE GENETIQUE DANS CHAQUE COURS D'EAU.....	80
FIGURE 57 : (A) DOMAINE VITAL (EN M) DE CHAQUE INDIVIDU DE TRUITE SUIVI EN SPECIFIANT LES LINEAIRES UTILISES PAR COURS D'EAU ET (B) BOX-PLOT POUR VISUALISER LA REPARTITION EN QUARTILES DES DOMAINES VITAUX.	81
FIGURE 58 : (A) DISTANCES PARCOURUES DANS CHAQUE COURS D'EAU PAR CHAQUE INDIVIDU DE TRUITE FARIO PENDANT LA PERIODE DE REPRODUCTION (EN M) ET (B) BOX-PLOT POUR VISUALISER LA REPARTITION EN QUARTILES DE CES DISTANCES.	82
FIGURE 59 : EXEMPLES CARTOGRAPHIQUES DES DOMAINES VITAUX DE QUELQUES INDIVIDUS ;.....	83
FIGURE 60 : CARACTERISTIQUES DES BARBEAUX FLUVIATILES ECHANTILLONNES, PRESENTES PAR COURS D'EAU D'ORIGINE OU DE RELACHER POUR LA PARTIE SUISSE ;.....	84
FIGURE 61 : EFFECTIFS DES BARBEAUX MARQUES EN FRANCE ET EN SUISSE AINSI QUE DES EFFECTIFS SUIVIS.....	85
FIGURE 62 : PERIODES DE SUIVI DES 52 INDIVIDUS SUISSES ET FRANÇAIS INTEGRES DANS LES ANALYSES.	86
FIGURE 63 : NUAGES DE POINTS A) DES DISTANCES PARCOURUES (M) ENTRE DEUX CONTACTS POUR TOUS LES BARBEAUX SUIVIS REGROUPES PAR COURS D'EAU ; B) DES VITESSES MOYENNES (M/J) PARCOURUES POUR TOUS LES BARBEAUX SUIVIS REGROUPES PAR COURS D'EAU.....	87
FIGURE 64 : GRAPHIQUE DE DEPLACEMENT DES BARBEAUX FLUVIATILES DEFINIS COMME SEDENTAIRES EN FONCTION DU TEMPS ET DE LEUR POINT DE MARQUAGE ET COURS D'EAU D'ORIGINE.	88
FIGURE 65 : SECTEUR DE L'ARVE ENTRE ETREMBIERES ET VETRAZ-MONTHOUX TRES FREQUENTE PAR DE NOMBREUX INDIVIDUS DE BARBEAU FLUVIATILE (PROXIMITE DE LA CONFLUENCE DE LA MENOGE) ;.....	90
FIGURE 66 : GRAPHIQUES DES DEPLACEMENTS DES BARBEAUX FLUVIATILES DEFINIS COMME MIGRANTS EN FONCTION DU TEMPS ET DE LEUR POINT DE MARQUAGE ET COURS D'EAU D'ORIGINE.	92
FIGURE 67 : MOYENNES MENSUELLES DES DISTANCES HEBDOMADAIRES (DES MOUVEMENTS VALIDES) EFFECTUEES PAR LES BARBEAUX FLUVIATILES MIGRANTS ET SEDENTAIRES SUIVIS DURANT TOUTE L'ETUDE.....	93
FIGURE 68 : (A) DOMAINE VITAL (EN M) DE CHAQUE INDIVIDU DE BARBEAU FLUVIATILE SUIVI EN SPECIFIANT LES LINEAIRES UTILISES PAR COURS D'EAU ET (B) BOX-PLOT POUR VISUALISER LA REPARTITION EN QUARTILES DES DOMAINES VITAUX.....	96
FIGURE 69 : EXEMPLES DE DOMAINES VITAUX CARTOGRAPHIES DE BARBEAUX FLUVIATILES.	97
FIGURE 70 : (A) DISTANCES PARCOURUES DANS CHAQUE COURS D'EAU PAR CHAQUE INDIVIDU DE BRABEAU FLUVIATILE PENDANT LA PERIODE DE REPRODUCTION (EN M) ET (B) BOX-PLOT POUR VISUALISER LA REPARTITION EN QUARTILES DE CES DISTANCES.	98
FIGURE 71 : CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES DES CHEVAINES ECHANTILLONNES, PRESENTEES PAR COURS D'EAU D'ORIGINE OU DE RELACHER POUR LA PARTIE SUISSE ; (A) LONGUEUR TOTALE EN MM ; (B) POIDS EN G ; (C) AGE DEFINI PAR LA SCALIMETRIE.	99
FIGURE 72 : EFFECTIFS DES CHEVAINES MARQUES EN FRANCE ET EN SUISSE AINSI QUE DES EFFECTIFS SUIVIS.	100
FIGURE 73 : DUREE DE SUIVI DES 57 CHEVAINES MARQUES EN SUISSE ET EN FRANCE INTEGRES DANS LES ANALYSES.....	101
FIGURE 74 : NUAGES DE POINTS A) DES DISTANCES PARCOURUES (M) ENTRE DEUX CONTACTS POUR TOUS LES CHEVAINES SUIVIS REGROUPES PAR COURS D'EAU ; B) DES VITESSES MOYENNES (M/J) PARCOURUES POUR TOUS LES CHEVAINES SUIVIS REGROUPES PAR COURS D'EAU.....	102
FIGURE 75 : GRAPHIQUE DE DEPLACEMENTS DES CHEVAINES DEFINIS COMME SEDENTAIRES EN FONCTION DU TEMPS ET DE LEUR POINT DE MARQUAGE ET COURS D'EAU D'ORIGINE.	103
FIGURE 76 : (A) LOCALISATION DE TOUTS LES POINTS DE CONTACTS DES CHEVAINES SUIVIS SUR LE GIFFRE AVAL ; B) MORPHOLOGIE DU GIFFRE SUR L'AIRE DE PRESENCE DES CYPRINIDES AVEC LA FORMATION D'EMBACLES EN BERGE LIEE A L'EROSION LATERALE... ..	104
FIGURE 77 : GRAPHIQUE DE DEPLACEMENTS DES CHEVAINES DEFINIS COMME MIGRANTS EN FONCTION DU TEMPS ET DE LEUR POINT DE MARQUAGE ET COURS D'EAU D'ORIGINE.....	105
FIGURE 78 : MOYENNES MENSUELLES DES DISTANCES HEBDOMADAIRES (DES MOUVEMENTS VALIDES) EFFECTUEES PAR LES CHEVAINES MIGRANTS ET SEDENTAIRES SUIVIS DURANT TOUTE L'ETUDE.	107
FIGURE 79 : (A) DOMAINE VITAL (EN M) DE CHAQUE INDIVIDU DE CHEVAINE SUIVI EN SPECIFIANT LES LINEAIRES UTILISES PAR COURS D'EAU ET (B) BOX-PLOT POUR VISUALISER LA REPARTITION EN QUARTILES DES DOMAINES VITAUX.	109
FIGURE 80 : EXEMPLES DE DOMAINES VITAUX CARTOGRAPHIES DE CHEVAINES.	110



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

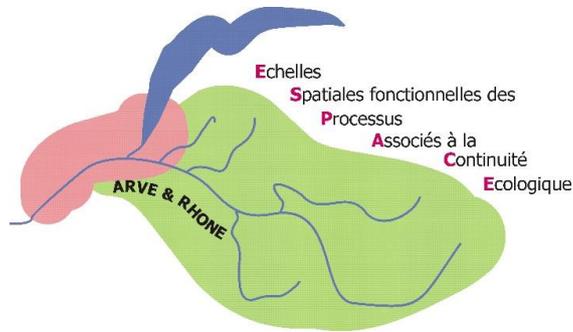


FIGURE 81 : (A) DISTANCES PARCOURUES DANS CHAQUE COURS D’EAU PAR CHAQUE INDIVIDU DE BRABEAU FLUVIATILE PENDANT LA PERIODE DE REPRODUCTION (EN M) ET (B) BOX-PLOT POUR VISUALISER LA REPARTITION EN QUARTILES DE CES DISTANCES. ... 111

FIGURE 82 : CARACTERISTIQUES DES OMBRES COMMUNS ECHANTILLONNES ET MARQUES D’UN PIT-TAG, PRESENTES PAR COURS D’EAU D’ORIGINE OU DE RELACHER POUR LA PARTIE SUISSE ; 113

FIGURE 83 : COMPORTEMENTS DE MIGRATION OU NON DES GENITEURS D’OMBRE COMMUN MARQUES DANS LA MENOGE AU PRINTEMPS 2012 (SOURCE : GADAIS, 2012). 114

FIGURE 84 : POINTS DE MARQUAGE 2013-2015 ET LINEAIRE PARCOURU PAR LES INDIVIDUS D’OMBRE COMMUN DETECTES A LA STATION PTME SITUÉE A 0.8 KM DE LA CONFLUENCE ARVE – MENOGE. 114

FIGURE 85 : SITUATIONS EN PERIODE DE BASSES EAUX PUIS AU MOMENT DE LA CRUE DU MOIS DE MAI 2015 A) DE L’ARVE AU NIVEAU DU BARRAGE D’ARTHAZ ET B) DE LA MENOGE AU NIVEAU DU SITE D’IMPLANTATION DES ANTENNES PIT-TAG (PTME) SUR LA COMMUNE DE VETRAZ-MOUTHOUX. 115

FIGURE 86 : DETECTIONS DE DEUX TRUITES DETECTEES CHACUNE A UNE STATION FIXE (EN BLEU FONCE CELLE DE BONNEVILLE ET EN BLEU CLAIR, CELLE DE SCIENTRIER) MISES EN RELATION AVEC LE DEBIT DE L’ARVE ENTRE LE 1^{ER} AVRIL ET LE 22 MAI 2015. 116

FIGURE 87 : POSITIONS DES DEUX ESPECES DE CYPRINIDES SUIVIS DANS LE SECTEUR DE VETRAZ-MONTHOUX (CONFLUENCE ARVE – MENOGE) AVANT ET APRES LA CRUE DU 1^{ER} MAI 2015. 117

FIGURE 88 : REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DES DONNEES COMPORTEMENTALES OBSERVEES SOUS LES BARRAGES DE CHANCY-POUGNY ET VERBOIS. 120

FIGURE 89 : DEBITS AUX TURBINES (COURBE BLEUE) ET AUX VANNES (SURVERSES, COURBE ORANGE) ET DATE DE PREMIERE APPROCHE DES INDIVIDUS MARQUES PAR RADIO SUR LE BARRAGE DE VERBOIS DURANT LES PERIODES DE REPRODUCTION DES CYPRINIDES ETUDIES (DU 1^{ER} AVRIL AU 31 JUILLET) EN 2013 ET 2014 (PAS DE MONTAISON DETECTEE PAR RADIO EN 2015). 125

FIGURE 90 : DEBITS AUX TURBINES (COURBE BLEUE) ET VANNES (SURVERSES, COURBE ORANGE) ET DATE DE PREMIERE APPROCHE DES INDIVIDUS MARQUES PAR RADIO SUR LE BARRAGE DE CHANCY-POUGNY DURANT LES PERIODES DE REPRODUCTION DES CYPRINIDES ETUDIES (DU 1^{ER} AVRIL AU 31 JUILLET) EN 2014. 126

FIGURE 91 : EVOLUTION DES POSITIONS INDIVIDUELLES SUR L’ARVE DES SALMONIDES (A) ET CYPRINIDES (B) MIGRANTS. 136

FIGURE 92 : CARTOGRAPHIE DES LOCALISATIONS DES TRUITES AYANT FRANCHI LE SEUIL DE PONT DU DIABLE. 137

FIGURE 93 : DEBIT HORAIRE DU NANT DE SION SUR LA PERIODE DE SUIVI ET TIMING DES FRANCHISSEMENTS DU SEUIL (FLECHES ROUGES, DONNEES PIT-TAG). 138

FIGURE 94 : AIRES DE VIE DE LA TRUITE FARIO, DU BARBEAU FLUVIATILE, DU CHEVAINE ET DE L’OMBRE COMMUN, DEFINIES A PARTIR DES SUIVIS EN RADIOTELEMETRIE ET LES TRANSPONDEURS RFID. 151

FIGURE 95 : DETECTIONS AU NIVEAU DE LA STATION FIXE RADIO DE BONNEVILLE (RFBO) DE LA TRUITE FARIO 9943-19 (LT = 429 MM) A) SUR L’ANTENNE 2 TOURNEE VERS LE BORNE (ORANGE) ET B) SUR L’ANTENNE 1 TOURNEE VERS L’ARVE (BLEU) ENTRE LE 19 MARS 2014 ET LE 22 MAI 2015. 152

FIGURE 96 : TAUX DE CAPTURE DES INDIVIDUS (INDIVIDUS/HEURE) PENDANT LES DIFFERENTES CAMPAGNES DE CAPTURES EN NASSES DES INDIVIDUS FRANCHISSANT L’ECHELLE A POISSONS DE VERBOIS. 157

FIGURE 97 : PLAN D’ECHANTILLONNAGE THEORIQUE INITIAL (GOOGLE EARTH) 172

FIGURE 98 : ECHANTILLONNAGE PAR PECHE ELECTRIQUE PAR LA FDPPMA74, BIOMETRIE (ICI, MESURE DE LONGUEUR) ET PRELEVEMENT D’UN MORCEAU DE LA NAGEOIRE CAUDALE. 173

FIGURE 99 : LES 45 POINTS D’ECHANTILLONNAGE DE CHABOT 174

FIGURE 100 : SCHEMAS ILLUSTRANT LES 2 KITS D’AMPLIFICATION (Cg1 ET Cg2) 175

FIGURE 101 : EXEMPLES DE PROFILS OBTENUS POUR 4 INDIVIDUS DIFFERENTS CONCERNANT LE LOCUS MICROSATELLITE Cc017. 176

FIGURE 102 : RICHESSE ALLELIQUE ESTIMEE PAR RAREFACTION POUR UN EFFECTIF MINIMUM DE 24 INDIVIDUS. 183

FIGURE 103 : RELATION ENTRE DISTANCE HYDROLOGIQUE (KM) ET DISTANCE GENETIQUE (FST) POUR LES 990 PAIRES DE STATIONS. 187

FIGURE 104 : CARTE ILLUSTRANT LA STRUCTURATION GENETIQUE DES STATIONS ECHANTILLONNEES. 189



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

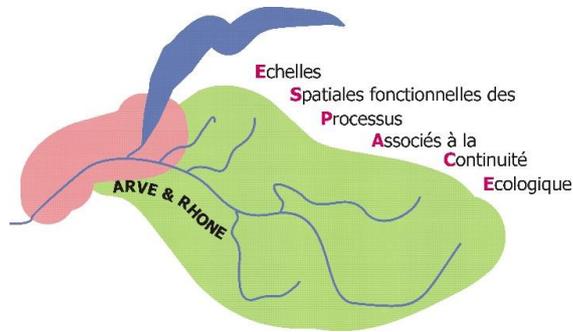


FIGURE 105 : DIAGRAMMES REPRESENTANT POUR CHACUNE DES STATIONS (CADRES NOIRS) L'ASSIGNATION DES INDIVIDUS (1BARRE VERTICALE = 1 INDIVIDU) AUX DIFFERENTS CLUSTERS GENETIQUES. 190

FIGURE 106 : CONFIGURATION ATYPIQUE DE LA CONFLUENCE ENTRE LE FORON DE REIGNIER ET LE COURS D'EAU PRINCIPAL (ARVE). 193

FIGURE 107 : SCHEMA REPRESENTANT LES TAUX DE MIGRATION A L'AMONT ET A L'AVAL DE LA RUPTURE LOCALISEE SUR LE GIFFRE 195

FIGURE 108 : SCHEMA REPRESENTANT LES TAUX DE MIGRATION EN PROVENANCE DE LA STATION 56 (FORON DE TANINGES) 196

FIGURE 109 : REPARTITION DES 45 STATIONS ECHANTILLONNEES PARMIS LES 14 UNITES FONCTIONNELLES DEFINIES DANS CETTE ETUDE (LES IDENTIFIANTS DES STATIONS LOCALISEES SUR LE COURS D'EAU PRINCIPAL SONT SOULIGNES). 198

FIGURE 110 : SITUATION DU BORNE AVAL, AFFLUENT RIVE GAUCHE DE L'ARVE, RECTIFIE SUR ENVIRON 3 KM DANS SA PARTIE AVAL (LINEAIRE ROUGE)..... 210

FIGURE 111 : ILLUSTRATIONS DU BORNE AVAL A ST PIERRE EN FAUCIGNY (A) VS BORNE MEDIAN AU GRAND BORNAND (B). 211

FIGURE 112 : SCHEMA D'EVOLUTION THEORIQUE D'UNE COMMUNAUTE DE MACROINVERTEBRES BENTHIQUES APRES RESTAURATION. 261

FIGURE 113 : GRAPHIQUE DES DEBITS MOYENS MENSUELS (QMM) POUR LES ANNEES 2010 ; 2011 ; 2012 ; 2013 ET 2014.... 262

FIGURE 114 : EXEMPLE DE DEBITS MOYENS JOURNALIERS DU BORNE SUR UNE ANNEE (2012). 262

FIGURE 115: SCHEMA DES TRONÇONS A AMENAGER ET POSITIONNEMENT DES STATIONS D'ECHANTILLONNAGE POUR LE SUIVI DES TRAVAUX. 263

FIGURE 116 : STRUCTURE SCHEMATIQUE DES DONNEES ET DE LEUR UTILISATION PAR LE MODELE. 276

FIGURE 117 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN BASSIN VERSANT VIRTUEL COMPOSE DE 31 TRONÇONS ET DE 8 OBSTACLES AINSI QUE LES INFORMATIONS ASSOCIEES A CHAQUE TYPE D'ENTITE..... 277

FIGURE 118 : ALGORITHME SIMPLIFIE DE RECHERCHE DE LA COMBINAISON DE PROJETS QUI OBTIENT LE MEILLEUR GAIN POUR UN BUDGET DONNE (BUDGET RESTANT). 283

FIGURE 119 : EVOLUTION DU TERME DE PONDERATION INVERSE DE LA DISTANCE EN FONCTION DE DO. 285

FIGURE 120: EFFET DE LA POSITION D'UN OBSTACLE SUR UN BASSIN VIRTUEL SIMPLE ET HOMOGENE..... 292

FIGURE 121 : EFFET DE L'INTEGRATION DE LA VALEUR D'HABITAT SUR UNE MODELISATION DU BORNE (74). 293

FIGURE 122 : CAPTURE D'ECRAN DES INTITULES DES FEUILLES DU CLASSEUR DE L'OUTIL INFORMATIQUE. 294

FIGURE 123 : CAPTURE D'ECRAN DES INTITULES DES COLONNES ET DES PREMIERES DONNEES RENSEIGNEES DANS UN EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TABLE «TRONÇONS » DU CLASSEUR DE L'OUTIL INFORMATIQUE..... 295

FIGURE 124 : EXEMPLE DE D'IDENTIFICATION CORRECTE DES TRONÇONS SUR UN BASSIN VERSANT VIRTUEL SIMPLE. 296

FIGURE 125 : CAPTURE D'ECRAN DES INTITULES DES COLONNES ET DES PREMIERES DONNEES RENSEIGNEES DANS UN EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TABLE «OBSTACLES » DU CLASSEUR DE L'OUTIL INFORMATIQUE..... 297

FIGURE 126 : EXEMPLE D'IDENTIFICATION CORRECTE D'UN OBSTACLE (JAUNE) SUR UN BASSIN VERSANT VIRTUEL SIMPLE 298

FIGURE 127 : CAPTURE D'ECRAN DES INTITULES DES COLONNES ET DES PREMIERES DONNEES RENSEIGNEES DANS UN EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TABLE « PROJETS »..... 299

FIGURE 128 : PROCEDURE DE LANCEMENT D'UNE MACRO SOUS EXCEL®..... 300

FIGURE 129: PRESENTATION DE LA FENETRE DE PARAMETRAGE DU MODULE M.E.R.C. POISSONS..... 301

FIGURE 130 : REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE DE LA BASE DE DONNEES DES TRONÇONS HYDROGRAPHIQUES ; 306

FIGURE 131 : REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE DE LA BASE DE DONNEES DES OBSTACLES NATURELS ET ARTIFICIELS SUR LE BORNE.307

FIGURE 132 : REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE DES CLASSES ROE A LA MONTAISON DES OBSTACLES ARTIFICIELS SUR LE BORNE. . 308

FIGURE 133 : REPRESENTATION GEOGRAPHIQUE DES DONNEES D'EVALUATION DES POSSIBILITES DE DEVALAISON SUR LES OBSTACLES ARTIFICIELS DU BORNE..... 309

FIGURE 134 : COMPARAISON DE LA FREQUENCE CUMULEE DES DEPLACEMENTS DE 45 TRUITES SUIVIES PAR RADIOPISTAGE PENDANT UNE PERIODE DE PLUSIEURS MOIS INCLUANT AU MINIMUM UNE PERIODE DE REPRODUCTION, AU RESULTAT DE LA FONCTION DE PONDERATION DES DEPLACEMENTS DU MODELE POUR UNE VALEUR DE D₀ DE 7000 M. 313



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

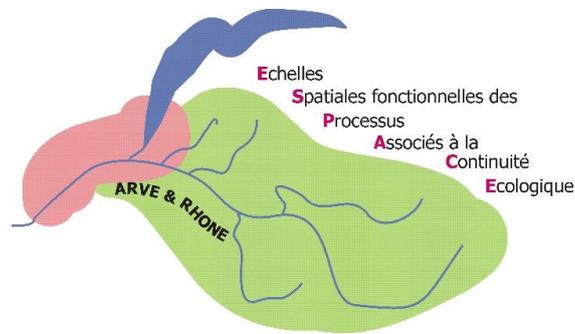
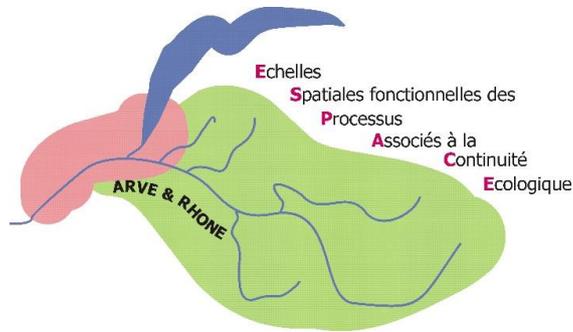


FIGURE 135: ILLUSTRATION SOUS SIG DES VALEURS DE CONNECTIVITE THEORIQUE (A -SANS PRISE EN COMPTE DES OBSTACLES) ET REELLE (B- AVEC PRISE EN COMPTE DES OBSTACLES NATURELS ET ARTIFICIELS) SUR LE MODELE BORNE.	314
FIGURE 136 : EVOLUTION DE LA SURFACE PONDEREE PAR LA FRAGMENTATION ET DU NOMBRE DE PROJETS RETENU EN FONCTION DU BUDGET POUR LE MODELE BORNE.	315
FIGURE 137 : EVOLUTION DE LA SURFACE PONDEREE PAR LA FRAGMENTATION ET DU GAIN DE SPF PAR K€ INVESTIS EN FONCTION DU BUDGET POUR LE MODELE BORNE.	315
FIGURE 138 : PROJETS DE RESTAURATION SELECTIONNES SUR LE BORNE POUR UN BUDGET DE 200, 400, 800 ET 1500 K€.	316
FIGURE 139 : TRANSECT AU DROIT DE LA STATION DE MESURE DE DEBIT DU NANT DE SION A PROXIMITE DE L'INSTALLATION PIT-TAG DU PONT DE LA RD19 – COMMUNE D'ARENTHON.	322
FIGURE 140 : COURBE DE TARAGE POUR LE NANT DE SION A ARENTHON (AMONT PONT DE LA RD 19) DEFINIE EN 2014-2015... ..	322



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : PROPORTION D'ESPECES MENACEES PAR LA DEGRADATION DE L'HABITAT, LA PRESENCE D'ESPECES EXOTIQUES, LA POLLUTION, LA SUREXPLOITATION ET LES MALADIES. D'APRES WILCOVE ET AL. (1998), MODIFIE.	3
TABLEAU 2 : LISTE DES ESPECES-CIBLES, STATUTS DE MENACE EN FRANCE (D'APRES UICN-FRANCE ET AL., 2010) ET EN SUISSE (KIRCHHOFFER ET AL., 2007), ET PRINCIPAUX INTERETS.	21
TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES DES 4 MODELES D'EMETTEURS UTILISES DANS LE CADRE DU PROGRAMME INTERREG ESPACE ARVE ET RHONE.	26
TABLEAU 4 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS RADIO FIXES MISES EN PLACE POUR LE PROGRAMME ESPACE ARVE & RHONE, LISTEES DE L'AVANT A L'AMONT.	29
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES (BARRAGES ET ECHELLES A POISSONS) ETUDIES SUR LE BASSIN ARVE-RHONE.	29
TABLEAU 6 : CRITERES DE DEFINITION DU « STATUT » D'UN INDIVIDU SUIVI EN RADIO-PISTAGE A L'ISSUE DE L'ETUDE.	35
TABLEAU 7 : CARACTERISTIQUES DES STATIONS FIXES PIT-TAG MISES EN PLACE DANS LE CADRE DU PROGRAMME ESPACE.	38
TABLEAU 8 : CARACTERISTIQUES DES MARQUEURS SNP UTILISES POUR LE GENOTYPAGE CHEZ LA TRUITE COMMUNE SALMO TRUTTA.	47
TABLEAU 9 : TAUX DE « MIGRATEURS » DEFINI PAR ESPECE ET PAR COURS D'EAU D'APRES LES RESULTATS DES INVESTIGATIONS SUR LES DEPLACEMENTS (III. 4).	54
TABLEAU 10 : VARIABLES CARACTERISANT LES CONDITIONS DE DEBIT ET TEMPERATURE.	55
TABLEAU 11 : EFFECTIFS ET POURCENTAGES DES INDIVIDUS MARQUES REPARTIS EN FONCTION DE LEUR STATUT FINAL POUR CHAQUE OPERATEUR FRANÇAIS ET SUISSE.	67
TABLEAU 12 : EFFECTIFS DE POISSONS MARQUES PAR ESPECE ET PAR TYPE DE MARQUE AU COURS DU PROGRAMME ESPACE.	68
TABLEAU 13 : BILAN DES PROPORTIONS DES TRUITES SEDENTAIRES ET MIGRANTES PAR COURS D'EAU ET PAR PERIODE DE SUIVI.	78
TABLEAU 14 : RELATIONS ENTRE DISTANCES ET VITESSES DE MONTAISON (D+ ET V+) ET DE DEVALAISON (D- ET V-) ET VARIABLES ENVIRONNEMENTALES (DEBIT ET THERMIE) : COEFFICIENTS DE CORRELATION DE SPEARMAN ET P-VALUES ASSOCIEES POUR CHACUN DES COURS D'EAU.	80
TABLEAU 15 : MATRICE DES CORRELATIONS DE SPEARMAN ET P-VALUES ENTRE LES DOMAINES VITAUX DES TRUITES (ET SUIVIES DURANT UNE PERIODE QUI INTEGRE LA PHASE DE REPRODUCTION) AVEC LEURS CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES (TAILLE, POIDS, AGE).	83
TABLEAU 16 : BILAN DES PROPORTIONS DES BARBEAUX FLUVIATILES SEDENTAIRES ET MIGRANTS PAR COURS D'EAU ET PAR PERIODE DE SUIVI.	94
TABLEAU 17 : RELATIONS ENTRE DISTANCES ET VITESSES DE MONTAISON (D+ ET V+) ET DE DEVALAISON (D- ET V-) ET VARIABLES ENVIRONNEMENTALES (DEBIT ET THERMIE) : COEFFICIENTS DE CORRELATION DE SPEARMAN ET P-VALUES ASSOCIEES POUR CHACUN DES COURS D'EAU.	95
TABLEAU 18 : MATRICE DES CORRELATIONS DE SPEARMAN ET P-VALUES ENTRE LES DOMAINES VITAUX DES BARBEAUX SUIVIS ET AYANT VALIDES LA PERIODE DE REPRODUCTION AVEC LEURS CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES (TAILLE, POIDS, AGE).	98
TABLEAU 19 : BILAN DES PROPORTIONS DES CHEVAINES SEDENTAIRES ET MIGRANTS PAR COURS D'EAU ET PAR PERIODE DE SUIVI.	106
TABLEAU 20 : ANALYSE DE LA CORRELATION DES DISTANCES ET VITESSES DE MONTAISON (D+ ET V+) ET DE DEVALAISON (D- ET V-) AVEC LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES (DEBIT ET THERMIE) : MATRICE DE CORRELATION DE SPEARMAN ET P-VALUES ASSOCIEES POUR CHACUN DES COURS D'EAU.	108
TABLEAU 21 : MATRICE DES CORRELATIONS DE SPEARMAN ET P-VALUES ENTRE LES DOMAINES VITAUX DES CHEVAINES ORIGINAIRES DE L'ARVE ET DU GIFFRE (ET SUIVIS DURANT UNE PERIODE QUI INTEGRE LA PHASE DE REPRODUCTION) AVEC LEURS CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES (TAILLE, POIDS, AGE).	112
TABLEAU 22 : MATRICE DES CORRELATIONS DE SPEARMAN ET P-VALUES ENTRE LES DOMAINES VITAUX DES CHEVAINES ORIGINAIRES DU RHONE ET AFFLUENTS (ET SUIVIS DURANT UNE PERIODE QUI INTEGRE LA PHASE DE REPRODUCTION) AVEC LEURS CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES (TAILLE, POIDS, AGE).	112



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

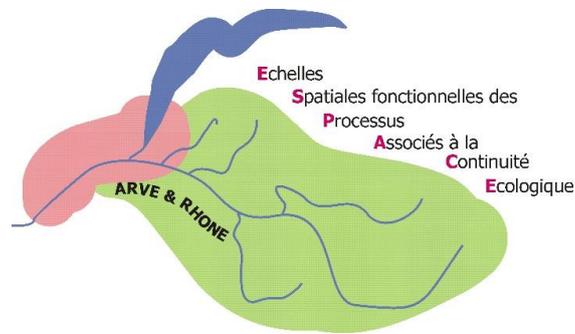
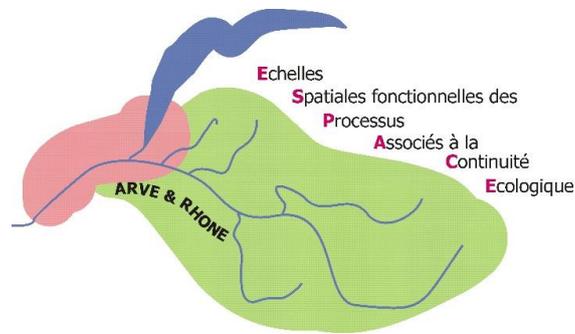


TABLEAU 23 : TAUX DE FRANCHISSEMENT DE L'OUVRAGE DE VERBOIS PAR ESPECE ET FAMILLE TAXONOMIQUE SELON LES INDIVIDUS MARQUES EN RADIO PUIS PAR PIT-TAG (EFFECTIFS CORRIGES).....	121
TABLEAU 24 : TAUX DE FRANCHISSEMENT DE L'OUVRAGE DE CHANCY-POUGNY PAR ESPECE ET FAMILLE TAXONOMIQUE SELON LES INDIVIDUS MARQUES EN RADIO PUIS PAR PIT-TAG (EFFECTIFS CORRIGES).	123
TABLEAU 25 : DONNEES COMPORTEMENTALES OBSERVEES SOUS LE BARRAGE DU SEUJET.	128
TABLEAU 26 : TAUX DE FRANCHISSEMENT DE L'OUVRAGE DU SEUJET SELON LES INDIVIDUS MARQUES PAR PIT-TAG (EFFECTIFS CORRIGES).	128
TABLEAU 27 : DONNEES COMPORTEMENTALES OBSERVEES SOUS LE BARRAGE DE VESSY.	130
TABLEAU 28 : TAUX DE FRANCHISSEMENT DE L'OUVRAGE DE VESSY SELON LES INDIVIDUS MARQUES PAR PIT-TAG (EFFECTIFS CORRIGES).	131
TABLEAU 29 : TAUX DE FRANCHISSEMENT DE L'OUVRAGE D'ARTHAZ-PONT-NOTRE-DAME SELON LES INDIVIDUS MARQUES PAR PIT-TAG (EFFECTIFS CORRIGES).....	132
TABLEAU 30 : RECAPITULATIF DES TAUX D'ATTRACTIVITE, DE FRANCHISSABILITE ET DE FRANCHISSEMENT SUR LES 5 OUVRAGES HYDROELECTRIQUES DU BASSIN ARVE-RHONE GENEVOIS (ISSUS DE L'EVALUATION PIT-TAG).	155
TABLEAU 31 : TABLES SYNTHETISANT LA COMPOSITION DES 2 KITS MULTIPLEX (CG1 ET CG2)	175
TABLEAU 32 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES CONCERNANT LES 45 STATIONS D'ECHANTILLONNAGE	180
TABLEAU 33 : RESULTATS DES TESTS DE MANTEL (SIMPLES ET PARTIELS) COMPARANT LES EFFETS DE LA DISTANCE HYDROLOGIQUE ET DU NOMBRE D'OUVRAGES SEPARANT LES STATIONS SUR LEUR DIFFERENCIATION GENETIQUE (FST).....	185
TABLEAU 34 : STATISTIQUES DESCRIPTIVE CALCULEES POUR LES 14 UNITES FONCTIONNELLES.....	199
TABLEAU 35 : DIFFERENCIATION GENETIQUE (FST) ENTRE PAIRES D'UNITES FONCTIONNELLES	201
TABLEAU 36 : TAUX DE MIGRATION PAR GENERATION ESTIMES POUR LES 14 UNITES FONCTIONNELLES	202
TABLEAU 37 : CLASSIFICATION DES RESULTATS ET REPRESENTATION GRAPHIQUE.	214
TABLEAU 38 : PRESENTATION ET DESCRIPTION DES 30 VARIABLES THERMIQUES CALCULEES A PARTIR DES DONNEES DE TEMPERATURE (DUMOUTIER ET AL., 2010).....	266
TABLEAU 39 : NOTATIONS UTILISEES DANS LES EQUATIONS DE CALCUL DE LA CONNECTIVITE (D'APRES O'HANLEY 2013).	281
TABLEAU 40 : DESCRIPTIF DU CONTENU ET DU FORMAT DES DONNEES NECESSAIRES A L'ALIMENTATION DE LA TABLE DES TRONÇONS.	295
TABLEAU 41 : DESCRIPTIF DU CONTENU ET DU FORMAT DES DONNEES NECESSAIRES A L'ALIMENTATION DE LA TABLE DES OBSTACLES.	298
TABLEAU 42 : DESCRIPTIF DU CONTENU ET DU FORMAT DES DONNEES NECESSAIRES A L'ALIMENTATION DE LA TABLE DES PROJETS.	299
TABLEAU 43 : PROBABILITES DE MONTAISON APPLIQUEES SUR LE BORNE, A PARTIR DES CLASSES ROE DISPONIBLES.	311
TABLEAU 44 : COUTS FORFAITAIRES ISSUS LANGUMIER ET AL. (2014), APPLIQUES SUR LES OBSTACLES RECENSES DANS LE ROE SUR LE BASSIN VERSANT DU BORNE.....	312



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



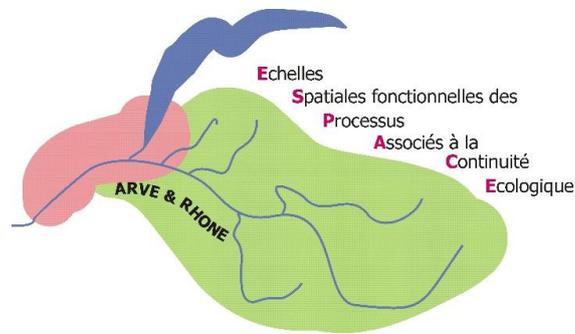
LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE 1: AFFICHE D'INFORMATION SUR LE MARQUAGE AUPRES DES PECHEURS DU CANTON DE GENEVE – FLYER DISTRIBUE A TOUS LES TITULAIRES DU PERMIS DE PECHE. 319
- ANNEXE 2 : AFFICHE D'INFORMATION AUPRES DES PECHEURS SUR LA ZONE D'ETUDE COTE FRANCE. 320
- ANNEXE 3 : CARTE DE LA LOCALISATION DES PANCARTES D'INFORMATION AUX PECHEURS SUR LE BASSIN DE L'ARVE. 321
- ANNEXE 4 : DEFINITION DU DEBIT DU NANT DE SION A LA STATION DE MESURE MISE EN PLACE PAR LA FDPPMA 74. 322
- ANNEXE 5 : TABLEAUX DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, STATUTS ET DOMAINES VITAUX DES POISSONS MARQUES EN RADIO. 323
- ANNEXE 6 : CORRELATIONS DES VARIABLES DE DEBIT ET DE TEMPERATURE (TOUTES ESPECES CONFONDUES). 326
- ANNEXE 7 : NOMBRES DE MOUVEMENTS VALIDES ET NON VALIDES POUR LE CALCUL DU TAUX DE MOBILITE PENDANT TOUTE LA DUREE DU SUIVI ET PENDANT LA PERIODE DE REPRODUCTION. 328
- ANNEXE 8 : CARTE DE KREITMAN (1931) REPERTORIAN LA PRESENCE ET L'ABONDANCE DES ESPECES SUR LE DEPARTEMENT DE LA HAUTE-SAVOIE. 329
- ANNEXE 9 : CARACTERISTIQUES DES INDIVIDUS MARQUES PAR RADIO DETECTES SOUS LE BARRAGE DE VERBOIS. 330
- ANNEXE 10 : CARACTERISTIQUES DES INDIVIDUS MARQUES PAR RADIO DETECTES SOUS LE BARRAGE DE CHANCY-POUGNY... 331
- ANNEXE 11 : CARACTERISTIQUES DES INDIVIDUS MARQUES PAR RADIO DETECTES SOUS LES AUTRES BARRAGES EQUIPES. 332
- ANNEXE 12 : EXEMPLES DE COMPORTEMENT INDIVIDUEL SOUS LE BARRAGE DE VERBOIS (TRUITES FARIO). 333
- ANNEXE 13 : EXEMPLES DE COMPORTEMENT INDIVIDUEL SOUS LE BARRAGE DE VERBOIS (BARBEAUX FLUVIATILES). 334
- ANNEXE 14 : EXEMPLES DE COMPORTEMENT INDIVIDUEL SOUS LE BARRAGE DE CHANCY-POUGNY (TRUITES FARIO). 335
- ANNEXE 15 : EXEMPLES DE COMPORTEMENT INDIVIDUEL SOUS LE BARRAGE DE CHANCY-POUGNY (BARBEAUX FLUVIATILES). 336
- ANNEXE 16 : EXEMPLES DE COMPORTEMENT INDIVIDUEL SOUS LE BARRAGE DE CHANCY-POUGNY (CHEVAINES). 337
- ANNEXE 17 : DISTRIBUTION DANS LE TEMPS DES PREMIERES APPROCHES (COMPORTEMENT SOUS LE BARRAGE ; TRAIT VERTICAL) POUR LES 5 OUVRAGES ETUDIES. 338
- ANNEXE 18 : DISTRIBUTION DANS LE TEMPS DES TENTATIVES DE FRANCHISSEMENTS (TRAIT VERTICAL) POUR LES 5 OUVRAGES ETUDIES. 339
- ANNEXE 19 : DISTRIBUTION DANS LE TEMPS DES FRANCHISSEMENTS REUSSIS (TRAIT VERTICAL) POUR LES 5 OUVRAGES ETUDIES. 340
- ANNEXE 20: CARTE REPRESENTANT LES STATIONS ECHANTILLONNEES ET LES OUVRAGES LOCALISES ENTRE CES STATIONS SELON LEUR « FRANCHISSABILITE » 341
- ANNEXE 21: DETAILS DES 2 KITS D'AMPLIFICATION MULTIPLEX (CG1 ET CG2) UTILISES POUR CETTE ETUDE 342
- ANNEXE 22 : RESULTATS DETAILLES PAR MARQUEUR (23 MICROSATELLITES) POUR CHACUNE DES 45 STATIONS ECHANTILLONNEES 343
- ANNEXE 23: DIFFERENCIATION DES 45 STATIONS ECHANTILLONNEES (FST) = « DISTANCES GENETIQUES » 353
- ANNEXE 24: TAUX DE MIGRATION PAR GENERATION 354
- ANNEXE 25 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS DE PECHE ELECTRIQUE DE LA FDPPMA74 EXISTANTES PAR RAPPORT AUX TRONÇONS DEFINIS DANS L'ETUDE D'AMENAGEMENT DU BORNE AVAL 355
- ANNEXE 26 : MODALITES PRATIQUES POUR L'UTILISATION DE LA METHODE IAM (DEGIORGI *ET AL*, 2012). 356
- ANNEXE 27 : FICHES-TERRAINS POUR L'UTILISATION DE LA METHODE DU MAG12 (OU MAG20). 360
- ANNEXE 28 : DEFINITION DES CRITERES DE DECOUPAGE DES TRONÇONS HOMOGENES POUR LE MODELE. 363
- ANNEXE 29 : DEFINITION DES 3 METRIQUES UTILISEES DANS LE CALCUL DE L'INDICE GLOBAL DE LA VALEUR D'HABITAT ATTRIBUE A CHAQUE TRONÇON DANS L'EXEMPLE D'UTILISATION DU MODELE POUR LE BASSIN VERSANT DU BORNE. 364



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Chapitre 1 Avant-propos- Contexte de l'étude

CATTANEO F. (a)

(a) *HEPIA Genève – Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève*



Institut Terre-Nature-Environnement

Route de Presinge

CH 1254 JUSSY, SUISSE

I. Introduction

1) *Des milieux aquatiques « sous pressions »*

Le développement des sociétés humaines s'est accompagné d'une pression croissante sur les milieux aquatiques, en particulier les rivières et les fleuves. C'est au cours des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, sous les effets d'une urbanisation et d'une industrialisation galopantes, d'impératifs de production énergétique, ou encore de modifications des pratiques agricoles et forestières au sein des bassins versants, que les impacts sur les cours d'eau se sont véritablement accentués et ont conduit à une forte artificialisation des milieux, à une altération de leur fonctionnement (TOCKNER *et al.*, 2009), et à une fragmentation des habitats (DYNESIUS & NILSSON 1994). La qualité physico-chimique de l'eau s'est fortement dégradée suite à la prolifération des rejets industriels et domestiques. Les lits des rivières ont été détournés, canalisés, endigués pour satisfaire à la production hydroélectrique, à la navigation, à l'irrigation, et/ou pour des besoins sécuritaires (BRAVARD & CLEMENS 2008). Les granulats, souvent considérés comme 'ressource inépuisable', étaient prélevés dans les lits-mêmes des cours d'eau. De nombreux épis, digues, seuils et barrages ont été érigés (par exemple, aménagements Girardon sur le Rhône dès la fin du XIX^{ème} siècle, aménagements hydroélectriques de la CNR¹ dès 1948, ...), modifiant plus ou moins fortement les flux d'eau et de sédiments, ainsi que les flux biologiques (dérive des organismes, migrations). A cette époque pas si lointaine, le développement économique des villes et régions justifiait ces actions, et il n'était fait aucun cas des altérations et dysfonctionnements que cela pouvait entraîner sur les écosystèmes. Aujourd'hui, en Europe comme ailleurs dans le monde, il est unanimement reconnu que cette dégradation des systèmes aquatiques a conduit à une forte érosion de la biodiversité et à une réduction des services rendus par les écosystèmes d'eau douce.

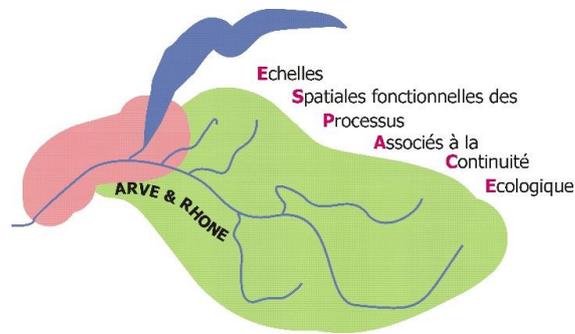
Historiquement, les efforts de « restauration » de la qualité des milieux aquatiques (à partir des années 1960 en France, notamment avec la loi relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution du 16 décembre 1964) se sont en premier lieu focalisés sur la qualité

¹ *Compagnie Nationale du Rhône*



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



physico-chimique de l'eau. Il s'agissait essentiellement de réduire les pollutions. Néanmoins, ces mesures n'ont pas toujours apporté les résultats escomptés, d'autres éléments du milieu pouvant être limitants en dépit d'une bonne qualité de l'eau. En parallèle, les scientifiques ont alerté les pouvoirs publics de l'importance du milieu physique en tant que support de processus fondamentaux pour l'écologie du milieu, et en tant qu'habitat pour la faune et la flore. Désormais, la restauration des fonctionnalités physiques et biologiques de ces milieux est un enjeu majeur, devenu indispensable afin de préserver la biodiversité et tendre vers une durabilité dans l'utilisation de nos ressources.

2) Fragmentation et connectivité

La fragmentation des habitats est une des principales altérations découlant de nos activités. Originellement issu des travaux en Ecologie du Paysage, le concept de fragmentation des habitats englobe tout phénomène artificiel de morcellement de l'espace, qui peut ou pourrait empêcher un ou plusieurs individus, espèces, populations ou associations de ces entités vivantes de se déplacer comme elles le devraient et le pourraient en l'absence de facteur de fragmentation. En réalité, ce terme combine deux phénomènes distincts, très largement amalgamés dans la littérature scientifique (FAHRIG 2003):

- d'une part, la perte ou la réduction d'habitat (*'habitat loss'*) ;
- d'autre part la fragmentation *stricto sensu* qui signifie la cassure, la séparation d'un habitat en différentes entités (ou *'patches'*) de plus petites tailles. Cela implique une augmentation du nombre de patches, une réduction de leur taille, et une augmentation de l'isolement de chaque patch.

Si la perte d'habitat conduit systématiquement à une réduction de la biodiversité, il semble que les réponses à la fragmentation *per se* soient moins unilatérales, pouvant être soit positives, soit négatives (FAHRIG 2003). WILCOVE *et al.* (1998) ont synthétisé les principales causes de déclin de la biodiversité sur environ 2000 espèces menacées aux Etats-Unis : pour les poissons, ils montrent que la dégradation, perte, ou fragmentation de l'habitat est responsable du déclin de 94% des espèces (**Tableau 1**). En détaillant cette catégorie et en identifiant plus précisément les causes qui conduisent à une fragmentation de l'habitat, WILCOVE *et al.* (1998) estiment que 64% des espèces de poissons sont négativement affectées par « les barrages, les retenues, et les barrières aux flux d'eau », et 91% par « le développement des usages de la ressources en eau, incluant les dérivations pour l'agriculture, le bétail, l'industrie, les usages résidentiels et l'irrigation ; les barrages, réservoirs, seuils et autres barrières à l'écoulement ; le contrôle des crues ; les drainages ; l'aquaculture ; les accès pour la navigation et leur maintenance).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

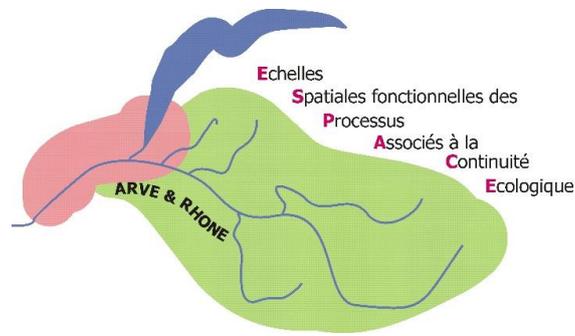


Tableau 1 : Proportion d'espèces menacées par la dégradation de l'habitat, la présence d'espèces exotiques, la pollution, la surexploitation et les maladies. D'après WILCOVE ET AL. (1998), modifié. (en % ; toutes espèces étudiées, et pour le groupe des poissons)

Cause	Toutes espèces (n = 1880)	Poissons (n = 213)
Dégradation, perte, fragmentation de l'habitat	85	94
Espèces exotiques	49	53
Pollution	24	66
Surexploitation	17	13
Maladies	3	1

A la fragmentation de l'habitat est inévitablement associée la notion de connectivité. De nombreuses définitions de ce terme peuvent être trouvées. LINDENMAYER & FISCHER (2006) définissent la connectivité des habitats comme la connexion entre patches d'habitats favorables pour une espèce. Ils la distinguent notamment de la connectivité des paysages (cette notion étant moins appropriée pour les écosystèmes d'eau courante) et de la connectivité écologique, qui est la connexion des processus écologiques (relations trophiques, processus de perturbations, flux hydrosédimentaires, ...) à travers différentes échelles. Généralement, cette distinction n'est pas faite par les pouvoirs publics et les gestionnaires, qui utilisent majoritairement le terme de connectivité écologique (ou encore continuité écologique, continuité biologique, trame écologique, corridors biologiques... ces termes étant souvent utilisés en synonymie) tout en y intégrant la connectivité des habitats. Ainsi, la définition donnée par le Ministère de l'Ecologie, bien adaptée aux milieux aquatiques, précise que « la continuité écologique, pour les milieux aquatiques, se définit par :

- la circulation des espèces ;
- le bon déroulement du transport des sédiments.

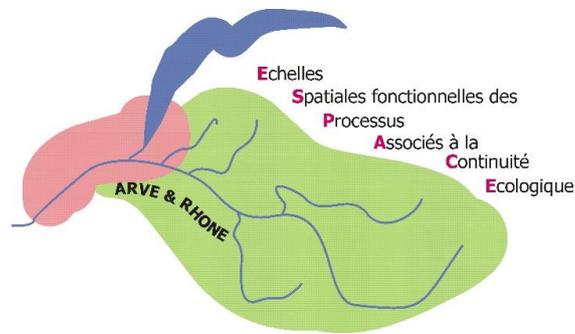
Elle a une dimension amont-aval, impactée par les ouvrages transversaux comme les seuils et barrages, et une dimension latérale, impactée par les ouvrages longitudinaux comme les digues et les protections de berges ».

Enfin, citons la définition énoncée dans la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA 2006), qui présente la continuité écologique comme « la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables à leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou leur abri, le bon déroulement du transport naturel des sédiments, ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs biologiques (connexions, notamment latérales, et conditions hydrologiques favorables) ».



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



La notion de connectivité induit une échelle d'espace (l'échelle à laquelle se trouvent les différents habitats indispensables pour l'espèce), et une notion de fonctionnalité dans la mesure où l'accès à ces habitats doit être possible au moment opportun.

Dans nos eaux continentales, une des conséquences les plus visibles de la perte de connectivité est la disparition ou la forte régression des espèces migratrices amphihalines (alose, saumon, anguille, lamproie marine, ...) suite au développement des barrages durant le XX^{ème} siècle. Pour le saumon et l'alose, les barrages empêchent les géniteurs de remonter sur les zones de frai situées en amont sur le cours principal ou sur des affluents, rompant ainsi le cycle biologique. Aujourd'hui, la recolonisation progressive du milieu par ces espèces (par ex., alose sur le Rhône, saumon sur la Loire, le Rhin, et l'axe Garonne/Dordogne) est directement liée soit à l'arasement d'ouvrages, soit à la reconnexion du continuum fluvial par des ouvrages de franchissement ou l'aménagement de confluences (reconnexion chenal principal – affluent, perdue par incision du lit du chenal ; STEINBACH 2001). Néanmoins, si ces espèces sont devenues emblématiques d'un processus engagé de restauration écologique des milieux, il n'en demeure pas moins que de nombreuses autres espèces, moins connues du grand public, réalisant leur cycle de vie à une échelle beaucoup plus petite, sont également affectées par la fragmentation des habitats. Pour ces espèces, dont nous connaissons en général mal le fonctionnement des populations, l'enjeu est double puisqu'il s'agit en premier lieu :

- de déterminer les différents habitats utilisés au cours du cycle de vie, ainsi que l'échelle spatiale utilisée par les individus ;
- d'évaluer les conséquences sur la population d'une restriction de cet espace en cas de barrière aux déplacements.

3) Contexte législatif

La France et la Suisse possèdent chacune leur propre réglementation quant à la gestion et la préservation de la ressource en eau et des milieux aquatiques. Malgré cela, les législations se recoupent sur bien des points, et nombre d'objectifs sont similaires. La politique française est dépendante des directives de l'Union Européenne (UE), qui impose à ses états membres des objectifs communs. Ainsi, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000 est un élément fondateur de la politique européenne sur l'eau, qui fixe des objectifs ambitieux pour 2015, notamment concernant la qualité écologique et chimique des milieux (« bon état » des masses d'eau). La Suisse s'appuie sur sa propre réglementation tout en partageant des ambitions communes avec l'UE.

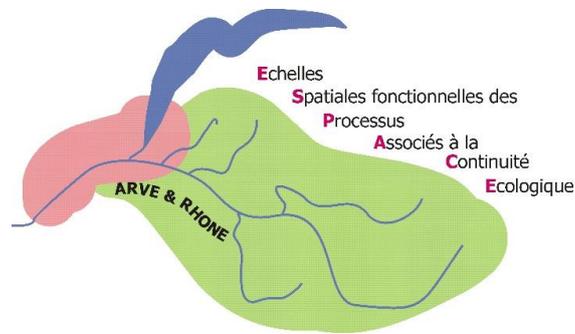
A. En France

Membre de l'Union Européenne, la France se doit d'appliquer les directives communautaires, et de donner à ses autorités compétentes les moyens légaux (par une retranscription en droit français) pour mener les actions requises afin de se conformer aux objectifs européens.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



La notion de continuité écologique apparaît pour la première fois dans un texte législatif européen en 2000, à l'annexe V de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE ; directive 2000/60/CE). Pour la France, elle apparaît en 2005 dans la circulaire DCE 2005/12 visant à définir le "bon état" des masses d'eau, puis est reprise en 2006 dans la LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques) et en 2010 dans l'arrêté du 25 janvier relatif aux eaux de surface. La continuité apparaît comme un critère permettant d'évaluer la qualité hydromorphologique du cours d'eau, elle-même influençant la qualité biologique. C'est sur ce critère de qualité biologique qu'est évalué l'état de la masse d'eau. La continuité est par conséquent un élément de diagnostic, et un levier sur lequel il est possible d'agir pour améliorer la qualité biologique de la masse d'eau. En 2007, la continuité écologique est l'objectif phare de la "Trame Verte et Bleue" (qui est un outil d'aménagement du territoire, visant à reconstituer un réseau écologique cohérent), issue du Grenelle de l'Environnement. La trame bleue est constituée des réservoirs de biodiversité (cours d'eau ou tronçons de cours d'eau abritant des espèces rares, indicatrices du bon fonctionnement du milieu, qui jouent un rôle de pépinière) et des corridors qui les relie, et doit permettre la survie des espèces ainsi qu'un fonctionnement optimal des écosystèmes, en partie évalué à partir des services rendus à l'homme.

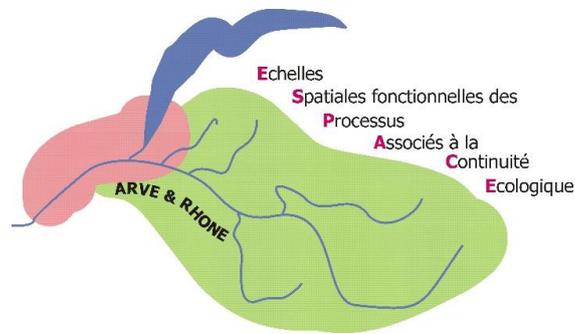
La LEMA (2006) impose la libre circulation des poissons migrateurs et l'accès aux zones de frayères, la continuité du transport sédimentaire, et la réduction des impacts issus du fonctionnement des ouvrages hydrauliques (débits réservés et volumes d'eau lâchés). Ces orientations en matière de restauration de la qualité écologique sont reprises par grand bassin hydrographique dans les SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux), puis déclinées plus localement dans des outils opérationnels (les SAGE : Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux). La LEMA introduit également l'article L214-17 au code de l'environnement, qui permet la révision du statut des cours d'eau conformément aux objectifs de la DCE (repris dans les SDAGE). Les cours d'eau sont classés en « liste 1 » ou « liste 2 », selon leur état écologique :

- Liste 1, regroupe les cours d'eau en très bon état écologique, les réservoirs biologiques, et les cours d'eau abritant des migrateurs amphihalins et devant être protégés pour cela. Sur ces cours d'eau (ou tronçons de cours d'eau), aucune autorisation ou concession ne peut être accordée pour la construction de nouveaux ouvrages s'ils constituent un obstacle à la continuité écologique (art. R214-109 du code de l'environnement). Pour les ouvrages existants, le renouvellement de l'autorisation est subordonné à des prescriptions particulières (art. L214-17 du code de l'environnement). Cette liste permet de répondre à l'objectif de « non dégradation des milieux aquatiques ».
- Liste 2, recense les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau nécessitant des actions de restauration de la continuité écologique (transport des sédiments et circulation des poissons), conformément aux objectifs du SDAGE. Tout ouvrage faisant obstacle doit y être géré, entretenu et équipé selon des règles définies par l'autorité administrative, en concertation avec le propriétaire ou, à défaut, l'exploitant, et ce dans un délai de cinq ans après publication des listes.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Pour le bassin Rhône-Méditerranée, par exemple, le classement des cours d'eau a été réalisé entre 2010 et 2013, et la liste officiellement publiée en septembre 2013².

B. En Suisse

La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux 814.20) du 24 janvier 1991, modifiée le 1er janvier 2011, et son ordonnance d'application (OEaux 814.201 du 24 octobre 1998, révisée le 1er août 2011) préconisent de protéger les eaux contre toute atteinte nuisible et prévoient de sauvegarder les biotopes naturels abritant la faune et la flore indigènes et les eaux piscicoles (Art. 1). Les cantons sont chargés d'exécuter la présente loi (Art. 45), alors que la Confédération veille à son exécution et à la coordination (Art. 46). Cette loi vise aussi bien les aspects quantitatifs que qualitatifs de la ressource en eau. Elle impose d'une part de revitaliser les cours d'eau altérés en préservant un espace de liberté, et d'autre part de réduire les incidences négatives liées à l'utilisation de la force hydraulique. Pour cette dernière exigence, cela implique de réduire les effets négatifs des éclusées en aval des centrales, de réactiver le régime de charriage sédimentaire, et d'assainir les ouvrages au sens de l'art. 10 de la LFSP (Loi Fédérale Sur la Pêche) du 21 juin 1991, notamment en rétablissant la libre circulation (ou migration) des espèces piscicoles. Les termes de connectivité, continuité, fragmentation, ou morcellement n'apparaissent cependant pas dans ces textes. Sans être nommément citée et explicitée, la notion de connectivité écologique transparait en plusieurs points, notamment au sujet des prélèvements d'eau : dans les secteurs soumis à débit résiduel, la valeur de ce débit doit être augmentée si "la profondeur d'eau nécessaire à la libre migration des poissons n'est pas garantie", ou si "les biotopes et les biocénoses rares dont l'existence est liée directement ou indirectement à la nature et à la taille du cours d'eau ne peuvent être conservés". Outre les intérêts publics et économiques, la gestion du débit doit tenir compte de "l'importance du cours d'eau en tant qu'élément du paysage", "en tant que biotope", et en termes de "maintien de la diversité de la faune et de la flore qui en dépendent ainsi que la conservation du rendement de la pêche et de la reproduction naturelle des poissons". Cette dernière partie sous-entend le libre accès aux zones de frayères, ainsi que le renouvellement des habitats de reproduction par les processus hydro-sédimentaires fonctionnels.

La notion de libre migration du poisson est une exigence légale, issue de la loi fédérale sur la pêche du 21 juin 1991 (LFSP ; RS 923.0). Il est précisé que, pour toute nouvelle construction d'ouvrages sur un cours d'eau, les autorités compétentes veillent à « assurer la libre migration du poisson » (LFSP, art. 9, al. 1, let. b). Pour les installations existantes, un assainissement doit être réalisé conformément aux prescriptions des autorités (LFSP, art. 10). Par « poisson », il faut entendre l'ensemble des espèces de la faune piscicole. La migration concerne aussi bien les mouvements vers l'aval (avalaison ou dévalaison), que les mouvements vers l'amont (montaison).

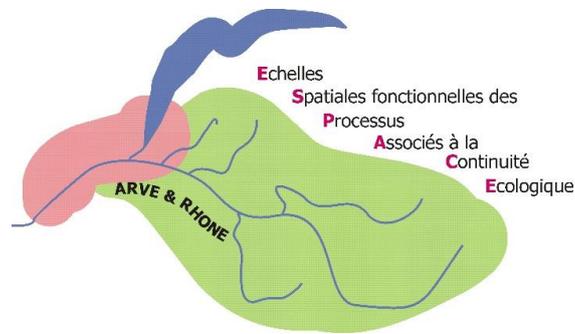
L'application par les cantons de la Leaux (2011) a débuté par une phase de diagnostic et de planification des actions de renaturation à conduire d'ici à 2030. Cette phase s'est achevée le

² Source : www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



31.12.2014. La Confédération prévoit d'accorder chaque année des subventions aux cantons afin de répondre aux objectifs fixés dans leur planification.

4) Aperçu de la gestion de l'eau à l'échelle locale

A. Dépendance amont-aval en zone transfrontalière

En terme de gestion de la ressource en eau (incluant les gestions hydrologique, sédimentaire, piscicole,...), une des particularités des zones frontalières est que sur un même bassin versant, à une échelle spatiale réduite, se rencontrent des acteurs différents (gestionnaires, décideurs, usagers de la ressource, associations,...) de part et d'autre de la frontière, soumis à des législations différentes, avec des sensibilités et des priorités différentes, agissant avec des objectifs différents, ou à des échéances différentes. Or, dans le cas de continua écologiques tels que les cours d'eau, il existe une forte dépendance au sein du bassin versant entre les parties amont et les parties aval : sur ces territoires, une entente et une coordination entre les différents acteurs de part et d'autre de la frontière est fondamentale à la mise en place d'une gestion cohérente, raisonnée et durable (CAUDRON *et al.*, 2012).

Citons, pour exemple, la situation suivante concernant la gestion piscicole : un très bel affluent transfrontalier du Rhône genevois en rive droite, l'Allondon, abrite une population d'Ombre commun (espèce classée comme « vulnérable » en France, « menacée » en Suisse, et prioritaire sur le Canton de Genève) reconnue comme prioritaire en terme de conservation en Suisse et France transfrontalière d'après ses caractéristiques génétiques (CATTANEO *et al.* 2012). Sur ce cours d'eau, les autorités genevoises ont cessé tout repeuplement depuis 1994, alors que des repeuplements sont encore pratiqués côté français, qui plus est avec une souche non recommandée pour ses caractéristiques génétiques dans ce cours d'eau. D'aucun pourrait se demander, à raison, où est la cohérence dans cette pratique de gestion.

En théorie, une gestion plus efficiente (sous-entendu, qui améliorerait la « qualité » ou « l'intégrité » du milieu, ou l'état d'une population) impliquerait des actions à une échelle spatiale qui est cohérente avec les processus biologiques (ex : déplacements pour la reproduction) et physiques (ex : connectivité déterminée par l'hydrologie), et les connaissances que l'on a du milieu, de son fonctionnement, et des populations piscicoles qu'il abrite (**Figure 1**). Dans l'exemple ci-dessus, on note que la gestion exercée sur la population, à l'échelle spatiale administrativement définie pour chacune des deux entités gestionnaires :

- n'est pas pertinente avec l'échelle de fonctionnement de la population d'Ombre commun qui occupe les 5 km en territoire suisse en amont de la confluence avec le Rhône (et pas la partie française) ;
- montre une divergence de points de vue, d'objectifs, et d'actions à mener entre les entités gestionnaires.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

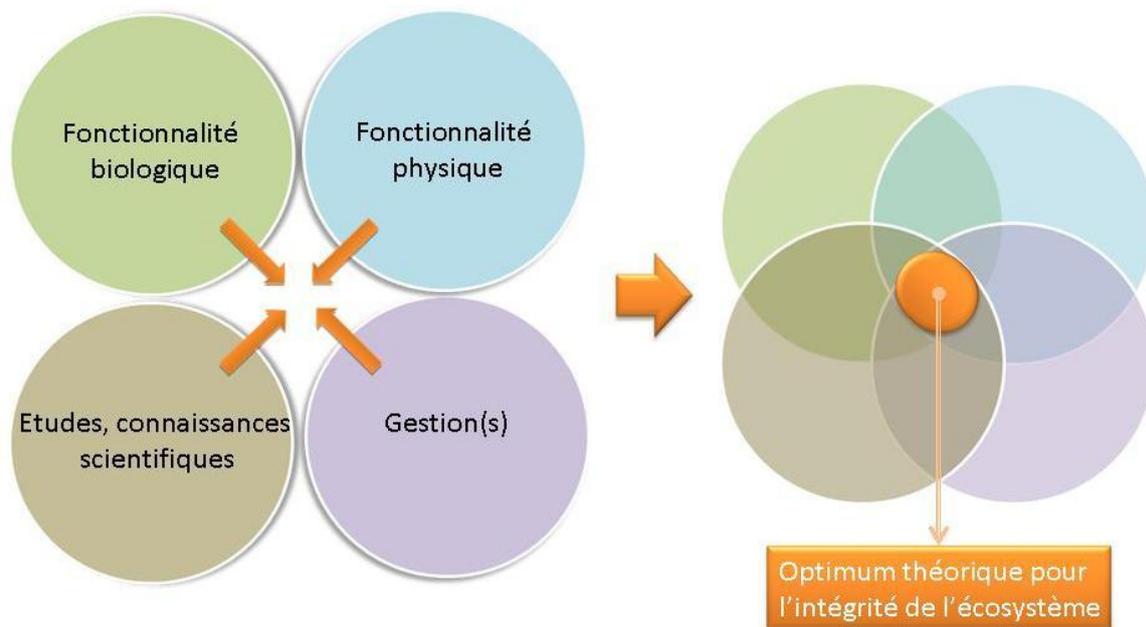
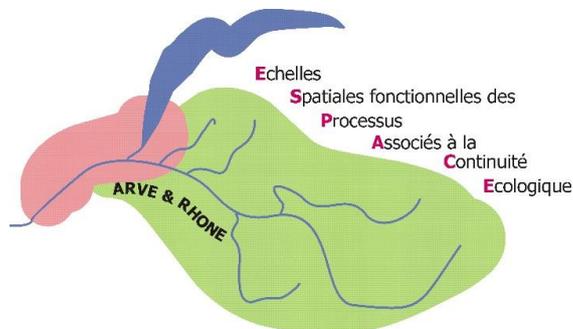


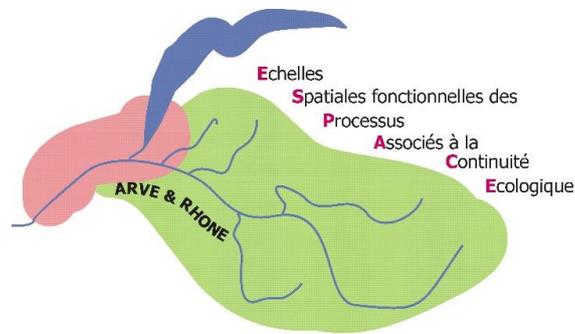
Figure 1 : Schéma conceptuel simplifié des différentes échelles spatiales associées au fonctionnement d'un écosystème anthropisé.

L'échelle de fonctionnalité biologique comprend l'espace nécessaire aux populations pour assurer leur cycle de vie. Cet espace doit présenter une fonctionnalité physique, c'est à dire permettre la continuité des processus hydrologiques et sédimentaires. Ces processus déterminent la création, l'évolution dans le temps et l'espace, et la connexion des différents types d'habitats requis par les espèces pour assurer leur cycle de vie. Les connaissances scientifiques apportent de la connaissance sur l'écologie des espèces et le fonctionnement de l'écosystème, mais celle-ci est souvent issue de travaux 'locaux', ou d'études à court terme (essentiellement pour des raisons de coûts), et non nécessairement transposables à un autre contexte ou à l'ensemble d'un bassin versant. Enfin, les gestions (piscicole, des débits, des sédiments, des prélèvements d'eau,...) sont diverses, et s'effectuent généralement sur des territoires administratifs différents des échelles spatiales des processus biologiques et physiques, et des connaissances scientifiques. N'est pas mentionné sur ce schéma le niveau de complexité supplémentaire apporté par les différences de cadres politiques, administratifs et législatifs en zones transfrontalières. Le rapprochement de ces différentes échelles, dans l'objectif de les faire coïncider davantage, permettrait d'améliorer la gestion globale d'un système anthropisé, d'approcher une 'intégrité' maximale pour prendre au final les décisions d'actions à la 'bonne' échelle spatiale.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



B. Organes de gestion français

Sur le bassin de l'Arve, la gestion des milieux aquatiques est partagée entre différentes structures (**Figure 2**) :

- Le SM3A (Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords)³ gère l'Arve et ses annexes, le Borne, ainsi que les cours d'eau et milieux aquatiques de Pays du Mont-Blanc et de la vallée de Chamonix. Il possède des compétences opérationnelles dans la gestion des eaux et la planification, l'aménagement des cours d'eau et des milieux aquatiques, et pilote des outils de gestion tels que SAGE et contrats de rivière.
- Le SIFOR (Syndicat Intercommunal du Foron du Chablais Genevois)⁴, syndicat à vocation unique créé en 2002, a pour mission l'étude, l'aménagement et l'entretien du Foron, de ses affluents et de ses annexes fluviales (zones humides, marais,...).
- Le SIVM (Syndicat Intercommunal à Vocations Multiples) du Haut Giffre⁵, créé en 1958, dont les missions en lien avec les milieux aquatiques concernent la gestion et l'aménagement intégrés des bassins du Giffre et de la Risse. Le SIVM du Haut Giffre a conduit l'élaboration d'un contrat de rivière « Giffre et Risse », signé en 2012 pour une durée de 7 ans, puis en a transféré le portage et la mise en œuvre au SM3A.
- La Communauté de Communes du Genevois (CCG)⁶, qui regroupe 17 communes au sud de l'agglomération genevoise, a parmi ses missions celle de protéger et mettre en valeur l'environnement. Cela s'est traduit par l'élaboration et la conduite d'un contrat de rivière transfrontalier, entre « Arve et Rhône ». Ce contrat visait à mettre en place des actions de revitalisation globale de l'écosystème des neuf cours d'eau du bassin versant. Il engageait environ 50 millions d'euros sur 7 ans pour une centaine d'actions réparties sur les 160 km² du bassin versant.

³ <http://www.riviere-arve.org>

⁴ <http://www.riviere-arve.org/outils/presentation-sifor.htm>

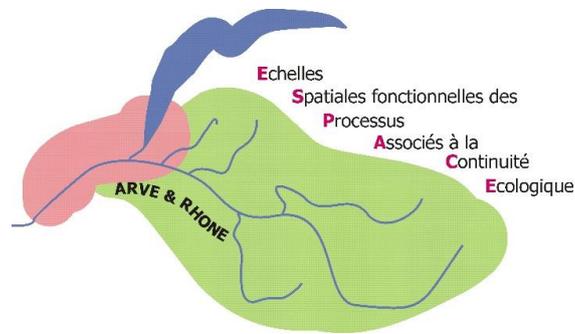
⁵ <http://www.hautgiffre.fr/>

⁶ <http://www.cc-genevois.fr/environnement/rivieres.htm>



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Service de renaturation
des cours d'eau
et des rives du canton
de Genève

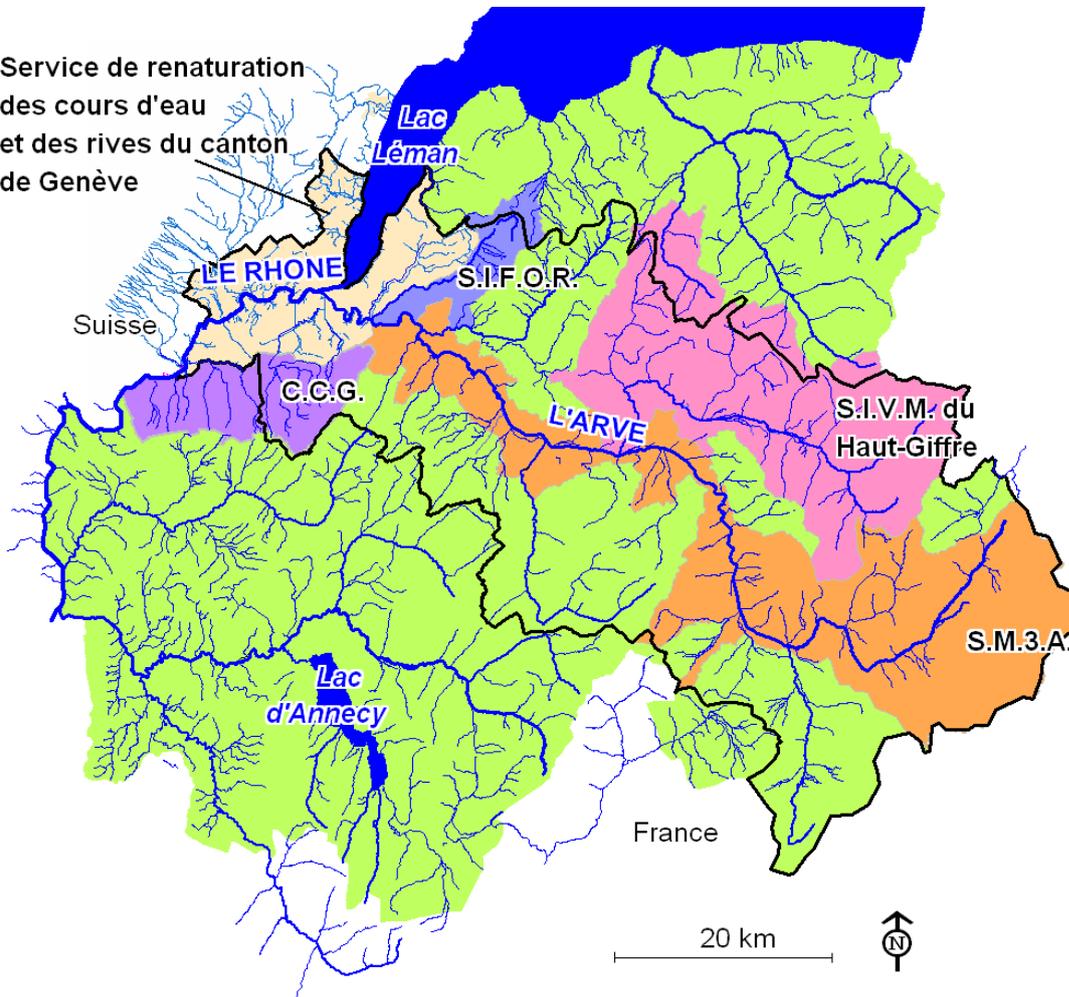


Figure 2 : Situation de l'ESPACE Arve & Rhône qui intègre les structures gestionnaires locales pour aboutir à une gestion coordonnée du bassin.

C. Organes de gestion suisses

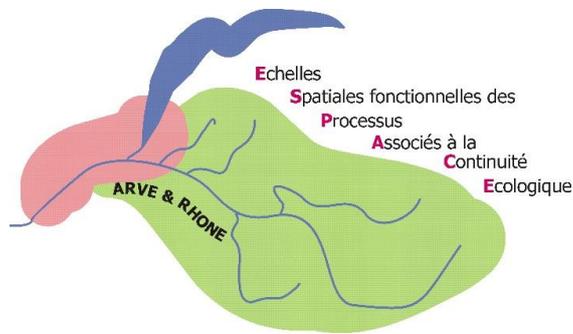
Dans le canton de Genève, deux services du Département de l'Environnement, des Transports et de l'Agriculture (DETA) se partagent la gestion de l'eau au sens large :

- La Direction Générale de l'Eau (DGEau), veille à l'assainissement et à la protection contre les inondations (Service de la planification), au contrôle de la qualité physico-chimique des eaux et à la lutte contre les pollutions (Service de l'Ecologie de l'Eau), et à la restauration de la morphologie des cours d'eau (service de la renaturation des cours d'eau).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- La Direction Générale de la Nature et du Paysage, notamment via la Direction de la Biodiversité, assure la conservation et la gestion des espaces naturels, de la faune et de la flore. Elle est donc l'autorité compétente en matière de conservation et de gestion piscicole.

D. Une volonté commune transfrontalière et des outils opérationnels

Dans le Canton de Genève comme en France, devant l'état dégradé de nombreuses masses d'eau, élus et citoyens ont eu à cœur d'œuvrer pour une amélioration de la qualité des cours d'eau et des milieux annexes. De plus, des lois très incitatives de part et d'autre de la frontière (voir §. 3) favorisent l'émergence de projets communs. Enfin, tous les principaux cours d'eau du Canton de Genève, à l'exception de la Seymaz et du Rhône, prennent leur source en France.

Un premier protocole d'accord transfrontalier pour la revitalisation des rivières du genevois a été signé en 1997 par le Canton de Genève, l'Etat français, et les collectivités locales concernées. Après une forte coopération, des progrès significatifs ont été obtenus sur l'assainissement et la qualité des eaux, la protection des zones d'habitation contre les crues, et la qualité écologique et paysagère des cours d'eau et des zones humides.

Fort de ce succès, c'est tout naturellement qu'un second protocole d'accord a été conclu en décembre 2012⁷ pour une durée de 15 ans, avec une ambition encore accrue. Piloté par la Communauté transfrontalière de l'eau, cet accord fixe 5 objectifs majeurs : protéger la ressource en eau afin d'en garantir la pérennité, protéger et reconstituer les cours d'eau en favorisant la diversité des organismes et des milieux, maintenir le régime hydrologique « naturel » des cours d'eau, pérenniser les efforts réalisés en matière d'assainissement, et apporter des réflexions sur les situations de crise. Ces objectifs sont traduits en actions via des outils opérationnels et réglementaires tels que les contrats de rivière (par ex., le contrat rivière « Arve et Rhône ») et le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux).

En 2009, le SAGE du bassin de l'Arve et de ses affluents, porté par le SM3A, a été créé. Il permet de décliner à l'échelle locale les grandes orientations et mesures du SDAGE « Rhône – Méditerranée » 2010-2015, ainsi que les objectifs de l'accord transfrontalier sur la gestion de l'eau. Issu d'un processus de concertation entre les différents acteurs et usagers de la ressource en eau, il est impulsé et suivi par la Commission Locale de l'Eau (la CLE), au sein de laquelle siègent également des représentants suisses (Canton de Genève, Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman – CIPEL, et Société d'électricité d'Emosson). Les objectifs, fixés pour les 10 à 15 années à venir, portent sur :

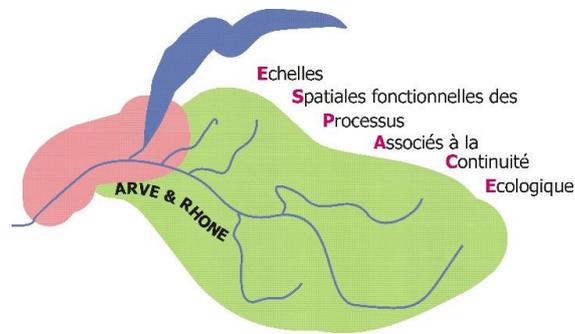
- l'amélioration de la connaissance et la mise en place d'une veille scientifique et technique ;

⁷ Protocole d'accord transfrontalier pour la gestion de l'eau et des milieux aquatiques sur l'agglomération franco-valdo-genevoise du 3 décembre 2012 (disponible sur <http://www.grand-geneve.org>)



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- l'amélioration de la qualité de l'eau et la préservation et restauration des milieux aquatiques et humides pour garantir leurs fonctionnalités hydrologiques et écologiques, et leur valorisation comme éléments d'amélioration du cadre de vie ;
- le rétablissement de l'équilibre sédimentaire des cours d'eau du bassin versant, la préservation de leurs espaces de liberté et la restauration de la continuité piscicole et des habitats aquatiques, en prenant en compte les enjeux écologiques et humains.

En Suisse, le canton de Genève a mis en place depuis 2010 sur chacun de ses six bassins versants, tous transfrontaliers (soit avec la France, soit avec le canton de Vaud), un outil de planification et de coordination pour la gestion de la ressource en eau, le SPAGE (Schéma de Protection, d'Aménagement et de Gestion des Eaux). Un SPAGE pour les bassins Rhône-Arve-Lac a été adopté par le Conseil d'Etat le 8 octobre 2014⁸. Cet outil, qui préconise une concertation transfrontalière, fixe notamment des objectifs sur les thèmes de la qualité des eaux, de la morphologie du cours d'eau et des berges, ainsi que sur la connectivité écologique à travers le réseau vert-bleu.

Fin 2014, au titre de la planification liée à la nouvelle loi sur les eaux, le canton de Genève a remis à l'OFEV⁹ un plan de revitalisation des cours d'eau dont les mesures doivent contribuer à recréer des milieux aussi naturels que possible et d'enrayer les pertes de biodiversité en réactivant des processus inhérents aux écosystèmes aquatiques comme le charriage des sédiments et la migration des poissons.

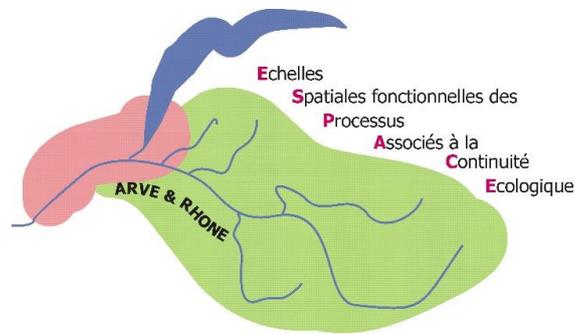
⁸ http://ge.ch/eau/media/eau/files/fichiers/documents/spage_lac-rhone-arve_brochure4.pdf

⁹ Office Fédéral de l'Environnement



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



II. Zone d'étude : le bassin de l'Arve et le Rhône genevois

Le territoire englobant les bassins de l'Arve et du Rhône genevois est complexe. Il combine des paysages de montagne et moyenne montagne, de vallées (Arve, Giffre, Borne, Menoge...) plus ou moins encaissées, et enfin un paysage plus ouvert qu'est le bassin genevois. Ce territoire, contraint par la géographie, est soumis à d'importantes pressions anthropiques. Sur le plan environnemental, la vallée de l'Arve a beaucoup souffert d'une industrialisation forte aux activités polluantes (activités métallurgiques, décolletage, industrie du bois), ainsi que d'une urbanisation prenant le pas sur les capacités d'assainissement des réseaux d'eau. Les industries utilisant beaucoup d'eau pour leurs activités ont dû se concentrer dans l'étroit fond de vallée, aux côtés de voies de communication empiétant sur l'espace de liberté de la rivière, repoussant celle-ci dans un lit de plus en plus étroit au moyen d'endiguements à outrance (**Figure 3**). Par ailleurs, ce territoire est également confronté au fort développement urbain et péri-urbain du Grand Genève, qui, avec ses 946 000 habitants¹⁰ et son dynamisme socio-économique exceptionnel, représente le second pôle de vie de la région Rhône-Alpes. Aussi, sur ce territoire, la gestion des ressources en eau représente un enjeu capital. La fragmentation des habitats est un phénomène omniprésent, tant sur les milieux terrestres qu'aquatiques.

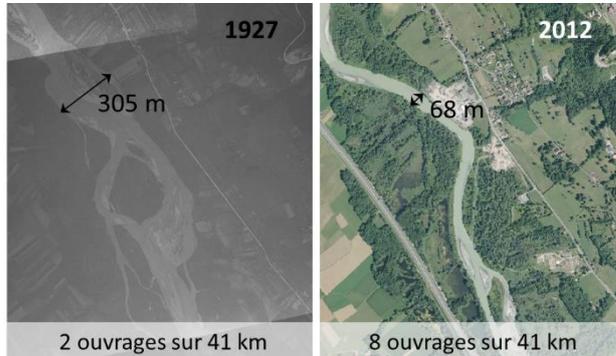


Figure 3 : Morphologie de l'Arve au cours du 20^{ème} siècle.

1) L'Arve et son bassin versant

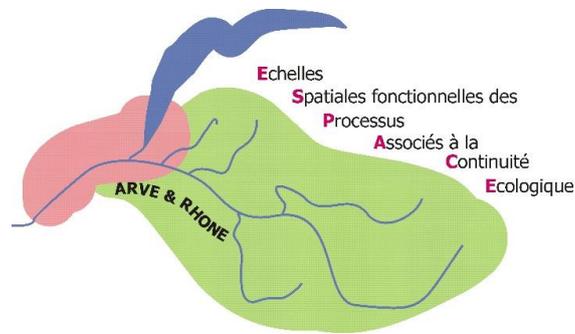
L'Arve est un affluent de rive gauche du Rhône, prenant sa source au Col de Balme (vallée de Chamonix) à 2 200m d'altitude environ. Longue de 117 km (dont 9 km en Suisse), elle se jette dans le Rhône en ville de Genève à une altitude de 370 m (quartier de la Jonction), 1 km environ en aval de l'exutoire du Léman. Avec une pente moyenne avoisinant 15 ‰, l'Arve est une rivière puissante. Dans sa partie amont, l'Arve présente un régime hydrologique glaciaire, alimenté par les eaux de fontes de neige et de glace en fin de printemps et en été. Vers l'aval, le régime devient glacio-nival (de Le Fayet jusqu'à Bonneville, avec les vallées du Giffre et du Borne), puis la composante pluviale modifie le régime et s'intensifie dans la basse vallée avec l'arrivée d'affluents comme la Menoge. A Genève, l'Arve présente un module de $77.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, avec des hautes-eaux de mai à juillet et un étiage hivernal.

¹⁰ Source : www.grand-geneve.org



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Le bassin versant de l'Arve en lui-même représente une superficie de 2060 km² (dont 80 km² en Suisse) et couvre environ le 1/3 du département de la Haute-Savoie. Il est essentiellement constitué de forêts et milieux semi-naturels (69.7 % de la superficie), et de territoires agricoles (20.7 %) ¹¹. Les milieux artificialisés occupent 9.4 % du territoire, mais se concentrent essentiellement en fond de vallée, en bordure des cours d'eau et notamment de l'Arve (**Figure 4**). La densité de population est importante, avec 150 hab./km². Les principales villes et agglomérations sont Chamonix-Mont-Blanc, Passy-Sallanches, Cluses-Scionzier, Bonneville, Annemasse, et Genève. Le territoire du SAGE Arve, légèrement différent du bassin versant tel que considéré ici, abritait en 2009 environ 320 000 habitants, et connaissait une croissance démographique importante (+1.5 % par an entre 1999 et 2009) ¹². La partie orientale du bassin se situe souvent à plus de 1 000 m, voire 2 000 m d'altitude : on y trouve les glaciers (120 km² env.), notamment la Mer de Glace, qui alimentent l'Arve en eau durant la période estivale.

L'Arve a subi de nombreuses pressions humaines. Outre l'altération de la qualité des eaux suite au développement industriel de la vallée, c'est surtout la morphologie de la rivière qui a été complètement contrainte et modifiée. Dès le XVI^{ème} siècle, des digues ont été construites autour de Sallanches. Le but premier était alors la protection contre les crues. L'endiguement de la rivière s'est intensifié au XVIII^{ème} siècle sous le gouvernement sarde, puis a continué au XIX^{ème} siècle. Genève a aussi réalisé des travaux d'endiguement dès la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Aujourd'hui, 75 % du linéaire de la rivière est endigué ¹³.

L'Arve a également été exploitée pour la force de ses eaux (usines d'Arthaz, de Passy-Servoz, nombreuses centrales sur les affluents) dès la fin du XIX^{ème} siècle, mais aussi et surtout pour sa production de granulats. Associé aux endiguements, le déficit de charge de fond lié à l'extraction de granulats (> 15M tonnes extraites du lit de l'Arve ¹⁴) accroît la capacité érosive du cours d'eau, favorisant les phénomènes d'érosion régressive et l'incision du lit. Sur l'Arve, le lit s'est par endroit enfoncé de plus de 10 m. Des seuils en dur, transversaux, ont alors été érigés afin de stopper ce phénomène, stabiliser le lit, ou pour maintenir une lame d'eau suffisante. Des seuils se sont aussi naturellement créés à la confluence entre affluents et cours principal de l'Arve, sous l'effet de l'incision du chenal, aboutissant à une déconnexion totale ou partielle (PEIRY 1986).

Ainsi, le cours de l'Arve mais aussi de ses affluents est aujourd'hui fortement impacté par un ensemble d'obstacles qui modifie les conditions d'écoulement, mais qui représente aussi une barrière plus ou moins franchissable pour les poissons. Le phénomène de fragmentation des habitats est donc bien présent. Sur le bassin de l'Arve, ce ne sont pas moins de 700 obstacles qui ont été recensés (CHASSERIEAU 2010).

¹¹ Source : www.services.sandre.eaufrance.fr

¹² Source : <http://www.gesteau.eaufrance.fr/sage/arve>

¹³ Source « Fiche rivière l'Arve » (2^{ème} édition) sur www.ge.ch/eau

¹⁴ Source : www.riviere-arve.org



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

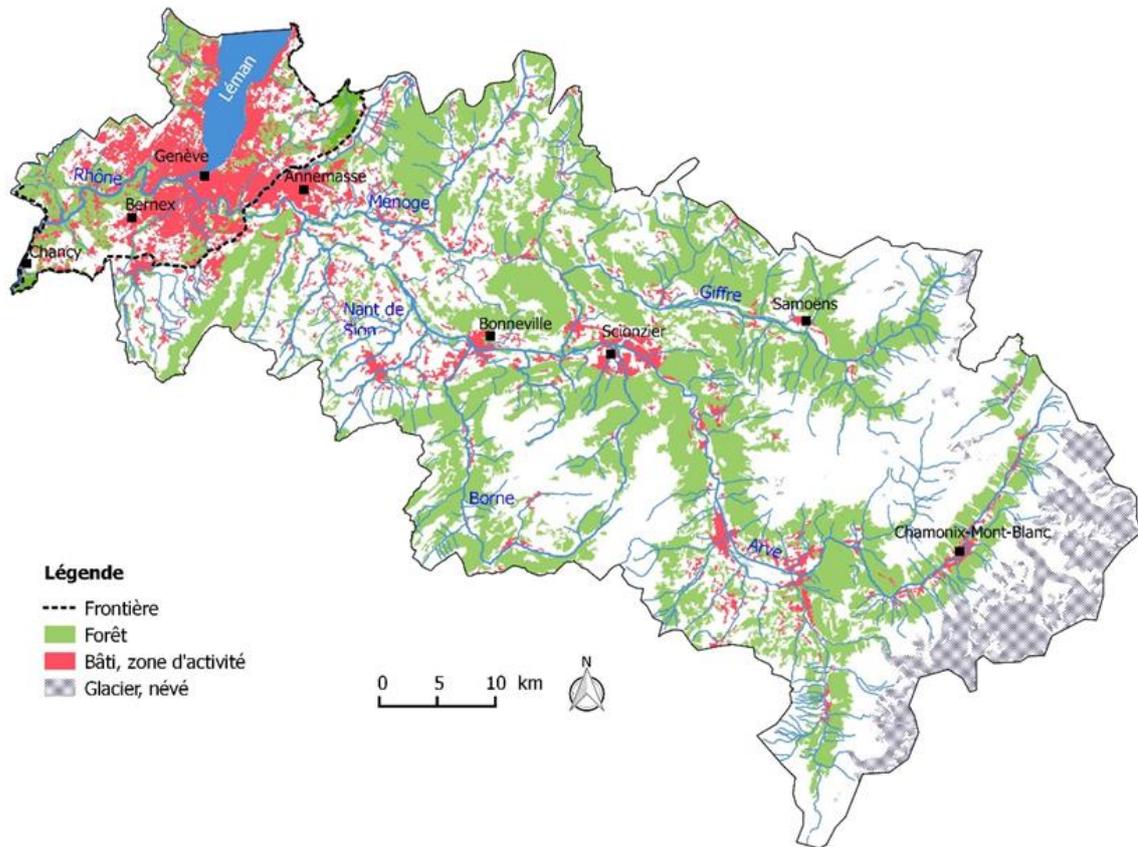
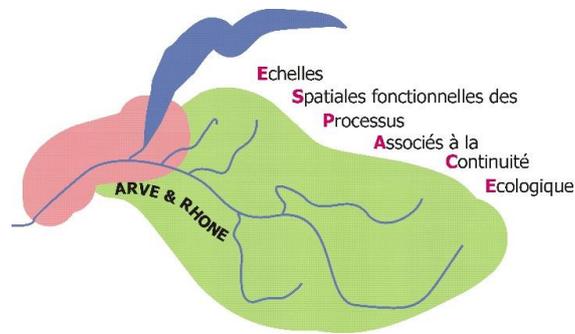


Figure 4 : Carte des bassins versants de l'Arve et du Rhône genevois, et principales utilisations du sol.

2) Le Rhône genevois

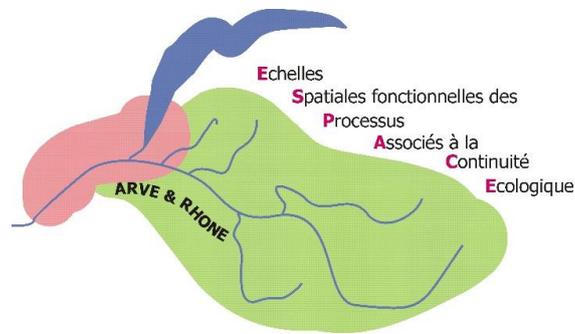
A la sortie du Canton de Genève (Chancy), le Rhône a parcouru 290 km depuis sa source à proximité du col de la Furka, dont 27.2 km depuis l'exutoire du Léman. Son bassin versant draine alors 10 300 km² (incluant le bassin de l'Arve). D'une couleur grise, très chargées en limon en arrivant des Alpes valaisannes, les eaux du Rhône ressortent limpides du Léman, avec un débit de 251 m³.s⁻¹ en moyenne (régulé par l'ouvrage du Seujet). Après avoir reçu l'Arve et quelques petits affluents, le débit atteint 342 m³.s⁻¹ à Chancy en quittant le territoire suisse. Le régime hydrologique, de type nivoglacière (maxima estivaux et minima hivernaux) à la Porte du Scex en entrant dans le Léman, est quelque peu modifié par le lac et sa régulation au Seujet, ainsi que les affluents intermédiaires, mais les hautes-eaux estivales et basses-eaux hivernales demeurent (OLIVIER *et al.* 2009) à Chancy.

Depuis l'exutoire du Léman (Seujet), le Rhône « urbain » présente un lit canalisé jusqu'à la confluence de l'Arve, 1 km plus en aval. Le Rhône retrouve ensuite des berges plus « naturelles », un lit sinueux, plus ou moins encaissé entre collines et falaises, et ce jusqu'à la sortie du canton à Chancy.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



La morphologie du fleuve et les écoulements sont fortement influencés par la présence de deux grands barrages, celui de Verbois entre les communes de Russin et d'Aire-la-Ville, et celui de Chancy-Pougny. Ces deux ouvrages sont des éléments majeurs de fragmentation du corridor fluvial.

Le barrage de Verbois, le plus imposant, mesure 34 m de hauteur et permet une chute d'eau de 20 m. Il fût construit entre 1938 et 1943, pour pallier au besoin en électricité du Canton. Ce barrage-poids créé une retenue d'eau longue de 11 km, d'un volume de 13 Mm³. Ce barrage fonctionne « au fil de l'eau », c'est-à-dire qu'il turbine en continue le débit arrivant depuis l'amont (mais qui est relâché depuis le Seujet sous forme d'éclusées), jusqu'à une valeur de 620 m³.s⁻¹, au-delà de laquelle l'excédent est déversé par les vannes. Le barrage et la retenue de Verbois agissent comme un véritable « piège à sédiments », notamment pour les matières en suspension en provenance de l'Arve qui sont directement stockées dans la retenue sous l'effet du ralentissement des vitesses de courant. Ce phénomène oblige les gestionnaires de l'ouvrage (SIG, Services Industriels de Genève) à procéder à des chasses afin de faire transiter les sédiments à l'aval et regagner du volume dans la retenue. Sur le Rhône, la retenue de Verbois apparaît comme un milieu artificiel, favorisant les espèces piscicoles lenticques (perche, brème, carpe, tanche, brochet,...) au détriment d'espèces rhéophiles (barbeau fluviatile, truite fario, ombre commun, spiralin,...) plus typiques. Le barrage est équipé d'un ouvrage de franchissement en rive gauche de type passe à poissons. Cette passe est atypique par ses dimensions « exceptionnelles », qui font d'elle la plus grande de Suisse et l'une des plus grandes d'Europe : 350 m de long, 107 bassins, 21 m de dénivelée.

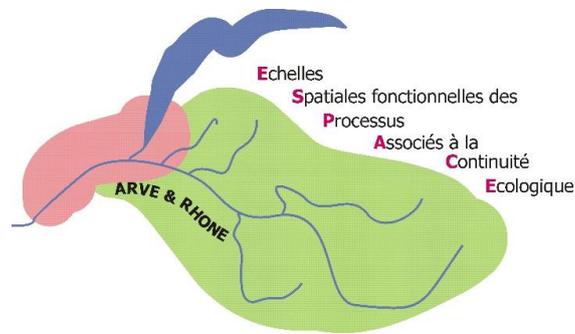
Le barrage de Chancy-Pougny, en aval de Verbois au niveau de la frontière franco-suisse, fût mis en service en 1925. Haut de près de 11 m, il autorise une chute de 6 m et présente une retenue de 9 km. Comme Verbois, il est exploité au fil de l'eau et turbine le débit modulé par le Seujet. Le barrage est équipé d'une passe à poissons mise en service en 2013. Elle totalise 250 m de long. Ses 65 bassins rattrapent chacun 20 cm de hauteur d'eau, ce qui permet au final de rattraper les 10 m de dénivelé.

Le Rhône en territoire genevois est un fleuve fortement artificialisé et fragmenté. Contrairement à l'Arve et ses affluents où la fragmentation consiste en une multitude de petits obstacles, elle est sur le Rhône essentiellement liée à deux obstacles majeurs que sont les barrages hydroélectriques de Verbois et Chancy-Pougny.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



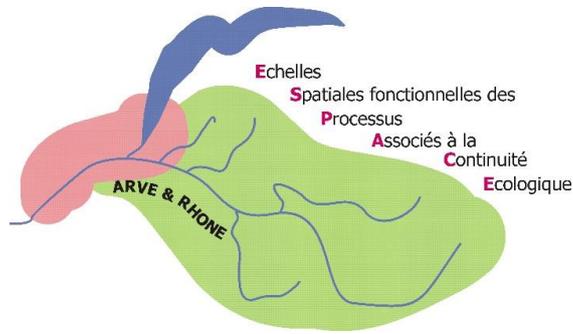
III. Bibliographie

- CATTANÉO, F., WINKLER, K., GRIMARDIAS, D., PERSAT, H., & WEISS, S. 2011. Caractérisation génétique des populations d'ombre commun (*Thymallus thymallus* L.) de Suisse et France transfrontalière - Applications à la gestion et à la conservation de l'espèce. Rapport pour l'Office Fédéral de l'Environnement, Berne: 75p.
- CAUDRON, A., VIGIER, L. & CHAMPIGNEULLE, A. 2012. Developing collaborative research to improve effectiveness in biodiversity conservation practice. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 49, p. 753-757.
- CHASSERIEAU, C. 2010. Recensement des ouvrages transversaux sur le réseau hydrographique de Haute-Savoie et continuité piscicole. Rapport final, Fédération Départementale pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique – Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, 66 p.
- FAHRIG, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. Vol. 34, p. 487-515.
- LINDENMAYER, D. B. & FISCHER, J. 2006. Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis. *Island Press, Washington*. 352 p.
- OLIVIER, J. M., CARREL, G., LAMOUREUX, N., DOLE-OLIVIER, M.-J., MALARD, F., BRAVARD, J.-P. & AMOROS, C. 2009. The Rhône River basin. In : TOCKNER, K, ROBINSON, C. & UEHLINGER, U. (eds). *Rivers of Europe*. Academic Press. 700 p.
- PEIRY, J. L. 1986. Dynamique fluviale historique et contemporaine du confluent Giffre-Arve (Haute-Savoie). *Revue de Géographie de Lyon*. Vol. 61, p. 79-96.
- WILCOVE, D. S., ROTHSTEIN, D., DUBOW, J., PHILLIPS, A., & LOSOS E. 1998. Quantifying threats to imperilled species in the United States: assessing the importance of habitat destruction, alien species, pollution, overexploitation, and disease. *BioScience*. Vol. 48, p. 607-615.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Chapitre 2 Aires de vie, déplacements et franchissements de 4 espèces cibles : la truite fario (*Salmo trutta*), le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), le chevaine (*Squalius cephalus*) et l'ombre commun (*Thymallus thymallus*).

CHASSERIEAU C. (a), GRIMARDIAS D. (b), BEAUFILS M. (a), CATTANEO F. (b)

(a) FDPPMA 74 – Fédération de pêche de Haute-Savoie



“Le Villaret”
2092, route des Diacquenods
74370 SAINT-MARTIN BELLEVUE

(b) HEPIA Genève – Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève



Institut Terre-Nature-Environnement
Route de Presinge
CH 1254 JUSSY, SUISSE

Résumé :

Afin d'élargir la connaissance sur les domaines vitaux et le franchissement d'ouvrages des espèces représentatives du cortège piscicole de l'Arve et du Rhône genevois (truite, barbeau, chevaine et ombre), 208 individus munis d'un émetteur radio et 1779 munis d'un transpondeur ont été suivis entre mai 2013 et avril 2015. Leurs déplacements individuels hebdomadaires pour les uns ont été enregistrés à l'échelle d'une année grâce à la télémétrie radio, permettant ainsi de couvrir toutes les phases des cycles saisonniers à l'âge adulte. La télémétrie RFID a quant à elle, permis l'acquisition de données sur le franchissement d'aménagements mais également l'utilisation de certains affluents.

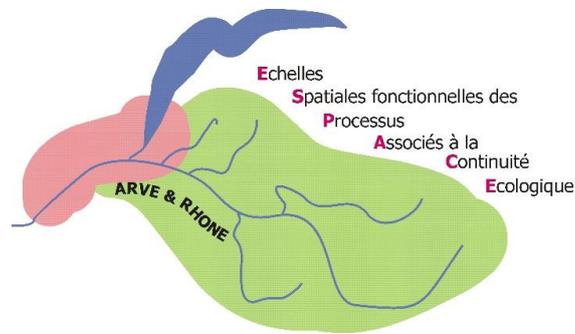
Pour les cyprinidés du Rhône et de l'Arve, la partie aval de la Menoge et le bras en amont du casino d'Annemasse sont des milieux très fréquentés, notamment au moment de la reproduction. Ces milieux annexes de l'Arve sont également importants pour le frai de l'ombre commun. Concernant la truite, le Borne (affluent médian de l'Arve) semble constituer un site privilégié pour le frai puisque la moitié des truites « migrantes » de l'Arve y remonte lors de la phase de reproduction.

Les proportions de migrants et sédentaires chez le chevaine sont équivalentes tandis que pour le barbeau fluviatile, la part de migrants est prépondérante (90%) dans le système Rhône. Les plus grands déplacements observés chez les cyprinidés ont été de 22 km tandis que pour la truite (essentiellement suivie dans l'Arve et ses affluents), ils ont atteint 40 km. Toutefois, la population de truite est constituée de 45% d'individus sédentaires, qui ont réalisé leur cycle de vie sur quelques



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



centaines de mètres seulement. Les ombres communs plus fragiles que les 3 autres espèces n'ont finalement pas été étudiés en télémétrie radio.

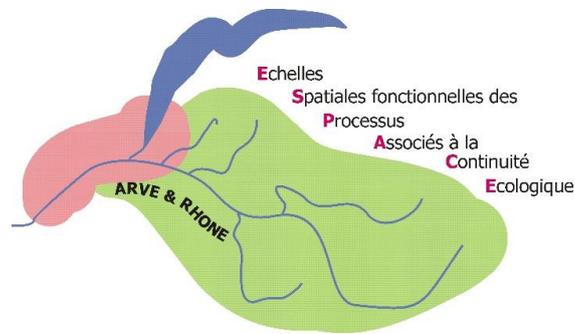
Le degré de fragmentation du milieu est une composante majeure de la continuité écologique. Dans un milieu comme le Rhône ou l'Arve, les ouvrages hydroélectriques peuvent représenter une entrave aux déplacements et migrations piscicoles, et perturber le cycle biologique des populations autochtones. Le franchissement piscicole des ouvrages a ainsi été évalué et montre que les grands ouvrages du Rhône représentent des obstacles difficiles à franchir pour les poissons dans le cadre de leur migration. Les ouvrages de plus faible taille ont un impact vraisemblablement moindre, d'autant plus lorsque des habitats favorables se trouvent à proximité (cours principal ou affluents), limitant ainsi le besoin de les franchir.

Mots clés : télémétrie radio, RFID, franchissement, déplacement, continuité, domaine vital, *Salmo trutta*, *Barbus Barbus*, *Squalius cephalus*, *Thymallus thymallus*, Arve, Rhône Genevois.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



I. Objectifs

La partie concernant le compartiment biologique et plus précisément piscicole du programme ESPACE Arve et Rhône vise à répondre aux objectifs suivants :

- Décrire les déplacements, identifier les habitats utilisés au cours du cycle de vie, et évaluer les échelles spatiales nécessaires au maintien de 4 espèces « dites mobiles » représentatives de la biodiversité piscicole du bassin Arve – Rhône genevois ;
- Evaluer la fonctionnalité en termes de franchissement d'une quinzaine d'aménagements, anciens et récemment construits, en intégrant les effets modulateurs de l'hydrologie et de la thermie ;
- Identifier, sur la base d'un SIG, les « points noirs » à la continuité écologique sur les bassins de l'Arve et du Rhône genevois.

Plus spécifiquement pour la Suisse :

- Evaluer l'efficacité de franchissement des passes à poissons de Chancy-Pougny, Verbois, et Vessy, afin de répondre d'une part aux exigences définies par la LEaux en termes d'assainissement des ouvrages, mais également aux besoins de critères quantitatifs objectifs pour le processus de certification 'Naturemade Star' (notamment pour Chancy-Pougny) ;

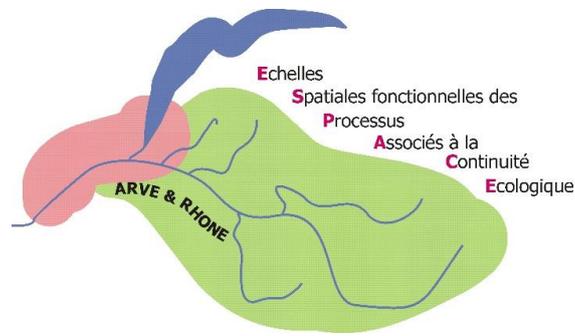
Plus spécifiquement pour la France :

- Evaluer l'efficacité de certains ouvrages de franchissement déjà réalisés sur des ouvrages structurant la continuité du cours principal de l'Arve (passe à ombre d'Arthaz, rivière de contournement de Scionzier,...) ;
- Evaluer les effets sur la continuité écologique de quelques grands ouvrages fragmentant l'habitat sur le bassin versant (Arve et parties basses des affluents). ;
- Mieux connaître les relations entre le cours principal de l'Arve et de ses affluents ainsi que les rôles joués par les affluents dans les processus biologiques (refuge thermique, refuge hydraulique, zone de reproduction,...) en rapport avec leur qualité et leur niveau d'accessibilité.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



II. Matériel et Méthodes

1) Les espèces piscicoles suivies

Quatre espèces ont été sélectionnées pour cette étude (**Tableau 2**), en tenant compte de la variabilité de leurs traits biologiques, morphologiques et écologiques, ainsi que de leur représentativité dans les peuplements de l'Arve et du Rhône et de leur présence historique (ESPACE A&R, 2013).

Tableau 2 : Liste des espèces-cibles, statuts de menace en France (d'après UICN-FRANCE et al., 2010) et en Suisse (KIRCHHOFER et al., 2007), et principaux intérêts.

Familie / espèce	Nom vernaculaire	Statut de menace F / CH	Intérêt		
			Patrimonial	Halieutique	Ecologique
Salmonidés					
<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	Vulnérable / Menacée ¹	oui	oui	pélagique sténoèce forte mobilité
<i>Salmo trutta</i>	Truite de rivière	Non menacée / Potentiellement menacée ²	oui	oui	pélagique sténoèce forte mobilité
Cyprinidés					
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau fluviatile	Non menacée / Potentiellement menacée	oui	non	benthique euryèce forte mobilité
<i>Squalius cephalus</i>	Chevaine	Non menacée	oui	non	pélagique euryèce forte mobilité

¹ Egalement inscrite à l'annexe III de la Convention de Berne

² "Fortement menacée" pour la forme lacustre en Suisse

A. L'Ombre commun (*Thymallus thymallus* LINNAEUS, 1758)

L'ombre commun (**Figure 5**) fait partie de la famille des *Salmonidae*, caractéristique des rivières de basse montagne aux eaux fraîches (température estivale ne dépassant pas 24°C), bien oxygénées (concentration proche de la saturation) et de relativement bonne qualité chimique (BRUSLE & QUIGNARD, 2001 ; PERSAT, 1977, 2011). C'est une espèce rhéophile (vitesses de courant comprises entre 70 et 110 cm/s) fréquentant généralement les faciès de type radier et plat courant (BRUSLE & QUIGNARD, 2001).



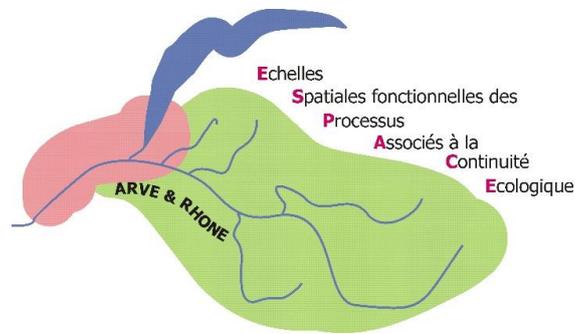
Figure 5 : Ombre commun pêché dans l'Arve à Annemasse (Lt = 368 mm ; 467 g).

Une température supérieure à 8°C est nécessaire pour déclencher la reproduction de l'ombre (PERSAT, 1988 in BRUSLE & QUIGNARD, 2001; PAQUET, 2002). Les géniteurs, dont la maturité sexuelle



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



intervient à l'âge de 2 ans (WOJTENKA, 1985), rejoignent alors des « affluents-frayères » en mars-avril. Ils recherchent des zones au substrat gravelo-sableux, courantes (40-70 cm/s) et peu profondes (20-50 cm), généralement situées en tête de radier (BRUSLE & QUIGNARD, 2001). La femelle pond 3 000 à 6 000 œufs par kg dans le substrat (caractère lithophile ; BRUSLE & QUIGNARD, 2001). Le cycle de vie de l'ombre commun est relativement court sur le Haut-Rhône français et ses affluents. En effet, l'espérance de vie est en moyenne de 4 ans et les géniteurs ne se reproduisent qu'une à deux fois (PERSAT, 1988 in BRUSLE & QUIGNARD, 2001).

B. La Truite fario (*Salmo trutta fario* LINNAEUS, 1758)

La truite fario est un *Salmonidae* pélagique et rhéophile (**Figure 6**). Elle est généralement considérée comme un poisson sténotherme d'eau froide (HAURY *et al.*, 1991), avec un préférendum thermique allant de 7 à 19°C selon FROST & BROWN (1967). C'est une espèce exigeante en oxygène dissous (> 6 mg/l ; KEITH *et al.*, 2011). On la retrouve dans des eaux peu profondes (10 - 40 cm) à vitesse modérée (0.2 - 0.5 cm/s) et avec une granulométrie moyenne en période de reproduction.



Figure 6 : Truite fario pêchée dans l'Arve à Annemasse (Lt = 275 cm ; 230 g).

La maturité sexuelle est atteinte vers 1 an pour les mâles et à partir de 2 ans chez les femelles. La période de reproduction se déroule de novembre à février. Les frayères sont situées dans des zones graveleuses à courant vif, généralement dans les parties hautes du bassin. La femelle pond environ 2 000 œufs/kg.

C. Le Barbeau fluviatile (*Barbus barbus* LINNAEUS, 1758)

Le barbeau fluviatile est un *Cyprinidae* benthique rhéophile (**Figure 7**). Il vit sur fond caillouteux, dans des eaux fraîches et bien oxygénées (KEITH *et al.*, 2011). La période de reproduction a lieu entre mai et juin, dans des eaux peu profondes, à partir de 13.5°C (BRITTON & PEGG, 2011). Il devient mature entre 4 et 7 ans et peut vivre plus de 15 ans (BRITTON, 2007 ; TAYLOR *et al.*, 2004).

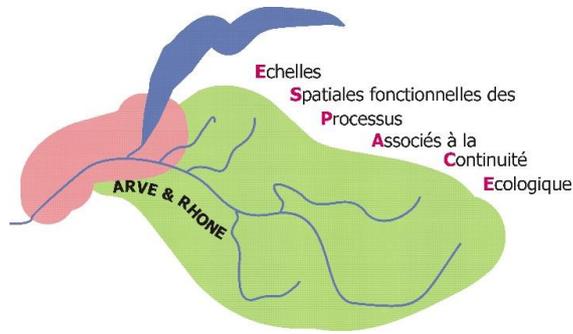


Figure 7 : Barbeau pêché dans l'Arve à Bonneville (Lt = 585 mm ; 2312 g).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



D. Le Chevaine (*Squalius cephalus* LINNAEUS, 1758)

Le chevaine fait partie de la famille des *Cyprinidae* (**Figure 8**). C'est une espèce adaptée à un large spectre d'habitats différents dont la préférence se situe de la basse zone à ombre à la zone à barbeau, soit une rivière à courant vif, à fond graveleux, avec une température relativement élevée. Le chevaine est peu exigeant en matière de qualité des eaux : il peut supporter des teneurs en oxygène inférieures à 6 mg/l et des températures supérieures à 30°C.



Figure 8 : Chevaine pêché dans la Menoge à Vétraz-Monthoux (Lt = 416 mm ; 955 g).

La reproduction a lieu entre mi-avril et mi-juin, avec une température supérieure à 12°C nécessaire au déclenchement de la reproduction. Les frayères sont situées à proximité de radiers, sur des zones de graviers, où la femelle y dépose jusqu'à 57 000 œufs par kg (KEITH *et al.*, 2011).

La **Figure 9** fait état des périodes de reproduction de ces 4 espèces cibles.

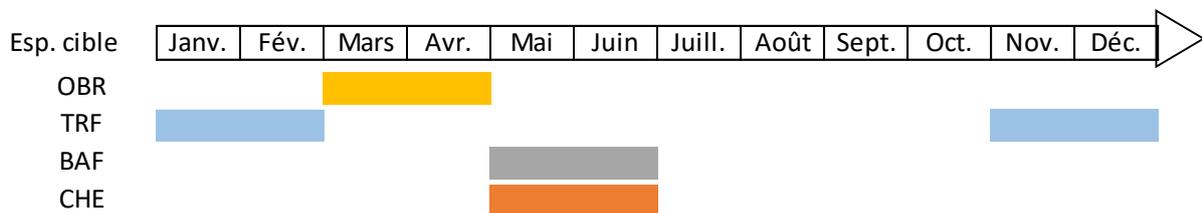


Figure 9 : Périodes de reproduction des 4 espèces piscicoles étudiées.

2) Principe des techniques de télémétrie

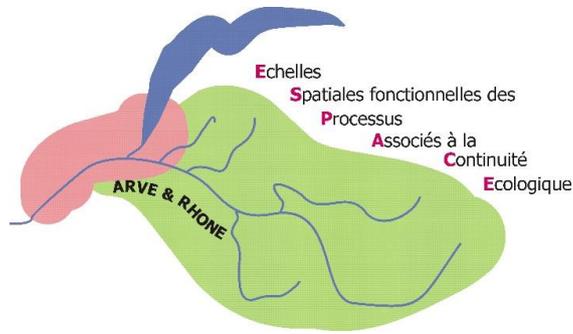
Afin de répondre aux objectifs définis précédemment, deux techniques de télémétrie ont été mises en œuvre. Celles-ci permettent d'étudier les poissons individuellement, à distance, de manière plus ou moins continue et sur de longues périodes. Ces deux technologies sont complémentaires, chacune répondant à des questions différentes.

La technologie RFID, aussi nommée PIT-tags (pour Passive Integrated Transponder tags) permet une détection de proximité (quelques dizaines de cm) des individus marqués en un point précis, généralement un ouvrage (seuil, échelle à poissons, etc.). Les PIT-tags sont des marques dites passives, dont l'énergie nécessaire à l'émission du signal et à la lecture du code est fournie par une antenne lorsqu'il se trouve à proximité (50-60 cm) (**Figure 10**). Ce type de marque permet d'identifier un grand nombre d'individus de toutes tailles (taille minimum 55 mm ; RICHARD *et al.*, 2013). Le marquage est rapide (< 30 secondes par individu) et fournit une information individuelle (code unique) pendant un temps quasi illimité (très longue durée de vie de la marque).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



La radio-télémetrie utilise des émetteurs radio autoalimentés, ce qui permet de localiser les poissons marqués à distance, jusqu'à plusieurs centaines de mètres (**Figure 10**). Il est ainsi possible de localiser sans recapture chaque individu marqué sur l'ensemble de la zone d'étude, aussi bien au niveau des ouvrages qu'entre ceux-ci. Le fait que l'émetteur soit autoalimenté implique un compromis entre sa taille et sa durée de vie, cette dernière augmentant avec la taille de la batterie. En fonction des objectifs de l'étude et de la taille des individus à marquer, un émetteur permet typiquement un suivi de quelques semaines à plusieurs années. De par le coût élevé et l'aspect intrusif que cela peut représenter pour l'animal, les études par radio-télémetrie portent généralement sur un nombre restreint d'individus (souvent < 100).

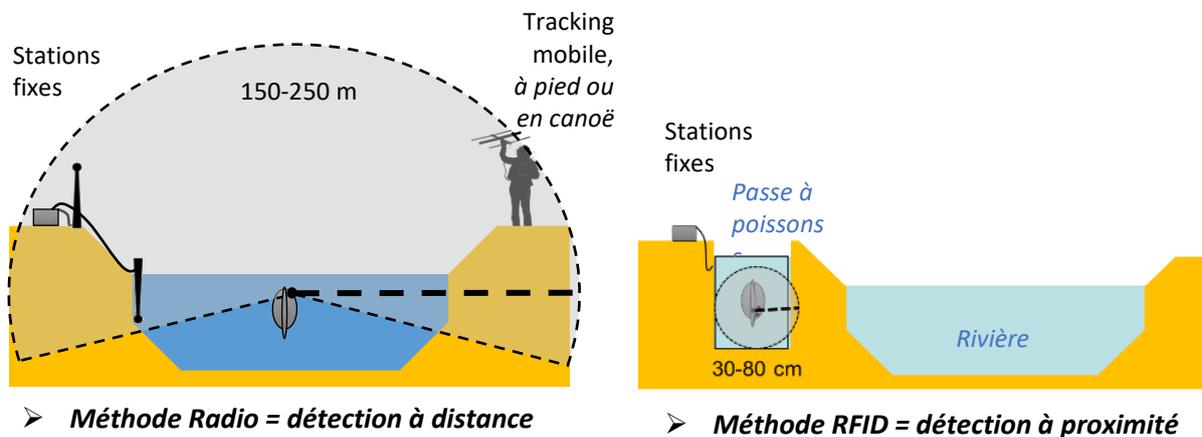


Figure 10 : Principe de fonctionnement des deux méthodes télémétriques utilisées dans le cadre du programme ESPACE Arve et Rhône.

3) Matériel utilisé et dispositifs de suivi mis en œuvre

A. Radiotélémetrie

a. Les émetteurs radio

Les émetteurs utilisés pour le programme ESPACE Arve et Rhône sont programmés pour émettre à une fréquence de 149 MHz. Habituellement, les études de télémetrie en milieu aquatique utilisent une plus basse fréquence (en général 50 MHz) car les pertes de signal occasionnées à l'interface eau-air sont moindres. Cependant, comme l'étude est menée en collaboration avec la Suisse, il a fallu s'adapter à la loi concernant l'utilisation des fréquences radios suisses (OFCOM, 2014) qui impose une gamme d'utilisation des fréquences de tracking animalier, soit 148 - 149 MHz.

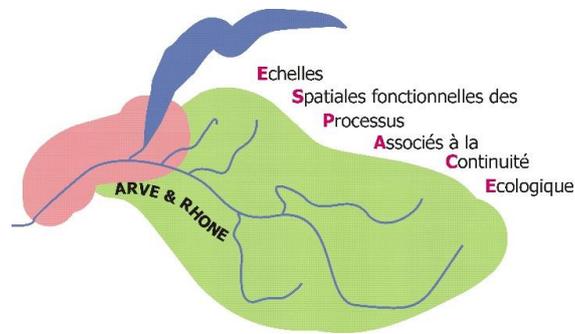
Deux types d'émetteurs sont utilisés dans le cadre de cette étude :

1. Les **émetteurs externes** (fournisseur ATS – Modèle 1815C - Type F2020, 8.6 g), ou marques « sac à dos », utilisés côté suisse pour marquer les barbeaux fluviaux et les chevaines lors de la période de migration pré-reproduction. Ce type de marque est plus adapté lorsque la période de marquage intervient avant ou durant la période de



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



reproduction des individus marqués puisque non intrusif et sans risque de dégradation des gamètes (BRIDGER & BOOTH, 2003). Cependant, ce type d'émetteurs peut limiter la croissance du poisson (MCCALLISTER *et al.*, 1992, in BARAS *et al.*, 2001) et provoquer une érosion et une blessure permanentes des tissus corporels dorsaux du fait du passage d'un élément étranger dans ceux-ci (BARAS *et al.*, 2001). De plus, l'émetteur est positionné sur un côté du dos du poisson, ce qui peut provoquer une perturbation dans la nage de ce dernier selon les conditions hydrauliques rencontrées (LEWIS & MUNTZ, 1984 ; BRIDGER & BOOTH, 2003)

2. les **émetteurs internes**, qui sont préférés pour leur moindre gêne dans la stature du poisson et pour une meilleure cicatrisation post-marquage des tissus corporels (BARAS *et al.*, 2001). L'implantation intra-péritonéale est habituellement considérée comme la procédure adéquate pour les études de télémétrie à long terme, en comparaison aux marques externes ou intra-gastriques (BARAS *et al.*, 1996), car elle possède les avantages de placer l'émetteur à proximité du centre de gravité du poisson, de le protéger des interactions avec l'environnement, de ne pas gêner la nage, de ne pas modifier l'appétit de l'individu ou encore de ne pas être rendu plus visible face aux prédateurs (BRIDGER & BOOTH, 2003). Le risque d'expulsion est également moins fréquent avec ce type de marque (GOSSET & RIVES, 2004). L'inconvénient est que les implants péritonéaux nécessitent une chirurgie plus « lourde », impliquant un temps de marquage plus long, une anesthésie plus profonde et un risque plus élevé d'infection (BRIDGER & BOOTH, 2003).

Nous avons choisi d'utiliser des émetteurs de marque ATS (Advanced Telemetry System) et de 3 tailles différentes. Les émetteurs sont de types : F1815C - F1210, F1820C - F1215 et F1835C - F1230 (**Figure 11**). En effet, la taille de l'émetteur dépend de la dimension de la pile à l'intérieur. Plus la pile est volumineuse, plus la durée de vie de l'émetteur (et donc le temps de suivi potentiel) est longue (**Tableau 3**). Ainsi, avec plusieurs tailles d'émetteurs, nous pouvons implanter dans de gros individus des marques plus grandes et suivre leurs déplacements plus longtemps.

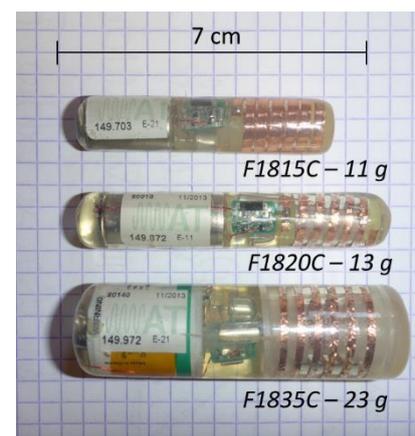


Figure 11 : Les 3 tailles d'émetteurs internes utilisés.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

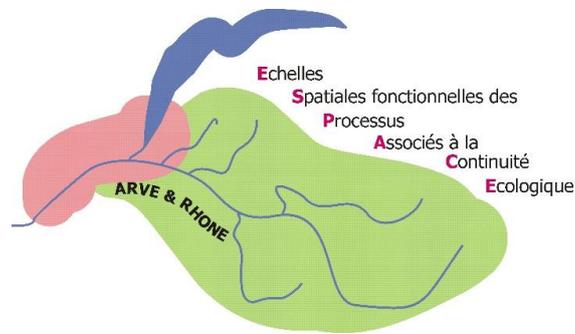


Tableau 3 : Caractéristiques des 4 modèles d'émetteurs utilisés dans le cadre du programme INTERREG ESPACE Arve et Rhône.

Le premier modèle (F1815C-F2020) est un émetteur externe, les 3 autres étant des émetteurs internes.

Modèle	Type	Poids théorique g	Poids observé g	Longueur mm	Hauteur mm	Capacité de la batterie jours	1/2 vie moyenne [Ecart type] jours
F1815C	F2020	8,6	9 [± 0.4]	43	12	250	199,3 [± 20.5]
F1815C	F1210	11	9,125 [± 0.1]	57	12	257	217,2 [± 43.5]
F1820C	F1215	13	11,68 [± 0.3]	64	12	373	207,9 [± 52.8]
F1835C	F1230	23	24,75 [± 0.6]	68	18	924	230,0 [± 36.1]

Les deux types d'émetteurs utilisés pour le programme ESPACE sont des émetteurs codés munis de l'option mortalité. Cette option a permis de statuer sur l'état de mort d'un individu et de l'extraire par la suite de l'effectif des poissons « à rechercher » lors des prospections de radiopistage. L'émission de base des émetteurs est de 11.45 pulsations par minute au minimum (1 pulsation = 3 bips). Sur une fréquence donnée, 11 à 20 émetteurs sont assignés, chacun avec un code différent. Le codage est réalisé par une variation de la période d'émission de la pulsation (entre 3760 ms et 5240 ms). Ainsi, pour une fréquence scannée, de 11 à 20 individus peuvent potentiellement être détectés et identifiés en même temps s'ils sont dans la même zone géographique. Ce format d'émetteur permet de suivre un grand nombre d'individus pour un temps de scan court.

L'option de mortalité est un changement de rythme du signal émis si l'émetteur (par extension, l'individu qui le porte) est resté statique pendant 24 h. Dans ces conditions, le signal de mortalité est activé et le nombre de pulsations/minute est doublé, soit 6 bips (en pratique 4 ou 5 bips car le temps de scan du récepteur est défini en fonction de la période maximale d'émission d'un émetteur en fonctionnement « normal »).

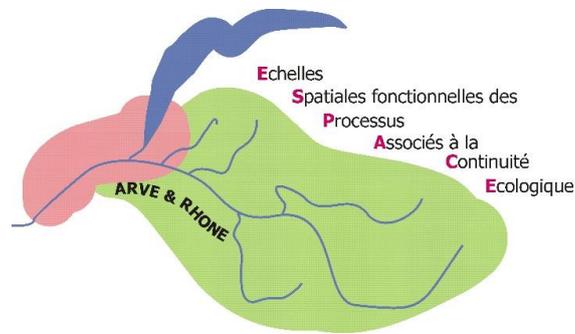
b. Les récepteurs – enregistreurs

Le suivi en radio-télémetrie peut s'effectuer en stationnaire (stations fixes à différents points du bassin versant qui enregistrent en continu le passage des poissons marqués) ou en mobile (prospection hebdomadaire de radiopistage par différents mode de déplacement). Le premier cas est une méthode passive où le poisson marqué « vient à l'émetteur », le second cas est une méthode active où l'opérateur recherche le poisson marqué.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



En stationnaire

Sept stations de suivi radio ont été installées entre juillet 2013 et avril 2014 à divers points stratégiques du bassin versant. Chacune est composée d'un récepteur – enregistreur de marque ATS modèle R4500C, d'un transformateur 220V/12V (marque *Nordic Power* AM0415 9A 6W) relié à une source électrique fixe et d'une ou plusieurs antennes aériennes, omnidirectionnelle (fouet) et/ou directionnelle (Yagi 3 éléments), suivant la configuration du site (**Figure 12**).



Figure 12 : Exemple de configuration de station radio fixe.

(a) positions d'implantations des antennes ; (b) récepteur ATS R4500C ; (c) et (d) respectivement antenne 1 et antenne 2 orientées sur chacun des cours d'eau pour caractériser le passage de l'un à l'autre par les poissons.

Le réseau de stations fixes prévoit un maillage régulier du linéaire entre Chancy-Pougny et Bonneville (**Figure 13**). Ainsi les 5 ouvrages hydroélectriques du secteur ont été équipés. Plusieurs récepteurs côté suisse ont été nécessaires pour bien couvrir chaque voie d'accès de ces ouvrages complexes sur le Rhône et sur l'Arve, et côté français, du fait de la configuration plus simple de l'ouvrage, un seul récepteur a été mis en place. Les autres points de suivi français ne constituent pas un « obstacle » à franchir mais sont des points de passage qui permettent de segmenter le cours principal de l'Arve en tronçons ou de caractériser le passage dans un affluent.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

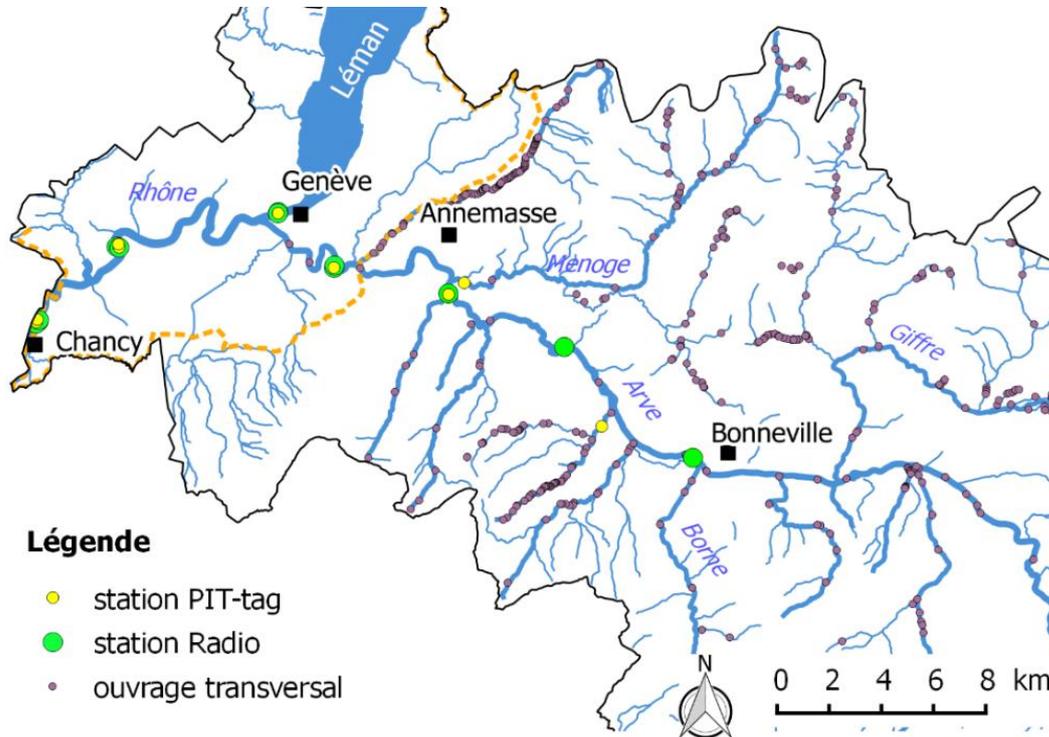
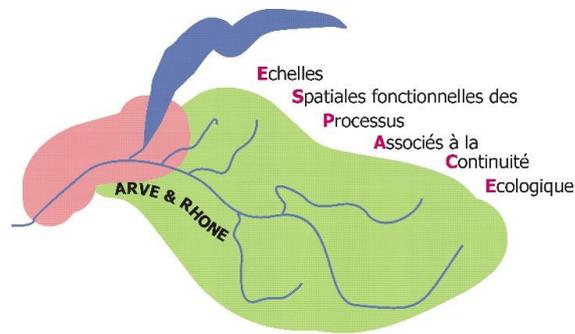


Figure 13 : Localisation des stations de suivi piscicole mises en place pour le programme ESPACE et des ouvrages transversaux présents sur le bassin, qu'ils soient impactant ou non (recensement non exhaustif : source ONEMA et FDPPMA 74).

Le **Tableau 4** liste les éléments et caractéristiques de chaque site suivi et les **Figure 14** à **Figure 20** illustrent le plan d'aménagement en radio et définissent l'ampleur des zones de détection de chacune des antennes par site. Pour chaque site suisse, 2 boîtiers d'enregistrements (munis d'1 ou 2 antennes fouet), sont nécessaires pour couvrir les zones à proximité des ouvrages et décrire l'approche des poissons face à ces derniers.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

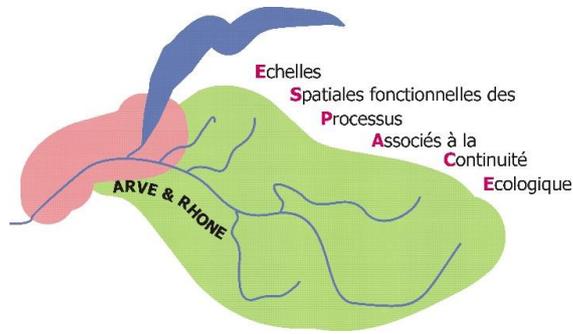


Tableau 4 : Caractéristiques des stations radio fixes mises en place pour le programme ESPACE Arve & Rhône, listées de l'aval à l'amont.

Type	Pays	Site	Propriétaire de la source électrique	Cours d'eau	Nom/Code du boîtier	Nb Antennes	Type	Objectif(s)		
Radio	Suisse	Chancy-Pougny	SFMCP	Rhône	Chancy Ponton	2	fouet	Définition du comportement du poisson à proximité de l'ouvrage		
					Chancy Passe	1	fouet			
		Verbois	SIG	Rhône	Verbois Ponton	2	fouet			
					Verbois Passe	1	fouet			
		Seujet	SIG	Rhône	Seujet Ecluse	2	fouet			
	Seujet Aval				1	fouet				
	Vessy	SIG	Arve	Vessy Passe	2	fouet				
				Vessy usine	1	fouet				
	France		Centrale d'Arhaz	EDF	Arve	RFAR	1		fouet	Enregistrement du passage d'un poisson vers l'amont ou vers l'aval ou vers un affluent
			STEP* Scientrier	Syndicat des eaux des Rocailles et de Bellecombe	Arve	RFSC	1		Yagi à 3 éléments	
STEP* Bonneville			Régie des eaux de Bonneville	Arve / Borne	RFBO	2	Yagi à 3 éléments			

* Station d'EPuration

Tableau 5 : Caractéristiques des ouvrages (barrages et échelles à poissons) étudiés sur le bassin Arve-Rhône.

Ouvrage	Arthaz-Pont-Notre-Dame	Vessy		Seujet	Verbois	Chancy-Pougny
		Rive droite	Rive gauche			
Date de construction	1892	1866		1995	1942	1925
Hauteur de chute (m)	3.6	3.7		3.4	20.0	10
Barrage						
Production hydroélectrique annuelle (GWh)	-	1.7		20	466	245
Débit moyen du cours d'eau (2013-2015 ; m ³ .s ⁻¹)	81	81		277	360	369
Echelle à poissons						
Date de construction	2001	2005	2006	1995	2000	2012
Dénivelé (m)	3.60	2.35	3.20	1.6-1.9	20	12
Longueur (m)	33	26	40	53	350	250
Nombre de bassins	11	11	15	21	107	65
Débit d'attrait (m ³ .s ⁻¹)	0.77 - 0.87	0.25	0.25 - 0.49	0.7 - 1.5	2.7	4.5



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

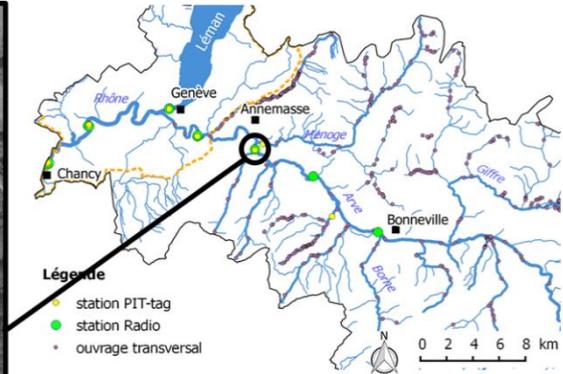
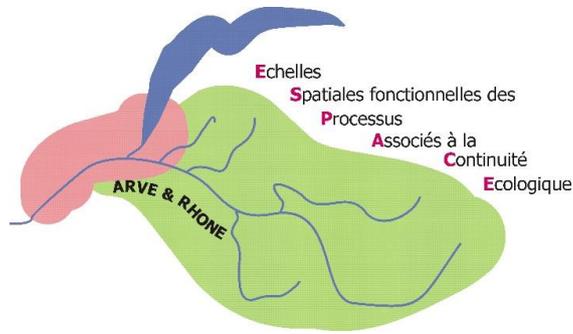


Figure 14 : Zone de détection de l'antenne omnidirectionnelle de la station fixe radio implantée à la centrale EDF d'Arthaz-Pont-Notre-Dame (linéaire couvert : 200 m). Les points bleus représentent la position des systèmes de détection PIT-tag.

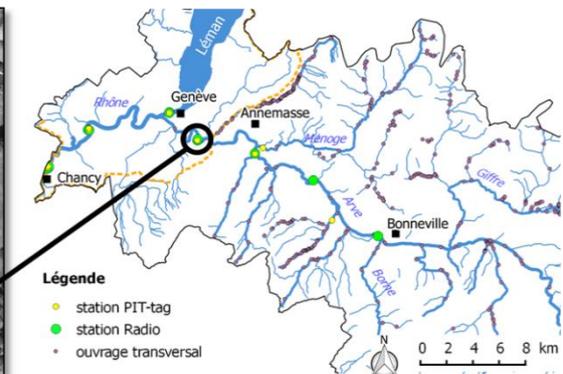
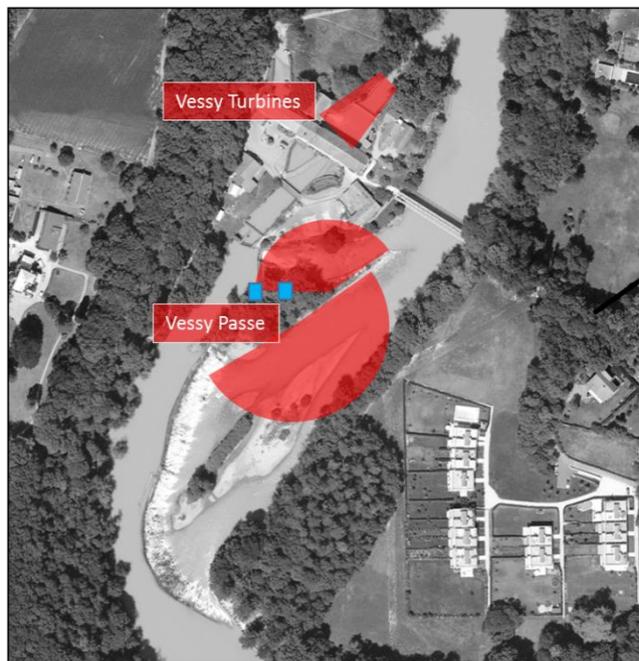


Figure 15 : Zone de détection des stations fixes radio implantées au barrage SIG de Vessy. Les points bleus représentent la position des systèmes de détection PIT-tag.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

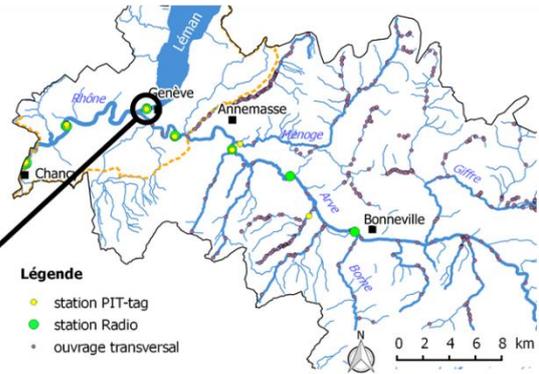
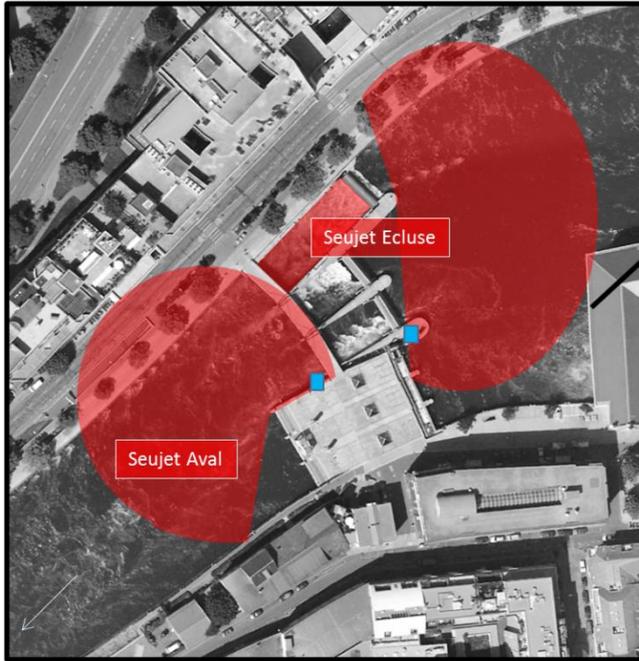
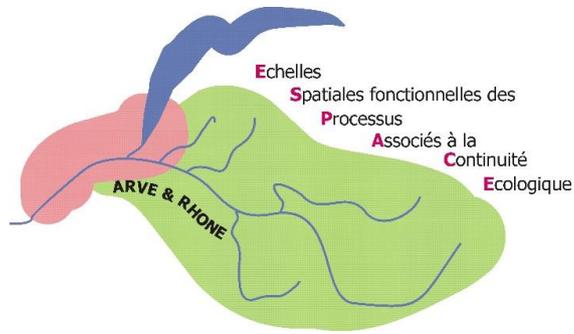


Figure 16 : Zone de détection des stations fixes radio implantées au barrage SIG du Seujet. Les points bleus représentent la position des systèmes de détection PIT-tag.

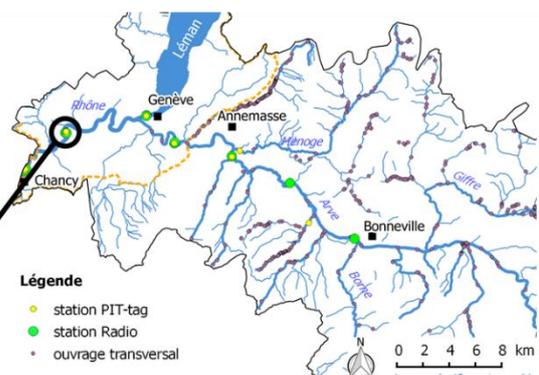


Figure 17 : Zone de détection des stations fixes radio implantées au barrage SIG de Verbois. Les points bleus représentent la position des systèmes de détection PIT-tag.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

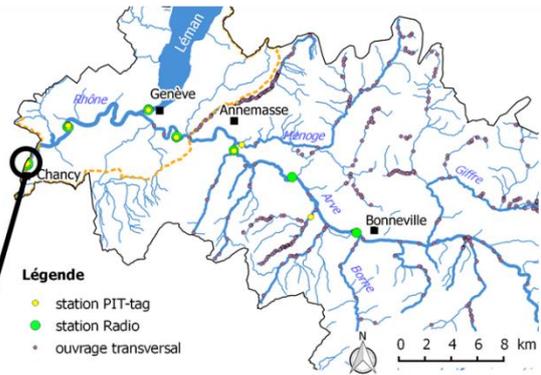
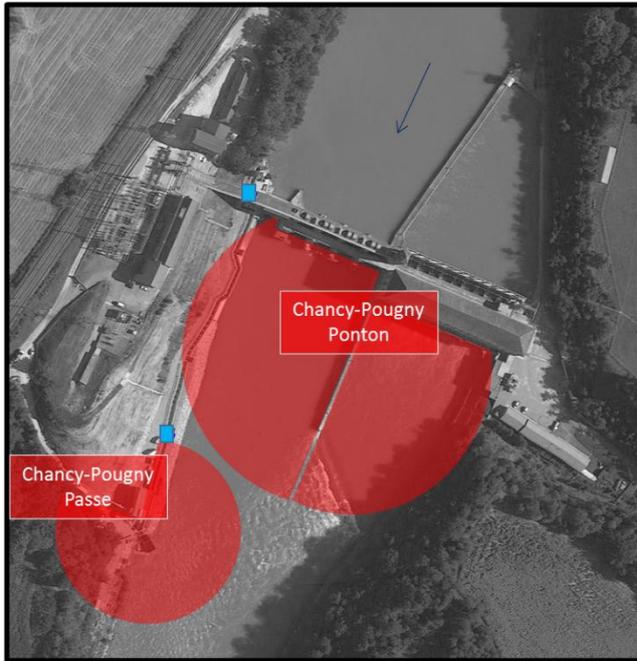
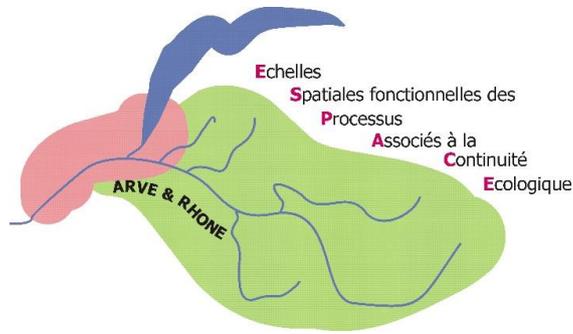


Figure 18 : Zone de détection des stations fixes radio implantées au barrage SIG de Chancy-Pougny. Les points bleus représentent la position des systèmes de détection PIT-tag.

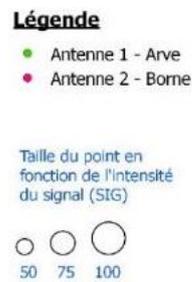
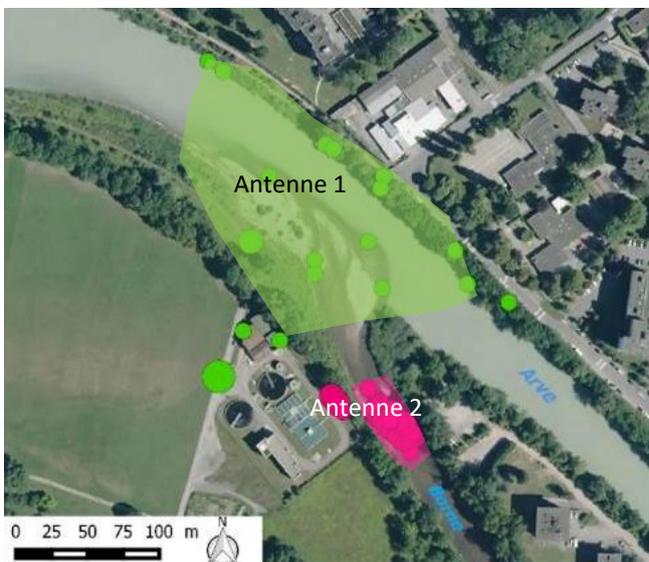
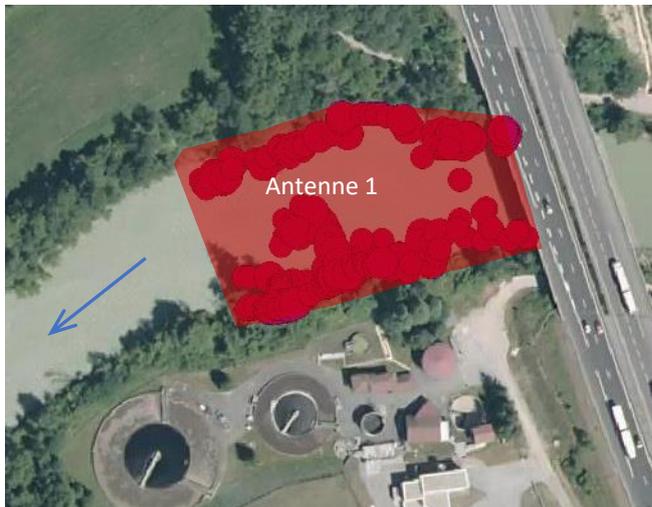
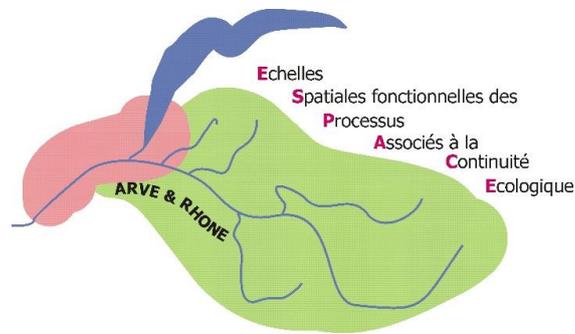


Figure 19 : Zones de détection des deux antennes Yagi directionnelles (3 éléments) de la station fixe radio de Bonneville.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



0 25 50 75 100 m

Légende

• détection à l'antenne Yagi RFSC

○ force du signal détecté
75 100

Figure 20 : Positionnement de la station radio fixe sur le site de la station d'épuration de Scientrier.

En mobile ou radiopistage

Le radiopistage ou radiotracking consiste à chercher activement les poissons marqués. Il s'effectue à l'aide d'un récepteur R4500C en mode « aerial » et d'une antenne Yagi 3 éléments tenue de manière perpendiculaire au cours d'eau (matériel ATS). Ces prospections se font de manière hebdomadaire et sur tout le linéaire de présence des poissons marqués. Un suivi régulier de chaque individu marqué donne des informations plus fines sur leur comportement. Selon BARAS (1997), l'intervalle de positionnement optimal est journalier. Cet auteur a mis en avant les différences de « home-ranges » et de distances en localisant chaque jour des barbeaux et en exploitant les résultats jour par jour ou en agrandissant l'intervalle de temps. Même si la localisation quotidienne est plus précise, l'hebdomadaire est la plus efficace en termes de coûts-bénéfices, avec une imprécision de 5% (BARAS, 1997), ce qui reste acceptable.

Les prospections de radiopistage ont commencé à la suite immédiate des opérations de marquage. Elles s'effectuent à pied, en canoë pour les zones non accessibles par les berges et en bateau de tourisme sur le Rhône (**Figure 21**). Le linéaire prospecté s'élève à environ 50 km sur l'Arve, 25 km sur le Rhône et environ 13 km sur l'aval des affluents (Menoge, Nant de Sion, Borne et Giffre) (**Figure 22**). Lorsqu'un poisson est perdu, la zone prospectée est étendue.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

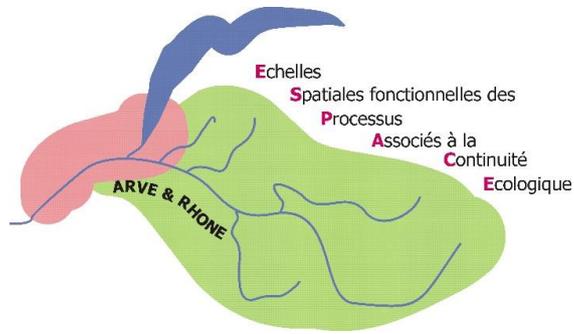


Figure 21 : Mode de radiopistage (a) à pied, (b) en canoë et (c) en bateau de tourisme pour le Rhône.

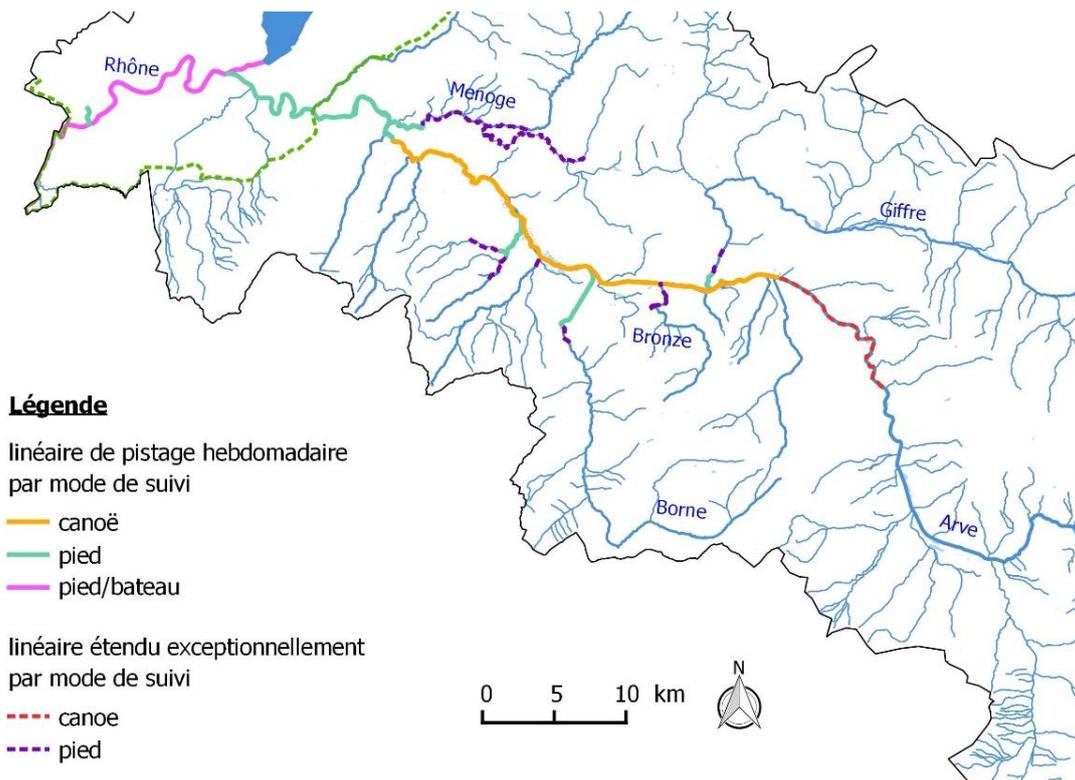
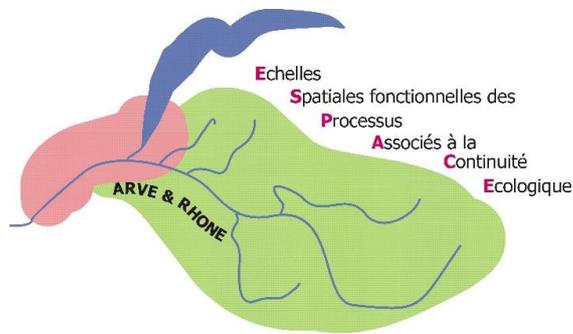


Figure 22 : Linéaires prospectés de manière hebdomadaire ou exceptionnelle, présentés selon les secteurs en fonction du mode de pistage utilisé.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



La méthode utilisée pour définir la position du poisson est dite « homing-in », consistant à s'approcher au plus près de l'individu pour recevoir le signal le plus fort possible afin d'avoir la position GPS la plus précise (**Figure 24**). Ainsi, l'opérateur « scanne » les fréquences de chaque émetteur à l'aide du récepteur, en marchant jusqu'à trouver les poissons. Lorsque le récepteur identifie une fréquence de marquage, il émet trois « bips » successifs puis donne le code correspondant à l'émetteur permettant d'identifier l'individu repéré. L'opérateur va donc chercher le signal le plus fort (intensité des bips sonores) (**Figure 23**). Ainsi, l'intensité du signal et les coordonnées sont enregistrées par le récepteur.

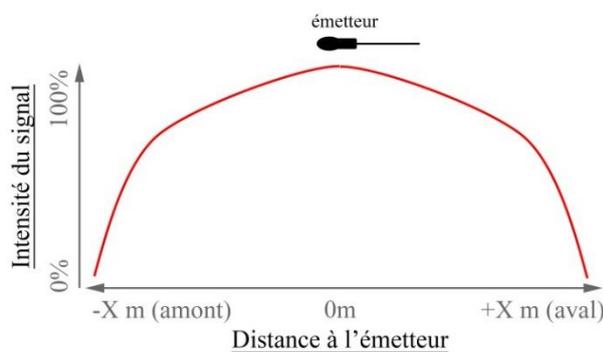


Figure 24 : Illustrations de la méthode de radiopistage par « homing-in » et de l'intensité du signal radio en fonction de la distance antenne – émetteur.

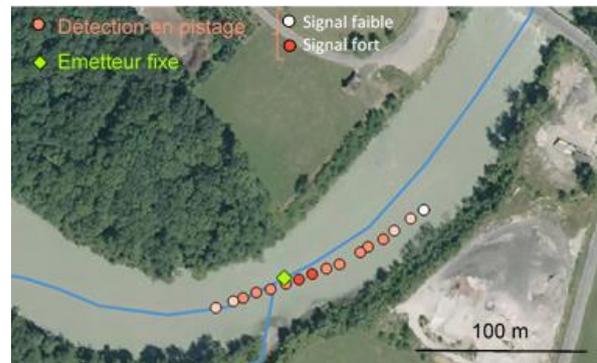


Figure 23 : Intensité du signal croissant détecté par le récepteur au fur et à mesure du rapprochement de l'émetteur.

Au total, 106 prospections mobiles (72 côté France et 44 côté Suisse) ont été réalisées entre le 3 juillet 2013 et le 13 mai 2015.

A l'issue de cette récolte de données, un « statut » final a été défini pour chaque individu marqué selon les critères décrits au **Tableau 6**.

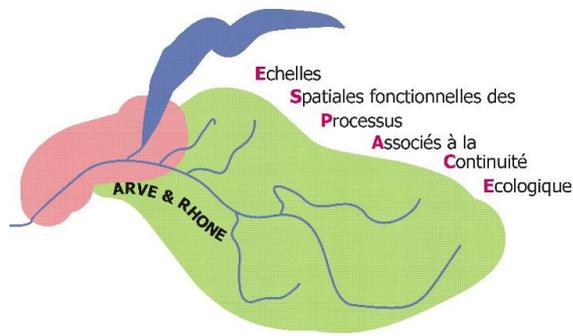
Tableau 6 : Critères de définition du « statut » d'un individu suivi en radio-pistage à l'issue de l'étude.

Statut	Conditions	Justifications
disparu / mort post marquage	lorsqu'un individu a disparu directement après le marquage (aucun contact en pistage) ou est mort 4 à 5 semaines après sa date de marquage	Une durée de 4 à 5 semaines est généralement celle nécessaire à la cicatrisation de l'implantation d'un émetteur interne (BARAS <i>et al.</i> , 2001) et donc celle généralement adoptée pour quantifier la mortalité due à l'opération de marquage intrapéritonéal. Pour les émetteurs externes, les décès post-marquage sont plutôt rares (BARAS <i>et al.</i> , 2001)
mort	quand l'option de mortalité s'est activée pendant plusieurs semaines consécutives	Une seule activation ponctuelle n'est pas forcément synonyme de mort. Ce fait a été constaté pour des individus très statiques en période de repos hivernal ou de stress hydrique à l'étiage estival.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Statut	Conditions	Justifications
pêché	lorsque l'information a été transmise aux porteurs de projet, avec la collecte de l'émetteur concerné	Une campagne accrue de sensibilisation des pêcheurs et autres usagers des rivières du bassin a été réalisée tout au long de l'étude via la distribution de flyers, un affichage au bord de l'eau avec les informations des opérations en cours et un contact direct lors des prospections de radiopistage (Annexe 1, Annexe 2 et Annexe 3).
perdu	lorsque l'individu après plusieurs recontacts en pistage a été perdu et jamais retrouvé et dont le signal de mortalité ne s'est jamais activé	Plusieurs hypothèses peuvent expliquer leur sortie du système : <ul style="list-style-type: none"> • prédation (aviaire ou autre) ; • capture par pêche à la ligne sans retour de l'émetteur par le pêcheur ; • zone de prospection pas assez étendue lors de la disparition de l'individu perdu ; • sortie de la zone d'étude (Rhône dans l'Ain, Arve en amont de Cluses ou un de ses affluents non prospecté) • arrêt de fonctionnement de l'émetteur (en fin d'étude)
vivant	quand l'individu a toujours été contacté via les dispositifs fixes ou mobiles et n'a jamais présenté de signal de mortalité	

B. Technologie RFID ou PIT-tag

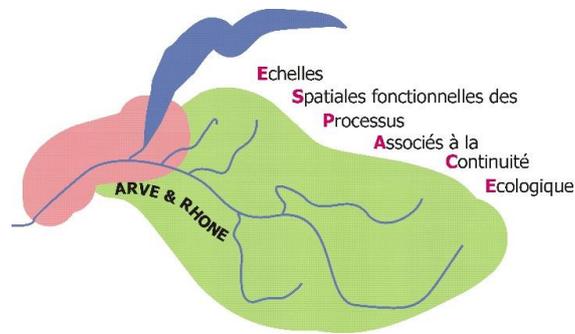
a. Les transpondeurs ou PIT-tags

Les PIT-tags utilisés (marque *Oregon RFID*, type HDX) sont de 3 tailles différentes. En effet, la taille de l'individu à marquer conditionne la taille de la marque à implanter. Ainsi, nous avons défini les tailles minimales requises des poissons en fonction de la taille des tags : 55 mm pour des marques de 12 mm, 120 mm pour celles de 23 mm et 135 mm pour celles de 32 mm (cf. RICHARD *et al.*, 2013 ; VATLAND & CAUDRON, 2014). Ainsi, lors des pêches de sondage et des vidanges de passes, tous les poissons appartenant aux espèces cibles et dans les gammes de tailles décrites précédemment ont été munis d'un tag. La gamme des poissons marqués avec un PIT-tag seul est en effet plus large que celle des poissons marqués avec un émetteur radio.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



b. Les stations fixes PIT-tag

Une station PIT-tag se compose de plusieurs éléments en série définis à la **Figure 25**.

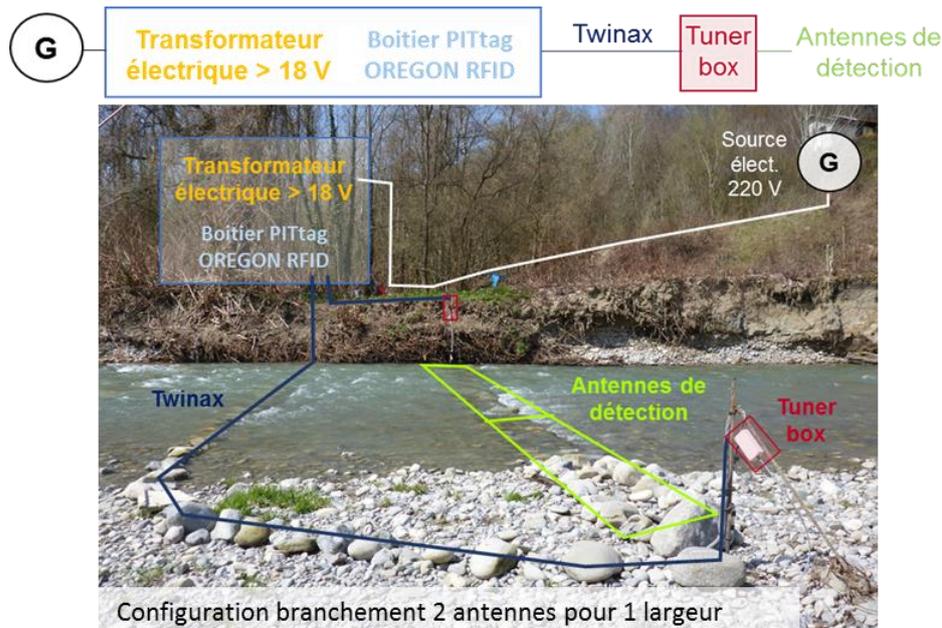


Figure 25 : Composition d'une station PIT-tag type – matériel Oregon RFID.

Suivant le site à équiper et les objectifs d'étude, le nombre, la forme et la disposition des antennes peuvent varier. Le **Tableau 7** récapitule les caractéristiques des 7 stations PIT-tag mises en place pour le programme ESPACE Arve et Rhône. Les **Figure 14** à **Figure 18** montrent l'emplacement des systèmes de détection PIT-tag sur les différents ouvrages hydroélectriques étudiés.

La **Figure 26** illustre 3 configurations de disposition d'antennes.

Tableau 7 : Caractéristiques des stations fixes PIT-tag mises en place dans le cadre du programme ESPACE.

Type Pays	Site	Propriétaire de la source électrique	Cours d'eau	Nom/Code du boîtier	Nb Ant.	Dimensions (m)			Section câble (mm ²)	Nb de spires	H de détect° (m) ⁽¹⁾	Position	Objectifs
						L ou h	l						
Suisse	Chancy-Pougny	SFMCP	Rhône	PTCH-Aval	2	2	0,5	2,5	3	0,5	verticale	Efficacité du dispositif de franchissement	
				PTCH-Amont	2	2	0,5	2,5	3	0,5	verticale		
	Verbois	SIG	Rhône	PTVER-Aval	2	2	0,5	2,5	3	0,5	verticale		
				PTVER-Amont	2	2	0,5	2,5	3	0,5	verticale		
	Seujet	SIG	Rhône	PTSEU	4	1	0,5	2,5	3	0,5	verticale		
Vessy	SIG	Arve	PTVES	2	1,5	0,5	2,5	3	0,5	verticale			
France	800m amont confl. avec Arve Vétraz-Monthoux	M. MENZLER	Menoge	PTME1	2	10	0,6	8	2	0,5	à plat	Caractérisation des remontées de géniteurs d'ombre et de barbeau	
				PTME2	2	8	0,6	6	2	0,5	à plat		
	Passe à poissons d'Arthaz	EDF	Arve	PTAR	3	2	0,4	2,5	2	0,5	verticale	Efficacité du dispositif de franchissement	
	Pont RD19 Arenthon	Mme OLIVIER	Nant de Sion	PTNS	2	6	1,2	4	2	0,5	verticale	Evaluation du franchissement de l'ouvrage	

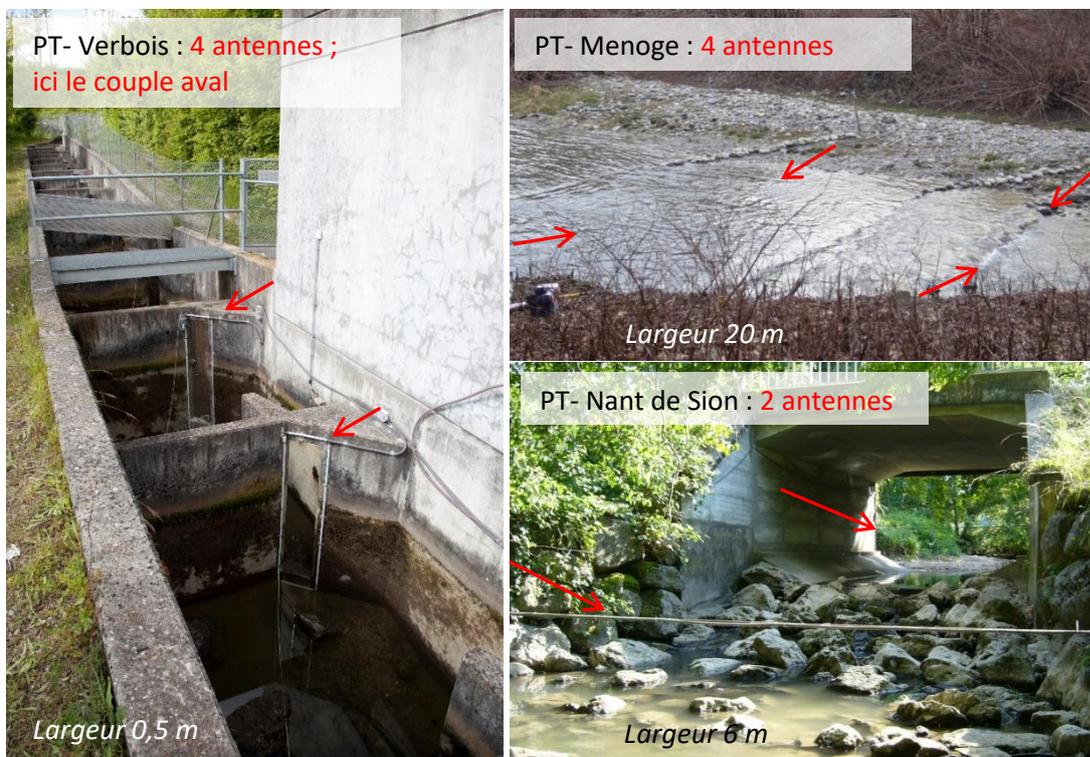
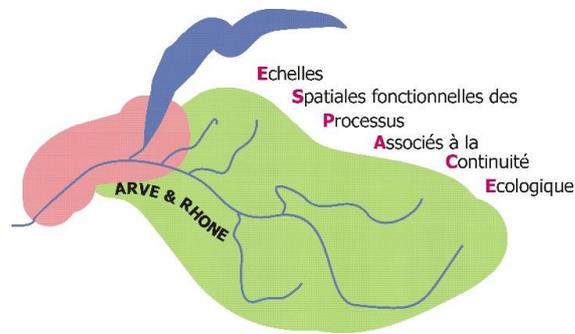


Figure 26 : Disposition des antennes PIT-tag indiquées par une flèche rouge (a) dans le cas d'une passe à poissons à fentes verticales ; (b) d'antennes transversales à plat ; (c) d'antennes transversales verticales.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



4) *Evaluation du fonctionnement des dispositifs de suivi*

A. Stations fixes

Pour chaque station fixe, qu'elle soit de technologie radio ou RFID, une marque (émetteur ou PIT-tag) est positionnée dans le champ de détection des antennes pour vérifier le bon état de marche de la station. Pour une station radio, l'émetteur est posé dans la boîte étanche qui contient le récepteur. Pour une station PIT-tag, une antenne (côté suisse) ou toutes (côté France) sont munies d'un « marker tag » (=marque témoin) qui est directement fixé sur ces dernières.

Ainsi, en fonction du nombre de détections journalières, puis horaires, les plages de temps de fonctionnement du dispositif sont définies. La mise en relation avec les passages des poissons marqués permet d'évaluer le manque possible d'acquisition de données.

B. Radiopistage

Afin d'appréhender la précision des résultats de radio-tracking, des émetteurs-tests fixes ont été placés en un endroit connu et géo-référencés sur les linéaires de l'Arve et l'aval des affluents principaux français par une personne ne réalisant pas de prospection. Chaque semaine, les positions de ces émetteurs-tests sont définies de la même manière que celles des poissons. Ainsi, des distances de localisation à pied et en canoë ont pu être calculées entre la position définie lors des prospections et la position réelle de l'émetteur fixe. Ceci permet donc de définir la « marge d'erreur » de détection et de pouvoir s'affranchir des distances non significatives dans le traitement des résultats. De même, un taux de détection par mode de suivi a pu être défini de la façon suivante :

$$T_d = \frac{\text{Nombre d'émetteurs détectés}}{\text{Nombre d'émetteurs recherchés}} \times 100$$

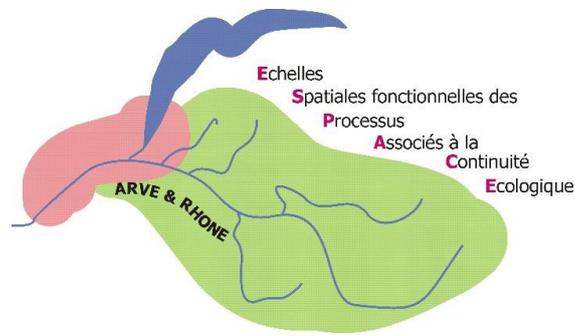
5) *Procédure de marquage des individus*

La phase de marquage est le point initial du suivi piscicole par télémétrie. La **Figure 27** synthétise les étapes successives de la procédure.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Capture



Anesthésie à l'eugénol 10%



Biométrie : longueurs totale et à la fourche, poids, prélèvements écailles et bout de nageoire pelvienne



Marquage : insertion ou accrochage de l'émetteur radio suivant le type + insertion PIT-tag



Stabulation



Remise à l'eau

Figure 27 : Les différentes étapes de la procédure de marquage.

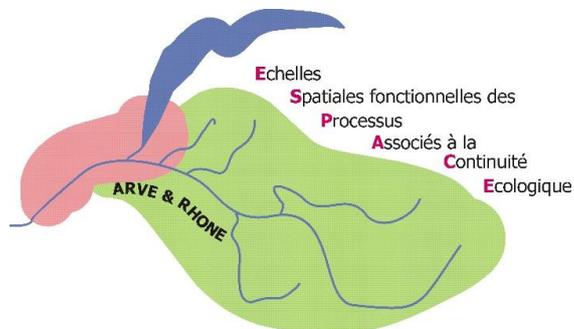
A. Echantillonnage des individus

Les poissons à marquer sont capturés par pêches électriques de sondage réalisées à l'aide d'un appareil thermique de marque *Hans & Grassl*, par vidange de passes à poissons ou par piégeage (en collaboration avec le suivi par nasse réalisé par le bureau d'étude COREALIS) sur les grands ouvrages suisses. Les zones prospectées sont sélectionnées en fonction de leur accessibilité (profondeur et vitesse de courant) et de leur attractivité d'habitat selon les espèces ciblées (**Figure 28**). La période d'échantillonnage est aussi déterminante ; en effet les bas débits de l'Arve se rencontrent habituellement entre les mois de décembre et mars. Seules les espèces étudiées listées dans le **Tableau 2** sont capturées pour être marquées après la pêche. Parmi les poissons échantillonnés, seuls ceux qui pèsent plus de 550 g (dans l'idéal) seront marqués d'un émetteur. En effet, plusieurs auteurs (par ex., GALLEPP & MAGNUSON, 1972 ; WINTER, 1983, 1996) ont mis en évidence que les marques n'engendraient qu'une moindre gêne pour les individus lorsque ces dernières ne représentaient pas plus de 2 % de leur poids dans l'air. Cette règle est communément adoptée dans les études de migration et de marquage mais a été dépassée dans plusieurs études sans effet néfaste pour le poisson (CLAIREAUX & LEFRANCOIS, 1998 ; BROWN *et al.*, 1999 ; BARAS *et al.*, 2000). Les autres individus (< 550g) sont marqués d'un simple PIT-tag. Le marquage radio cible les grands individus qui sont vraisemblablement tous des géniteurs participant à la reproduction.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Interreg
FRANCE-SUISSE



Figure 28 : Capture des poissons par pêche électrique dans les habitats attractifs sur le plan piscicole ;
(a) pêche dans les embâcles sur la Laire ; (b) pêche dans les enrochements sur le parcours kayak sur l'Arve à
Annemasse ; (c) capture des poissons lors de la vidange de la passe à poissons de Chancy-Pougny ; (d) pêche des
embâcles sur le Giffre aval.

In fine, entre les mois de mai 2013 et février 2015, 53 jours d'échantillonnage (35 jours côté France et 18 jours côté Suisse) à 3 ou 4 opérateurs ont été nécessaires pour marquer l'effectif de poissons suivis. Les opérations de capture représentent un peu plus de 29 km de pêche de sondage en cumulé (**Figure 29**), 8 vidanges de passe et 2 opérations de piégeage.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

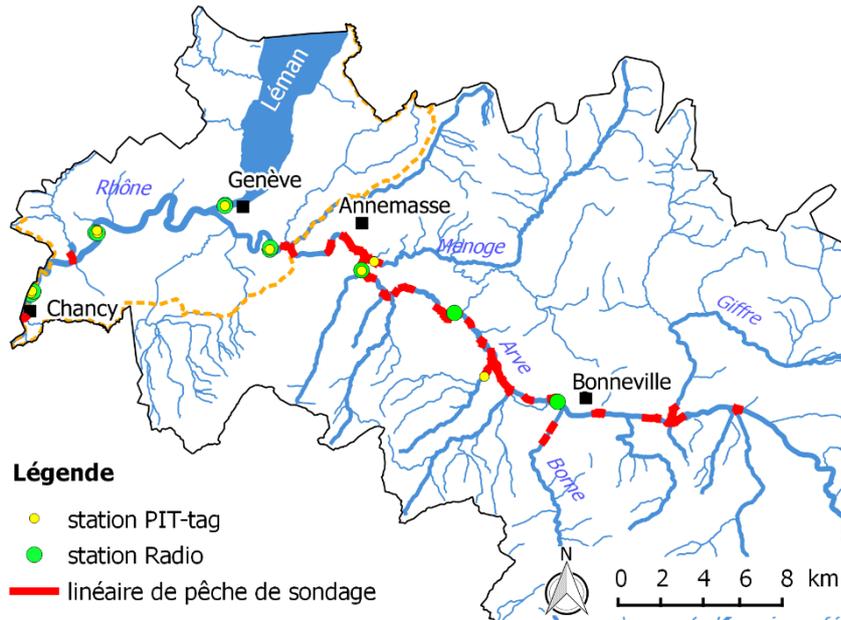
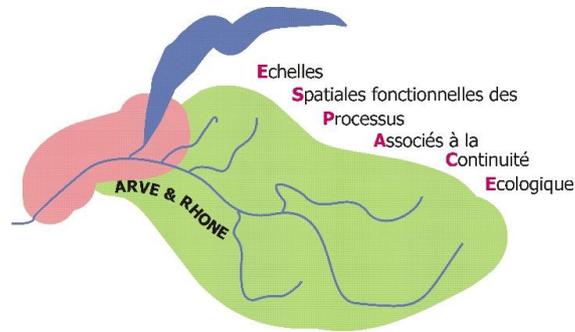


Figure 29 : Localisation des secteurs prospectés par pêche électrique de sondage pour capturer les poissons à marquer.

B. Le marquage

Le marquage est réalisé en anesthésie profonde. Pour ce faire, les individus sont endormis dans un bain d'eugénol à 10 % (solution extemporanée d'éthanol à 96° et d'huile essentielle de clou de girofle). La dose utilisée pour le bain d'anesthésique est 3 ml de solution d'eugénol à 10 % pour 10 l d'eau.

Une fois anesthésié (stade 4), l'individu est pesé, mesuré et deux prélèvements sont réalisés :

- 5 écailles sont enlevées sur une zone spécifique à chaque espèce (BAGLINIERE & LOUARN, 1987) en vue des futures analyses scalimétriques pour définir son âge ;
- un morceau de nageoire pelvienne est conservé dans un tube Eppendorf® avec de l'éthanol absolu en vue de futures analyses génétiques.

Ensuite, l'individu est positionné dans un bac de marquage avec sa tête immergée dans une solution d'anesthésique léger (1 ml d'eugénol à 10 % pour 10 l d'eau). L'oxygénation de la solution d'anesthésique est favorisée grâce à un système de bullage. Un système de circulation, gravitaire ou « mécanique » via une pompe de surface *SHURFLO Standard 8000-443-136*, permet un flux forcé (à l'aide d'un tuyau) de la solution d'anesthésique de la bouche vers les ouïes du poisson (**Figure 30**). L'individu marqué est en position ventrale pour la pose de l'émetteur externe et dorsale pour celle de l'émetteur interne.

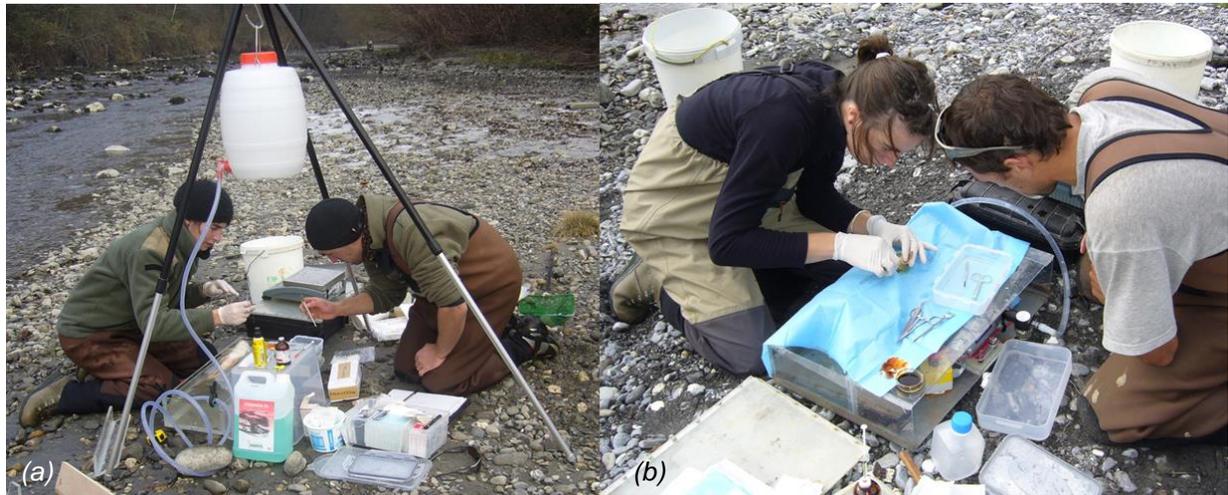


Figure 30 : Dispositif de marquage avec système d'oxygénation (a) par flux gravitaire ; (b) par une pompe de surface sur batterie.

Suivant le type d'émetteur utilisé, l'opération de marquage est différente.

Les **émetteurs externes** se positionnent sur le dos du poisson. La procédure de fixation (**Figure 31**) nécessite deux aiguilles droites hypodermiques (Terumo® Neolus® 18G x 1^{1/2}”) qui sont insérées à travers les muscles dorsaux afin d’y passer les deux câbles de fixation de l’émetteur. Une fois passés, et les aiguilles retirées, les câbles de fixation sont fixés à l’aide d’une contremarque (rondelle plastique) qui est bloquée par le sertissage d’un « sleeve ». Enfin, la réalisation d’un nœud d’arrêt, sécurisé par un collage à la colle Ethyl-cyanoacrylate, permettent de sécuriser la pose de l’émetteur. L’émetteur, ses câbles, les aiguilles ainsi que les plaies engendrées par le marquage sont désinfectés avec une solution antiseptique de Povidone iodée (Bétadine® dermique 10%).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

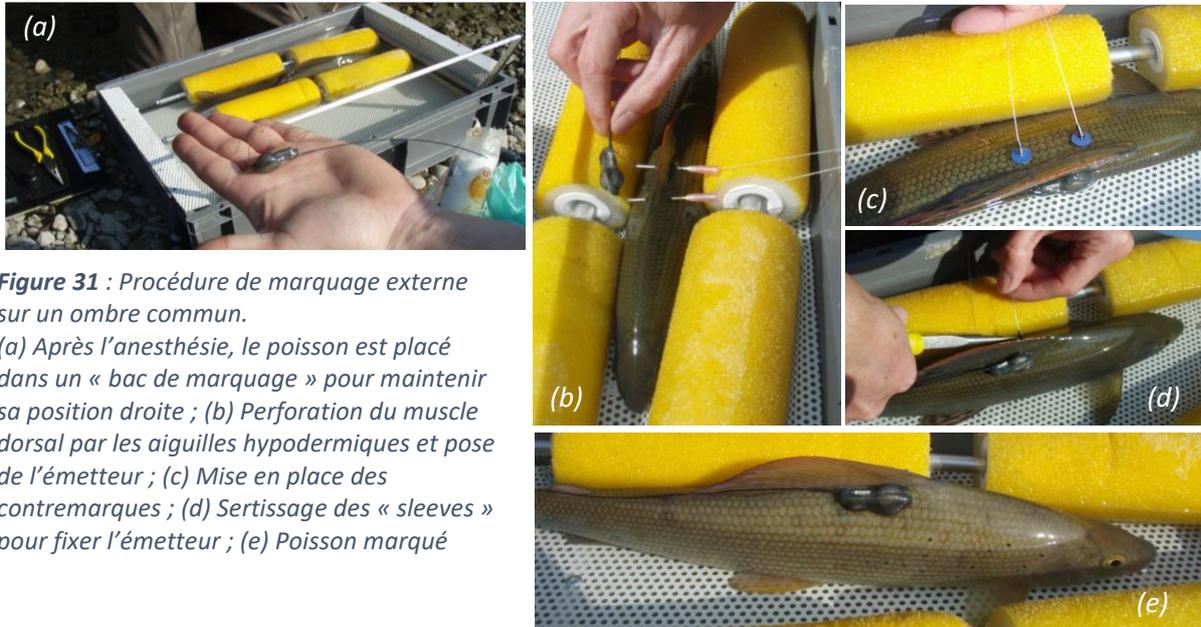
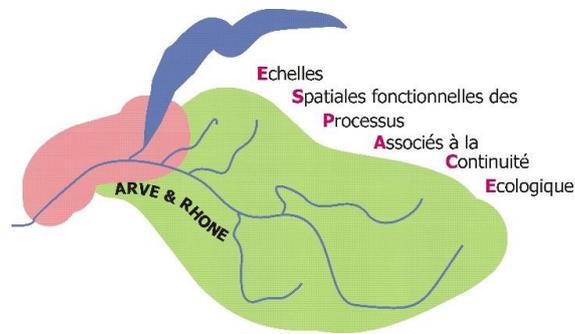


Figure 31 : Procédure de marquage externe sur un ombre commun.

(a) Après l'anesthésie, le poisson est placé dans un « bac de marquage » pour maintenir sa position droite ; (b) Perforation du muscle dorsal par les aiguilles hypodermiques et pose de l'émetteur ; (c) Mise en place des contremarques ; (d) Sertissage des « sleeves » pour fixer l'émetteur ; (e) Poisson marqué

Les **émetteurs internes** nécessitent une opération chirurgicale plus lourde (**Figure 32**). Des précautions sanitaires et de désinfection sont prises pour minimiser le risque d'infection :

- port de gants stériles de chirurgie non poudrés,
- désinfection du matériel dans un bain de Stéranios 2 % puis rinçage à l'eau stérile,
- positionnement d'un champ stérile sur le bac de marquage pour isoler le matériel stérile.

Une incision de 2 à 3 cm est faite dans la partie ventrale juste en arrière de la ceinture pelvienne à l'aide d'un bistouri (manche N°3) muni d'une lame courbe (N°12) et d'une sonde canulée afin de ne pas endommager les tissus internes du poisson. L'émetteur est introduit dans la cavité générale du poisson, puis glissé au niveau de la ceinture pelvienne de manière centrale ce qui limite le déséquilibre du poisson. L'incision est refermée avec au minimum 3 points de suture (points de chirurgien) réalisés à l'aide d'une aiguille courbe 3/8 T 22 mm pointe diamant munie d'un monofilament résorbable en glyconate (longueur 70 cm, 3/0).

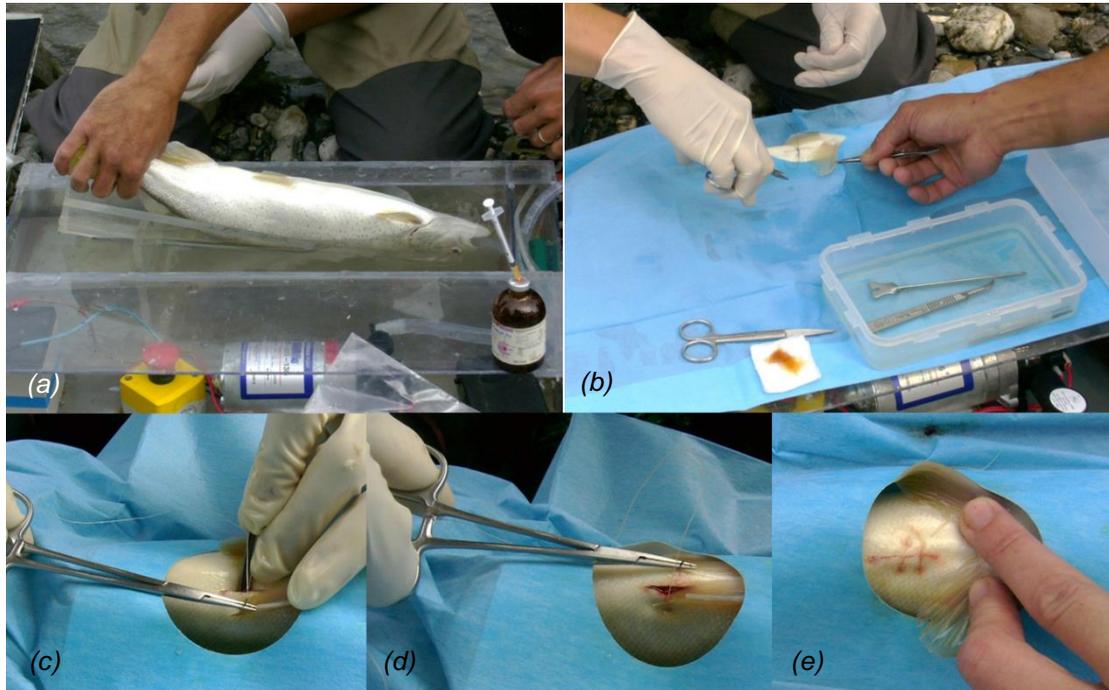
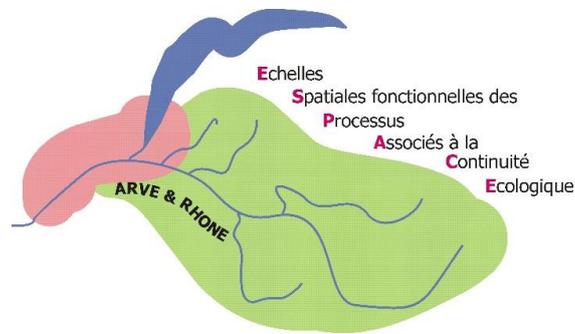


Figure 32 : Procédure de marquage pour l'implantation d'un émetteur radio interne.

(a) truite fario anesthésiée prête pour l'opération de marquage ; (b) champ opératoire stérile pour minimiser les risques d'infection liés à l'opération ; (c) et (d) suture de l'ouverture avec du fil monofilament résorbable ; (e) points de suture terminés.

Pour limiter les infections post-opératoires, une injection d'antibiotique (Marbocyl 2%) est réalisée en intramusculaire à l'aide d'une seringue à insuline (Terumo® Myjecto® 27G x ½" - 0.4 x 12 mm ; 0.5 ml). La dose injectée est définie par la relation suivante : 0.3 ml pour 1 kg de poisson (com. pers. BERGE). Une seconde précaution est prise en appliquant une pommade antibiotique dermique (Forudine®) au niveau des zones incisées.

De manière conjointe à la pose de la marque radio, un marquage PIT-tag est réalisé. Ce dernier est désinfecté dans la Bétadine dermique 10 %, de même que le bistouri utilisé pour réaliser la petite incision (5 mm). Celle-ci est faite sur le ventre du poisson juste en dessous de la ceinture pectorale ou en arrière de la ceinture pelvienne si l'individu subit un marquage radio interne et permet l'insertion du tag dans la cavité générale du poisson. Le tag est glissé dans l'ouverture, à la main, verticalement dans un premier temps puis avec une inclinaison dirigée vers la queue ou la tête du poisson respectivement suivant la localisation de l'incision (**Figure 33**). Aucune suture n'est faite dans le cas d'un marquage PIT-tag seul.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

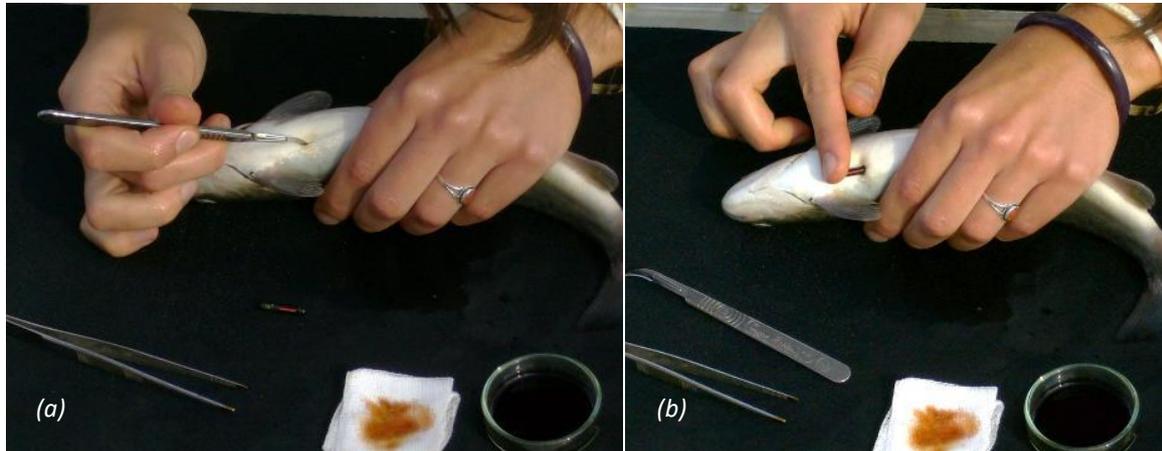
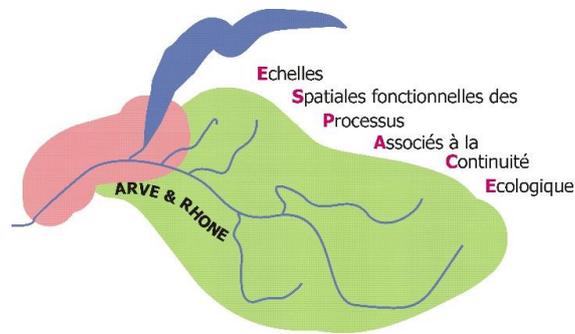


Figure 33 : Marquage interne d'une truite avec un PIT-tag de 23 mm ;
(a) Incision en position ventrale et centrale réalisée au bistouri juste en dessous de la ceinture pectorale ; (b) insertion du PIT-tag dans la cavité générale du poisson.

Après l'opération de marquage, l'individu est transféré dans un bac d'eau claire, fraîche et oxygénée pour le réveil. Une fois qu'il s'est redressé et a retrouvé son comportement normal, il est conservé en stabulation dans un vivier ou un second bac oxygéné avant d'être relâché à l'endroit de sa capture (côté France) ou à l'amont ou l'aval d'un barrage (côté Suisse).

6) Analyses génétiques des truites fario

Pour répondre aux premières hypothèses soulevées à l'issue des résultats de déplacements, une investigation sur le génome de toutes les truites prélevées côté France a été réalisée à l'INRA de Thonon-les-Bains. En effet, lors de l'étude INTERREG IIIA réalisée en 2006, il a été montré l'existence d'une population de truite autochtone (soit de souche méditerranéenne) peu introgressée dans la partie médiane et aval du Borne. Cette population a son importance puisque c'est la seule identifiée sur l'ensemble du bassin versant de l'Arve (CAUDRON *et al.*, 2006).

Ces analyses génétiques ont pu être intégrées dans un programme départemental d'analyses génétiques commandé par la FDPPMA 74 à l'INRA de Thonon-les-Bains. Le protocole d'extraction et d'analyse de l'ADN adoptés ici sont les mêmes que ceux adoptés par HARRANG *et al.* (2014).

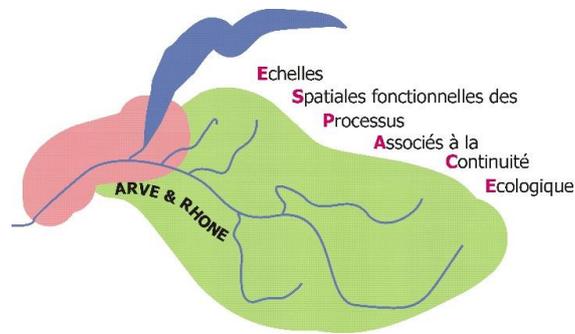
A. Extraction d'ADN et génotypage des individus de truite fario

Pour chaque individu, l'ADN est extrait avec le Kit Wizard® SV 96 Genomic DNA Purification System (Promega, USA) selon les recommandations du fournisseur. La concentration en ADN est ensuite mesurée à 260 nm et 280 nm au moyen d'un spectrophotomètre NanoDrop™ 1000 (Thermo Scientific). Le rapport des valeurs d'absorbance 260/280 nm a permis d'estimer la pureté de l'extrait.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Un ratio compris entre 1,6 et 1,8 dénote un extrait d'ADN de bonne qualité, c'est-à-dire sans contamination par des protéines ou par les produits utilisés pour l'extraction.

Les ADN extraits sont ensuite dilués à $8 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ et transmis à la société *LGC Genomics* (Hoddesdon, Royaume-Uni) pour amplification par PCR et génotypage de 5 marqueurs SNP¹⁵, avec la technologie KASP™ (*LGC Genomics*). Les caractéristiques des 5 marqueurs (Str541INRA, Str591INRA, OMM1105, OMM1154, OMM1164) sont présentées dans le **Tableau 8**.

Tableau 8 : Caractéristiques des marqueurs SNP utilisés pour le génotypage chez la truite commune *Salmo trutta*.

Marqueur	No Accession GenBank	Séquence des amorces (5' - 3')	Allèle Atlantique	Allèle Méditerranéen
Str541INRA		F: GCCAAAAGGAAATTG R: TTTTCTCCCTTGCA	-	T
Str591INRA		F: GCACACACAAGCAAG R: TCACACACACRCACA	T	C
OMM1105		F: TGGGATGAGTAGTAT R: ACATCAATATTAGGC	G	T
OMM1154		F: ATGGAGAGATCTGCG R: CAGGCARTCTGGCAG	G	T
OMM1164		F: ATATTGAGTAAAAG R: TAGCAAGATGTAACG	C	A

B. Analyse des données

Le caractère diagnostique des marqueurs permet de distinguer sans ambiguïté pour chaque marqueur l'origine atlantique (ATL) ou méditerranéenne (MED) des allèles obtenus.

Chaque individu a été caractérisé par un indice d'hybridation allant de 0 à 10 en fonction du nombre d'allèles ATL observés. Un indice de 0 correspond à un individu totalement MED et un indice de 10 à un individu totalement ATL.

7) Traitement des données et métriques calculées pour les déplacements et domaine vital

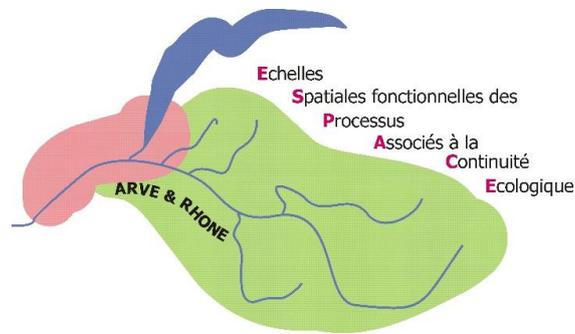
Pour calculer les différentes métriques de déplacements effectués par les individus suivis, il a été nécessaire de projeter l'ensemble des localisations pointées au GPS lors des prospections de radiopistage sur la ligne du réseau hydrographique cartographié par projection du point le plus proche et de les associer à un « Point métrique » (= **Pm**). Ce traitement s'est fait à l'aide des logiciels QGIS et Grass selon les étapes suivantes (**Figure 34**) :

¹⁵ Un marqueur SNP (= Single Nucleotide Polymorphism) correspond à la variation d'une seule paire de bases sur une séquence ADN donnée.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- i. projection des données brutes sur le réseau avec l'outil « v.dist » sous Grass ;
- ii. l'outil « joindre les attributs par localisation » (sous QGIS) permet de rattacher les données du pistage avec la ligne de projection ;
- iii. l'outil « extraction des nœuds » (sous QGIS) permet de garder le point projeté sur la ligne du réseau hydrographique ;
- iv. attribution du Point métrique P_m au point projeté par jointure. Les points métriques sont définis par des cercles de 1 m de diamètre qui composent la ligne du cours d'eau. Le $P_{m_{\min}} = 1$ se situe au niveau de la confluence et le $P_{m_{\max}}$ à la source. Une exception pour le Rhône où le P_{m_0} est à Culoz (dans l'Ain) ;
- v. définition de nouvelles coordonnées GPS pour les points projetés.

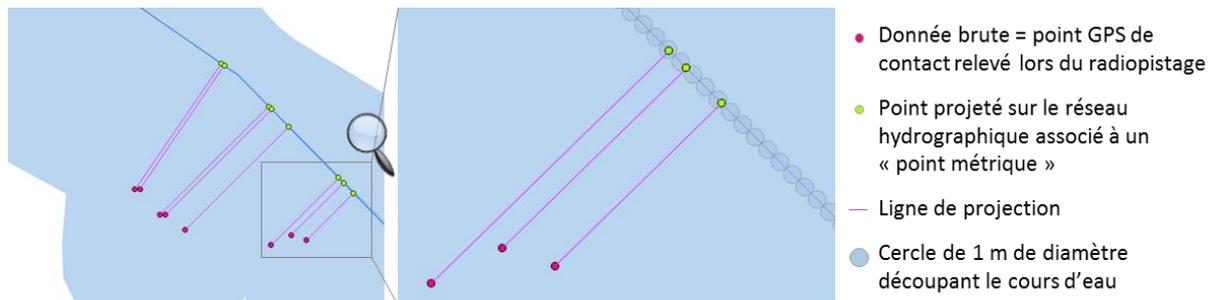


Figure 34 : Projection des points GPS issus des campagnes de terrain sur la ligne de réseau hydrographique cartographié et attribution d'un point métrique à chaque donnée de pistage.

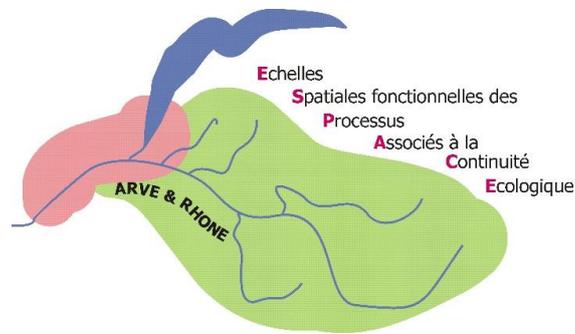
Les métriques définies ci-après permettent de caractériser les déplacements des espèces étudiées, auxquels peuvent être associés la notion de migration. Celle-ci est souvent rattachée à la distance parcourue, et le terme "migrateur" est réservé aux seuls animaux parcourant de très grandes distances (BARAS *et al.*, 2001), qui fait généralement référence aux « grands migrants » comme par exemple l'anguille ou le saumon atlantique. La migration est motivée par la « fitness génétique », qui, en l'absence des conditions de réalisation, va amener l'individu à effectuer de plus ou moins grands déplacements. Le terme sous-entend donc un changement de milieu et la distance associée va être très variable d'un milieu à un autre. Ces deux principes sont les piliers de la définition des termes « migrant » et « sédentaire ». L'enjeu de cette étude est de déterminer la part que représente chacune de ces catégories dans les effectifs de poissons suivis. Pour cela, **la qualité de migrant est attribuée à un individu ayant rempli au moins une des conditions suivantes** :

- avoir parcouru une distance supérieure à 2 km. En effet, les cours d'eau de l'Arve et du Rhône sont des grands milieux plutôt homogènes sur la zone d'étude ; leurs faciès d'écoulement peuvent mesurer plusieurs centaines de mètres. Ainsi, une distance parcourue inférieure à 2 km peut ne pas être qualifiée de « migration » car il n'y a pas forcément « changement de type d'habitat » ;
- avoir effectué un changement de milieu, comme par exemple un déplacement dans un autre cours d'eau (au-delà de la confluence). Ce déplacement peut être dû à la



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



volonté de trouver des conditions que le milieu d'origine ne possède pas (par exemple des zones favorables au frai) ;

- être resté bloqué à l'aval d'un grand barrage hydroélectrique suisse. En effet, les individus échantillonnés et marqués au niveau des passes à poissons ont été relâchés en amont des ouvrages ou entre 1,5 et 14 km en aval. Donc si un individu s'est présenté au pied d'un barrage, c'est qu'il a déjà parcouru une certaine distance et se trouve devant une difficulté à franchir.

Les individus entrant dans l'analyse des statuts « migrant » et « sédentaire » ont été suivis pendant une partie ou la totalité de la période de reproduction.

A. Distances au point de relâcher

Les distances au point de relâcher (d_i en m) ont été calculées pour chaque point de localisation en utilisant les points métriques hydrographiques (Pm en m) suivant la formule suivante :

$$d_{0 \rightarrow x} = Pm_{relâcher} - Pm_{localisation\ x}$$

Des conversions ont donc été effectuées entre les Pm des différents cours d'eau pour les ramener à un tributaire commun : l'Arve ou le Rhône.

B. Domaine vital

Le domaine vital (noté Dv en km) se définit comme l'aire utilisée par le poisson pour y effectuer toutes les phases de sa vie (nourriture, repos, reproduction,...). Il a été calculé par différence entre les distances extrêmes et celle du relâcher. La durée de suivi est donc très importante. De plus, le domaine vital est défini dans la littérature comme devant inclure 95 % des localisations de l'animal afin d'éliminer les localisations exceptionnelles (BLANC, 1997). Le choix a été fait de ne pas appliquer ce niveau de probabilité, le pas de suivi étant hebdomadaire (ce qui implique une sous-estimation des déplacements) et la durée de suivi entre 40 jours et 675 jours. Cette dernière englobe automatiquement une phase de reproduction.

$$Dv = d_{0 \rightarrow x}^{max} - d_{0 \rightarrow x}^{min} = Pm_{max} - Pm_{min}$$

C. Distances de déplacement

Grâce aux distances au point de relâcher préalablement calculées ou directement aux Pm , des distances parcourues ($d_{i \rightarrow j}$ en km) entre deux localisations ont été calculées par la formule suivante :

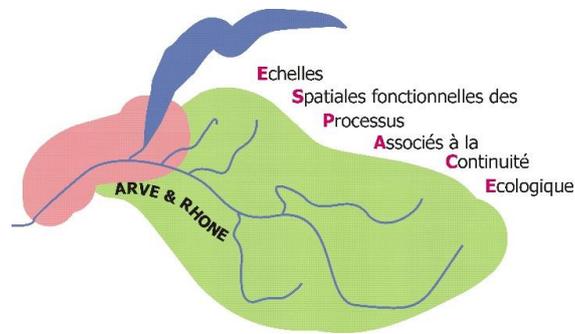
$$d_{i \rightarrow j} = D_{0 \rightarrow i} - D_{0 \rightarrow j} = Pk_i - Pk_j$$

Elles sont négatives en dévalaison et positives en montaison.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



D. Significativité des distances de déplacement

Grâce aux tests de précision effectués (Cf. § III. 2). B.), un « déplacement significatif » correspond à une distance supérieure à 150 m si Pm est issu d'une prospection à pied et 325 m si Pm est issu d'une prospection en canoë (précision appliquée à l'amont et à l'aval). Ces seuils permettent également de discerner les mouvements de migration des mouvements d'activité quotidienne.

E. Vitesses individuelles de déplacement

Bien que les prospections ont été effectuées à un pas de temps environ hebdomadaire, l'écart de temps entre deux localisations d'un même poisson n'est pas toujours constant et ceci pour diverses raisons (poisson non-localisé lors d'une prospection mais non « perdu », prospection à cheval sur deux semaines,...). L'étude des vitesses de déplacement v_{ti} (en m/j) plutôt que des distances permet de pondérer chaque déplacement par rapport au temps mis par le poisson pour effectuer celui-ci. La formule de calcul suivante a donc été utilisée :

$$v_{ti \rightarrow tj} = \frac{d_{i \rightarrow j}}{t_j - t_i}$$

Les vitesses sont négatives en dévalaison et positives en montaison. Les vitesses de pointe peuvent être supérieures aux valeurs v_{ti} . Les trajets réellement parcourus par un individu peuvent être supérieurs aux distances di et au temps séparant deux localisations. En effet, ces vitesses se basent sur un trajet à vitesse constante et continu dans le temps alors que le poisson peut avoir effectué des déplacements non détectés entre deux prospections. Il s'agit donc d'une vitesse minimale de déplacement.

F. Taux de déplacement

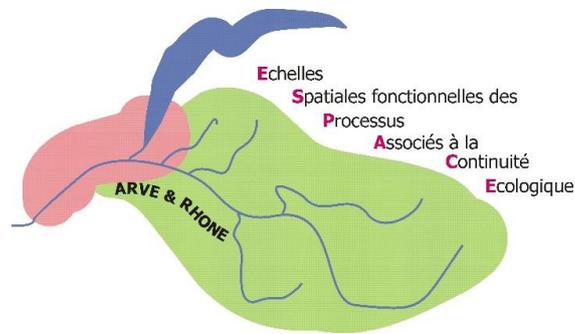
Le taux de déplacement $T_{dép}$ peut être défini par le nombre de poissons ayant effectué un déplacement significatif de montaison ou d'avalaison par rapport au nombre total de poissons détectés.

$$T_{dép. MONT} = \frac{Nb_{déplacement\ significatif\ de\ montaison}}{Nb_{déplacement\ total}}$$



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



8) Analyse des données et variables calculées pour l'efficacité de franchissement des ouvrages

Pour chacun des cinq ouvrages suivis (Arve : Arthaz et Vessy ; Rhône : Seujet, Verbois et Chancy-Pougny), des dispositifs télémétriques radio et PIT-tag ont été mis en œuvre afin de répondre à deux objectifs principaux :

- Evaluer l'efficacité de franchissement des passes-à-poissons existantes et identifier les éventuelles difficultés rencontrées par les poissons ;
- Décrire le comportement individuel des poissons radio-marqués lors de leur présence au pied des barrages afin de mieux comprendre les difficultés potentielles à utiliser la passe-à-poissons.

Dans ce but, un dispositif global composé de stations d'enregistrement fixes radio-télémétriques et PIT-tag a été installé sur ces ouvrages de l'Arve et du Rhône, et les antennes de détection ont été placées selon les caractéristiques de chacun des barrages afin de s'adapter à celui-ci et répondre au mieux aux objectifs.

A. Concept général d'étude du franchissement

Les différentes zones d'intérêt de chaque ouvrage ont été déterminées et équipées d'antennes radio, de manière à délimiter des secteurs dans lesquels les poissons marqués présents sont détectés (Cf **Figure 14** à **Figure 19**). L'étude du franchissement se compose donc de deux parties :

a. Etude du comportement au pied du barrage :

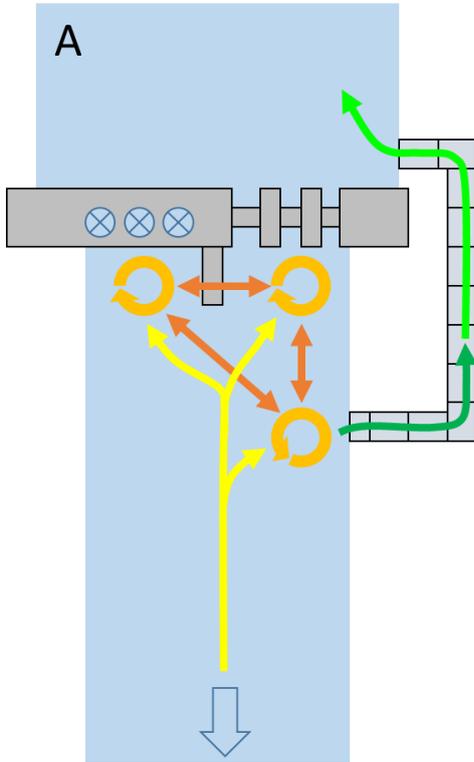
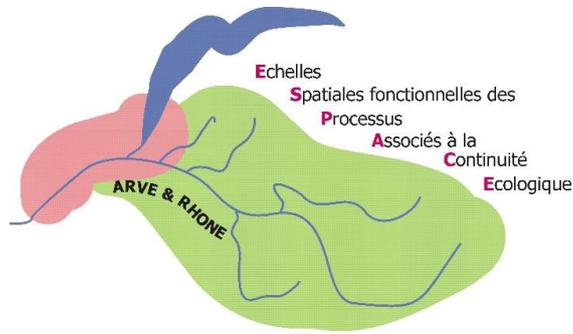
Afin de mieux comprendre comment le poisson agit face à la présence d'un ouvrage lors de sa migration, trois types principaux de comportement ont été évalués.

Le premier, appelé dans la présente étude « première approche », cherche à décrire vers quelle partie du barrage le poisson se dirige lorsqu'il arrive au pied de celui-ci, à savoir les turbines, les vannes ou l'entrée de la passe-à-poissons.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

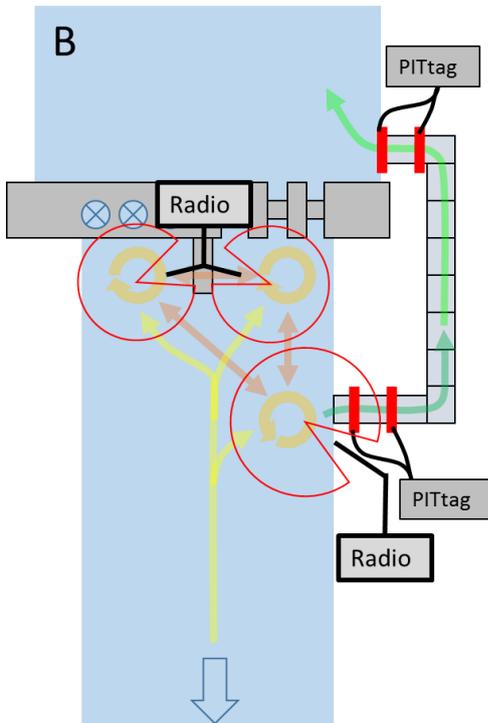


Comportement sous le barrage :

- "1^{ère} approche" █
- Temps d'occupation █
- Transitions █

Franchissement :

- "Attractivité" █
- "Franchissabilité" █
- Temps de franchissement



Comportement sous le barrage :

- "1^{ère} approche" █
- Temps d'occupation █
- Transitions █

Radio-télémetrie

Franchissement :

- "Attractivité" █
- "Franchissabilité" █
- Temps de franchissement

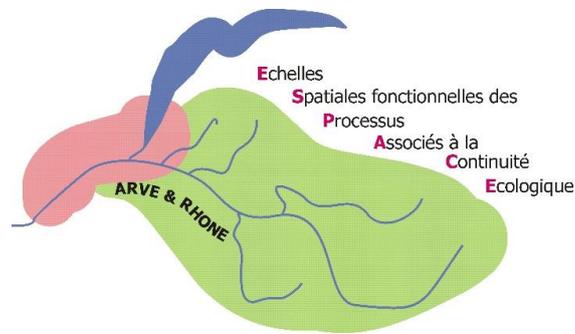
PIT-tagging

Figure 35 : Paramètres étudiées (A) et dispositif-type de détection radio et PIT-tag équipant les ouvrages (B).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Le second paramètre pris en compte est le temps de présence par secteur de détection. Ceci permet de rendre compte du temps passé par le poisson sur une zone donnée ou sur l'ensemble des zones de détection (temps de présence sous le barrage).

Le troisième paramètre prend en compte les transitions entre chacune des zones, permettant de décrire la mobilité des poissons au pied des ouvrages. Il permet de calculer où les mouvements se font majoritairement, ainsi que leur fréquence.

L'estimation de ces paramètres comportementaux repose sur l'ensemble des individus, marqués par radio, qui se sont approchés des ouvrages équipés.

b. Probabilité de franchissement de l'aménagement :

Pour cette analyse, nous avons dissocié deux étapes dans la séquence de franchissement :

- « Attractivité » de l'aménagement : celui-ci prend en compte la probabilité qu'un individu, présent au pied de l'ouvrage, détecte l'entrée de la passe à poissons et y pénètre ;
- « Franchissabilité » : une fois le poisson entré dans la passe, ce paramètre détermine la probabilité que celui-ci arrive à parcourir l'ensemble de l'aménagement et en sorte par l'amont.

Chacun de ces paramètres décrit une phase précise du processus de franchissement, permettant d'identifier si un éventuel problème de franchissement d'un aménagement est dû à son attrait ou à la difficulté à le parcourir jusqu'en amont.

Le produit de ces deux paramètres donnera la probabilité de franchissement de l'ouvrage (probabilité qu'un poisson qui se présente au pied de l'aménagement trouve son entrée et le franchisse complètement).

L'estimation de ces paramètres de franchissement repose non pas sur l'ensemble des individus marqués par PIT-tag (individus marqués sur le secteur aval, auxquels s'ajoutent les individus dont la venue de secteurs plus en amont ou en aval a pu être déterminée), mais sur un sous-échantillon corrigé de celui-ci. En effet, la prise en compte de l'ensemble des individus présents sous un barrage (individus marqués) fausserait fortement ces estimations. Parmi les individus marqués, une fraction de l'échantillon n'effectue pas de migration, et ne cherche donc pas nécessairement à franchir un ouvrage. Aussi, l'effectif sur lequel reposent ces estimations de franchissement est le nombre d'individus marqués par un PIT-tag présents sous un ouvrage donné (voir **Figure 46**, corrigé par la part de migrants au sein des populations étudiées. La quantification de la part de migrants a été définie à partir des radiopistages et systèmes de détection radio-téléométriques installés sur les ouvrages (cf. III. 4). Le **Tableau 9** récapitule les taux de migrants par espèce pour le Rhône et l'Arve sur lesquels sont implantés les ouvrages hydroélectriques qui font l'objet d'une analyse plus poussée sur la problématique du franchissement.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

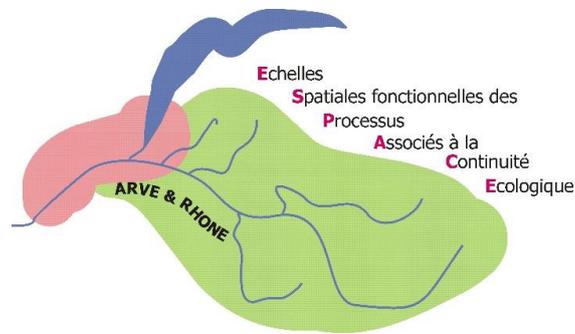


Tableau 9 : Taux de « migrants » défini par espèce et par cours d'eau d'après les résultats des investigations sur les déplacements (III. 4).

		Rhône	Arve
Barbeau fluviatile	BAF	90%	44%
Chevaine	CHE	53%	27%
Truite fario	TRF	(a)	50%

(a) L'effectif de truites équipées d'un émetteur radio étant réduit sur le Rhône, il n'a pas été défini de taux de migrants spécifique pour ce cours d'eau. Le taux de l'Arve a été extrapolé pour le Rhône dans la partie "Résultats"

9) Mesures des paramètres environnementaux

Les conditions hydrologiques et thermiques ont pu être caractérisées durant la période d'étude grâce à un certain nombre de stations existantes ou mises en place pour le programme ESPACE. Afin de caractériser le comportement des poissons suivis, les variables caractéristiques du milieu (ou abiotiques) ont été confrontées aux métriques de déplacements.

A. Débit

Douze stations hydrologiques gérées par la DREAL Rhône-Alpes, l'OFEV, les SIG et la FDPPMA 74 mesurent les débits du Rhône, de l'Arve ainsi que de ses principaux affluents (Figure 36). La DREAL, l'OFEV et les SIG ont fourni des données au pas de temps 10 min et journalier. Concernant la station gérée par la FDPPMA 74, elle a consisté à relever des mesures horaires de pression via 2 sondes *Hobo U20-001*, l'une placée dans l'eau et l'autre à l'air. La différence des 2 mesures à un instant *t* permet de définir la hauteur d'eau. En parallèle, 24 relevés des couples hauteur/vitesse ont été réalisés sur un transect au droit de la station de mesure pour définir la courbe de tarage propre à la station. Cette dernière permet de déterminer le débit horaire à partir des hauteurs d'eau enregistrées (Annexe 4).

B. Température

Côté France, des relevés horaires ont été effectués grâce à des thermographes (*Onset HOBO*) sur 11 stations suivies par la FDPPMA 74. Côté suisse, les données utilisées sont fournies au pas de temps 10 min et journalier par l'OFEV et récoltées au droit des stations hydrologiques du Bout du Monde à Genève pour l'Arve et aux Rippes à Chancy pour le Rhône (Cf Figure 36).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

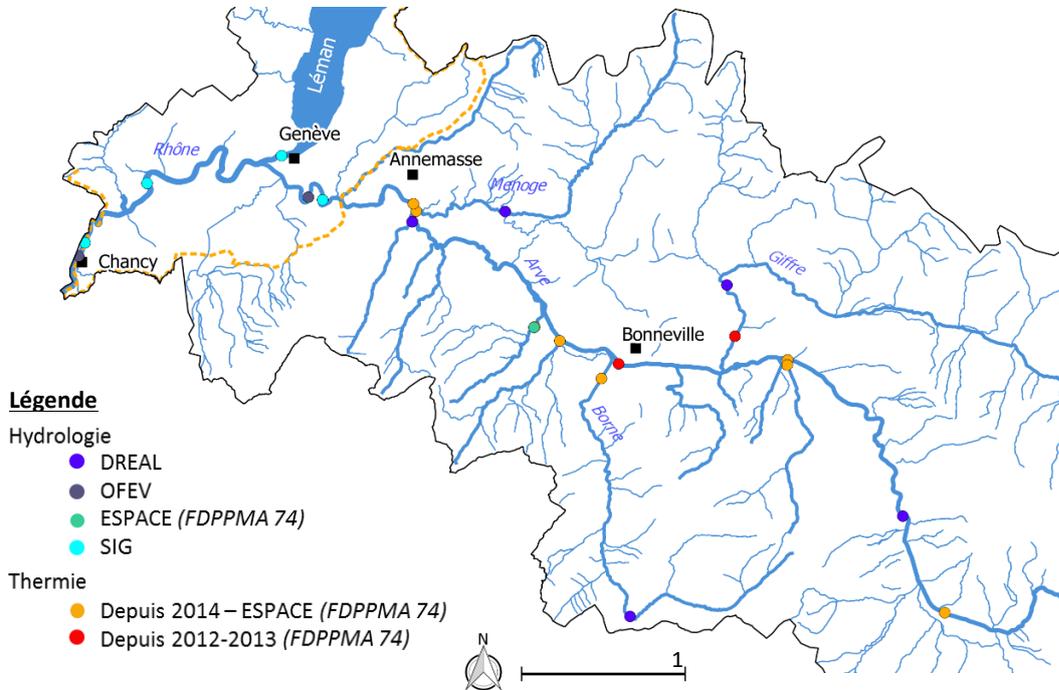
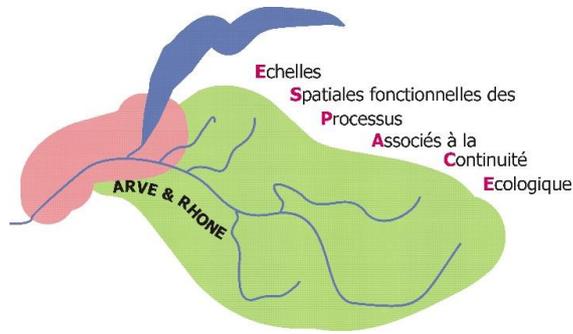


Figure 36 : Localisation des stations de suivi de débit et de température utilisées pour caractériser les conditions abiotiques du milieu, associées aux producteurs des données.

C. Variables caractéristiques retenues pour les analyses

A partir des données fournies, des variables de débit et température ont été sélectionnées (**Tableau 10**) pour étudier l'effet des variations environnementales sur le comportement de déplacement des poissons. Elles ont été définies pour chaque cours d'eau et chaque poisson analysé.

Tableau 10 : Variables caractérisant les conditions de débit et température.

Abbréviation (unité)	Définition
QM/n (m^3/s) ; TM/n ($^{\circ}C$)	Débit/Température moyen calculés entre 2 détections successives (*)
QMmax/n (m^3/s) ; TMmax/n ($^{\circ}C$)	Débit/Température moyen maximal sur la période entre 2 détections successives (*)
QMmin/n (m^3/s) ; TMmin/n ($^{\circ}C$)	Débit/Température moyen minimal sur la période entre 2 détections successives (*)

(*) variable calculée à partir des débits et températures moyens journaliers

10) Tests statistiques utilisés

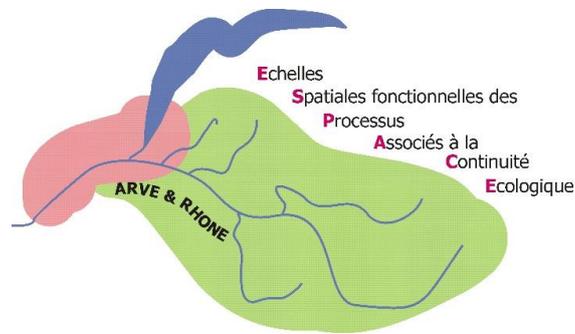
Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT 2015 (Addinsoft) en utilisant les tests non paramétriques suivants (il n'a pas été vérifié si les données suivaient la loi normale pour des effectifs > 30) :

- Le test de Kruskal-Wallis (KW) bilatéral (i) pour comparer la différence de taille, de poids et d'âge pour une même espèce entre les cours d'eau d'origine des poissons marqués ; (ii) pour comparer



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



les vitesses de déplacement journalières pour une même espèce mais pour des cours d'eau différents ;

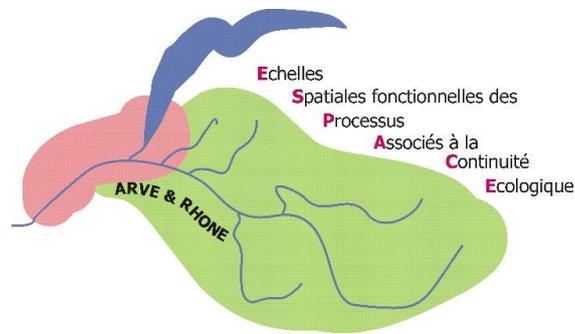
- le test de Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) unilatéral pour comparer une variable morphologique pour les poissons d'une même espèce mais originaires de cours d'eau différents ;
- le test de corrélation de Spearman (SPEARMAN) (i) pour évaluer le lien entre la taille du domaine vital et les variables morphologiques d'un individu et ce pour tous les individus analysés ; (ii) pour évaluer la relation des variables du milieu (température et débit) avec les métriques de déplacement ;
- la table de contingence du khi2 pour évaluer l'indépendance entre les opérateurs de marquage et le statut des poissons ; cela revient à tester l' « effet opérateur ».

Pour les paramètres où les effectifs disponibles étaient moindres, seuls des statistiques descriptives ont été utilisées. Ce fut malheureusement le cas pour l'ensemble des données comportementales et de franchissement, ne permettant pas une modélisation plus poussée de ces processus.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

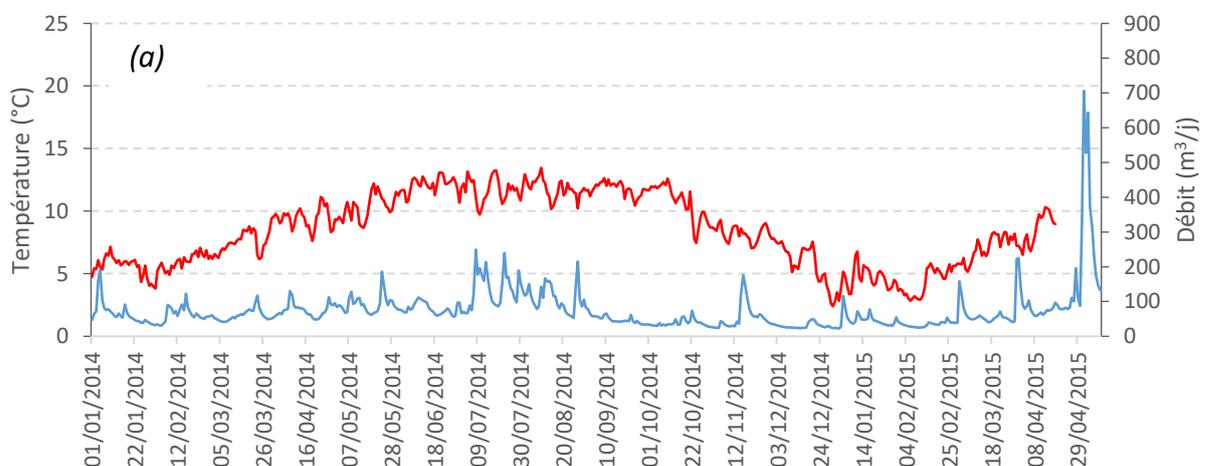


III. Résultats

1) Contexte environnemental lors des suivis

La **Figure 37** présente les débits (courbe bleue) et les températures (courbe rouge) de l'Arve (a), du Borne (b), du Giffre (c), de la Menoge (d) et du Rhône (e) du 1^{er} janvier 2014 au 30 avril 2015. Dans l'Arve, on observe de grandes variations de débit sur un pas de temps court. Les débits, très élevés en période estivale, sont dus à son régime nivo-glaciaire (fonte des glaces). Les régimes hydrologiques du Borne, du Giffre et de la Menoge sont quant à eux plus stables et suivent les mêmes tendances avec des débits plus élevés au printemps (régime pluvio-nival). Pour le Rhône, on n'observe pas vraiment de différence entre les saisons, car les débits varient très fortement de manière journalière du fait de son régime artificiel (influence des ouvrages liée à la production hydroélectrique).

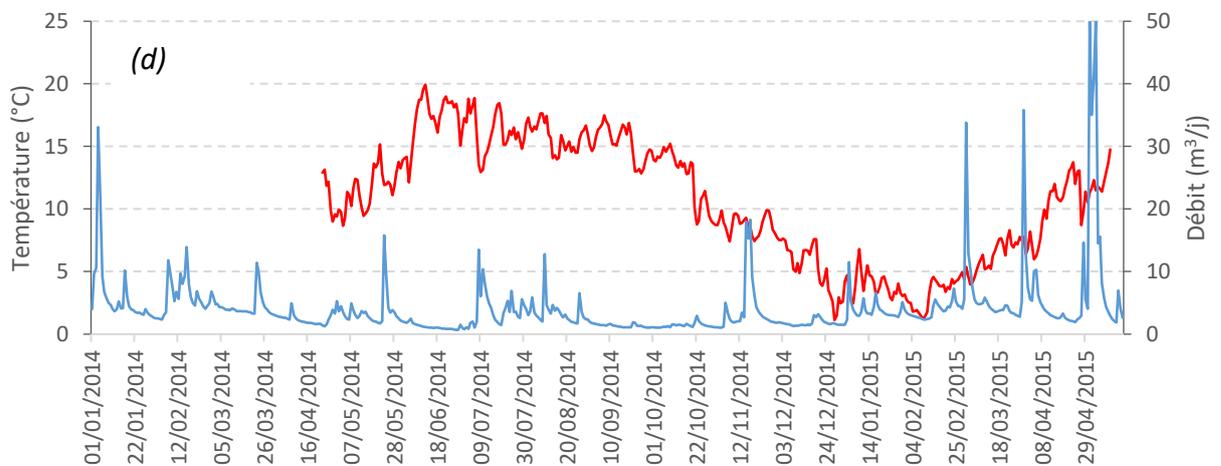
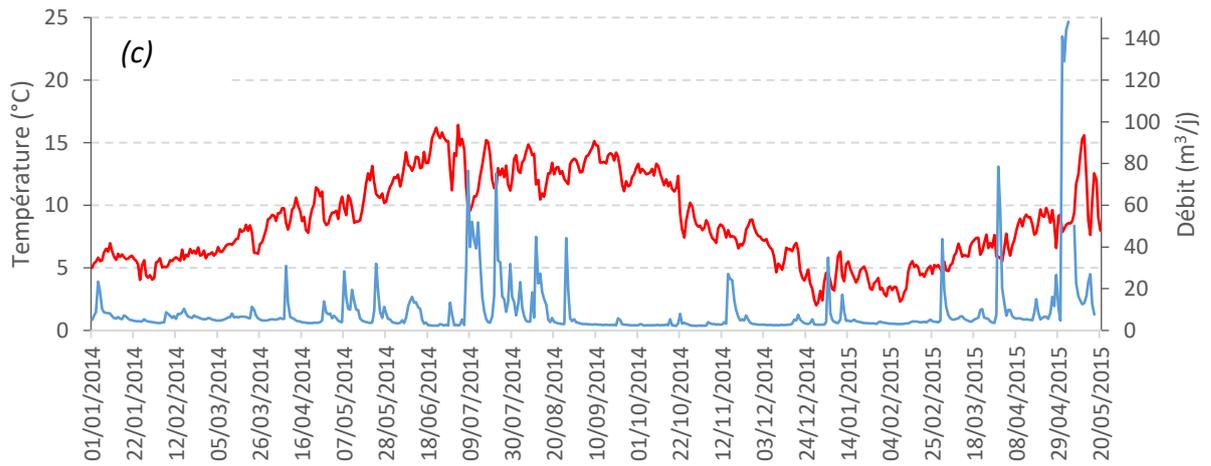
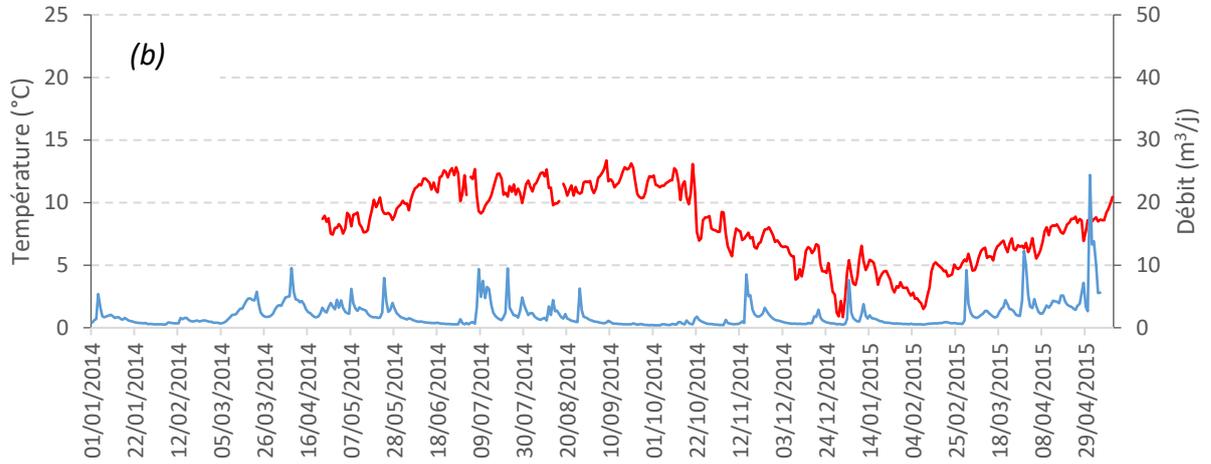
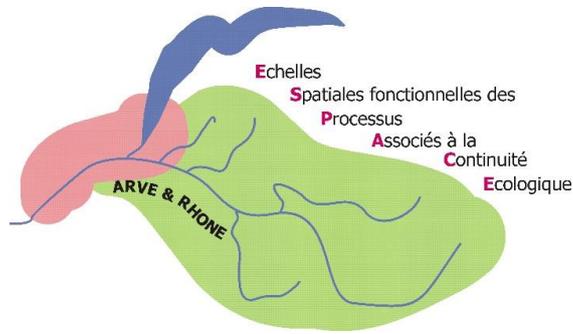
Concernant les températures de l'eau, elles suivent le schéma classique : élevées en été, basses en hiver. Notons toutefois que les températures de l'Arve ne dépassent pas les 14°C et l'amplitude saisonnière est faible : 2°C au plus froid et 14°C au plus chaud. Quant à celles de ses affluents, elles suivent les mêmes tendances, avec des températures bien plus élevées sur la Menoge (jusqu'à 20°C). Enfin, en ce qui concerne le Rhône, les températures sont très élevées en été (23°C) et plus faibles en hiver sans pour autant tomber en dessous de 5°C.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

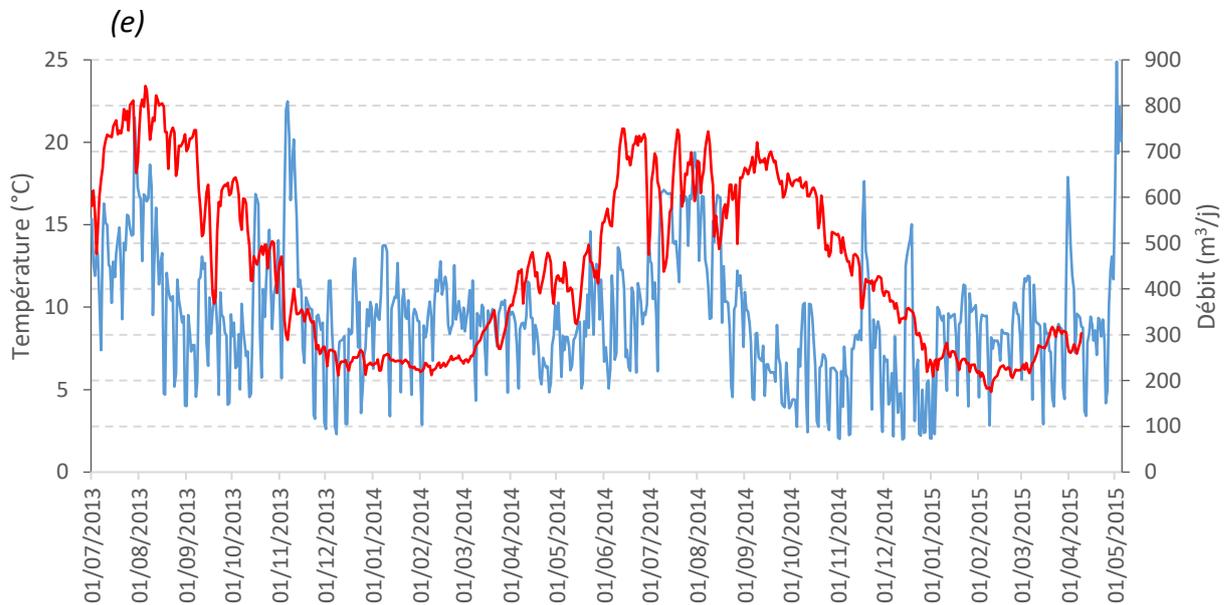
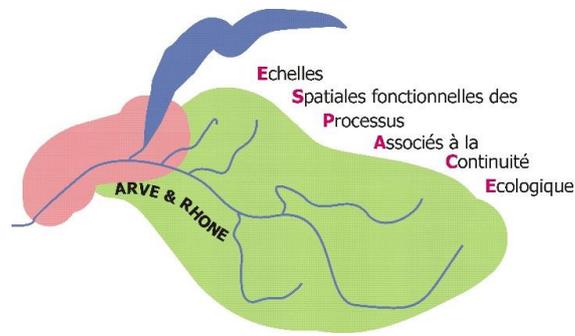


Figure 37 : Evolution des débits (courbe bleue) et des températures (courbe rouge) moyens journaliers de chaque cours d'eau (a : Arve ; b : Borne ; c : Giffre ; d : Menoge et e : Rhône) durant la période de suivi des poissons.

2) Analyses des biais méthodologiques

A. Efficacité des dispositifs télémétriques

a. Stations fixes équipées en radio-téléométrie

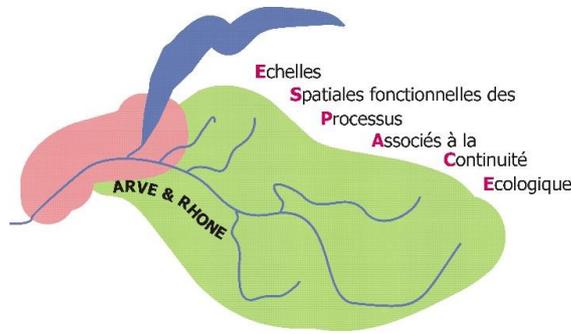
En France, les stations fixes radio n'avaient pour but qu'une aide et une acquisition de données supplémentaires par rapport aux prospections mobiles. En effet, deux d'entre elles (RFSCentrier et RFBOnneville) ne ciblent pas d'ouvrage mais sont simplement des points intermédiaires de passage sur le cours principal de l'Arve. Leur bon fonctionnement au cours du suivi était primordial pour optimiser l'efficacité des prospections de radiopistage hebdomadaire. Ces deux dernières ont rempli leur rôle pour 92% et 99% du temps de suivi (durée totale de fonctionnement 375 jrs) (**Figure 38**) ; leur dysfonctionnement étant dû à un problème d'alimentation (coupure d'électricité ou mauvaise manœuvre de l'opérateur). Pour la 3^{ème} station, celle d'Arthaz (RFAR), son état de fonctionnement a été légèrement moindre, soit 87% du temps (durée totale de fonctionnement 480 jrs) ; les 2/3 du temps de non fonctionnement venant d'un problème du récepteur et non de l'alimentation.

Ces défauts de fonctionnement ont pu engendrer un manque ponctuel mais sans conséquence pour les résultats finaux de déplacements puisque majoritairement alimentés par les données de radiopistages. Quelques données supplémentaires auraient pu être acquises sur des déplacements journaliers vers l'amont des cyprinidés à l'aval d'Arthaz aux printemps 2014 et 2015 au moment de



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



leur période de reproduction avec un fonctionnement optimal de RFAR, et au mois de novembre 2014 à RFSC au moment des forts déplacements de truites pour le frai.

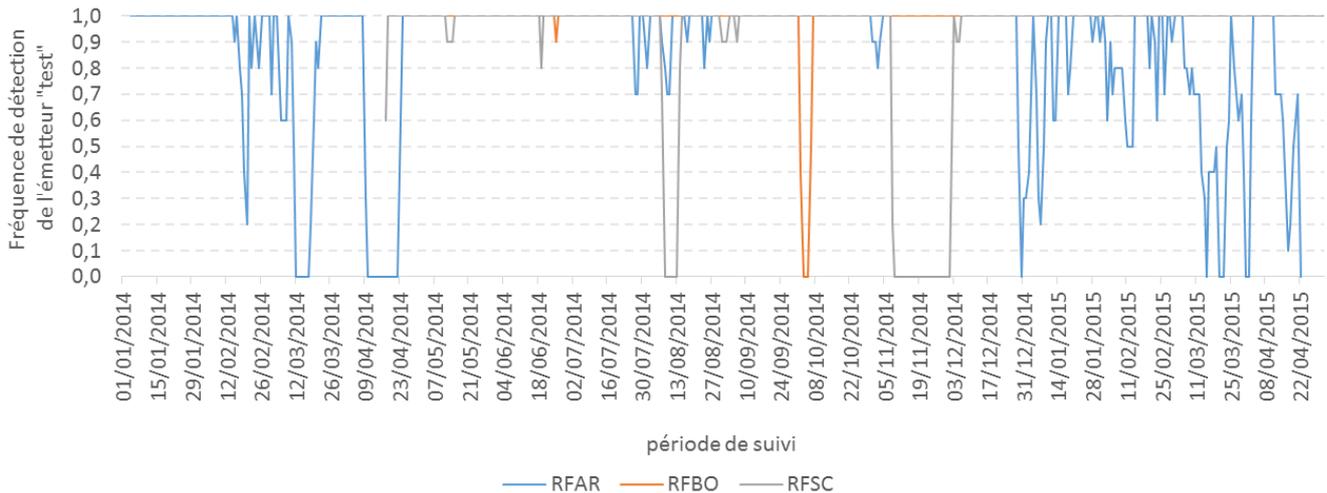


Figure 38 : Etat de fonctionnement des 3 stations fixes radio françaises ; $f = 1$ quand la station est fonctionnelle durant 1 jour complet et $f < 1$ quand la station ne fonctionne pas durant quelques heures.

b. Les stations fixes PIT-tag

Côté France, les stations pour l'évaluation d'un franchissement d'ouvrage ont fonctionné à l'optimum 90% du temps de suivi (**Figure 39**). Malheureusement, elles ont subi des dommages (dysfonctionnement du lecteur ou arrachement des antennes suite à une crue) au moment de pics de remontée, la 1^{ère} quinzaine de septembre pour PTAR et fin novembre – début décembre pour PTNS. Il est à noter qu'un petit nombre d'individus, notamment des truites, ait pu passer à ces périodes en ces 2 points de passage. Pour les autres interruptions de fonctionnement de ces 2 stations, le manque d'information est négligeable.

De plus, en dehors des périodes de panne, ces deux systèmes sont continuellement à leur optimum de fonctionnement (pas de perte de données sur l'une des antennes).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

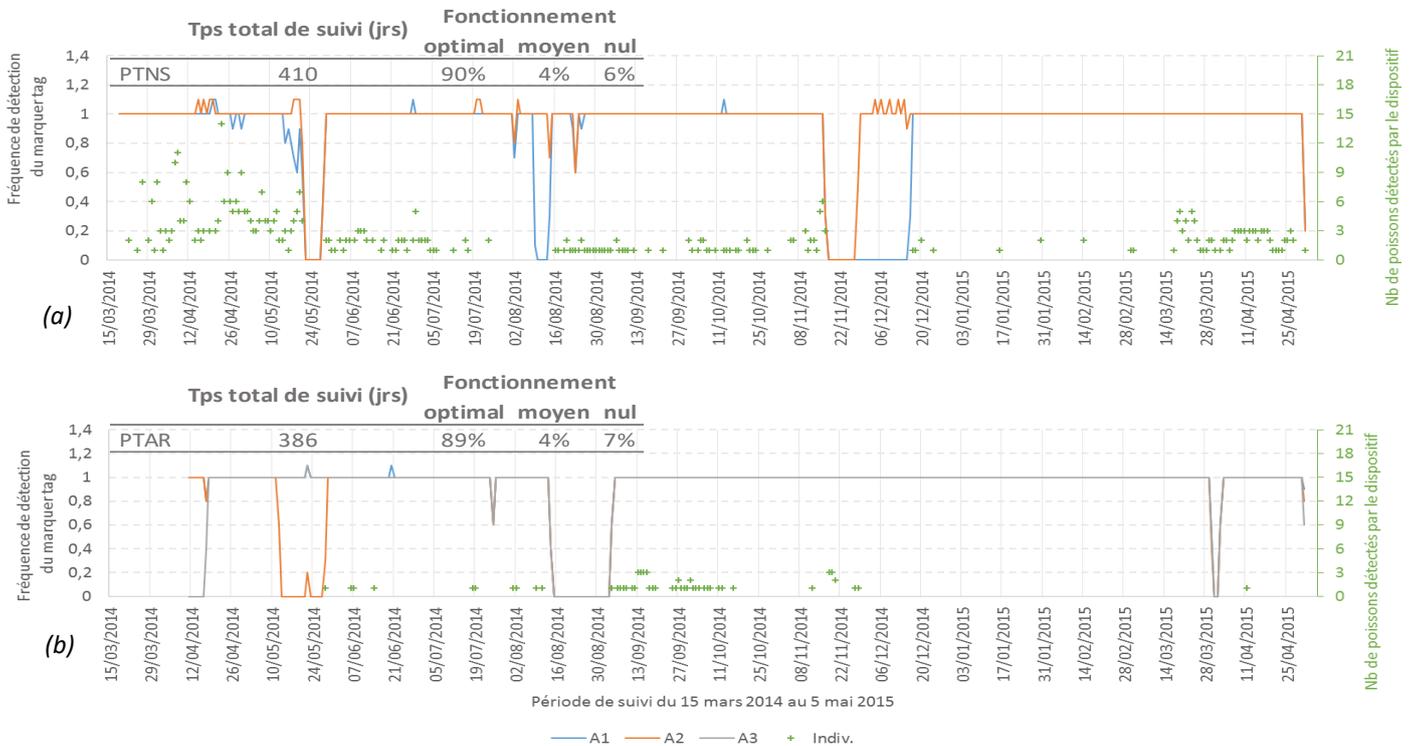
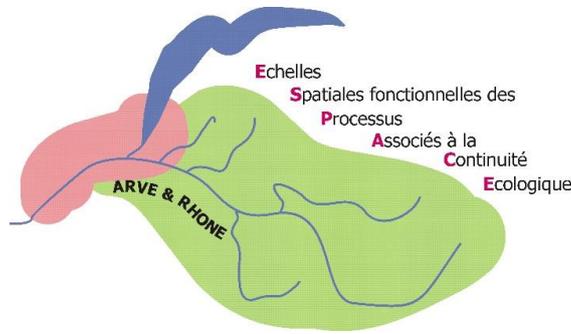


Figure 39 : Efficacité du fonctionnement de chaque antenne composant les dispositifs PIT-tag de suivi. (a) au niveau du pont de la RD19 sur le Nant de Sion – PTNS ; (b) au niveau de la passe à poissons d’Arthaz - PTAR, mis en relation avec les effectifs d’individus détectés par ces dispositifs

La station sur la Menoge aval n’avait pas pour but d’évaluer un franchissement mais plutôt de quantifier un flux de géniteurs migrants de cyprinidés et d’ombre commun remontant sur cet affluent pour se reproduire. Ce site de suivi a été mis en place tardivement, au mois de mars 2015 et a arrêté de fonctionner suite à la crue vicennale de la Menoge du 1^{er} mai ($Q_{i\max} = 95.3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un QMJ = 48.9 m^3/s le 01/05/2015 à la station V0235020 à Bonne). Durant ce laps de temps de fonctionnement (51 jours), ce site a subi 2 crues (la 1^{ère} fin mars, quinquennale avec un QMJ = 32.5 m^3/s) qui ont arraché toutes les antennes, celles-ci étant situées sur une zone de radier où les éléments sédimentaires sont fortement mobilisables (**Figure 40**). Cette station compliquée en maintenance, a un taux de fonctionnement optimum plus faible (80%) mais a apporté des résultats très intéressants et satisfaisants.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

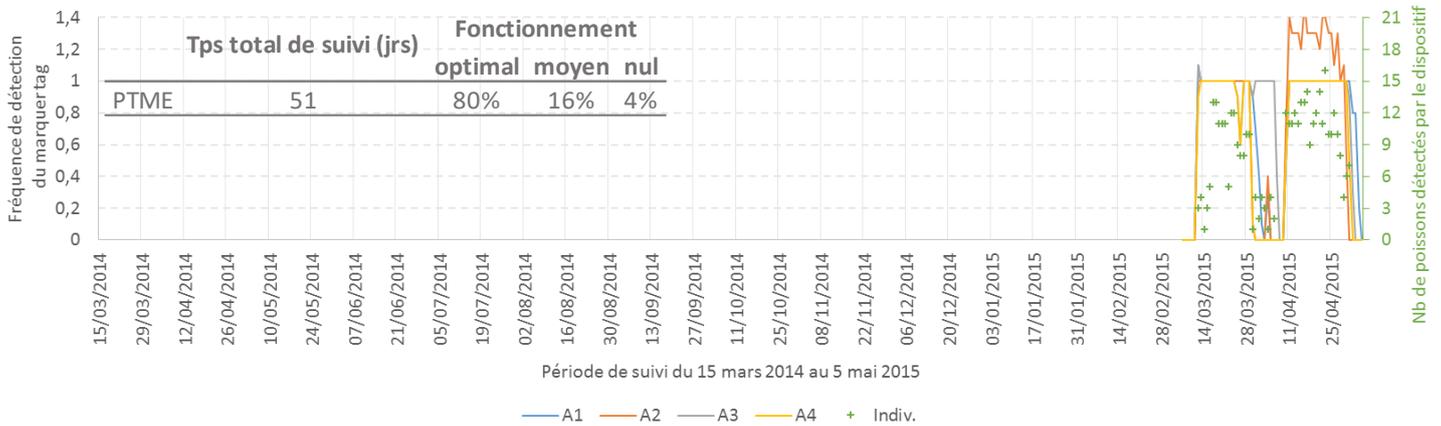
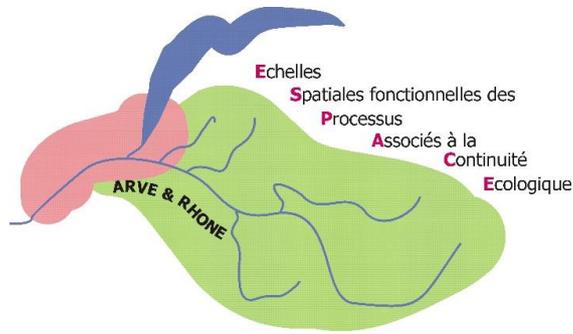


Figure 40 : Efficacité du fonctionnement de chaque antenne composant le dispositif PIT-tag de la Menoge aval à Vétraz-Monthoux - PTME, mis en relation avec les effectifs d'individus détectés par ces dispositifs.

Côté Suisse, l'efficacité de fonctionnement des installations PIT-tag sur les ouvrages de Chancy-Pougny et Verbois a pu être également estimée (**Figure 41**). Pour Chancy-Pougny, les antennes aval ont été fonctionnelles durant 92.7 % du temps, permettant un suivi précis des entrées et sorties par l'aval de la passe-à-poissons. En revanche, les antennes amont n'ont fonctionné que durant 37.8 % de la période d'étude. Les raisons de ce dysfonctionnement des systèmes de détection restent malheureusement partiellement indéfinies, et il est suspecté que la structure même du barrage en amont de la passe en soit à l'origine. En effet, la maintenance du site a démontré que l'origine n'était ni matérielle (boîtiers de détection) ni due à l'alimentation électrique. Plusieurs boîtiers de détection successifs ont subi des avaries et dommages, et leur remplacement (à 4 reprises) n'a malheureusement pas réglé le problème. De plus, l'ajout d'un onduleur, qui devait protéger le boîtier de détection de coupures courtes ou de surtensions n'a pas résolu le problème du dysfonctionnement du système de détection. L'hypothèse restante est que cette station, placée sous une arche où se trouvent de nombreuses conduites électriques, subit des contraintes électrostatiques importantes, conduisant à des détections plus faibles et au mauvais fonctionnement à long terme de l'appareillage mis en place. Pour pallier à ce dysfonctionnement, ont été considérés comme ayant franchi les poissons qui n'ont pas été détectés comme dévalant la passe (station aval) et qui n'ont pas été recapturés lors des vidanges de la passe-à-poissons réalisées tout au long de l'étude (ainsi qu'à sa clôture).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

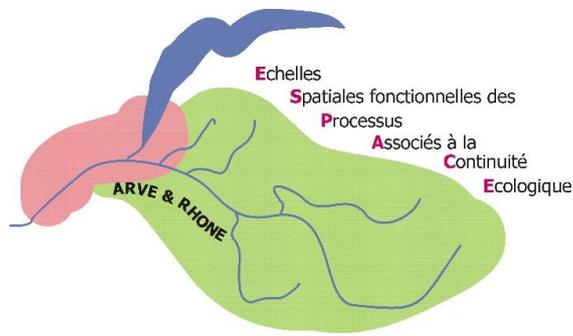


Figure 41 : Efficacité du fonctionnement du dispositif PIT-tag des ouvrages de Chancy-Pougny (A) et Verbois (B).

Sur l'ouvrage de Verbois, les systèmes de détection PIT-tag mis en place ont parfaitement rempli leur rôle, puisque leur temps de détection, totalisent un fonctionnement pour 91.2 et 98.9 % du temps (respectivement pour les stations aval et amont ; **Figure 41**).

Pour toutes ces stations, et à l'exception de la station située en amont de la passe-à-poissons de Chancy-Pougny, ces systèmes de détection fonctionnent quasi-continuellement à leur optimum (fréquence de fonctionnement journalier de 1.0, **Figure 41**).

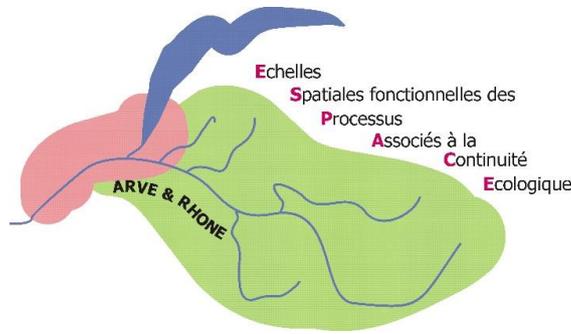
Concernant enfin les stations des ouvrages de Vessy et du Seujet, un dysfonctionnement des marker-tag plus ou moins longtemps après leur installation, combiné à une position difficile d'accès sans couper le fonctionnement des échelles à poissons, n'ont pas permis d'évaluer un taux de fonctionnement représentatif. Durant ces périodes de non fonctionnement du marker-tag, des tests réguliers réalisés avec un tag-test au bout d'une corde et passé dans les antennes, ont montré leur fonctionnement régulier, et permettent d'espérer un fonctionnement globalement satisfaisant de celles-ci.

De plus, des tests réguliers de la distance de détection ont montré sur l'ensemble des stations que l'efficacité de détection des antennes est restée bonne tout au long de l'étude et estimée à 95 %. Ces tests consistaient à faire passer un PIT-tag « témoin » dans les antennes et vérifier qu'il soit effectivement détecté.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



B. Taux de détection et précision de localisation des émetteurs en radiopistage

Les **taux de détection** sont équivalents pour les 2 modes de prospection, soit de 97 % en moyenne. On peut donc considérer que tout poisson présent sur le linéaire prospecté a été détecté lors des multiples prospections. Sur la **Figure 42**, les taux de détection « canoë » et « à pied » ont par conséquent été globalisés, et mis en relation avec les conditions hydrologiques et de conductivité de l'eau sur le cours principal de l'Arve pour en évaluer leur impact sur le taux de détection. En effet, plusieurs auteurs (FREUD & HARTMAN, 2002 ; DAVID & CLOSS, 2001 ; VELLE *et al.* 1979 in LUCAS & BARAS, 2000) ont mis en évidence l'impact des facteurs du milieu (température qui croît, conductivité > 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, profondeur > 5m) sur l'intensité du signal qui diminue en fonction des facteurs évoqués. Le début de l'automne (P38) marque une hausse de la conductivité et une baisse des débits. A partir de cette période, le taux de détection varie entre 90 % et 100 %. C'est au cours de l'été, lorsque le débit dépasse 100 m^3/s , que le taux de détection observé n'est pas optimum (entre 67 % et 86 %). Les forts débits semblent avoir plus d'influence que les valeurs de conductivité voisines ou supérieures à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

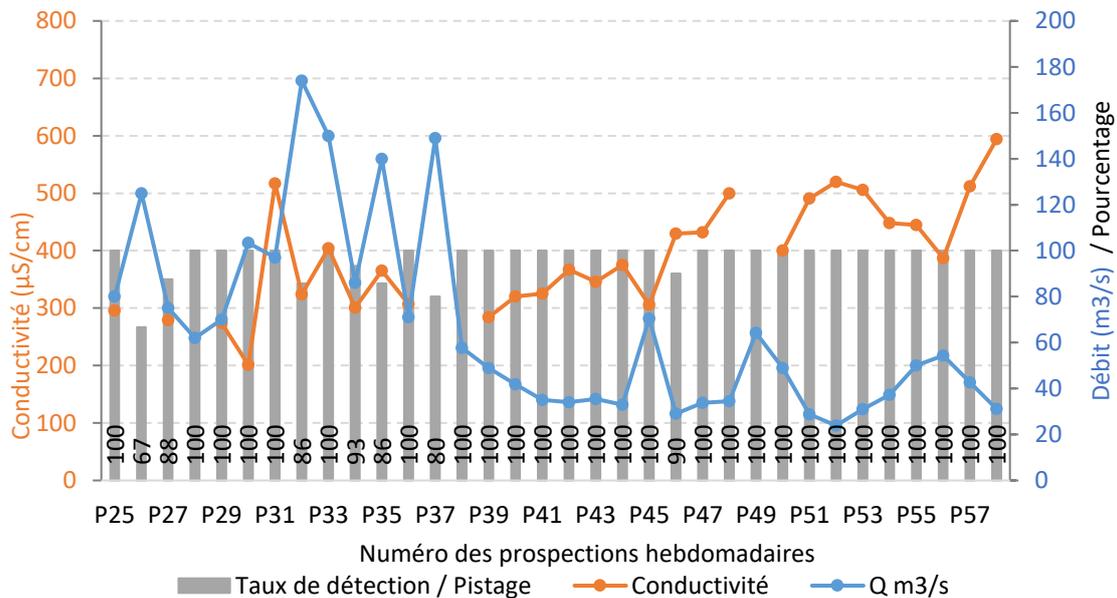


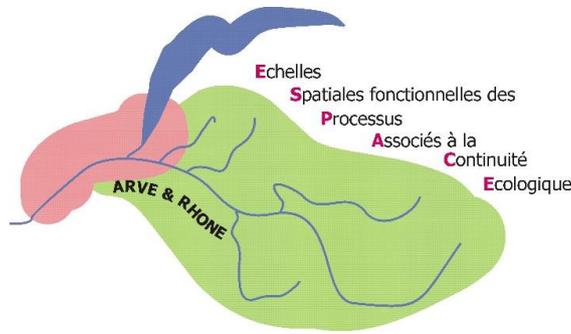
Figure 42 : Taux de détection hebdomadaire global (indifférencié selon le mode de suivi) entre juin 2014 (P25) et janvier 2015 (P58) mis en relation avec le débit et la conductivité de l'Arve.

La **distance de détection** a été calculée pour chaque pistage comme étant la distance entre la localisation réelle de l'émetteur-test (donnée par la position GPS lors de sa pose) et la localisation hebdomadaire faite par l'opérateur depuis la berge lors du pistage à pied ou depuis le canoë. Ainsi, puisque l'émetteur lesté n'a pas bougé, les distances maximales en amont et en aval résultant de ces tests constituent les distances en-dessous desquelles on ne peut pas être certain que l'individu suivi se soit déplacé. Ce sont les « marges d'erreur » de localisation d'un émetteur.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



On estime que, pour le pistage à pied, le positionnement des poissons est effectué avec 75 m d'erreur aussi bien en amont qu'en aval. En canoë, cette marge d'erreur s'évalue à 250 m en amont et 75 m en aval (valeur négative) (**Figure 43**). Ces valeurs sont données pour un intervalle de confiance à 95 %. Pour valider le déplacement d'un poisson entre 2 contacts, il faut au moins que les 2 positions soient éloignées de 150 m pour un poisson contacté à pied et de 325 m pour un poisson contacté en canoë. En-dessous de ces valeurs, il est impossible de savoir si le poisson s'est réellement « déplacé » ou si la différence de positions relève du manque de précision des localisations. Cette marge d'erreur permettra de calculer par la suite les taux de mobilité pour une espèce et un cours d'eau donné.

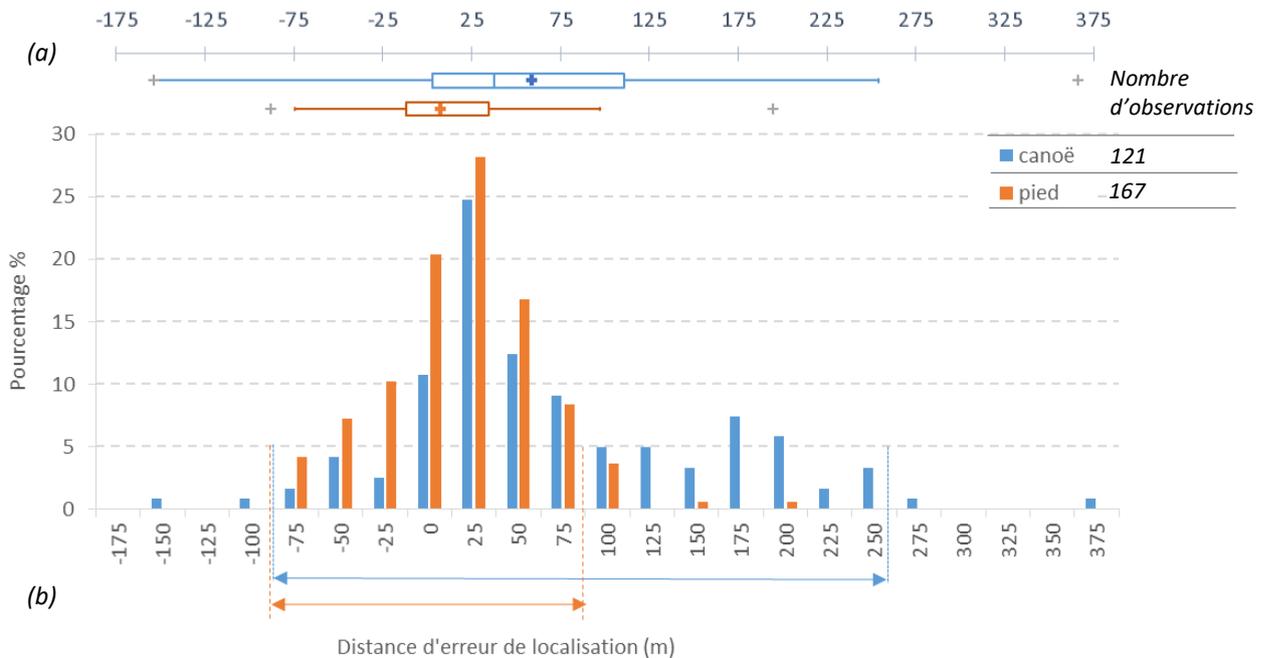


Figure 43 : Distances de détection (en m) définies pour un panel de 14 émetteurs-tests localisés lors des prospections hebdomadaires en mode à pied et en canoë. Répartition des données (a) en box-plots avec la médiane symbolisée par la croix de couleur, la moyenne par la barre verticale et les valeurs extrêmes par les croix grises ; (b) en histogrammes.

C. Biais opérateur

a. Les prospections mobiles de radiopistage

Les émetteurs-tests fixes ont également permis de vérifier si tous les opérateurs intervenant lors des prospections de pistage engendraient des données comparables. En effet, 11 opérateurs différents (8 pour la France et 3 pour la Suisse) sont intervenus pour effectuer les radiopistages. Les distances de détection définies pour les émetteurs-tests (ou marges d'erreur) ont été comparées pour chacun des opérateurs français pour les 2 modes de suivi (**Figure 44**).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

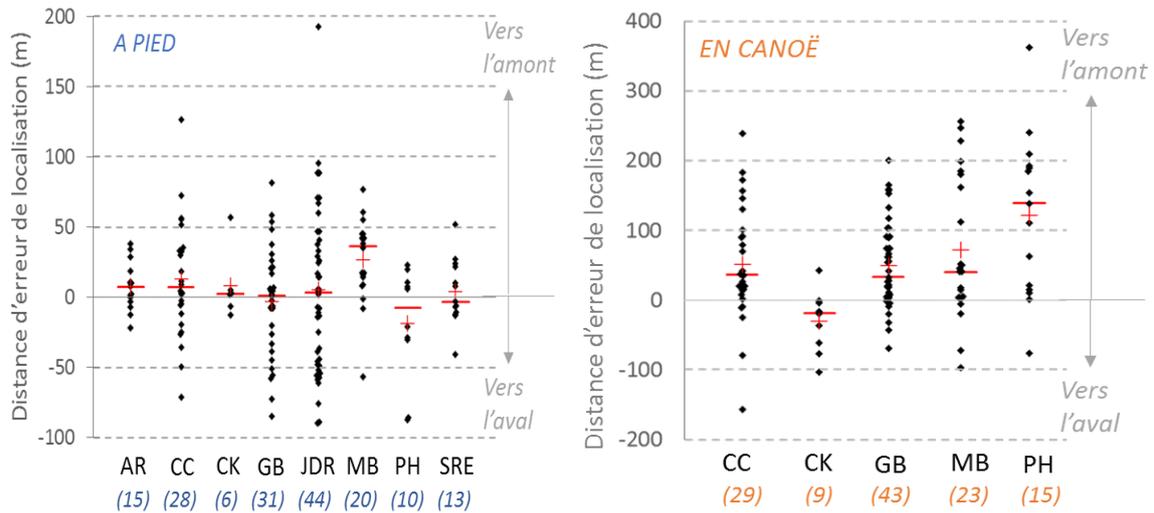
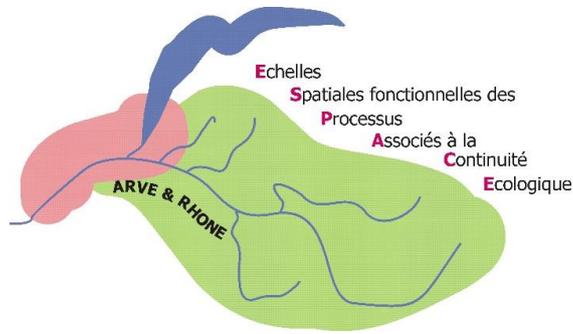


Figure 44 : Marge d'erreur de localisation des émetteurs-tests par chacun des opérateurs intervenant sur pour le radiopistage pour les 2 modes de prospection utilisés côté France.

Il n'y a pas de différence significative dans le positionnement des émetteurs « tests » entre les opérateurs pour la méthode à pied (KW ; $p > 0.05$) alors que pour la méthode en canoë, l'opérateur CK se distingue des autres (KW ; $p < 0,01$). Il est à noter que cet opérateur a réalisé le moins de prospections (représentant 3.6 % des observations en canoë). Ce résultat ne remet pas en cause l'homogénéité de la récolte de données puisqu'elle est assurée pour 96.4 % du jeu de données.

b. Le marquage radio

L'opération de marquage est la première étape d'une étude en télémétrie. C'est un point crucial pour le bon déroulement et la teneur des résultats qui s'en suivent. Le marquage radio est une opération chirurgicale lourde et intrusive pour le poisson. Dans cette étude, 3 opérateurs sont intervenus pour la réaliser, 1 côté Suisse et 2 côté France. Pour juger de l'acte chirurgical de chacun d'eux, un bilan a été réalisé sur les statuts finaux des individus marqués pour chacun des opérateurs (**Tableau 11**).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

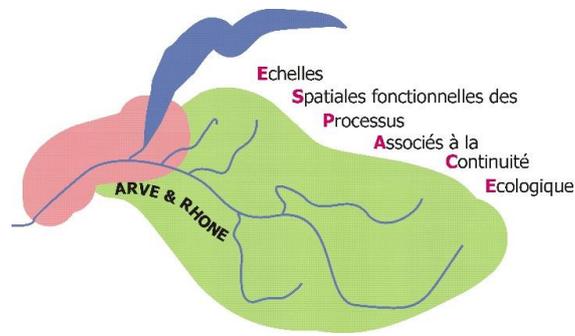


Tableau 11 : Effectifs et pourcentages des individus marqués répartis en fonction de leur statut final pour chaque opérateur français et suisse.
 Pour rappel la définition du statut final est évoqué **Tableau 6**. Les valeurs en gras sont significatives au seuil $\alpha=0.05$.

	Effectifs			Pourcentages		
	France		Suisse	France		Suisse
	CC	GB	DG	CC	GB	DG
mort	18	16	18	26%	28%	19%
disparu / mort post-marquage	8	10	15	12%	18%	16%
pêché	3	-	-	4%	0%	0%
perdu	18	14	44	26%	25%	47%
vivant	21	17	16	31%	30%	17%
Total	68	57	93			

Les 2 opérateurs côté France opèrent de manière « similaire » (χ^2 ; $p > 0.05$). En effet, les pourcentages d'individus disparu post-marquage / morts / perdus et vivants sont équivalents et non significativement différents. Il n'y a pas non plus de différence avec l'opérateur suisse quant aux pertes post marquage et aux mortalités. En revanche, à la fin du suivi, le nombre d'individus perdus côté Suisse est significativement plus élevé (2.75 fois) que pour la partie française et le nombre d'individus vivants et encore suivis plus faible ; cette différence indique un biais opérateur de l'intervenant suisse (χ^2 ; $p < 0.05$). Cette différence peut s'expliquer par plusieurs éventualités :

- le Rhône étant plus profond et plus large que l'Arve, la totalité du lit mouillé n'est pas prospectable en tout point. Un effet, le signal radio émis à une profondeur élevée est atténué et moins bien détectable en surface. LUCAS & BARAS (2000) estiment que cette atténuation intervient à partir d'une profondeur de 5 m. Ainsi la retenue de Verbois, caractérisée par une profondeur moyenne de $11.4 \text{ m} \pm 3$ [min = 5.9 m ; max = 17.6 m] (GRIMARDIAS *et al.*, 2012) a pu accueillir en certains points des individus marqués qui sont restés non inaperçus lors des prospections¹⁶ ;
- la fréquence des radio-pistages sur le Rhône n'a pas été hebdomadaire à partir du dernier trimestre 2014, mais plutôt mensuelle. Ces suivis moins réguliers ont pu occasionner la perte d'individus (cf. voir **Tableau 6** pour les hypothèses de perte).

3) Bilan des marquages

Au total, 1 779 poissons ont été équipés d'un PIT-tag et 219 d'un émetteur radio (152 internes et 67 externes) sur tout le territoire d'étude. La répartition par espèce pour les deux types de marques et l'évolution des effectifs marqués sont présentés **Tableau 12** et **Figure 45**.

¹⁶ La retenue de Verbois représente un linéaire de 8,3 km soit environ 1/3 du linéaire total de la zone d'étude sur le Rhône genevois.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

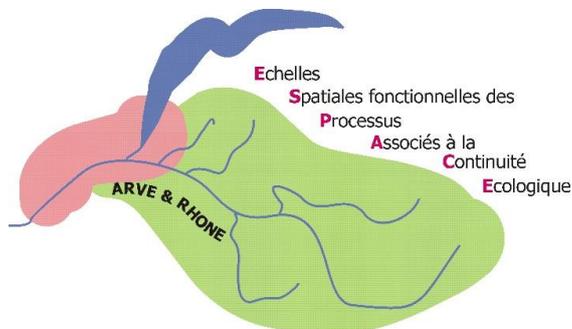


Tableau 12 : Effectifs de poissons marqués par espèce et par type de marque au cours du programme ESPACE.

Espèce	Code	Effectif marqué d'un PIT-tag	Effectif marqué d'un émetteur radio
Ombre commun	OBR	88	11
Truite fario	TRF	985 (dont 3 truites de lac)	66 (dont 2 truites de lac)
Barbeau fluviatile	BAF	181	65
Chevaine	CHE	525	77

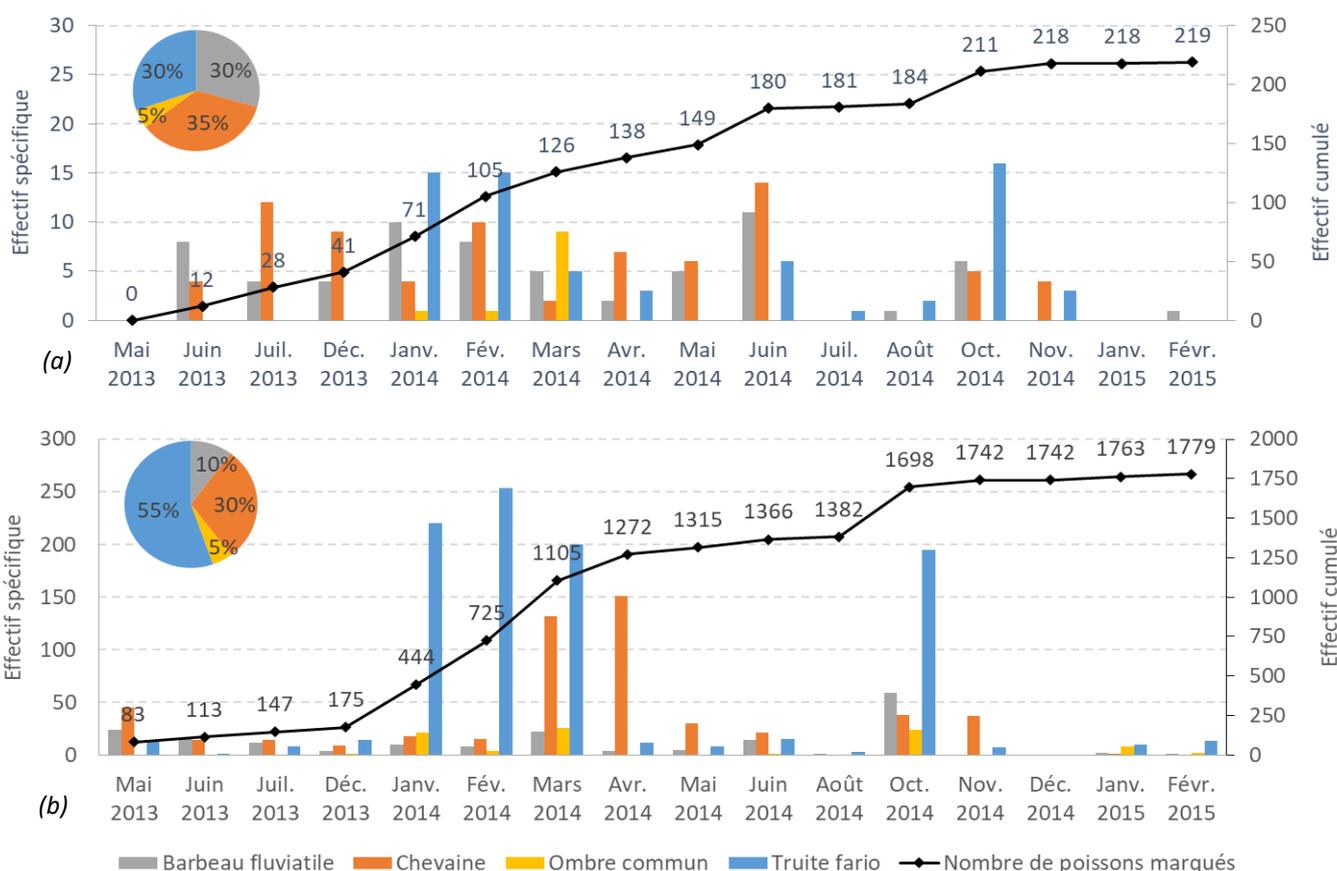


Figure 45 : Effectifs de poissons marqués par espèce et en cumulé sur toute la durée du programme et par les deux structures porteuses (a) avec les émetteurs radio ; (b) avec les PIT-tags.

Les cyprinidés sont davantage présents sur l'aval de la zone d'étude, à savoir le Rhône genevois, l'Arve jusqu'à Arthaz-Pont-Notre-Dame et la Menoge, tandis que la partie amont, notamment le cours principal de l'Arve, est davantage favorable à la truite fario (Figure 46). Les chevaines sont cependant bien représentés sur des affluents comme le Giffre et le Nant de Sion qui se situent en partie médiane de l'Arve. Les ombres communs ont été capturés sur les secteurs où subsistent encore des bras secondaires d'Arve, secteurs identifiés antérieurement par GADAIS (2012).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

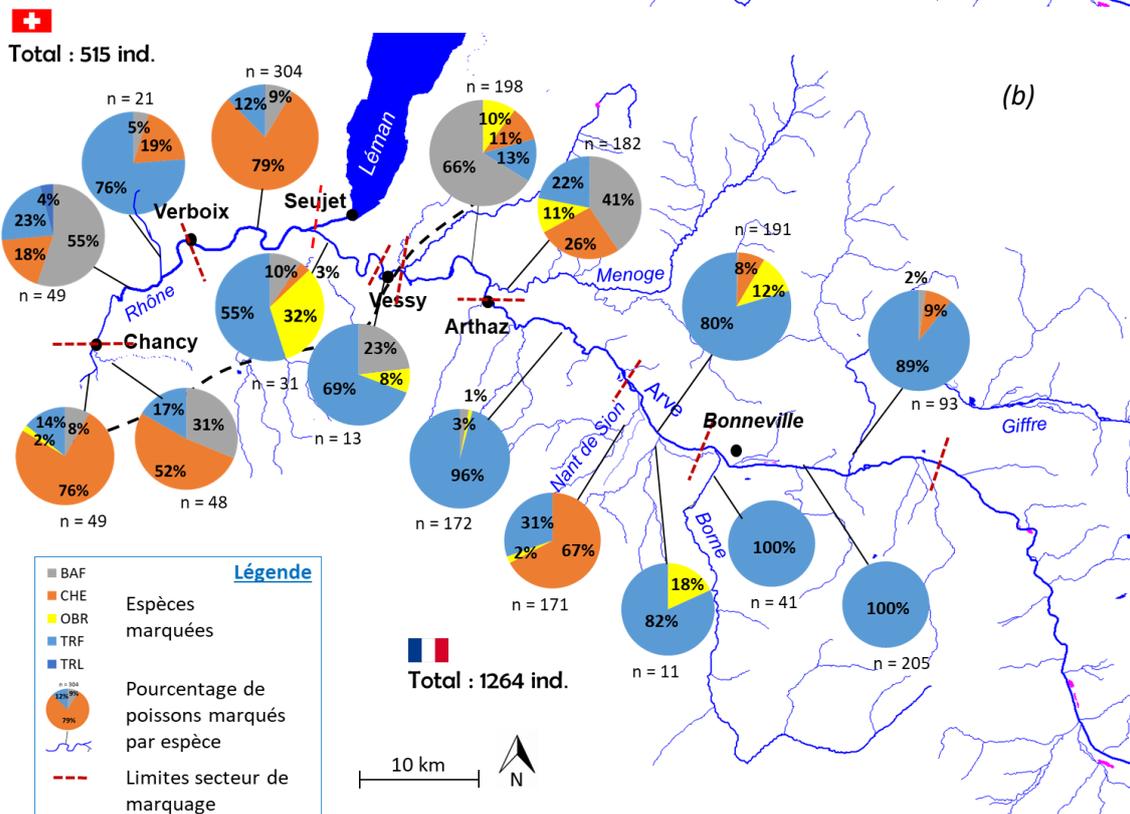
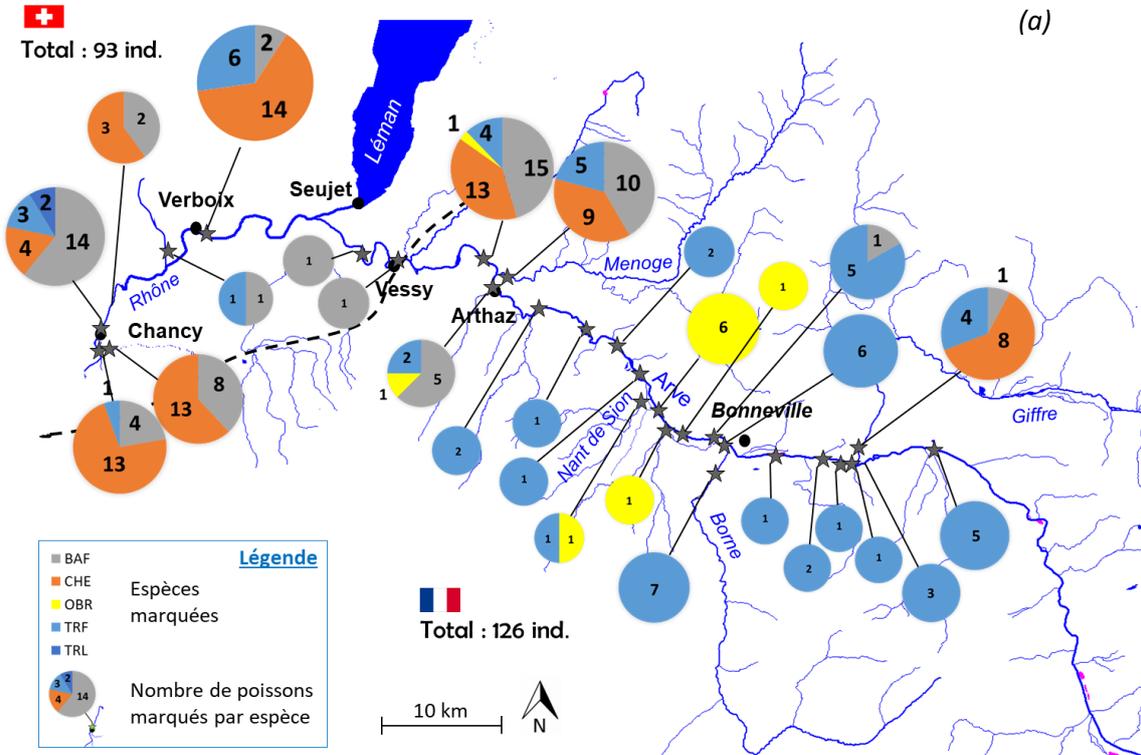
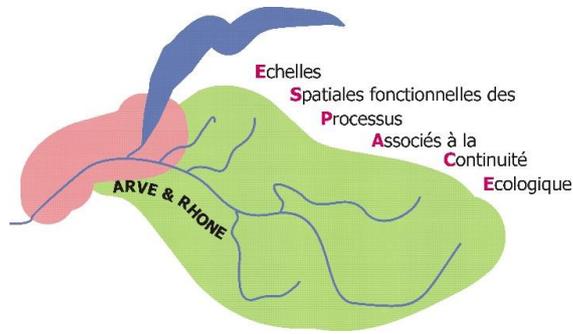
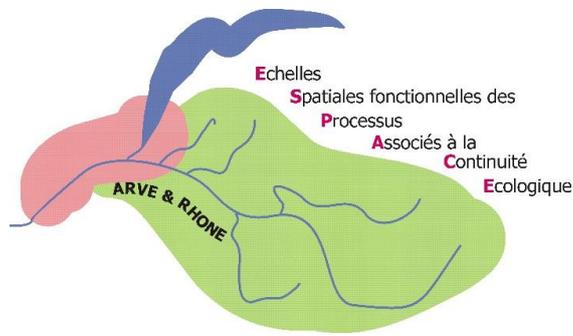


Figure 46 : Localisation des effectifs de poissons marqués sur la zone d'étude présentés par espèce (a) équipés d'un émetteur radio ; (b) équipés d'un PIT-tag.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Les contraintes d'échantillonnage ont été différentes en fonction des cours d'eau et des pays.

Ainsi, côté France, les marquages se sont concentrés sur l'hiver 2014 entre les mois de janvier et mars (cf **Figure 45**). En effet, l'Arve est une rivière glaciaire qui n'offre de faibles débits qu'en période hivernale, période à laquelle les précipitations sont sous forme de neige sur la majeure partie de son bassin versant et ne viennent pas grossir les flots des rivières. L'hiver 2014, plus doux que les hivers précédents, a offert des conditions d'échantillonnage compliquées avec des débits élevés pour la saison, en moyenne 62.8 m³/s (**Figure 47**). Il est à noter que les opérations de pêche de sondage sont réalisables dans de bonnes conditions à des débits inférieurs à 40 m³/s (mesure du débit de référence à la station OFEV n°2170), et davantage efficaces encore à des débits plus faibles. Durant la période propice aux marquages, les conditions d'échantillonnage sur l'Arve ont été satisfaisantes seulement 10% du temps. Il a été prospecté plus de 19 km d'Arve en cumulé en 30 jours d'opérations de marquage. Sur ces 30 jours, 5 jours ont été infructueux pour la capture de grands individus destinés à recevoir une marque radio et en moyenne, seulement 3 individus étaient marqués par jour de marquage.

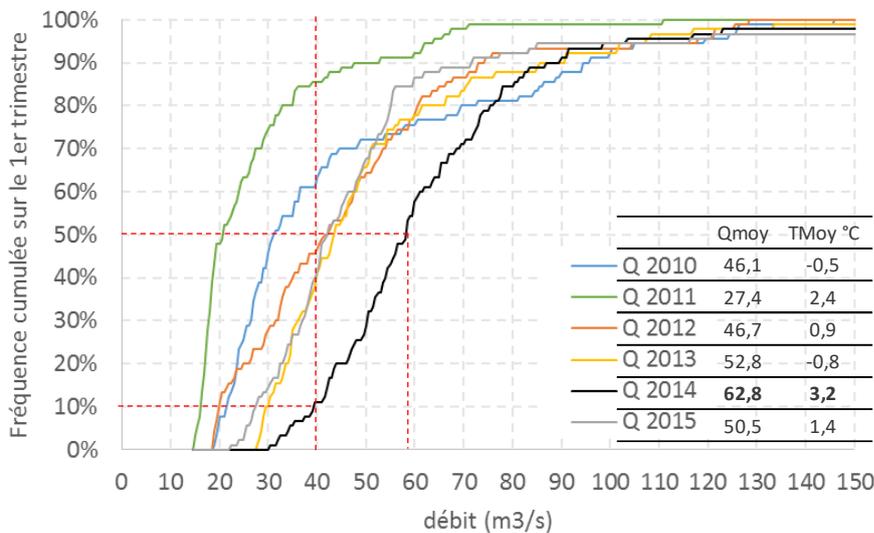


Figure 47 : Fréquence cumulée des débits de l'Arve à Genève (Station OFEV n°2170) sur la période hivernale (de janvier à mars) pour les années 2010 à 2015. En référence, la température moyenne de l'air sur cette même période à la station météorologique de Thyez située à 970 m d'altitude (Source ROMMA).

Côté Suisse, le Rhône étant difficile d'accès pour les pêches de sondage, l'échantillonnage a été réalisé essentiellement via les vidanges de passes à poissons et ce, au moment des migrations « connues » des cyprinidés, soit aux printemps 2013 et 2014 (cf **Figure 45**). Cependant, deux petits affluents ont également été échantillonnés par pêche au niveau des embouchures, à savoir l'Allondon et la Laire.

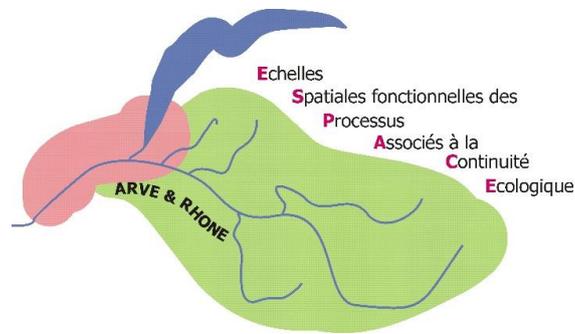
Tous les individus munis d'un émetteur-radio n'ont pas été intégrés dans le traitement des données. Seuls les individus ayant été suivis plus de 5 semaines et présentant un nombre de points de contacts suffisants et cohérents ont été pris en considération dans les analyses suivantes.

Il est à noter que les individus d'ombre commun n'ont pas supporté le marquage radio, aussi très vite les opérations de ce type sur cette espèce ont été stoppées.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



4) Déplacements et domaines vitaux

A. La truite fario

a. Bilan et caractérisation biométrique de l'effectif de poissons marqués

Au terme des campagnes de marquage, nous totalisons 64 truites fario¹⁷ marquées sur toute la zone d'étude (Arve, affluents et Rhône). Parmi ces 64 individus, 53 ont été marqués côté français et 11 côté suisse. Toutefois, la totalité n'a pas été suivie, puisque certains individus n'ont été détectés que quelques fois (*rappel : lorsque le suivi a été inférieur à 1 mois, ou 4 détections, l'individu a été retiré du jeu de données car disparu post-marquage, cf Tableau 6 au § II 3) A) b*). Ainsi, le taux de disparition post-marquage s'élève à 30%. La **Figure 48** donne les détails chiffrés des effectifs suivis.

Sur les 64 truites marquées :

- 33 ont été capturées dans l'Arve (dont 26 intégrées dans le jeu de données) ;
- 10 dans le Rhône (dont 4 suivies) ;
- 1 dans l'Allondon (non suivie) ;
- 10 dans le Borne (9 suivies) ;
- 4 dans le Giffre (3 suivies) ;
- 5 dans le Menoge (2 suivies) ;
- 1 dans le Nant de Sion (suivie).

Par conséquent, sur les 53 truites marquées en France, 41 entrent dans le jeu de données et sur les 11 en Suisse, 4 truites seulement ont pu être suivies plus d'un mois, soit 45 en tout (Annexe 5). A l'issue des 469 jours de suivi en radiopistage (dernière prospection le 22 avril 2015), 31% des truites sont encore vivantes ; 7% pêchées ; 31% perdues et 31% mortes naturellement (âgées en moyenne de 4 ans) ou par prédation. Parmi l'effectif de truites perdues ou mortes (hors post-marquage), 43% l'ont été pendant la période de reproduction.

¹⁷ Deux truites lacustres ont également été marquées, mais leur nombre et la durée de suivi trop courte ne permettent pas d'analyser les données. Elles ne sont pas intégrées dans le traitement de données de truites fario puisqu'elles possèdent des modes de vie bien différents.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

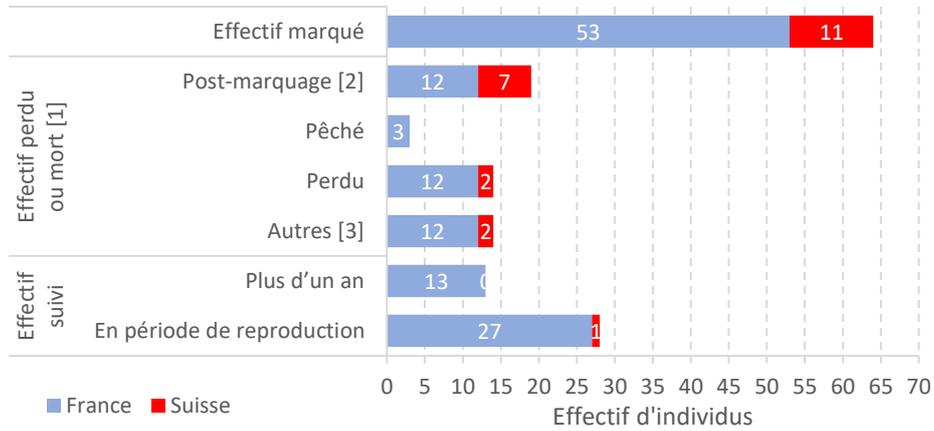
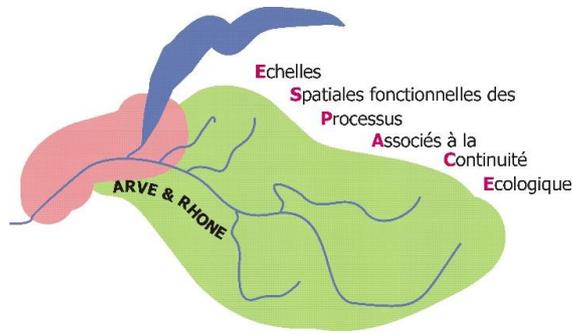


Figure 48 : Histogrammes récapitulatifs des effectifs marqués de truites fario en France et en Suisse ainsi que les effectifs suivis.

[1] Parmi les effectifs perdus ou morts non en post-marquage mais pêchés ou perdus, certains ont pu être suivis plus d'un an et/ou en période de reproduction. Ils interviennent donc dans le jeu de données. Le graphique fait état de la mortalité et de la perte à la fin du programme.

[2] Les disparitions « post-marquages » sont celles survenues le mois suivant l'opération de marquage.

[3] Les « autres » mortalités sont de causes inconnues (mort naturelle, post-reproduction, prédation...).

Les caractéristiques biométriques de l'échantillon de truites marquées sont présentées dans les graphiques ci-dessous (**Figure 49**) (Annexe 5). Il est important de rappeler que cet échantillon n'est pas représentatif de la population en place dans le milieu puisque les truites marquées ont été sélectionnées de par leur taille et leur poids. En effet, comme cela a été mentionné dans le § II 5) B, les poissons doivent être de taille suffisante pour pouvoir supporter l'émetteur.

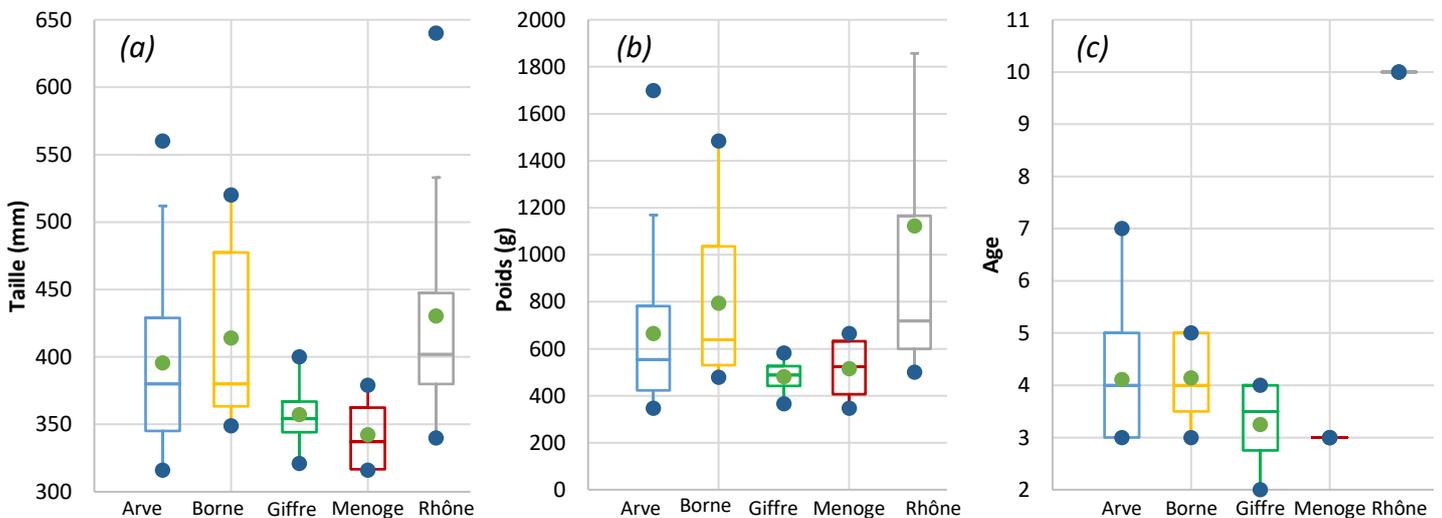
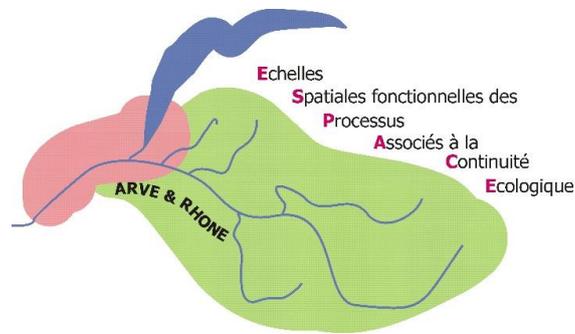


Figure 49 : Caractéristiques biométriques de la totalité des truites marquées par cours d'eau : (a) taille (moyenne = 388 ± 71 mm) ; (b) poids (moyenne = 715 ± 949 g) et (c) âge (moyenne = 5 ans \pm 1 an). La Menoge et le Rhône sont exclus du test statistique de l'âge car il a été défini sur un seul individu.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Statistiquement, il n'y a aucune différence de taille / poids / âge entre les différents cours d'eau (KW ; $p > 0,05$). L'échantillon est donc homogène.

b. Durée des suivis individuels

La durée moyenne de suivi est de 188 ± 169 jours, soit environ 6 mois. Cette durée de suivi est très variable entre les individus, pouvant aller de 0 jour de suivi, lorsque l'individu n'a jamais été contacté après le marquage à plus de 460 jours pour les suivis les plus longs (**Figure 50**).

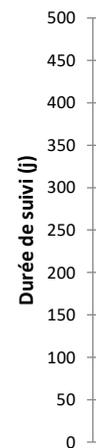


Figure 50 : Boxplot des durées de suivi (en jours) des truites fario.

c. Distances et vitesses de déplacement

Les graphiques ci-dessous (**Figure 51**) représentent : (a) les distances parcourues et (b) les vitesses de déplacement. Chaque point correspond à une distance ou vitesse réalisée par un individu entre 2 prospections (valeurs positives = montaison ; valeurs négatives = dévalaison).

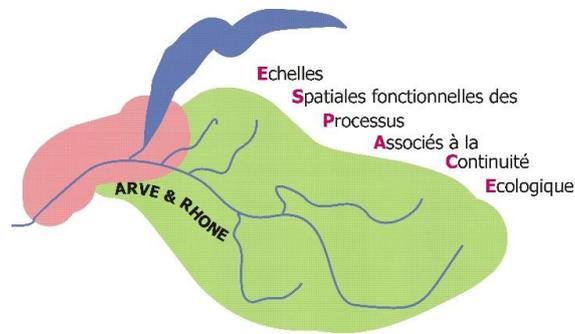
Les distances et vitesses observées dans l'Arve sont significativement plus importantes que celles observées dans le Borne (KW ; $p < 0,0001$), ce qui pourrait s'expliquer par la différence de taille entre ces cours d'eau. Les autres cours d'eau ne montrent pas de différence significative (KW ; $p > 0,05$) mais la faiblesse du jeu de données peut biaiser ces tests statistiques. Le moindre nombre de détections dans le Giffre, le Rhône et la Menoge est concordant avec le peu d'individus suivis. De plus, la forte fragmentation du Rhône peut expliquer les faibles distances et vitesses de ce grand milieu comparable à des plus petits tels que le Giffre et la Menoge.

Concernant les vitesses, elles sont calculées en divisant la distance parcourue par le nombre de jours entre les 2 détections. On a donc une vitesse exprimée en m/j. Ainsi, on remarque que les truites sont capables d'effectuer de très grandes distances en très peu de temps. Un individu a pu parcourir jusqu'à 18 km de montaison en un seul jour. Il semblerait donc que les grandes distances effectuées aient été réalisées très rapidement, très probablement par la motivation de la reproduction.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



De plus, les nuages de points apparaissent très symétriques autour de 0, ce qui signifie que les truites effectuent autant de distances en montaison qu'en dévalaison, avec une même vitesse. Il a été remarqué en début de période de reproduction de grands déplacements en amont ou en aval puis en fin de période de reproduction un déplacement similaire dans le sens inverse ; l'individu étant revenu à son site de repos initial.

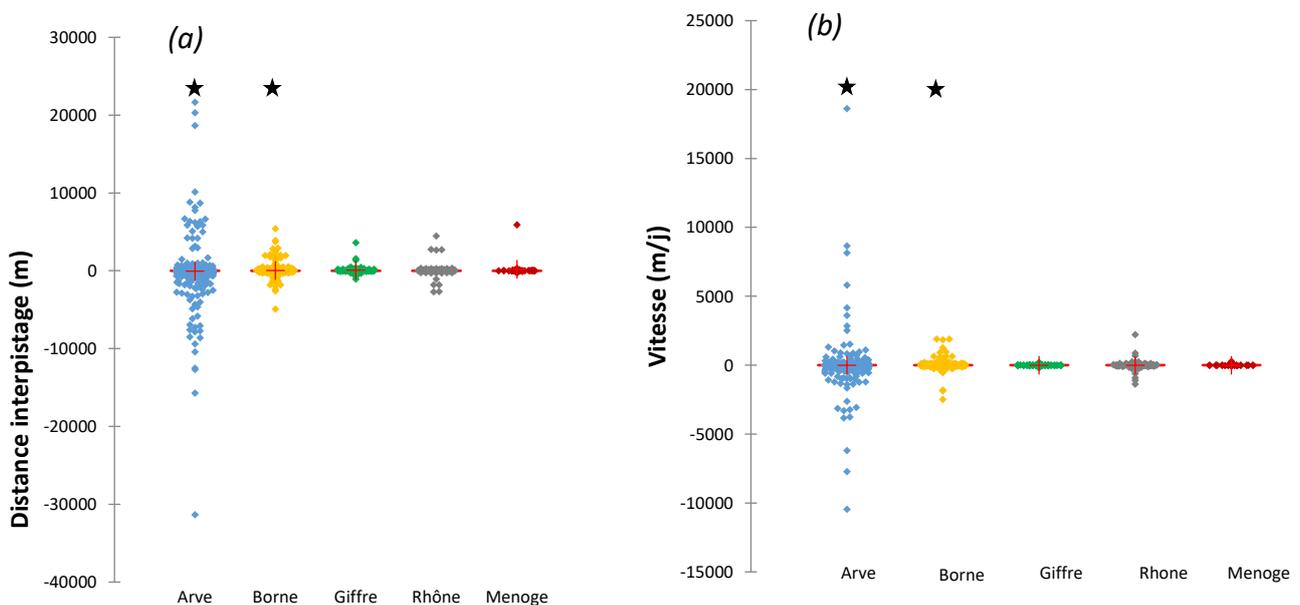


Figure 51 : Scattergram (a) des distances parcourues (m) entre chaque prospection et pour chaque truite suivie ; (b) des vitesses moyennes (m/j) parcourues entre chaque prospection et pour chaque truite suivie.

En fonction de la marge d'erreur calculée dans le positionnement (Cf. III 2) B), seule une partie des données de localisation reflète un réel mouvement de l'individu. La proportion de localisations associées à un réel déplacement (ou taux de mobilité) est la suivante :

- 33 % dans l'Arve
- 18 % dans le Borne
- 21 % dans le Rhône

Le détail des déplacements par cours d'eau est donné en Annexe 7.

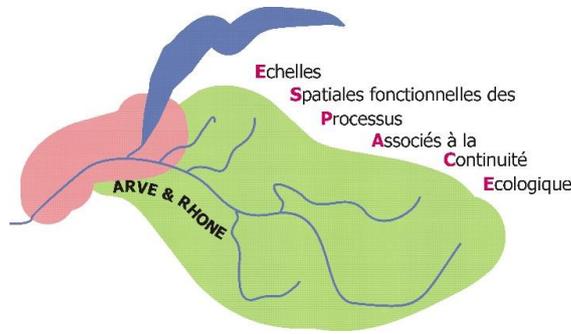
C'est dans le Borne que le taux de mobilité est le plus faible, ce qui s'explique par la plus forte sédentarité des truites dans cet affluent. Si on ne prend en compte que la période de reproduction, ce taux monte à 41 % dans l'Arve et 21 % dans le Borne.

Pour le Giffre et le Menoge trop peu de détections ont été récoltées (ainsi que pour le Rhône au moment de la période de reproduction) en lien avec le peu d'individus suivis pour pouvoir réaliser un pourcentage qui reflète une image représentative des comportements dans ces 2 affluents.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



d. Profils de déplacement de l'ensemble des individus suivis de truite fario

D'après les métriques fixées pour définir la migration et la sédentarité (Cf § II 7)), les résultats qui vont suivre ont été traités séparément : d'une part les déplacements des truites qualifiées de « sédentaires », et d'autre part ceux des truites « migrantes ».

Les graphiques suivants représentent les distances parcourues tout au long de l'année. En abscisses les dates et en ordonnées, les *Pm* (Points métriques) sont les distances calculées par rapport à la confluence de l'Arve et du Rhône (jonction = Pm_0). Les distances parcourues dans le Rhône sont négatives car effectuées en aval de la confluence Arve - Rhône. Ainsi, une courbe correspond à un individu et chaque point à une détection faite lors du pistage (le premier étant le point de marquage).

La **Figure 52** présente les déplacements des truites qualifiées de sédentaires, puisqu'elles n'ont pas parcouru plus de 2 km, ni effectué de changement de cours d'eau, y compris pendant la période de reproduction. En termes d'effectifs, il y a un total de 27 truites sédentaires : 13 dans l'Arve (50 % de l'effectif suivi dans l'Arve), 4 dans le Rhône (100 % des truites suivies dans ce cours d'eau), 8 dans le Borne (89 %), 1 dans le Giffre et 1 dans la Menoge.

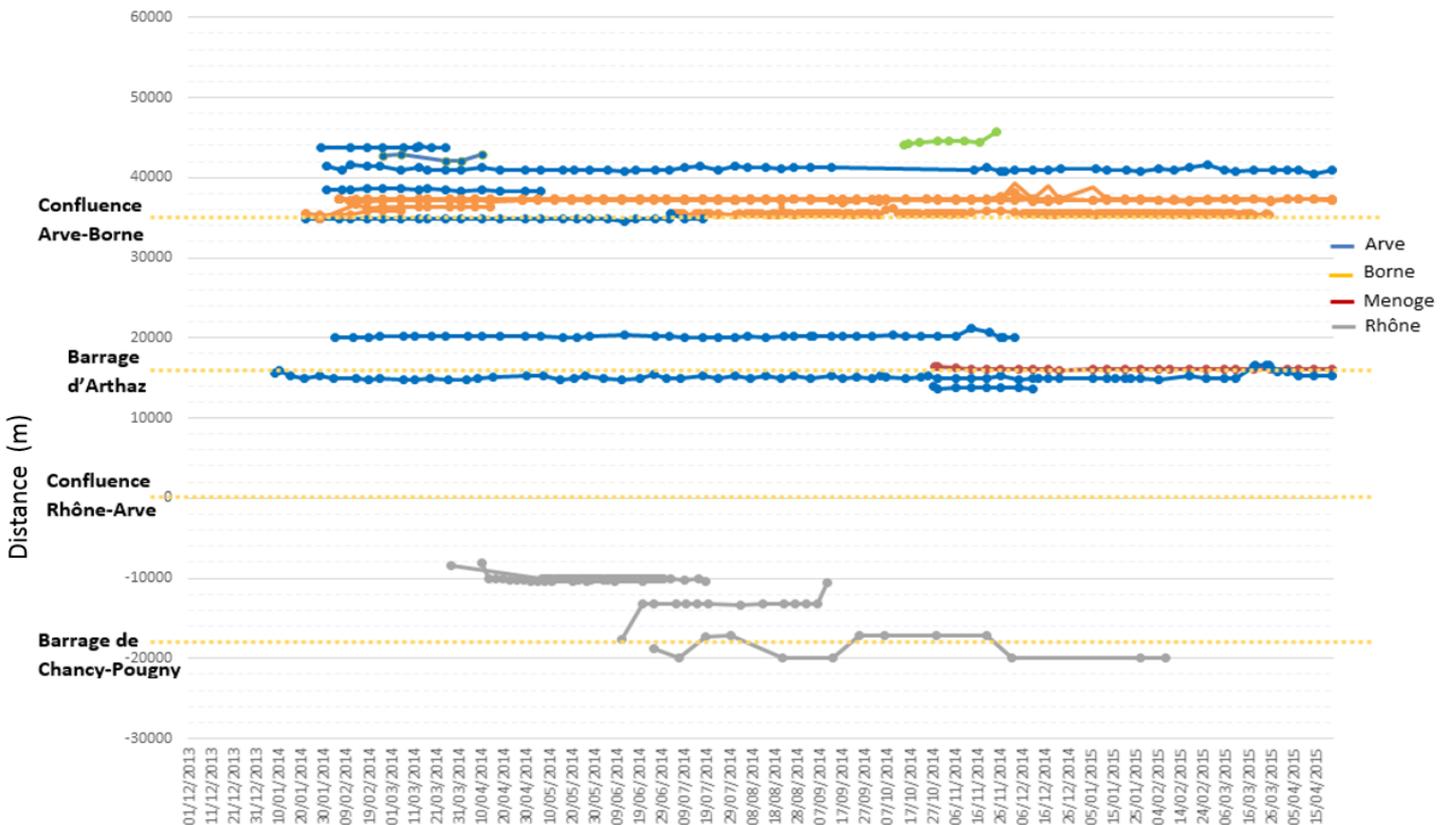


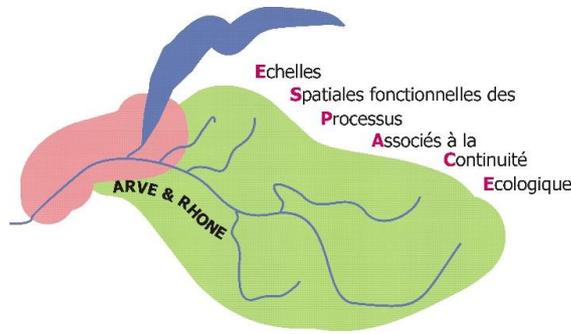
Figure 52 : Déplacements des truites sédentaires (en ordonnées, les *Pm*) durant toute la période de suivi (date en abscisses).

Un point est égal à une détection d'un individu.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



La **Figure 53** représente les déplacements des individus qualifiés de migrants. Toutefois, les truites ayant migré vers le Borne n'apparaissent pas dans ce graphique puisque ce type de migration fera l'objet d'une figure traitée à part entière. Ainsi, il a été observé en tant que migrantes : 13 truites de l'Arve (50 %), 1 du Borne (11 %), 2 du Giffre, 1 de la Menoge, et celle du Nant de Sion, soit 40 % de l'effectif total suivi.

En considérant la période de reproduction de septembre à fin février (période incluant les mouvements pré- et post-reproduction), il apparaît clairement que les déplacements les plus importants ont eu lieu à cette époque de l'année (encadré en orange sur la **Figure 53**). Pour la plupart des individus suivis dans l'Arve, il s'agit bien d'une montaison suivie d'une dévalaison, soit un comportement de reproduction.

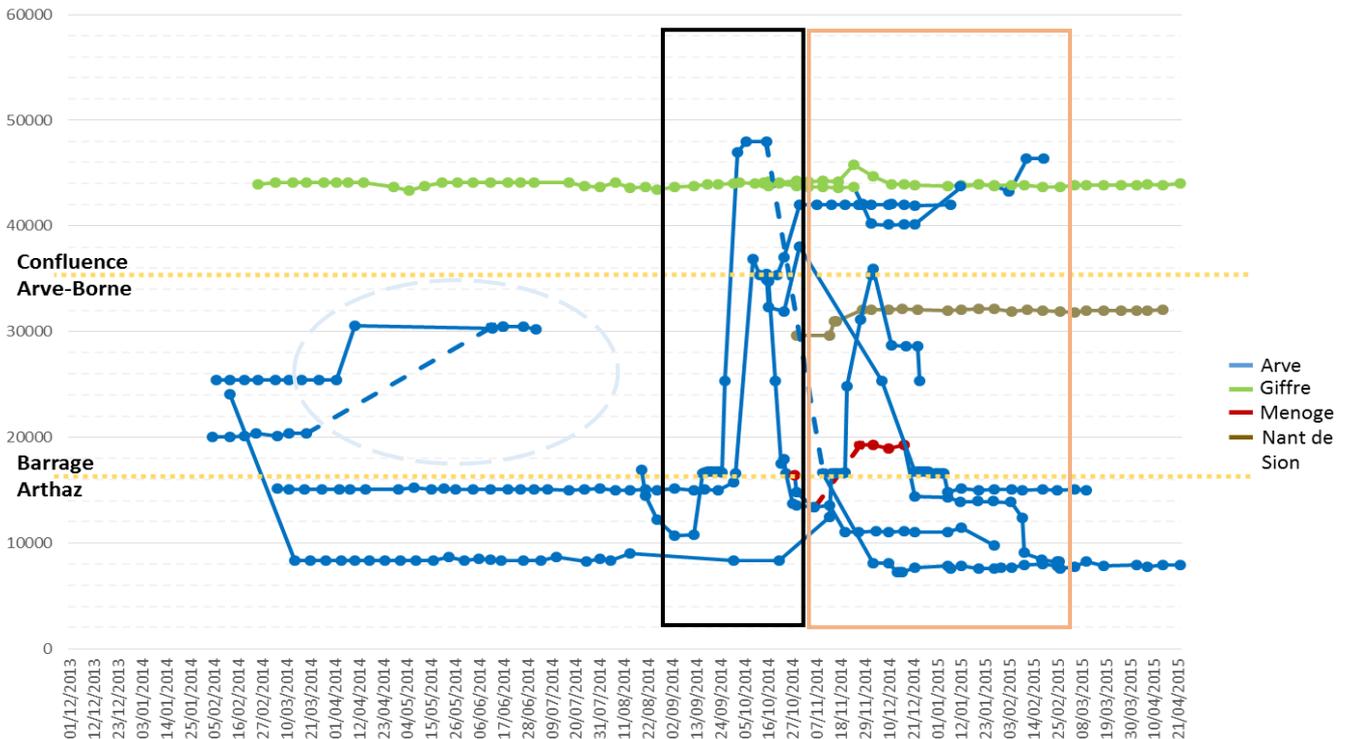


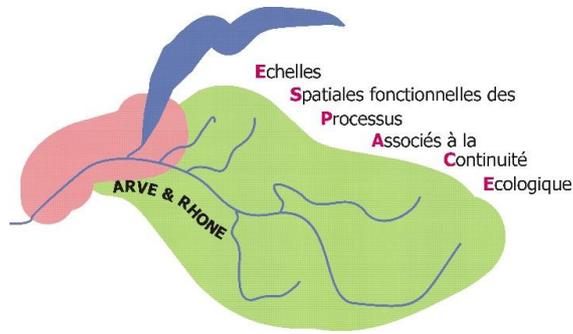
Figure 53 : Déplacements des truites migrantes (en ordonnées, les Pm) durant toute la période de suivi (dates en abscisses) à l'exception des truites de l'Arve migrant dans le Borne. Un point est égal à une détection d'un individu. L'encadré noir met en évidence la période pré-reproduction et l'orange, la période classiquement définie pour la reproduction de la truite fario. L'entouré bleu met en évidence deux comportements exceptionnels.

Il est à noter deux comportements individuels surprenants : 2 truites, capturées dans des tronçons différents de l'Arve, ont été détectées dans un étang connecté à l'Arve de manière temporaire (en hautes eaux) en avril 2014 (entourées en bleu ciel sur la **Figure 53**). L'une aurait parcourue 10 km et l'autre 5 km en amont, à une période qui ne correspond pas à celle de reproduction ; ce sont d'ailleurs les 2 seules truites à avoir parcouru autant de distance à ce moment de l'année. De plus, il s'agit d'un étang eutrophe, dont les températures sont supérieures au



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



preferendum thermique de la truite. Ces deux individus y sont morts quelques jours après y avoir été détectés, pris au piège par la baisse des eaux (rupture de la connexion avec l'Arve) et la hausse des températures du mois de juin. Le caractère naturel de ces déplacements, bien que possible, semble tout de même douteux.

La Figure 54 ci-dessous représente les déplacements de migration dans le Borne. Sept truites issues de l'Arve ont migré dans cet affluent ce qui représente 54 % des truites migrantes de l'Arve. A cet effectif s'ajoute une truite marquée dans le Borne séjournant alternativement dans l'Arve et dans le Borne, à proximité de la confluence.

C'est au moment de la période de reproduction (encadré orange) que la moitié des truites de l'Arve se sont déplacées dans le Borne pour y frayer. Cela suggère que cet affluent offre des habitats de reproduction plus attractifs que le chenal de l'Arve. Il est probable qu'une fraction de la population de truites issue du Borne dévale dans l'Arve, probablement au stade juvénile, puis retourne dans le Borne à l'âge adulte pour se reproduire (comportement de homing).

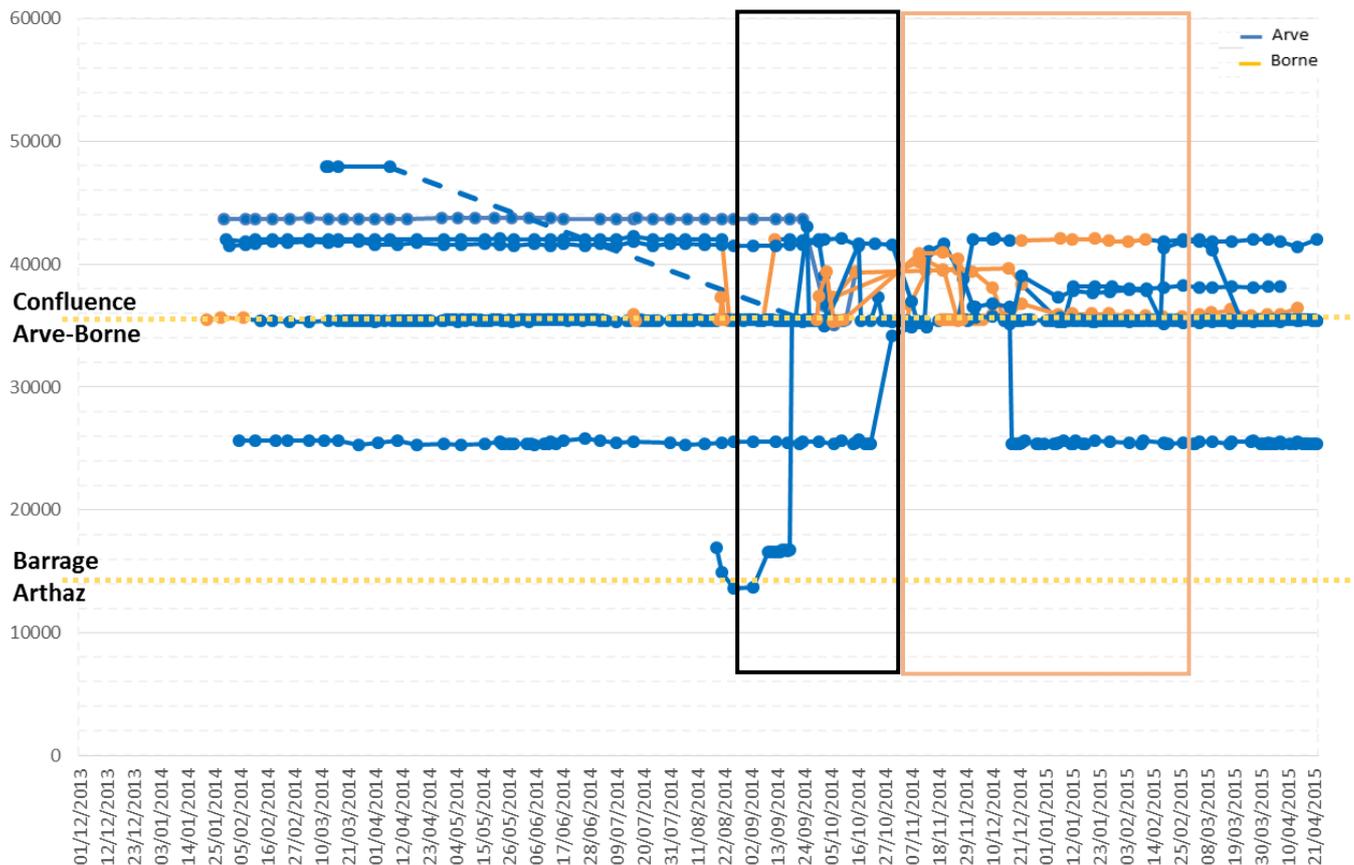
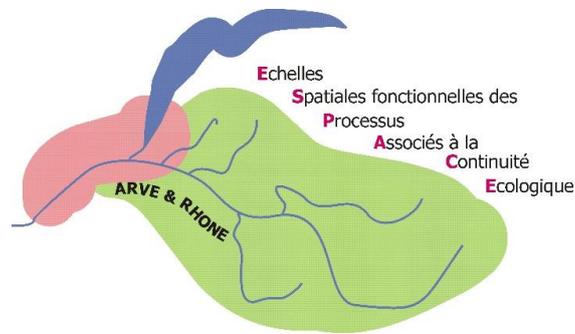


Figure 54 : Déplacements des 8 truites migrantes dans le Borne (en ordonnées, les Pm) durant toute la période de suivi (dates en abscisses). Un point est égal à une détection d'un individu. L'encadré noir met en évidence la période pré-reproduction et le orange, la période classiquement définie pour la reproduction de la truite fario.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Alors que les truites sédentaires du Borne se cantonnent à la partie aval de cet affluent (tronçon confluence - Pont de l'autoroute A40 ; $Pm_{max} = 38\ 000$; cf **Figure 52**), les truites migrantes dans le Borne sont presque toutes montées plus en amont, jusque dans les gorges en amont de Saint-Pierre-en-Faucigny pour le point le plus amont (**Figure 54**). Il est cependant probable qu'elles soient allées plus haut encore, mais cela n'a pu être mis en évidence lors des prospections du fait que la zone soit inaccessible.

De plus, il est à noter que 4 des 7 truites provenant de l'Arve sont issues de secteurs situés en amont de la confluence Arve-Borne ($41\ 000 < Pm < 48\ 000$), secteurs rectilignes et chenalisés entre deux enrochements latéraux relativement homogènes en terme habitat piscicole.

En terme de bilan de comportement de reproduction des truites suivies dans le bassin de l'Arve, 57% sont migrantes contre 43% sont sédentaires (dont la moitié provient du Borne), soit un ratio plutôt équilibré, tout cours d'eau confondu (**Tableau 13**). Cependant si on fait un focus sur le cours principal de l'Arve, on observe 73% d'individus migrants au moment de la période de reproduction.

Tableau 13 : Bilan des proportions des truites sédentaires et migrantes par cours d'eau et par période de suivi. Les pourcentages en italique sont donnés à titre indicatif mais n'ont pas de réelle signification étant donné le peu d'individus suivis sur ces cours d'eau.

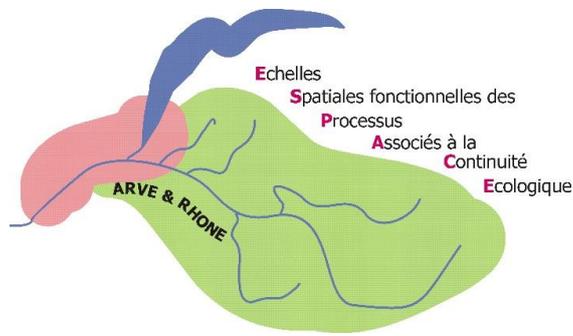
	Effectifs				Pourcentages			
	Truites sédentaires		Truites migrantes		Truites sédentaires		Truites migrantes	
	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai
Arve	13	4	13	11	50%	27%	50%	73%
Borne	8	6	1	1	89%	86%	11%	14%
Rhône	4	1	0	0	100%	100%	0%	0%
Giffre	1	1	2	2	33%	33%	67%	67%
Menoge	1	1	1	1	50%	50%	50%	50%
Nant de Sion	0	0	1	1	0%	0%	100%	100%
Total	27	13	18	16	60%	45%	40%	55%
Total BV Arve	23	12	18	16	56%	43%	44%	57%

Les comportements de déplacements varient en fonction des saisons et en fonction des statuts des individus. En faisant le focus sur les moyennes mensuelles des distances hebdomadaires des mouvements validés, il apparaît que les truites migrantes effectuent des distances très importantes à partir du mois de septembre jusqu'au mois de décembre (entre 10 000 m et 4 860 m), avec un pic au dès le mois de septembre (**Figure 55**), qui correspond aux migrations pré-reproduction. Le fait que l'on n'observe pas un « arrêt des mouvements » en période de frai (novembre-décembre) vient du fait que le frai de la truite est étalé dans le bassin de l'Arve. La différence nette des moyennes mensuelles de



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



février et de septembre montre que les truites migrantes rejoignent leur lieu de repos (après la phase de reproduction) à une vitesse réduite par rapport à celle qu'elles mettent en œuvre pour rejoindre leur site de frai.

Le printemps et l'été (de mars à juillet), les moyennes mensuelles des distances hebdomadaires des migrants sont du même ordre de grandeur (entre 750 m et 1070 m). Au mois d'août les individus migrants commencent à bouger davantage.

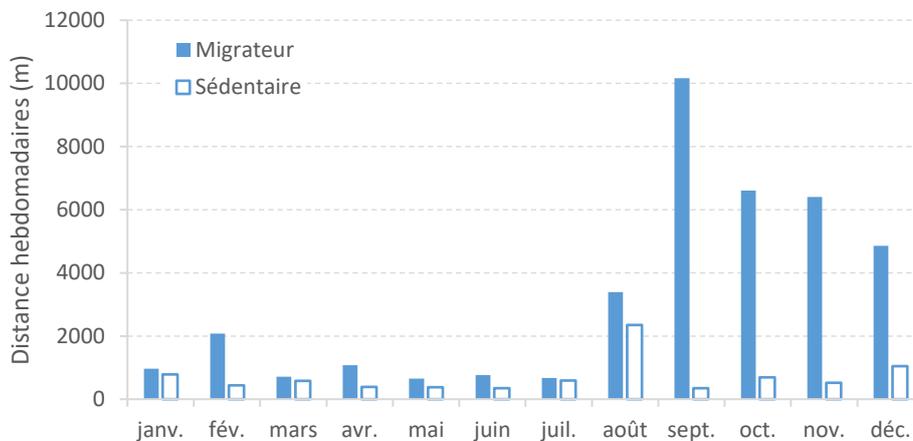


Figure 55 : Moyennes mensuelles des distances hebdomadaires (pour les mouvements validés) pour les truites migrantes et sédentaires.

Les moyennes mensuelles des distances hebdomadaires des truites sédentaires sont équivalentes de janvier à novembre (entre 350 m et 780 m) avec cependant un pic au mois d'août (2350 m). En décembre, au milieu de la période de reproduction, les distances hebdomadaires s'élèvent à 1045 m en moyenne, soit deux fois moins qu'au mois d'août (**Figure 55**).

a. Influence des conditions hydrologiques et thermiques sur les déplacements

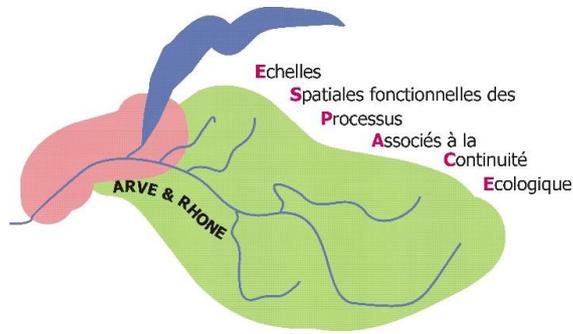
Le **Tableau 14** présente les corrélations de Spearman et ses p-values entre les distances parcourues (le signe + pour les mouvements de montaison et le signe - pour les mouvements de dévalaison) et les variables de débits et températures ($Q-T/n$ = moyenne inter-pistage ; $Q-T_{max-min}$ = valeurs maximale et minimale journalières entre 2 pistages) pour l'Arve et le Borne. Les valeurs apparaissant en bleu sont les corrélations positives et celles en rouge sont les corrélations négatives. Une variable environnementale a été définie comme influente sur le comportement des poissons seulement si les corrélations étaient significatives et de même sens pour les deux paramètres (D et V). Les autres cours d'eau n'ont pas été testés en raison de l'insuffisance du jeu de données.

Il apparaît que les débits dans l'Arve sont positivement corrélés aux dévalaisons, tandis que les températures influencent les mouvements de montaison.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Dans le Borne, c'est l'inverse qui se dessine pour les débits, influençant les montaisons. Les températures ne semblent pas avoir de conséquences sur les mouvements dans ce cours d'eau.

Tableau 14 : Relations entre distances et vitesses de montaison (D+ et V+) et de dévalaison (D- et V-) et variables environnementales (débit et thermie) : coefficients de corrélation de Spearman et p-values associées pour chacun des cours d'eau.

En bleu, les corrélations positives et en rouge, les corrélations négatives prises en considération.

NB : Les variables de débit et de température pour l'Arve sont toutes corrélées positivement entre elles. Pour le Borne, seul le Qmax est corrélé positivement avec les variables thermiques (Annexe 6).

Variables	Arve				Borne				
	D +	V +	D -	V -	D +	V +	D -	V -	
Matrice de corrélation (Spearman)	Q/n	-0,036	-0,060	0,194	0,198	0,186	0,155	0,027	0,122
	Qmax	0,089	0,034	0,155	0,251	0,274	0,220	-0,012	0,137
	Qmin	-0,137	-0,135	0,210	0,140	0,064	0,071	0,071	0,073
	T/n	0,093	0,084	-0,003	0,001	0,068	0,079	0,072	0,042
	Tmax	0,146	0,123	-0,001	0,056	0,124	0,110	0,108	0,158
	Tmin	0,027	0,038	-0,004	-0,077	0,018	0,050	0,146	0,065
p-values	Q/n	0,397	0,155	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,001	0,705	0,092
	Qmax	0,036	0,424	0,002	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,868	0,058
	Qmin	0,001	0,001	< 0,0001	0,004	0,172	0,129	0,329	0,313
	T/n	0,028	0,046	0,952	0,982	0,149	0,094	0,318	0,565
	Tmax	0,001	0,003	0,989	0,261	0,008	0,019	0,134	0,028
	Tmin	0,528	0,373	0,929	0,121	0,699	0,285	0,043	0,366

b. Génétique

Les analyses génétiques montrent qu'une grande majorité des truites suivies originaires du Borne (7 truites sur les 10 marquées) sont des individus purement méditerranéens (MED) tout comme un tiers des individus de l'Arve (12 truites sur 33) (**Figure 56**). Parmi les 7 truites ayant migré de l'Arve vers le Borne, 6 sont des individus purement méditerranéens (Annexe 5), c'est-à-dire que quasiment tous ces individus migrants vers l'affluent Borne ont de fortes probabilités de provenir de ce cours d'eau puisqu'il est le seul foyer de truite de souche méditerranéenne du bassin versant de l'Arve. Ce constat semble montrer le comportement de « homing » de certains individus. Dans les autres affluents, le nombre d'individus analysés est insuffisant pour discuter de leurs origines.

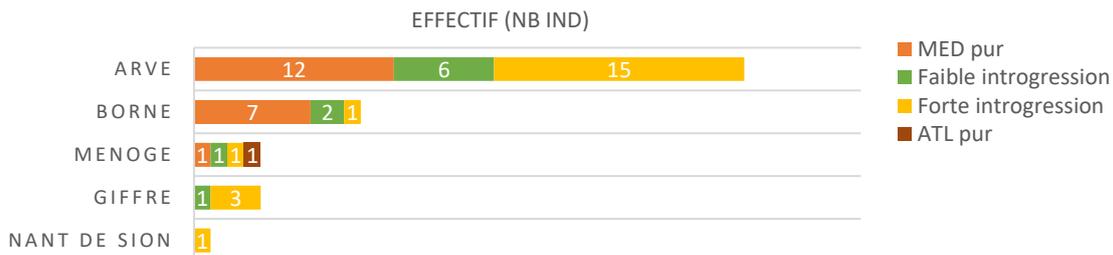
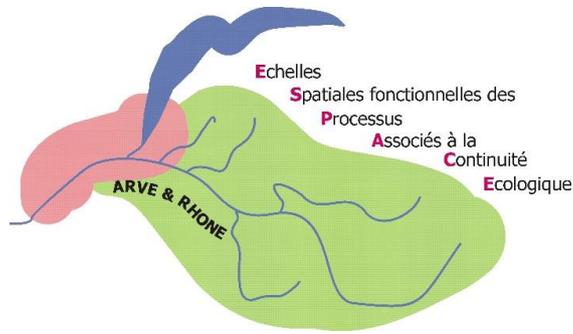


Figure 56 : Nombre d'individus en fonction de leur souche génétique dans chaque cours d'eau.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



c. Domaines vitaux

Le domaine vital, c'est-à-dire le linéaire nécessaire à un individu pour établir toutes ces phases de vie, est maximal pour les individus de l'Arve mais est également important pour ceux des migratrices Arve-Borne (**Figure 57**). Dans l'Arve, la moyenne des domaines vitaux est de 8 440 m et dans le Borne 1 714 m (résultats expliqués par la grande sédentarité des truites pêchées dans le Borne et par la taille du cours d'eau, bien inférieure à celle du cours principal de l'Arve). Les autres cours d'eau qui apparaissent sur le graphique n'ont pas été pris en compte dans les moyennes et tests statistiques puisque les suivis sur ceux-ci sont trop courts et / ou le nombre d'individus insuffisant.

Les aires de vie dans l'Arve sont significativement supérieures à celles dans le Borne (MW ; $p = 0,002$).

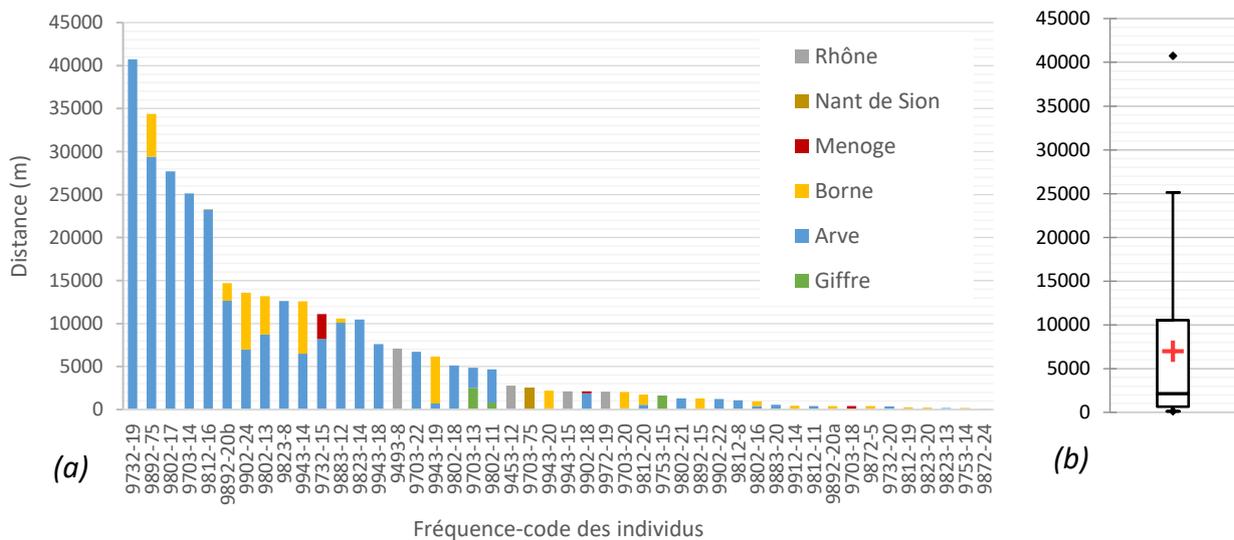


Figure 57 : (a) Domaine vital (en m) de chaque individu de truite suivi en spécifiant les linéaires utilisés par cours d'eau et (b) box-plot pour visualiser la répartition en quartiles des domaines vitaux. La croix rouge sur le box-plot indique la longueur moyenne des domaines vitaux.

La **Figure 58** ci-après montre les distances parcourues au cours de la période de reproduction classiquement définie pour la truite fario (novembre à février). La période pré-repro (septembre-octobre) n'a pas été intégrée à cette analyse mais constitue une période cruciale pour la réussite car les migrations vers les sites de frai se réalisent majoritairement à cette période-là (cf. **Figure 53** et **Figure 54**).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

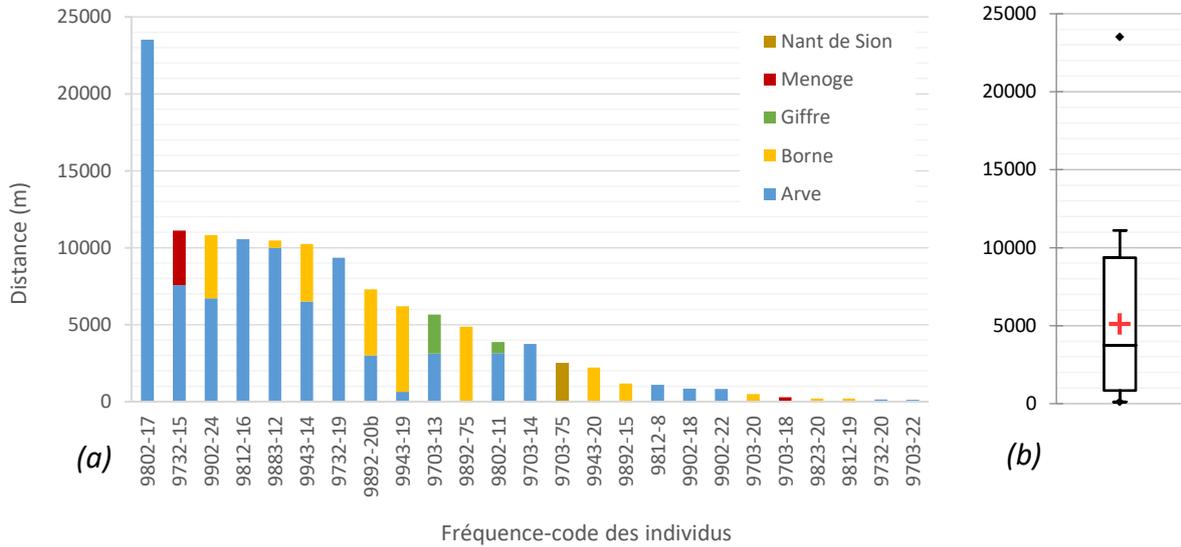
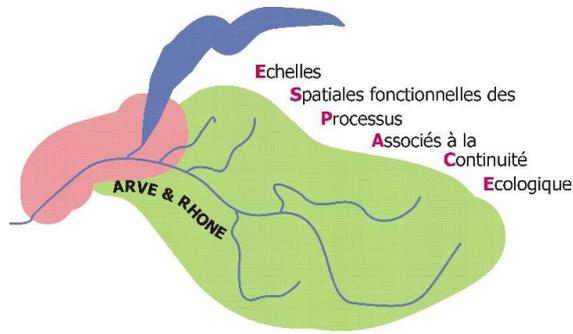
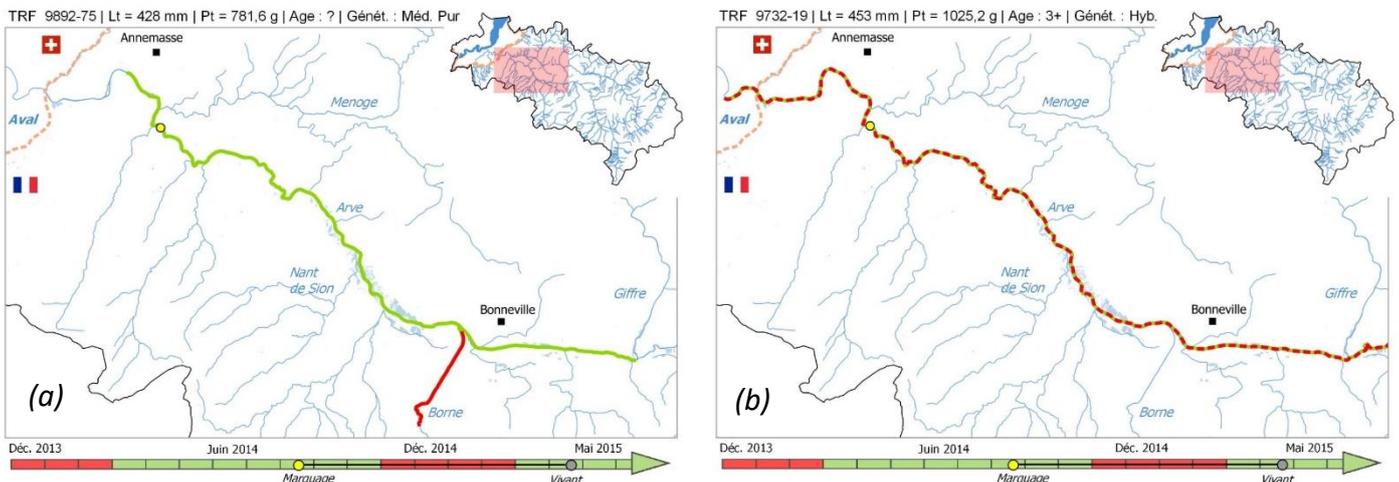


Figure 58 : (a) Distances parcourues dans chaque cours d'eau par chaque individu de truite fario pendant la période de reproduction (en m) et (b) box-plot pour visualiser la répartition en quartiles de ces distances. La croix rouge sur le box-plot indique la moyenne des distances parcourues.

On remarque que, par rapport aux domaines vitaux complets de la Figure 57 ci-dessus, les plus grandes distances parcourues ont été effectuées durant cette phase de vie. En effet, les linéaires occupés pendant la période de frai expliquent en moyenne 72 % du domaine vital total. Les distances parcourues pour trouver le site de frai peuvent être considérables ; le maximum observé dans l'Arve se chiffre à plus de 23 km (Figure 58).

Afin de replacer spatialement les domaines vitaux et les linéaires occupés pour la phase de reproduction (novembre à février), la Figure 59 présente des exemples individuels pour des truites migrantes et sédentaires.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

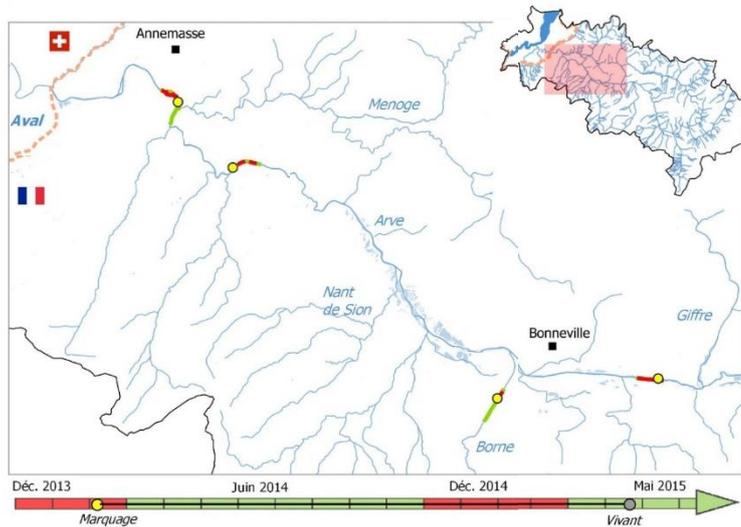
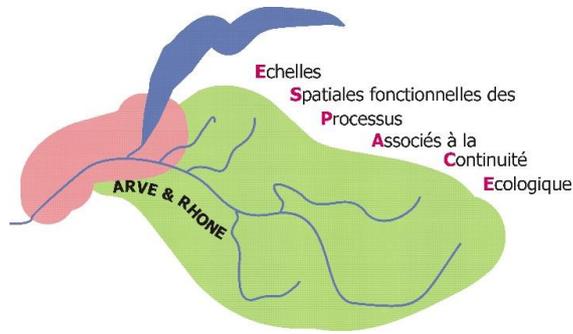


Figure 59 : Exemples cartographiques des domaines vitaux de quelques individus ; (a) Truite migrante dans le Borne en période de reproduction (rouge) et hors reproduction (vert) ; (b) Truite migrante en période de reproduction dans l'Arve, marquée à Arthaz, montée à l'amont de la confluence Arve-Giffre et descendue en Suisse (Vessy) ; (c) Quatre truites sédentaires y compris en période de reproduction (3 dans l'Arve, 1 dans le Borne).

Il n'y a pas de corrélation entre les domaines vitaux des truites et leurs caractéristiques biométriques (**Tableau 15**). Ainsi, les truites les plus grandes n'ont pas forcément un domaine vital plus grand. Ces résultats sont à nuancer du fait que l'échantillon de truites marquées est homogène (pas de différence statistique entre les individus ; cf. § III 4) A a) et que seuls de grands individus pouvant être équipés d'une marque radio sont intégrés à cette analyse.

Tableau 15 : Matrice des corrélations de Spearman et p-values entre les domaines vitaux des truites (et suivies durant une période qui intègre la phase de reproduction) avec leurs caractéristiques biométriques (taille, poids, âge).

Les corrélations positives sont indiquées en rouge tandis que les négatives sont indiquées en bleu.

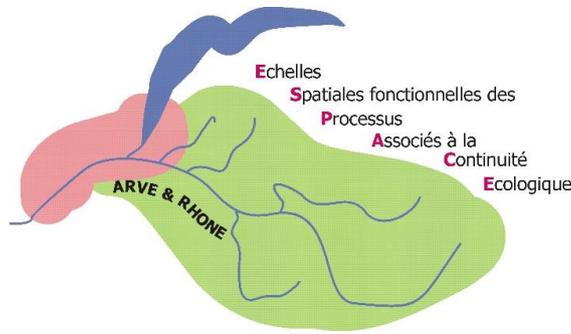
Variables	Matrice de corrélation (Spearman)				p-values			
	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Âge	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Âge
Domaine vital	1	0,365	0,343	0,084	0	0,062	0,080	0,741
Longueur totale (mm)	0,365	1	0,958	0,326	0,062	0	< 0,0001	0,186
Biomasse (g)	0,343	0,958	1	0,292	0,080	< 0,0001	0	0,239
Âge	0,084	0,326	0,292	1	0,741	0,186	0,239	0

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



B. Le barbeau fluviatile

d. Bilan et caractérisation biométrique de l'effectif de poissons marqués

Au total, 65 individus de Barbeau fluviatile ont été équipés d'un dispositif radio avec une répartition des effectifs quasi-identique entre la France et la Suisse, soit respectivement 32 et 33 individus (Annexe 5). L'échantillon suivi est originaire de l'aval de la zone d'étude, c'est-à-dire du Rhône et de ses affluents la Seymaz et l'Allondon, de l'Arve et de la Menoge. Il est à noter cependant qu'un individu a été capturé et marqué dans le Giffre (partie médiane de l'Arve) ; les résultats le concernant présentés par la suite sont simplement descriptifs mais n'entrent pas dans les comparaisons inter cours d'eau.

Les individus marqués présentaient en moyenne une longueur totale de 537 mm [\pm 64], un poids de 1 536 g [\pm 505] et étaient âgés de 9 ans [\pm 2]. Les gammes de taille et de poids peuvent varier suivant leurs cours d'eau d'origine, par exemple les barbeaux de la Menoge mesurent entre 440 et 580 mm pour un poids de 894 à 1 920 g tandis que ceux du système Rhône font entre 363 et 656 mm pour un poids de 428 à 2 696 g (**Figure 60**). Cette différence n'est cependant pas significative pour ces deux caractères (KW ; $p > 0,05$). Il n'en est pas de même pour l'âge, puisque les barbeaux de l'Arve, âgés en moyenne de 8 ans [\pm 2] sont significativement plus jeunes que ceux de la Menoge qui eux ont un âge moyen de 11 ans [\pm 2] (KW ; $p < 0,01$). En revanche, ils ne présentent pas de différence significative avec les individus du Rhône qui ont un âge intermédiaire. Ces derniers ne présentent pas non plus de différence significative avec ceux de la Menoge. Par la suite, cette différence sera prise en considération dans l'analyse des comportements de déplacement.

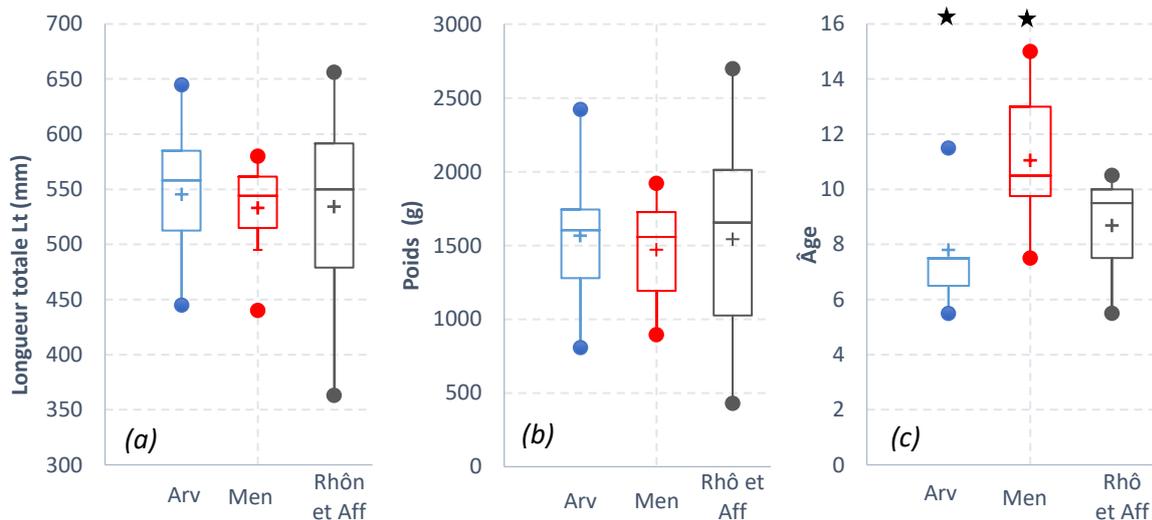
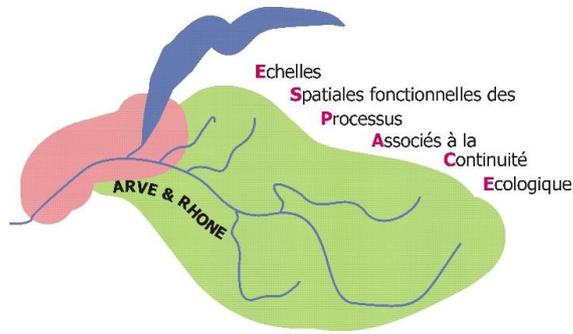


Figure 60 : Caractéristiques des barbeaux fluviatiles échantillonnés, présentés par cours d'eau d'origine ou de relâcher pour la partie suisse ; (a) longueur totale en mm ; (b) Poids en g ; (c) Âge défini par la scalimétrie. Les étoiles noires spécifient les groupes significativement différents entre eux (W ; $p < 0,01$).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



L'individu du Giffre n'apparaît pas sur la **Figure 60** ; au moment du marquage celui-ci faisait 506 mm, 1 352 g pour un âge de 7 ans minimum.

Parmi cet effectif de barbeaux marqués, tous n'ont pu être suivis en raison d'une disparition post-marquage de l'ordre de 20 % au total (**Figure 61**). Il est à noter que cette disparition post-marquage pour cette espèce est 10 fois plus élevée côté Suisse : soit 36 %, contre 3 % côté France pouvant être mise en lien avec les caractéristiques morphologiques du Rhône genevois (retenues profondes des barrages de Verbois et Chancy-Pougny pouvant occasionner la perte de signal radio ; cf. § III. 2) C. b.).

Pour les analyses qui vont suivre, ont été intégrés 52 individus, 31 côté France et 21 côté Suisse. Le devenir final à l'issue du suivi de ces derniers est défini selon 3 classes : perdus (env. 31 %), morts naturellement ou par prédation (21 %), et toujours vivants (48%) (**Figure 61**).

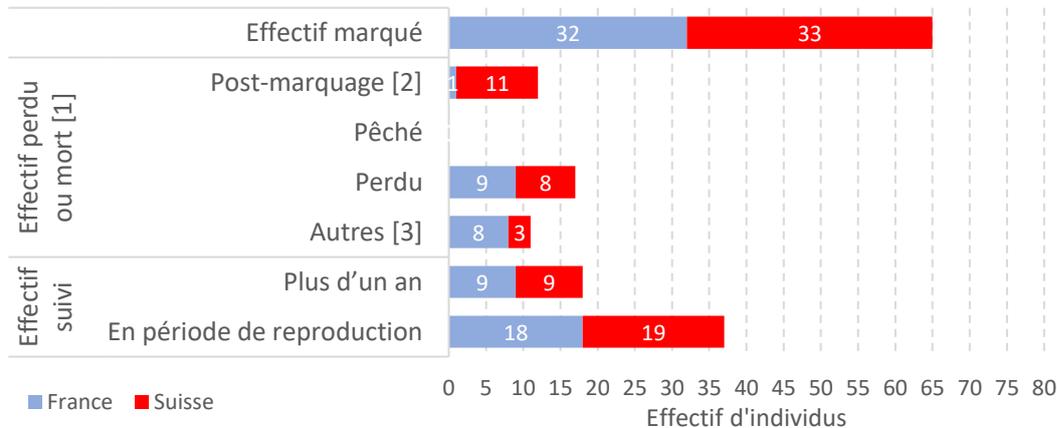


Figure 61 : Effectifs des barbeaux marqués en France et en Suisse ainsi que des effectifs suivis.

[1] Parmi les effectifs perdus ou morts non en post-marquage mais pêchés ou perdus, certains ont pu être suivis plus d'un an et/ou en période de reproduction. Ils interviennent donc dans le jeu de données. Le graphique fait état de la mortalité et de la perte à la fin du programme.

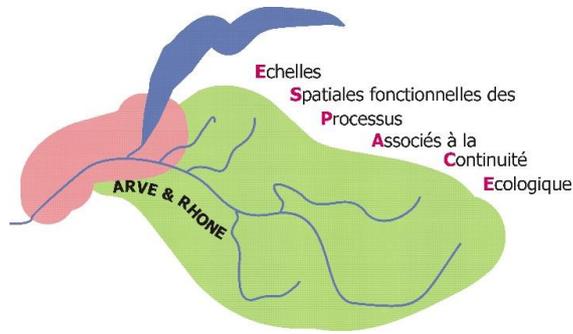
[2] Les disparitions « post-marquages » sont celles survenues le mois suivant l'opération de marquage.

[3] Les « autres » mortalités sont de causes inconnues (mort naturelle, post-reproduction, prédation...).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



e. Durée des suivis individuels

En moyenne, ces individus ont été suivis 240 jours [± 155], soit plus de 8 mois ; la variabilité individuelle est forte : entre 37 et 518 jours (**Figure 62**). Plus de la moitié des barbeaux perdus ou morts l'ont été lors de leur période de frai (15 individus sur 27), soit lors de la 1^{ère} saison suivie, soit lors de la 2^{nde} (cadre gris sur la **Figure 62**). En effet, cette période est coûteuse en énergie pour les géniteurs et l'issue peut leur être fatale.

Dix-neuf individus ont été suivis pendant 1 an et plus avec, pour la majorité, 2 périodes de reproduction intégrées dans cette période. Ces individus fournissent des informations importantes, notamment en termes de « homing » pour leur site de frai. Durant la période de reproduction généralement synonyme de mouvements pour les poissons, 37 individus ont été pistés (soit 60 %) ; seuls ces individus ont été intégrés dans les calculs pour définir la part de migrants et de sédentaires. En effet, il a été considéré qu'un individu n'ayant pas été suivi pendant la période de frai avait moins de « raisons » de se déplacer, et donc plus de chance d'être classé comme sédentaire alors qu'il n'adoptait pas réellement ce comportement.

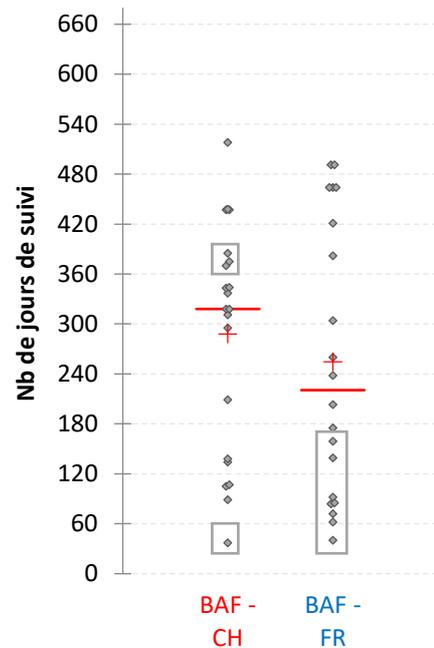


Figure 62 : Périodes de suivi des 52 individus suisses et français intégrés dans les analyses.

f. Distances et vitesses de déplacement

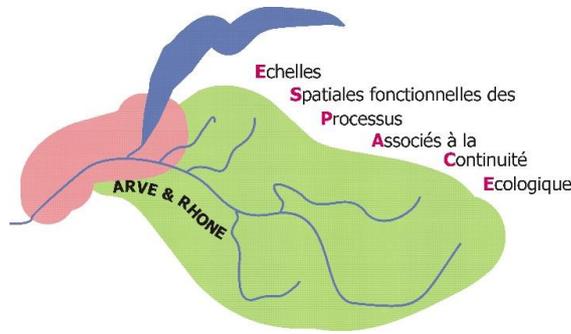
La **Figure 63** fait état des distances et des vitesses inter-contacts. Les valeurs positives correspondent à la montaison et les valeurs négatives à la dévalaison. De manière générale, plus le milieu est grand, plus les distances et les vitesses maximales enregistrées entre deux contacts sont élevées. Cette généralité se traduit également à travers le taux de mobilité qui correspond au nombre de déplacements significatifs (dont le détail est disponible en Annexe 7), c'est-à-dire supérieurs aux marges d'erreur préalablement définies (cf. § III. 2) B). Dans les grands cours d'eau tels que le Rhône et l'Arve, le taux de mobilité des barbeaux est de l'ordre de 30 - 35 % tandis qu'il s'élève autour de 20 % pour les affluents (**Figure 63**).

La plupart des nuages de points, qu'ils décrivent les distances ou les vitesses, sont symétriques. Ils mettent en évidence que les individus de barbeau fluvial circulent dans les deux sens sur des distances et à des vitesses équivalentes. Cependant, le nuage de points de la Menoge affiche un profil différent : les distances maximales parcourues vers l'amont sont de l'ordre du km alors que de telles valeurs ne se retrouvent pas à la dévalaison. Cela met en évidence les remontées rapides et en une seule fois des géniteurs dans cet affluent. La dévalaison s'étale généralement sur plusieurs semaines



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



permettant ainsi des points de contact intermédiaires entre le site de reproduction et le site de repos et d'alimentation ; les valeurs de distances et vitesses inter-contacts sont donc moins élevées.

Les individus de l'Arve et du Rhône montrent un certain nombre de déplacements inférieurs à 2 km et d'autres, plus ponctuels, jusqu'à plus de 10 km. La mise en relation des déplacements et des vitesses sur le Rhône montre que des « migrations » de l'ordre de 6 km ont été parcourues en une seule fois. Ces « migrations » importantes ont été vers l'amont et juste après l'opération de marquage.

Les nuages de points du Giffre sont relativement « plats » par rapport aux autres car ils ne représentent les déplacements que d'un seul individu sédentaire. Ces déplacements ne peuvent être mis en relation avec les autres.

Il n'y a cependant pas de différence significative entre les distances inter-contacts observées dans les différents cours d'eau (KW ; $p > 0.5$). Le constat est similaire pour les vitesses inter-contacts entre les cours d'eau (KW ; $p > 0.5$).

Lorsque les caractéristiques morphologiques sont mises en relation avec les distances et les vitesses inter-contacts, aucune corrélation n'apparaît. Cette analyse a été réalisée de manière globale puis en différenciant les cours d'eau d'origine des individus suivis étant donné les différences observées au § III. 4) B. d.

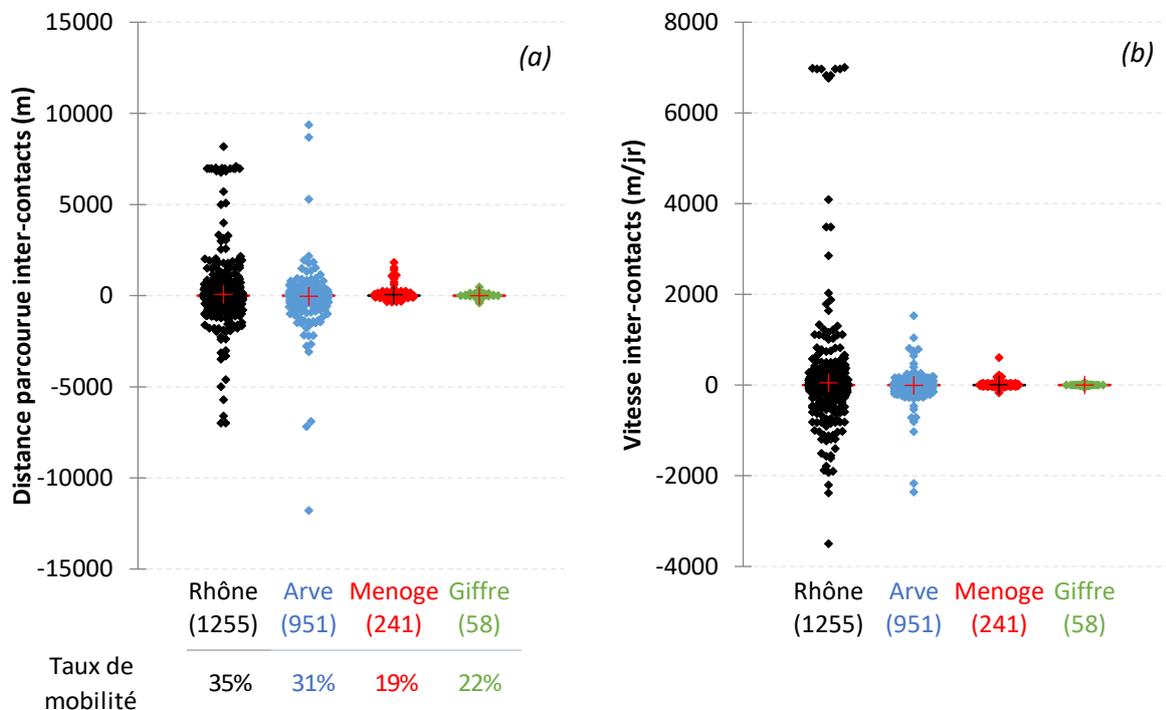
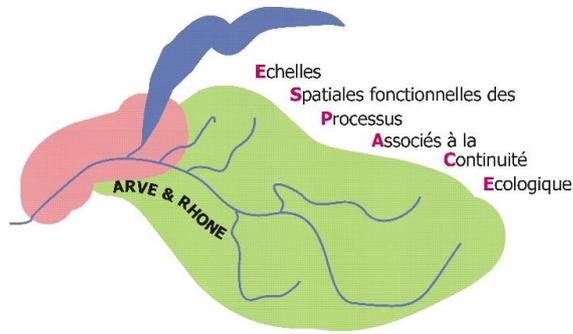


Figure 63 : Nuages de points a) des distances parcourues (m) entre deux contacts pour tous les barbeaux suivis regroupés par cours d'eau ; b) des vitesses moyennes (m/jr) parcourues pour tous les barbeaux suivis regroupés par cours d'eau.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



g. Profils de déplacement de l'ensemble des individus suivis de barbeau fluviatile

Les **Figure 64** et **Figure 66** présentent les déplacements de chaque individu suivi entre son point de marquage et son dernier point de contact ; chaque point du graphique correspond à un point de contact via les dispositifs mobiles ou fixes. Un tronçon en pointillé a été assigné à une période sans détection de l'individu. La convention de couleur précédemment adoptée a été conservée : noir/gris pour les individus du Rhône, bleu pour ceux de l'Arve, rouge pour ceux de la Menoge et vert pour celui du Giffre. Pour globaliser l'ensemble des individus sur un même graphique, un **Pm** (Point métrique) global qui additionne les successions des Pm de chaque cours d'eau a été défini par poisson. Ainsi, tout le réseau est intégré sur ces figures : le Pm minimal (48 000 m) correspondant au marais de l'Etournel à l'aval du barrage de Chancy-Pougny et le Pm maximal (120 000 m) aux seuils de Scionzier.

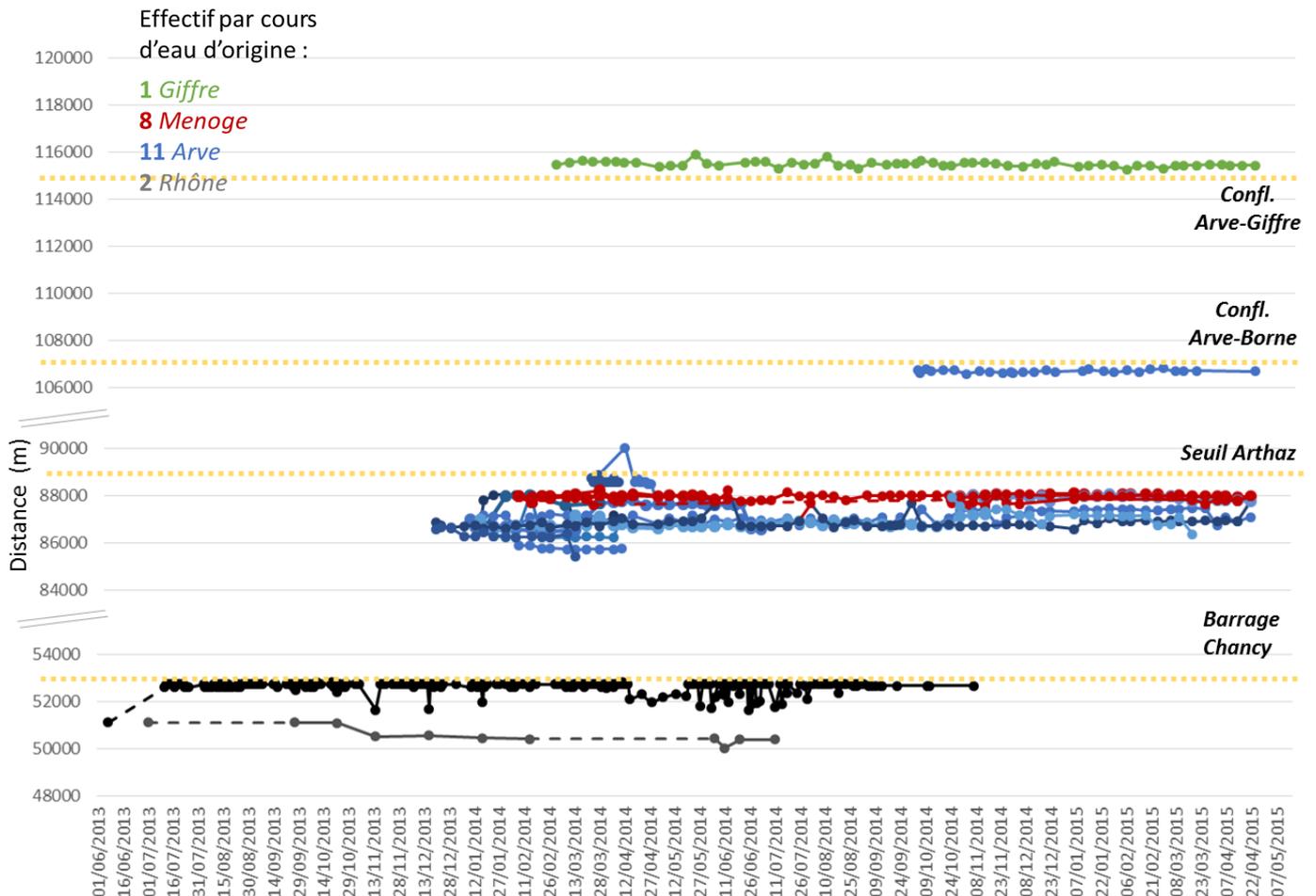
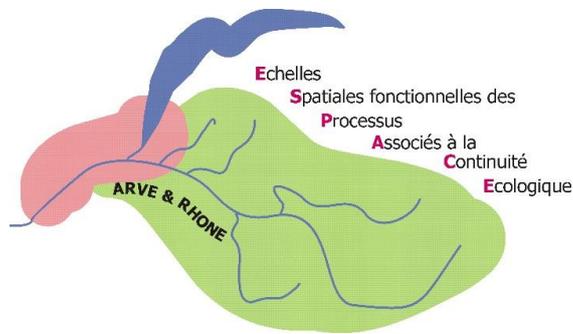


Figure 64 : Graphique de déplacement des barbeaux fluviatiles définis comme sédentaires en fonction du temps et de leur point de marquage et cours d'eau d'origine.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Comme pour la truite, les individus de barbeau fluviatile ont été séparés entre « migrants » et « sédentaires » suivant leur schéma de déplacement. Ainsi, suivant les critères définis au § II.7) , 22 individus ont été qualifiés de « sédentaires » et se répartissent tout au long de la zone d'étude (**Figure 64**). Côté France, ce sont des individus qui n'ont pas cherché à changer de cours d'eau à l'inverse de leurs congénères « migrants ». Ils sont restés, pour la majorité, plus d'un an sur une même aire géographique inférieure à 2 km de linéaire de cours d'eau. Les individus de l'Arve, de la Menoge et même celui du Giffre sont pourtant situés entre 250 et 700 m d'une confluence. Le groupe d'individus situés à l'aval d'Arthaz (entre les *Pm* 85 000 et 88 000), se cantonnent entre le pont d'Etrembières et la partie de la Basse Menoge comme le montre la **Figure 64**.

Des déplacements entre les bras secondaires (ceux du secteur d'Annemasse) et le cours principal de l'Arve sont observés. Ces déplacements n'ont pas été attribués à un comportement de migration puisque le passage de l'un à l'autre se fait sur quelques centaines de mètres et que les conditions de vie entre ces deux milieux sont peu différentes en termes d'habitat physique et de thermie ; seule la composante hydrologique varie.

Une analyse de la répartition des individus de barbeau entre ces deux milieux sur ce secteur de l'Arve en fonction des débits de l'Arve a été réalisée et est présentée sur les box-plots de la **Figure 65**. Chaque localisation d'un individu de barbeau dans l'Arve ou dans un bras secondaire a été associée à la valeur de débit moyen journalier de l'Arve enregistrée à la date de cette localisation. Ainsi, il en ressort que lorsque le débit de l'Arve est plus élevé, les barbeaux ont tendance à se réfugier dans les bras secondaires (valeur moyenne sur le box-plot « Bras II » plus élevé ; 72 m³/s). A l'inverse, en période de basses eaux, les barbeaux ont davantage tendance à se maintenir dans le cours principal de l'Arve (valeur moyenne sur le box-plot « Bras II » plus faible ; 56 m³/s). Ce constat est à mettre aussi en lien avec la moindre alimentation en eau des bras secondaires en période d'étiage.

Ce secteur, entre le « bras du casino » et le pont de l'A40 à l'aval d'Arthaz, est très « prisé » par les barbeaux « sédentaires » et « migrants » et, comme on le verra par la suite, par les chevaines également.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

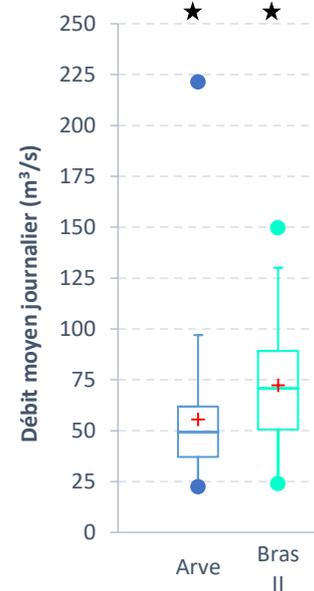
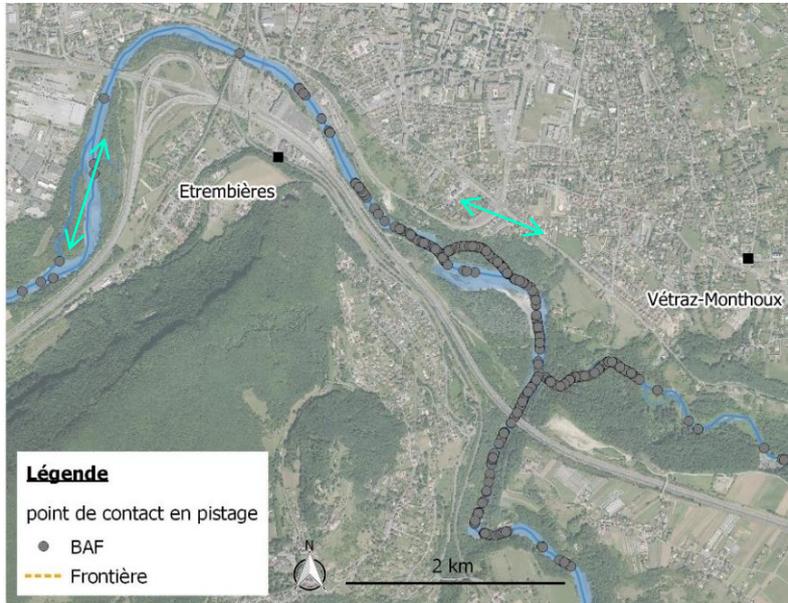
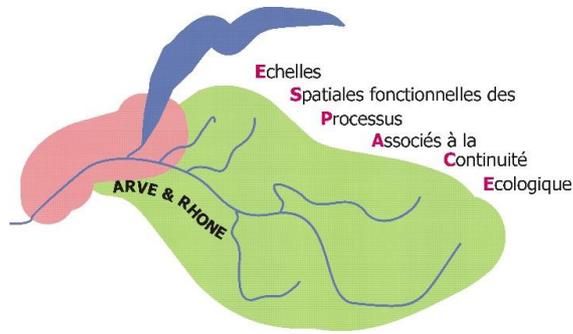


Figure 65 : Secteur de l'Arve entre Etrembières et Vétraz-Monthoux très fréquenté par de nombreux individus de barbeau fluviatile (proximité de la confluence de la Menoge) ;
(a) localisations hebdomadaires issues des campagnes de pistage ; (b) Box-plot des débits moyens journaliers par milieu fréquenté par les individus de barbeau dans ce même secteur. Les étoiles noires indiquent une différence significative ($p < 0.001$).

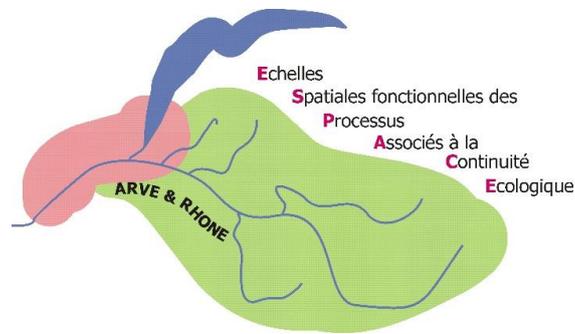
Pour le système Rhône, seuls deux individus semblent vivre sur le même secteur durant toutes les phases de leur cycle annuel de vie adulte, l'un vivant au pied du barrage de Chancy-Pougny, sans pour autant l'avoir franchi ou vouloir le franchir, et le second un peu plus en aval. Pour ce dernier, son statut de sédentaire est moins robuste, puisqu'il n'a pas été contacté entre les mois de mars et mai 2014, période qui marque le début de la période de frai pour le barbeau, souvent synonyme de mouvements.

Pour les individus qualifiés de « migrants » (soit 30 individus au total), les distances parcourues sont de plusieurs kilomètres et le changement de milieu est presque systématique. Le record de montaison est de 18 km pour un barbeau de l'Arve (celui monté jusqu'à la confluence du Borne, **Figure 66**). Sur le secteur Menoge - Arve à Vétraz-Monthoux, on retrouve un groupe conséquent d'individus qui utilisent la Menoge et l'Arve à des phases différentes de leur cycle de vie. Six barbeaux sur 17 (soit 35 %) ayant été suivis durant la période de reproduction sur ce secteur sont remontés dans la Menoge et ce jusqu'à 2,8 km pour le point plus en amont, qui correspond au viaduc de la N205. Parmi ces migrants, 4 d'entre eux ont été suivis durant les deux saisons du frai successives 2014 et 2015 et auraient été susceptibles de montrer un homing pour leur site de frai dans la Menoge. Cependant la fin des campagnes de pistage en début de période de reproduction 2015 de cette espèce n'a pas permis de valider cette hypothèse. Un seul individu est monté précocement dans la Menoge fin avril



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



2015 mais ce dernier ayant été marqué en octobre 2014 n'a été suivi qu'au cours de la reproduction 2015. L'importante crue du 1^{er} au 3 mai 2015 a pu entraver ou retarder les potentielles remontées des barbeaux de l'Arve marqués à la 1^{ère} saison de suivi, remontées qui n'ont pas été observées au printemps 2015 dans la Menoge aval. En effet, les suivis hebdomadaires se sont arrêtés le 22 avril 2015. Une seule campagne de pistage a été réalisée après la crue pour en appréhender ses conséquences.

Parmi les individus suisses, beaucoup ont réalisé un grand déplacement post-marquage vers l'amont de l'ordre de 6 km en moyenne lors des marquages des mois de mai et juin 2015 (phénomène observé dans une moindre mesure en 2014) ; cela concerne 11 individus sur 20 individus suivis sur le Rhône (soit 55 % des individus). Le type de marque (externe ou interne) ne semble pas être un facteur explicatif de ce comportement puisque la proportion d'individus marqués par l'un et l'autre type d'émetteur est équivalente entre les individus effectuant cette migration post-marquage et ceux ne l'effectuant pas. Ce phénomène n'a presque pas été observé pour les individus suivis sur le système Arve côté France. Ces derniers ont été marqués essentiellement en hiver. Un seul individu a effectué 2 km de migration post-marquage vers l'amont et ce au mois d'août. Ce phénomène est donc davantage observé au printemps et en été peut être en lien avec la température plus élevée de l'eau à cette saison (> 11.5°C).

La **Figure 66** met en évidence que le Rhône est segmenté par les gros ouvrages hydroélectriques installés sur son cours. Les barbeaux suivis se cantonnent majoritairement aux secteurs inter-barrages avec des va-et-vient à l'intérieur de ces secteurs. Sur le segment entre les barrages de Verbois et Chancy-Pougny, le tronçon entre 56 000 – 58 000 m, correspondant au linéaire entre le pont de la Plaine et les Teppes de Verbois, semble plus attractif car davantage fréquenté par le groupe de barbeaux suivis.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

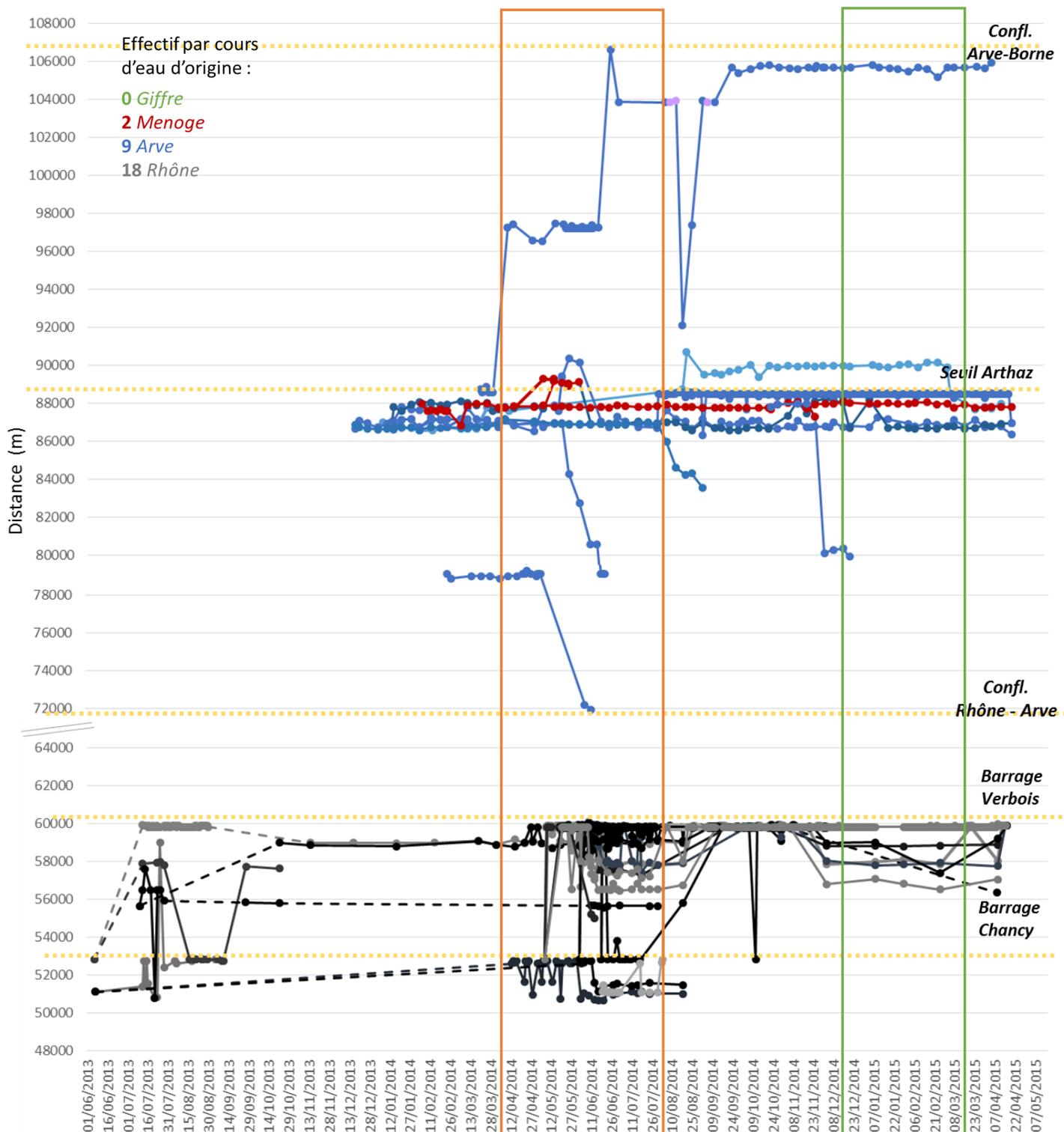
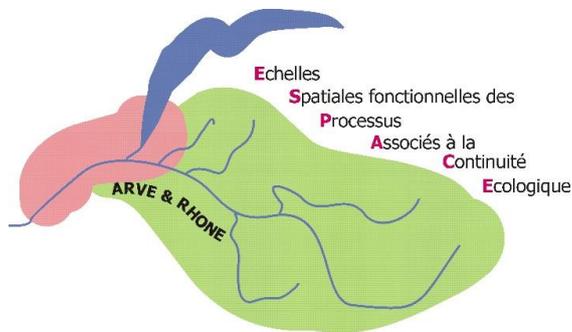


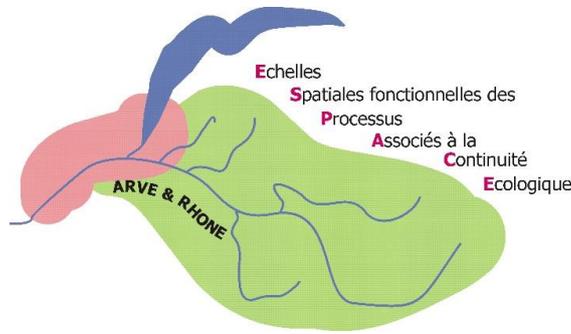
Figure 66 : Graphiques des déplacements des barbeaux fluviaux définis comme migrants en fonction du temps et de leur point de marquage et cours d'eau d'origine.

Le cadre orange met en évidence la période de reproduction du barbeau et le vert la période hivernale.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Pour les barbeaux fluviatiles migrants, la majorité des déplacements est observée au moment de la période de reproduction comme l'illustrent les **Figure 66** (période ciblée par le cadre orange) et **Figure 67** avec les moyennes mensuelles de déplacements hebdomadaires. Le pic des déplacements observés pour l'ensemble des barbeaux (migrants et sédentaires) se situe au mois de juin. On observe une mise en mouvement générale dès le mois de mai. A partir de juillet, les individus migrants restent encore relativement mobiles jusqu'en octobre tandis que les individus sédentaires après ce mois-ci n'effectuent pas plus de 800 m à la semaine. Durant la période hivernale (cadre vert sur la **Figure 66**), plusieurs individus ont élu domicile sur un site précis et n'en n'ont plus bougé jusqu'à l'arrivée du printemps. Cette période, entre décembre (ou janvier suivant les années) et mars, est synonyme pour l'Arve et le Rhône d'une température inférieure à 6°C, température extrême pour le barbeau fluviatile dont le préférendum thermique se situe entre 10°C et 24°C (TISSOT & SOUCHON, 2011).

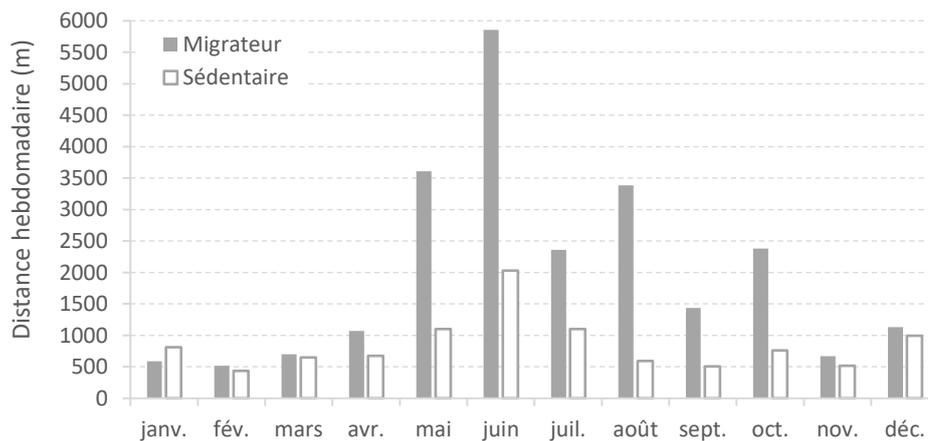


Figure 67 : Moyennes mensuelles des distances hebdomadaires (des mouvements validés) effectuées par les barbeaux fluviatiles migrants et sédentaires suivis durant toute l'étude.

Le bilan des statuts par cours d'eau pour cette espèce est dressé dans le **Tableau 16**.

Il met en évidence lorsqu'on globalise l'ensemble des individus de barbeau fluviatile suivis une part équivalente de comportements migrants et sédentaires. Or lorsqu'on s'intéresse aux cours d'eau d'origine des individus, il apparaît nettement que les individus des grands systèmes (Rhône et Arve) adoptent des comportements de migrants (constat flagrant pour le Rhône avec 89% d'individus migrants) tandis que dans les affluents (Menoge et Giffre), les individus vont préférer une stratégie de sédentarité (80% d'individus sédentaires dans la Menoge).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

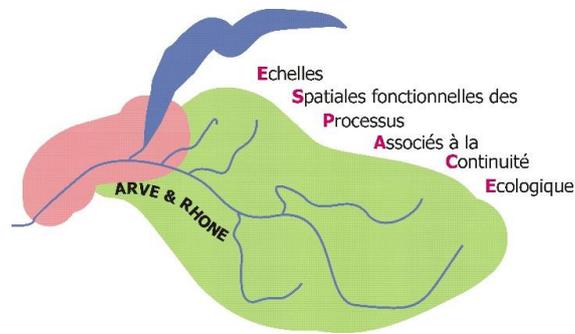


Tableau 16 : Bilan des proportions des barbeaux fluviaux sédentaires et migrants par cours d'eau et par période de suivi.

Les pourcentages en italique sont donnés à titre indicatif mais n'ont pas de réelle signification étant donné le peu d'individus suivis sur ces cours d'eau.

	Effectifs				Pourcentages			
	Barbeaux sédentaires		Barbeaux migrants		Barbeaux sédentaires		Barbeaux migrants	
	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai
Arve	11	4	10	9	52%	31%	48%	69%
Rhône	2	2	18	17	10%	11%	90%	89%
Giffre	1	1	0	0	<i>100%</i>	<i>100%</i>	<i>0%</i>	<i>0%</i>
Menoge	8	4	2	1	80%	80%	20%	20%
Total	22	11	30	27	42%	29%	58%	71%
Total BV Arve	20	9	12	10	63%	47%	38%	53%

h. Influence des conditions hydrologiques et thermiques sur les déplacements

La mise en relation des distances et vitesses de déplacements inter-contacts avec les variables environnementales qui régissent habituellement le comportement des poissons mettent en relief certaines tendances. Il a été défini qu'une variable environnementale influençait le comportement des poissons seulement si les corrélations étaient significatives et de même sens pour les deux paramètres (Distance et Vitesse) du fait que les vitesses sont calculées à partir des distances. On notera que pour le Rhône seules les vitesses montrent des corrélations avec deux variables de débit ; elles ne sont donc pas retenues car considérées comme peu valables.

Ainsi, les déplacements des barbeaux dans le Rhône et la Menoge ne semblent pas être régis par les fluctuations des moyennes des débits et des températures inter-contacts (**Tableau 17**). A l'inverse, dans l'Arve, la montaison des barbeaux paraît être influencée par une croissance des débits tandis que la dévalaison serait davantage soumise à l'élévation de la thermie (corrélation négative).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

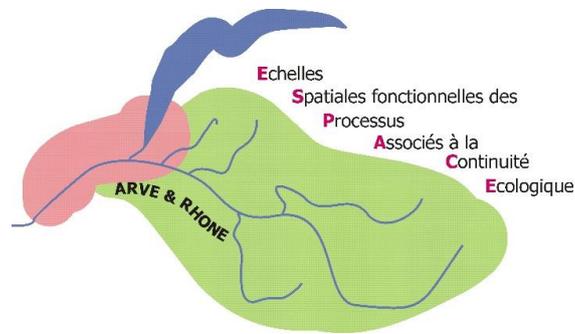


Tableau 17 : Relations entre distances et vitesses de montaison (D+ et V+) et de dévalaison (D- et V-) et variables environnementales (débit et thermie) : coefficients de corrélation de Spearman et p-values associées pour chacun des cours d'eau.

En bleu, les corrélations positives et en rouge, les corrélations négatives prises en considération.

NB : Les variables de débit et de température pour le Rhône et l'Arve sont toutes corrélées positivement entre elles. Pour la Menoge, les corrélations sont négatives entre QM_{max} et les variables thermiques et entre TM/n et les variables de débit (Annexe 6).

Variables	Rhône				Arve				Menoge				
	D+	V+	D-	V-	D+	V+	D-	V-	D+	V+	D-	V-	
Matrice de corrélation (Spearman)	QM/n	0,033	-0,063	0,033	0,076	0,133	0,125	-0,171	-0,103	0,039	0,001	-0,094	-0,138
	QM _{max}	0,039	-0,252	0,001	0,275	0,292	0,256	-0,140	0,004	0,073	0,014	-0,116	-0,114
	QM _{min}	-0,019	0,174	0,025	-0,207	-0,033	-0,011	-0,146	-0,160	-0,038	-0,061	-0,052	-0,090
	TM/n	-0,038	0,019	0,029	-0,096	-0,027	-0,025	-0,171	-0,177	0,037	0,075	0,051	0,063
	BAF	TM _{max}	-0,002	-0,099	0,052	0,029	0,057	0,047	-0,167	-0,136	0,047	0,070	0,067
	TM _{min}	-0,059	0,127	0,000	-0,215	-0,110	-0,095	-0,180	-0,233	0,048	0,097	0,054	0,056
p-values	QM/n	0,549	0,253	0,568	0,185	0,001	0,003	0,002	0,057	0,694	0,988	0,393	0,209
	QM _{max}	0,482	< 0,0001	0,989	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,009	0,945	0,457	0,884	0,289	0,298
	QM _{min}	0,727	0,002	0,664	0,000	0,421	0,787	0,007	0,003	0,698	0,538	0,633	0,412
	TM/n	0,492	0,729	0,608	0,093	0,519	0,545	0,001	0,001	0,704	0,446	0,643	0,567
	BAF	TM _{max}	0,966	0,073	0,365	0,614	0,171	0,256	0,002	0,012	0,636	0,479	0,539
	TM _{min}	0,283	0,021	0,997	0,000	0,008	0,021	0,001	< 0,0001	0,626	0,324	0,623	0,609

Les données concernant le Giffre ont été exclues de cette analyse car elles ne se réfèrent qu'à un seul individu.

i. Domaines vitaux

Les barbeaux ont été suivis entre 37 et 518 jours. Le cycle annuel a été suivi dans son intégralité pour 18 individus (soit 34 % de l'effectif analysé). Pour les autres, une seule partie de leur domaine vital a pu être définie. Les barbeaux dans les affluents Giffre et Menoge vivent sur des linéaires de cours d'eau moins étendus, en moyenne 667 m pour la Menoge¹⁸, que ceux des grands cours d'eau Arve et Rhône où en moyenne les individus ont parcouru 2 682 m et 5 588 m respectivement (**Figure 68**). La taille des domaines vitaux entre les différents cours d'eau est significativement différente (KW ; $p < 0,001$). Autrement dit, les barbeaux vivent sur un linéaire de rivière plus grand dans le Rhône que dans l'Arve et que dans la Menoge. Cette constatation est aussi en lien avec les comportements des individus décrits auparavant. En effet, dans les grands milieux les barbeaux ont tendance à être « migrants » alors que dans les petits affluents ils optent pour un comportement plutôt « sédentaire ». Les petits milieux offrent a priori plus de diversité d'habitats sur un court linéaire que les grands milieux qui sont davantage homogènes.

¹⁸ L'individu du Giffre a un domaine vital de 642 m.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

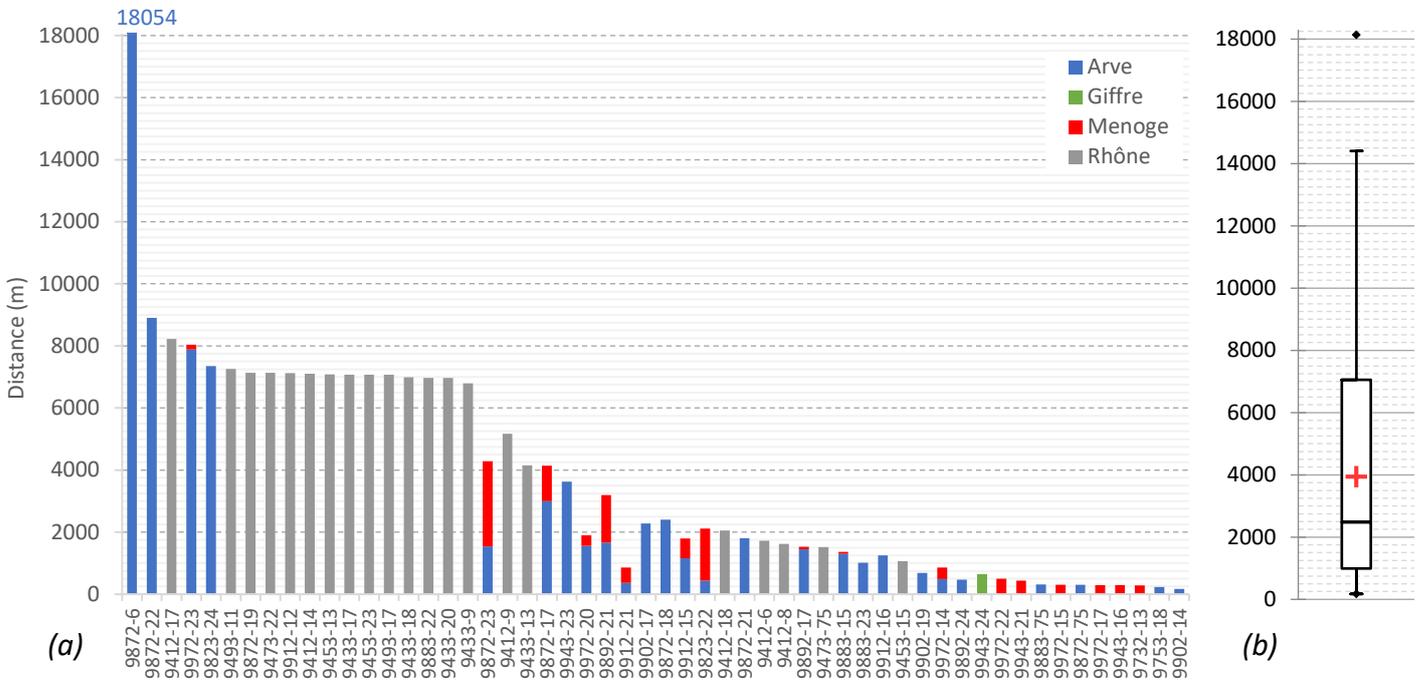
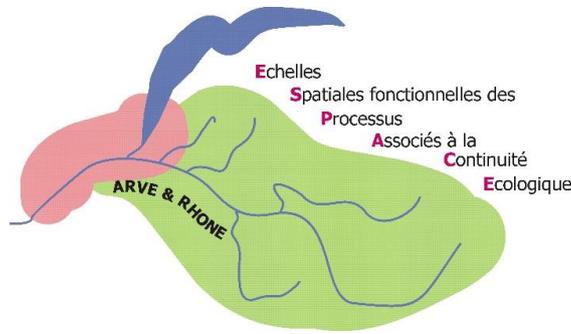


Figure 68 : (a) Domaine vital (en m) de chaque individu de barbeau fluviatile suivi en spécifiant les linéaires utilisés par cours d'eau et (b) box-plot pour visualiser la répartition en quartiles des domaines vitaux. La croix rouge sur le box-plot indique la longueur moyenne des domaines vitaux.

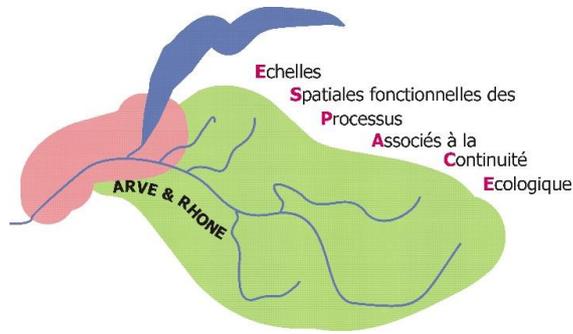
Un comportement remarquable de migration se détache du lot avec un domaine vital d'environ 18 km pour un barbeau de l'Arve médiane. Cet individu originaire d'Arthaz est remonté vers l'amont ; il a traversé la zone des gorges de Bellecombe et franchi 2 seuils en enrochements libres avant d'élire domicile dans le secteur de divagation à la passerelle piétonne de Bonneville (Figure 69 a). Certains individus au contraire, montrent un comportement de sédentarité dans l'Arve avec des domaines vitaux de l'ordre de la centaine de mètres. Ce sont généralement des individus qui vivent à proximité ou dans un bras secondaire sur la partie basse de l'Arve française (Figure 69 b et c).

Les Figure 68 et Figure 69 mettent aussi en relief qu'un certain nombre d'individus (11 au total) vivent « à cheval » entre l'Arve et la Menoge. Certains n'utilisent que les abords de la confluence (par exemple 9892-17 ou 9883-15) alors que d'autres utilisent autant de linéaire sur l'un et l'autre des cours d'eau à différents moments dans l'année (par exemple 9872-23 ou 9892-21).

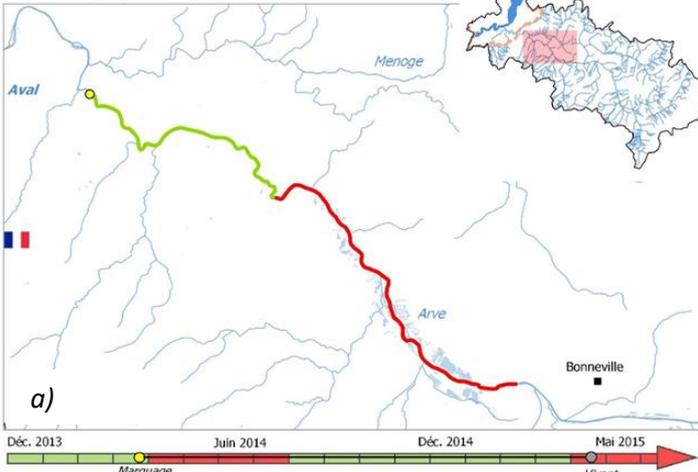


h e p i a

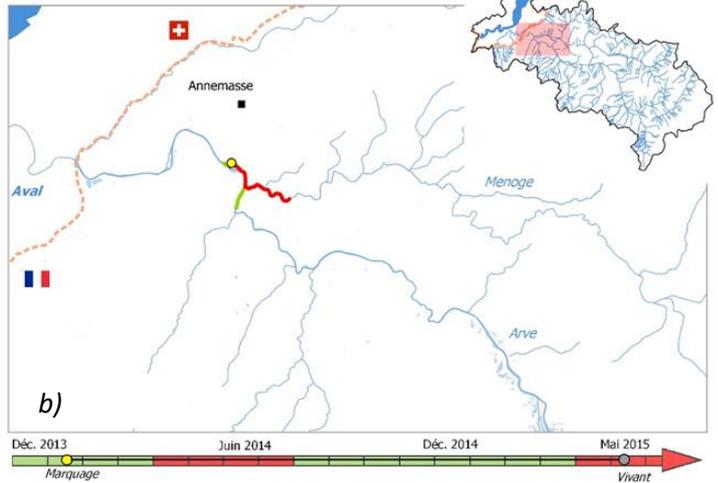
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



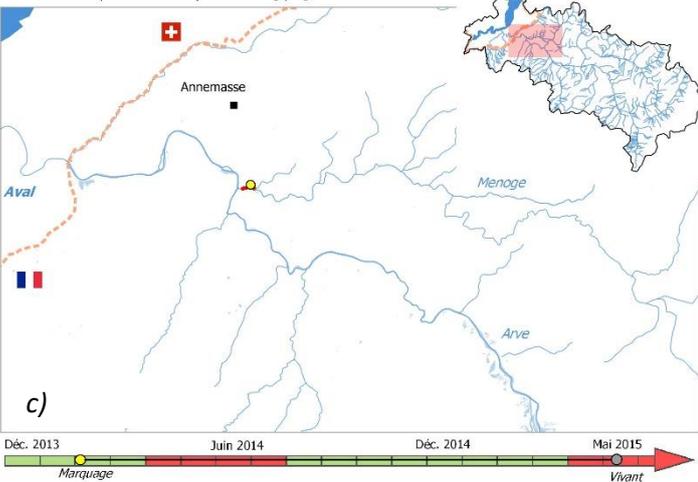
BAF 9872-6 | Lt = 535 mm | Pt = 1460 g | Age : 7+



BAF 9892-21 | Lt = 505 mm | Pt = 1408 g | Age : 11+



BAF 9943-21 | Lt = 495 mm | Pt = 1095 g | Age : 9+



BAF 9412-14 | Lt = 653 mm | Pt = 2160 g | Age : 9+

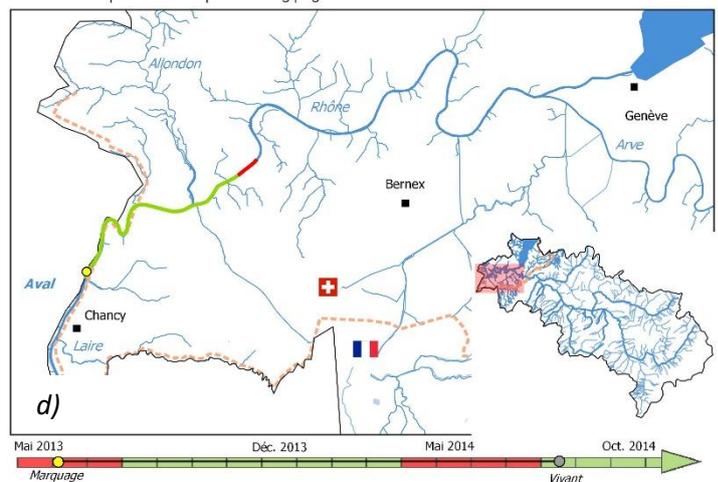


Figure 69 : Exemples de domaines vitaux cartographiés de barbeaux fluviaux.

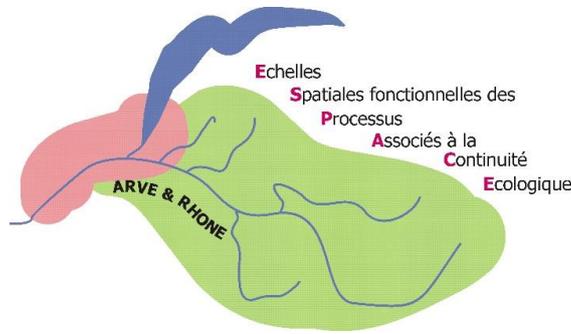
En vert, le linéaire utilisé en dehors de la période de reproduction et en rouge linéaire utilisé durant la période de reproduction. Le point jaune localise le point de marquage de l'individu, soit le point initial du suivi. L'axe temporel spécifie la durée de suivi de l'individu. a), b) et d) sont des individus « migrants » et c) un individu « sédentaire ».

Il est à noter aussi que la majorité des individus du Rhône ont un domaine vital de l'ordre de 7 km, soit l'équivalent de la distance inter-barrages entre Verbois et Chancy-Pougny. La distance parcourue par ces individus du Rhône en période de reproduction est équivalente à la taille de leur domaine vital observé sur la totalité de leur période de suivi (Figure 70). Autrement dit les individus du Rhône parcourent pour la majorité l'intégralité du tronçon inter-barrages où ils se trouvent au moment de la reproduction. Ce constat a peut-être été influencé par la date de marquage qui pour ces individus genevois a été systématiquement au moment de la période de reproduction.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Les individus de barbeau fluviatile vivant dans l'Arve, la Menoge ou par alternance dans ces deux cours d'eau parcourent au cours de leur période de reproduction une distance qui équivaut en moyenne à 48 % ($\pm 36\%$) de leur domaine vital (**Figure 70**).

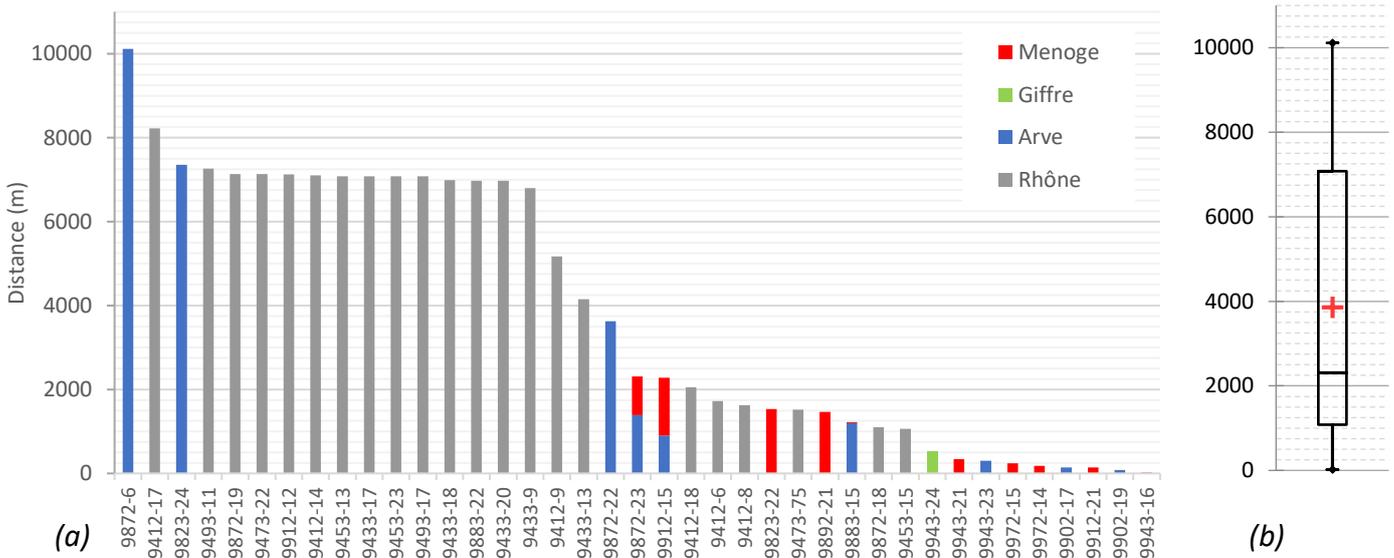


Figure 70 : (a) Distances parcourues dans chaque cours d'eau par chaque individu de barbeau fluviatile pendant la période de reproduction (en m) et (b) box-plot pour visualiser la répartition en quartiles de ces distances. La croix rouge sur le box-plot indique la moyenne des distances parcourues.

Les différences de taille des domaines vitaux individuels ne s'expliquent pas par la diversité des caractéristiques morphologiques des individus. En effet, le caractère « explorateur » des jeunes individus de l'Arve et du Rhône ne peut être invoqué pour expliquer la grande taille des domaines vitaux de cette espèce dans ces deux cours d'eau. Il n'y a aucune corrélation entre les deux, comme le spécifie la matrice des corrélations de Spearman (**Tableau 18**).

Tableau 18 : Matrice des corrélations de Spearman et p-values entre les domaines vitaux des barbeaux suivis et ayant validés la période de reproduction avec leurs caractéristiques biométriques (taille, poids, âge). Les corrélations positives sont indiquées en rouge tandis que les négatives sont indiquées en bleu.

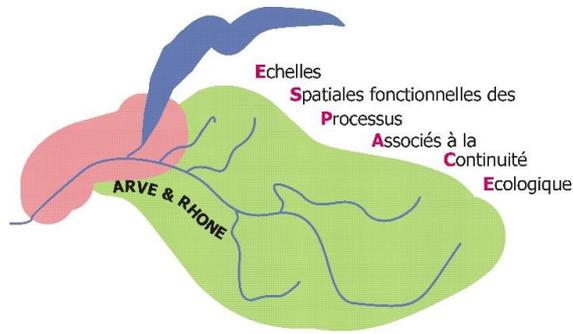
Variables	Matrice de corrélation (Spearman)				p-values			
	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Âge	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Âge
Domaine vital	1	-0,014	0,090	-0,320	0	0,936	0,589	0,146
Longueur totale (mm)	-0,014	1	0,931	0,131	0,936	0	< 0,0001	0,560
Biomasse (g)	0,090	0,931	1	0,128	0,589	< 0,0001	0	0,568
Âge	-0,320	0,131	0,128	1	0,146	0,560	0,568	0

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



C. Le chevaine

a. Bilan et caractérisation de l'effectif de poissons marqués

Soixante-dix-sept individus ont été marqués, dont 30 côté France et 47 côté Suisse (Annexe 5). La majeure partie de l'effectif suivi (69 individus, soit 90 % de l'effectif marqué) est localisée sur la partie aval de la zone d'étude c'est à dire le continuum Rhône – Arve – Menoge. Les 10 % restants (8 individus) vivent sur la partie basse du Giffre, secteur situé 27 km en amont (cf **Figure 46**).

Les chevaines ont essentiellement été marqués en hiver en France et au printemps-été en Suisse. Ils se caractérisent au moment de cet échantillonnage par une longueur totale moyenne de 409 mm [± 40], un poids moyen de 879 g [± 286] et un âge moyen de 7 ans [± 2]. Suivant leur cours d'eau d'origine, les chevaines affichent des gammes de taille/poids significativement différentes, différence qui ne s'observe pas pour les âges définis par scalimétrie (**Figure 71**). Ainsi, les chevaines de l'Arve et du Giffre sont significativement plus grands et gros, soit en moyenne 433 mm [± 32] et 1033 g [± 243], que les chevaines du Rhône et affluents qui mesurent 399 mm [± 42] et pèsent 817 g [± 303] en moyenne (MW ; $P < 0.01$). Cela signifierait que la croissance des individus vivant dans l'Arve et le Giffre serait plus élevée que celle des individus demeurant dans le système Rhône. Les individus issus de la Menoge présentent des caractéristiques biométriques intermédiaires, soit en moyenne 407 mm [± 25] et 839 g [± 122] (**Figure 71**).

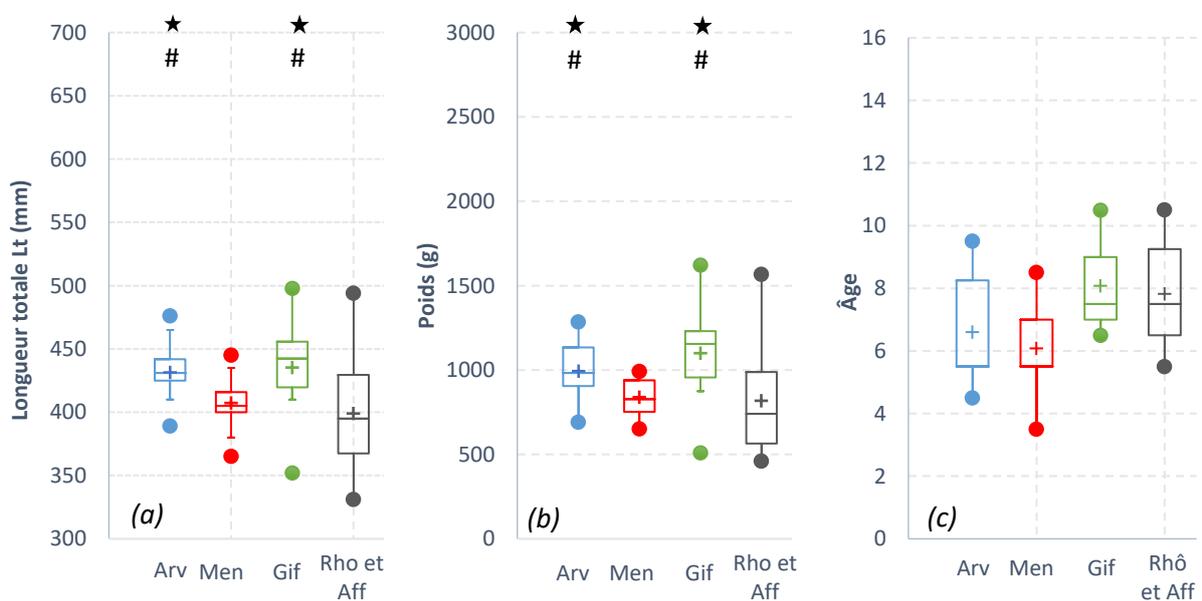
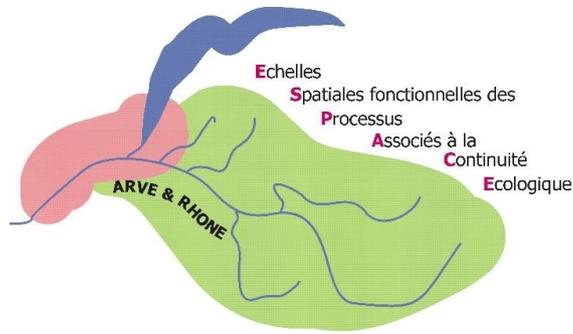


Figure 71 : Caractéristiques biométriques des chevaines échantillonnées, présentées par cours d'eau d'origine ou de relâcher pour la partie suisse ; (a) longueur totale en mm ; (b) poids en g ; (c) âge défini par la scalimétrie. Les étoiles noires spécifient la différence significative par rapport à la catégorie Rhône et Affluents (MW ; $p < 0.01$). Les dièses spécifient l'absence de différence significative entre les groupes (MW ; $p > 0,05$).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Parmi les 77 individus marqués, un certain nombre a été perdu à l'issue de l'opération de marquage. La perte liée à cette étape s'élève à 26 % des individus marqués pour cette espèce ; la disparition post-marquage a été similaire de chaque côté de la frontière 23 % (France) et 27 % (Suisse) contrairement aux deux autres espèces précédentes (**Figure 72**). Ainsi les analyses qui vont suivre se basent sur 57 individus (23 individus côté France et 34 côté Suisse). Parmi eux, 63 % ont fourni des informations sur la période de reproduction. Au cours de l'étude, l'effectif suivi a été réduit à cause des pertes dues à la mortalité (naturelle ou autre) à hauteur de 40 % ou la perte d'individus (sortis du système par prélèvement ou résidant sur une portion de cours d'eau non prospectée) à hauteur de 35 %. A la fin des campagnes de pistage au mois d'avril 2015, il restait 25 % de l'effectif initial suivi encore en vie.

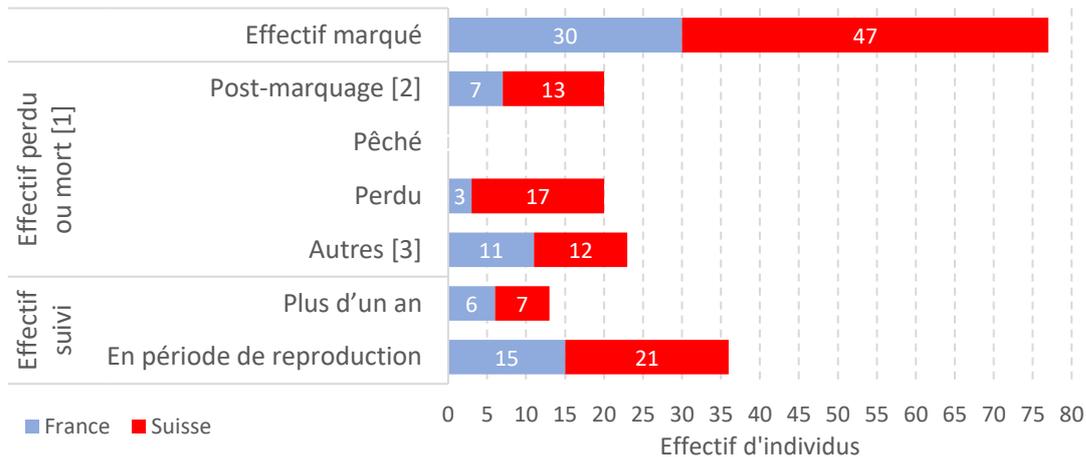


Figure 72 : Effectifs des chevaines marqués en France et en Suisse ainsi que des effectifs suivis.

[1] Parmi les effectifs perdus ou morts non en post-marquage mais pêchés ou perdus, certains ont pu être suivis plus d'un an et/ou en période de reproduction. Ils interviennent donc dans le jeu de données. Le graphique fait état de la mortalité et de la perte à la fin du programme.

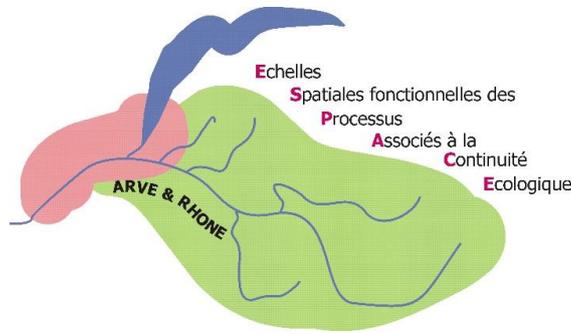
[2] Les disparitions « post-marquages » sont celles survenues le mois suivant l'opération de marquage.

[3] Les « autres » mortalités sont de causes inconnues (mort naturelle, post-reproduction, prédation...).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



b. Durée des suivis individuels

Un individu de chevaine a été suivi en moyenne 210 jours [± 156], soit environ 7 mois. La fourchette des durées de suivi est comprise entre 41 et 675 jours (**Figure 73**). Le cours d'eau d'origine de l'individu n'influence pas significativement la durée du suivi. Autrement dit les mortalités ou pertes d'individus n'affectent pas plus un cours d'eau qu'un autre. La majorité des individus ayant survécu à la période de frai suivant le marquage a été étudiée sur des durées proches ou supérieures à 1 an, soit 13 individus (**Figure 72**). Parmi eux, 2 individus originaires de la Laire (affluent rive gauche du Rhône à l'aval de Chancy) ont pu être étudiés pendant 22 mois (**Figure 73**).

Au contraire il est à noter qu'un certain nombre d'individus ont été perdus ou morts au moment de la période de reproduction et ce surtout côté France avec 86% de l'effectif français (cadre orange **Figure 73**). Ce constat, déjà mentionné précédemment pour les barbeaux, se vérifie pour les chevaines mais de manière bien plus importante (soit 20 % de plus).

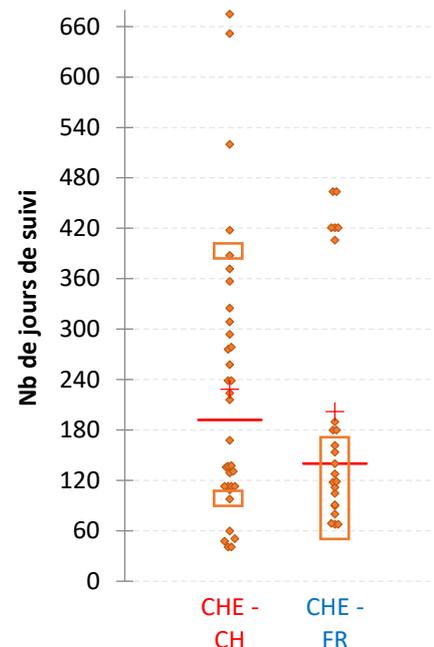


Figure 73 : Durée de suivi des 57 chevaines marquées en Suisse et en France intégrés dans les analyses.

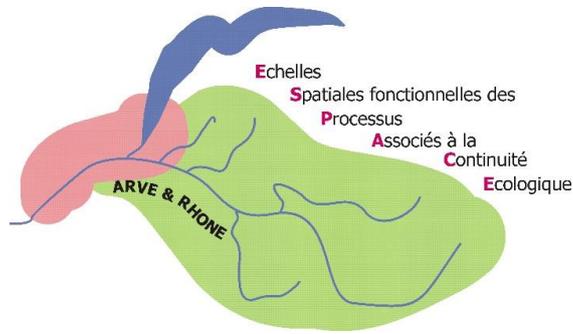
c. Distances et vitesses de déplacement

Les distances de déplacements des chevaines suivies sont pour 90 % inférieures à 1 000 m sur le Rhône et à 500 m sur l'Arve aussi bien en montaison qu'en dévalaison (**Figure 74**). Dans les affluents, Giffre et Menoge, respectivement 2 et 9 % des déplacements dépassent 500 m. Aussi, plus le milieu est grand, plus les chevaines explorent des linéaires importants et ce à des vitesses de déplacements également plus élevées. Cette tendance se traduit également par la décroissance des taux de mobilité en fonction de la taille du cours d'eau : 42 % pour le Rhône contre 30 % pour la Menoge. Le moindre taux de mobilité dans le Giffre par rapport à la Menoge ne réside pas dans la taille du milieu, bien au contraire. Les chevaines dans ce cours d'eau sont présents au niveau de la confluence dotés de plusieurs chenaux d'écoulement. Cet affluent situé en partie médiane de l'Arve se caractérise par un régime hydrologique de type nivo-pluvial. Les conditions de vie dans celui-ci ne correspondent pas à celles classiquement définies pour le chevaine. Aussi l'aire de répartition historique de cette espèce se limite à la plaine de Contamine-sur-Arve (cf. Annexe 8 ; KREITMANN, 19). Cependant l'aval de cet affluent offre des conditions thermiques comparables à la partie basse du bassin de l'Arve (voir III 1)). Les chevaines vivent donc sur un linéaire restreint dans ce secteur (soit environ 1 km) d'autant plus que les zones d'habitat qui leur sont favorables restent limitées (zones calmes et embâcles).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Concernant les vitesses de déplacements, la **Figure 74 b)** met en évidence des valeurs plus élevées pour la montaison que pour la dévalaison dans le Rhône et la Menoge. Ces vitesses de déplacements élevées sont généralement observées à l'approche de la période de reproduction où les individus sont à la recherche d'un site de frai. Ces migrations, orientées davantage vers l'amont que vers l'aval, sont réalisées en une seule fois comme l'illustrent les graphiques de déplacements (**Figure 75** et **Figure 77**).

A l'inverse, les nuages de points pour l'Arve et le Giffre sont relativement symétriques avec des distances et des vitesses de déplacements équivalentes qu'ils soient orientés vers l'amont ou l'aval (**Figure 74**). De plus, ces deux métriques arborent des valeurs faibles (au regard des autres espèces) de l'ordre de quelques centaines de mètres qui ont valu le qualificatif de « résidents » à la plupart des individus issus de ces deux rivières.

Même si les gammes de distances et vitesses inter-contacts apparaissent différentes d'un cours d'eau à l'autre, cette différence n'est pas significative (KW ; $p > 0.05$). Elle ne s'explique pas non plus par les différences morphologiques observées sur les individus précédemment.

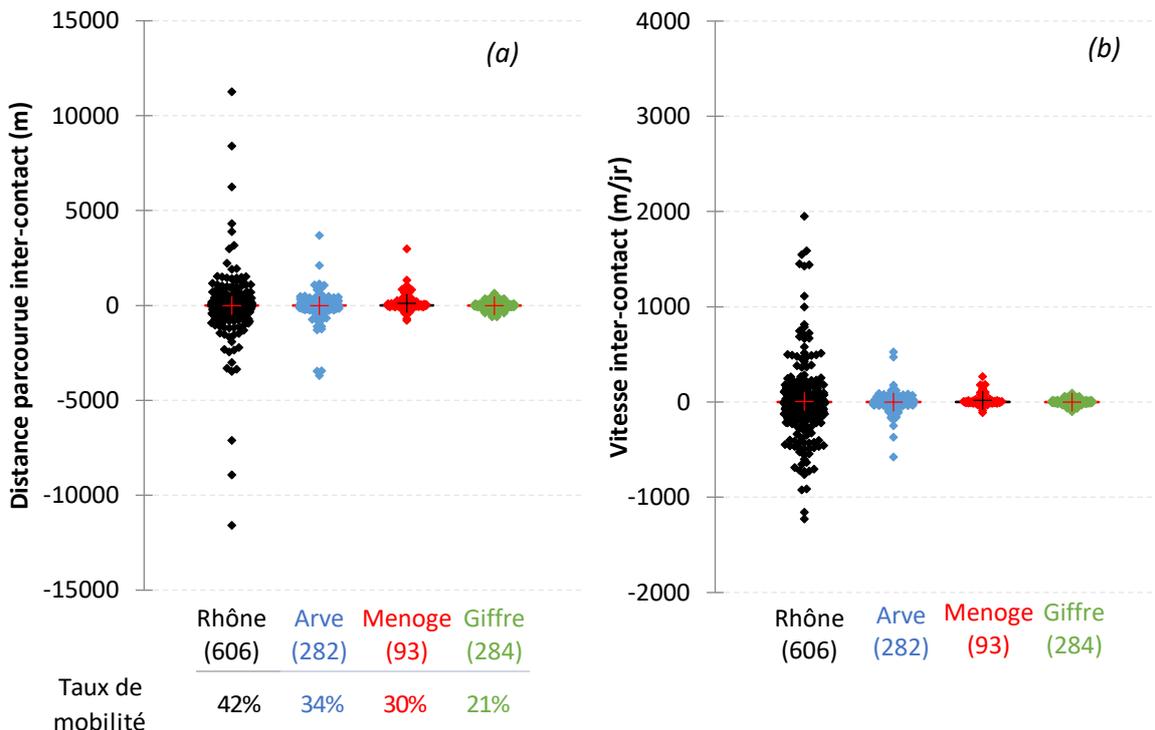


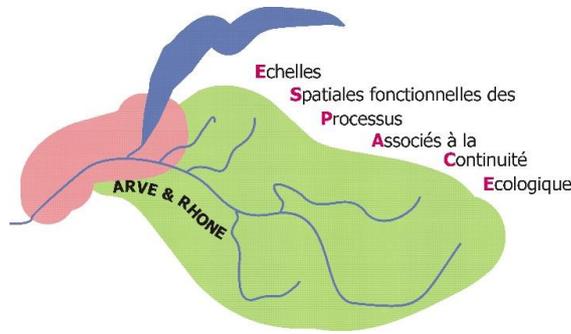
Figure 74 : Nuages de points a) des distances parcourues (m) entre deux contacts pour tous les chevaines suivis regroupés par cours d'eau ; b) des vitesses moyennes (m/j) parcourues pour tous les chevaines suivis regroupés par cours d'eau.

Le taux de mobilité tient compte des marges d'erreur de localisation et spécifie les déplacements véritables (le détail est disponible en Annexe 6).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



d. Profils de déplacement de l'ensemble des individus suivis de chevaine

Comme dans les parties précédentes, les individus ont été répartis dans les catégories « sédentaires » et « migrants » selon l'ampleur de leurs déplacements, la pluralité des cours d'eau utilisés selon leurs phases de vie et la présentation en pied de barrage dans le Rhône. Ainsi parmi les chevaines suivies, 34 individus ont été définis comme sédentaires et 23 comme migrants. Leurs dynamiques de déplacements sont présentées aux Figure 75 et Figure 77.

Les individus sédentaires se répartissent sur 3 secteurs bien identifiés à la Figure 75. De l'amont à l'aval du bassin, le Giffre aval, le secteur entre les bras secondaires de l'Arve à Vétraz-Monthoux et la Menoge aval et la portion du Rhône entre l'aval de Chancy Pougny et la confluence de la Laire accueillent de manière pérenne ces individus qui n'ont effectué que des déplacements de l'ordre du kilomètre et ce même en cumulé.

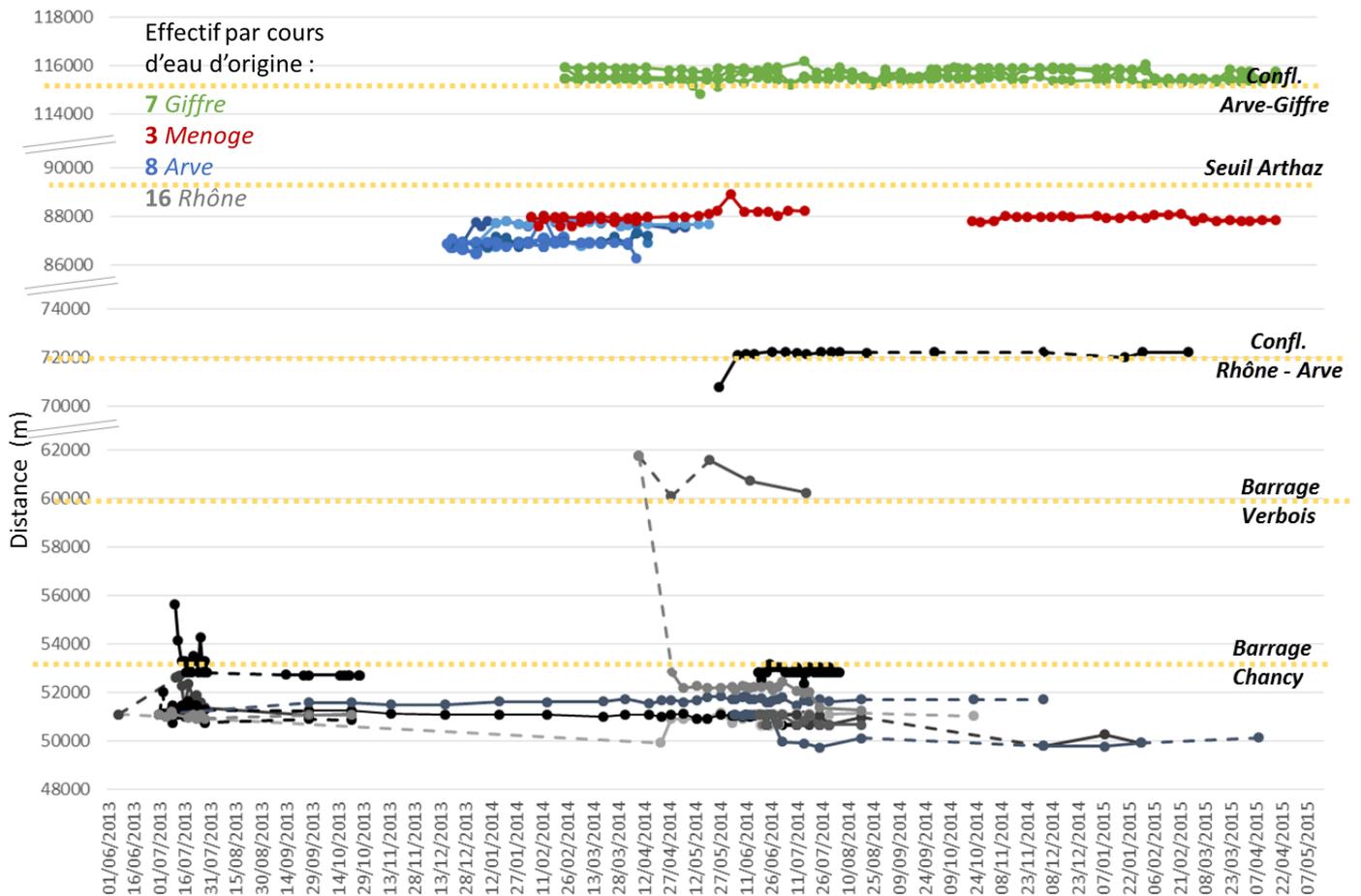
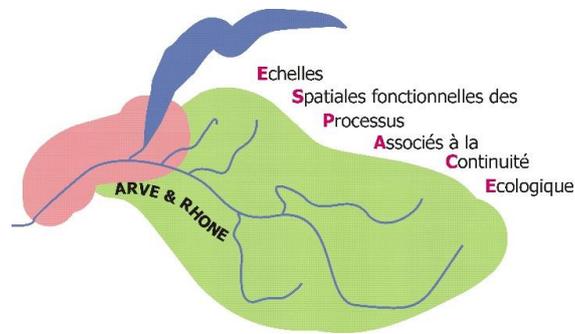


Figure 75 : Graphique de déplacements des chevaines définis comme sédentaires en fonction du temps et de leur point de marquage et cours d'eau d'origine.



Le Giffre possède un statut particulier par rapport à l'aval de la zone d'étude. Sur ce cours d'eau, tous les individus radio-pistés (chevaines et barbeau fluviatile confondus) sont sédentaires. En effet, tous ces individus, dont plus de la moitié (5 individus sur 8) ont été suivis durant 406 jours minimum (soit 13.5 mois), sont restés sur les 1.2 km de la zone de divagation juste en amont de la confluence avec l'Arve. Le Giffre sur ce secteur n'offre pas un habitat propice aux chevaines. Les quelques embâcles en berge sont leurs seuls refuges (**Figure 76**).



Figure 76 : (a) Localisation de tous les points de contacts des chevaines suivis sur le Giffre aval ; (b) Morphologie du Giffre sur l'aire de présence des Cyprinidés avec la formation d'embâcles en berge liée à l'érosion latérale.

Parmi l'effectif suivi en radiotélémétrie, et en se focalisant uniquement sur le système Rhône – Arve – Menoge, 46 % (n = 23) des individus montraient des caractéristiques de migrants.

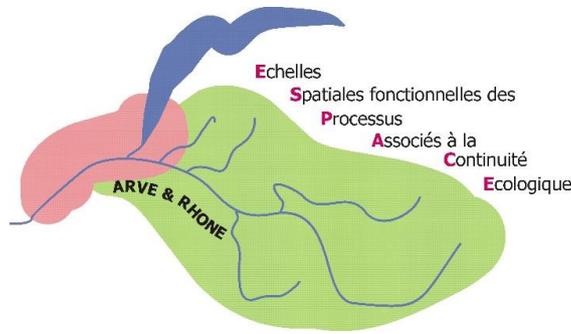
La **Figure 77** met en évidence, pour les individus côté France, des déplacements bilatéraux entre le cours principal de l'Arve et celui de la Menoge. Ces déplacements vers l'affluent, déclenchés entre le début des mois d'avril et de mai, interviennent pour 4 de ces 5 individus au moment de la période de reproduction 2014. Ces comportements n'ont pas été observés en 2015 ; les conditions hydrologiques printanières cette année-là étant radicalement différentes (cf **Figure 37**), elles ont pu venir troubler les motivations des géniteurs. En dehors de ce changement de milieu à la période du frai, les chevaines vivent sur un secteur bien identifié pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois avant de changer de site pour stabuler à nouveau une longue période.

Dans le Rhône, les suivis des chevaines ont été moins assidus. Certains individus n'ont pas été détectés pendant de longues périodes puis sont réapparus dans le système plus tard. Contrairement aux barbeaux, peu de chevaines ont été suivis à proximité du barrage de Verbois. Parmi les quelques individus relâchés dans ce tronçon (53 000 – 60 000 m), un seul s'est aventuré au pied du barrage réalisant ainsi des mouvements de montaison au moment de la reproduction d'environ 4 km en moins de 4 jours (**Figure 77**).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Deux secteurs ressortent tout de même comme étant bien fréquentés par les chevaines marqués :

- l'aval de Chancy – Pougny où plusieurs individus vivent à l'année, effectuant des va-et-vient au pied du barrage, sans pour autant réussir un franchissement. Les plus grands déplacements enregistrés sur ce secteur sont légèrement supérieurs à 2 km.
- la Jonction (confluence Rhône – Arve) où les individus séjournent tantôt dans l'Arve, tantôt dans le Rhône.

Parmi les individus de ce dernier secteur, 2 sont issus de Port d'Aire-la-Ville, soit 10 km plus aval. Leur montaison n'a pas été bien décrite par manque de contacts à cette période. Compte-tenu des observations des congénères sur le système Arve à la même époque, il est fort possible que ces déplacements se soient faits en une fois rapidement.

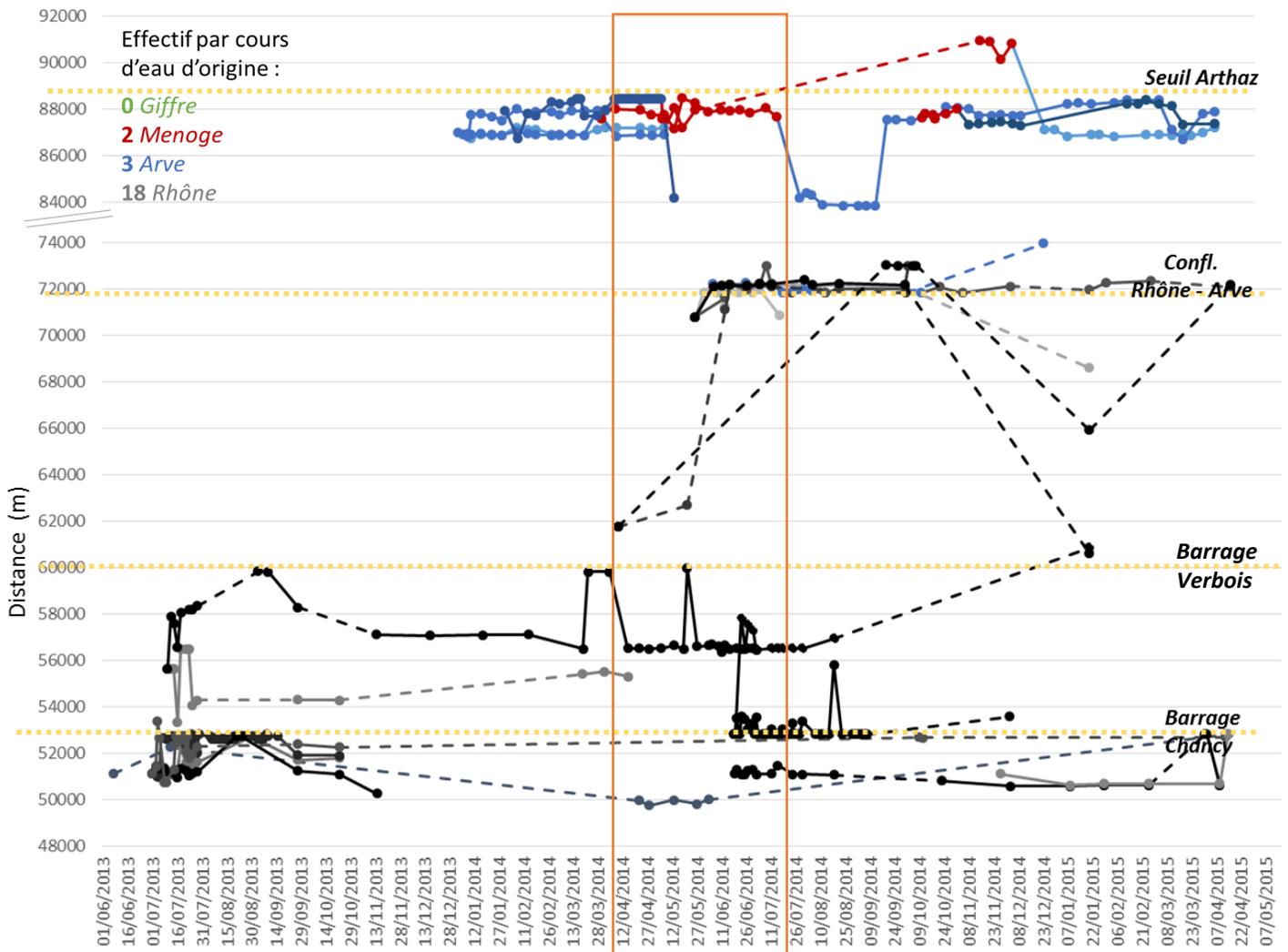
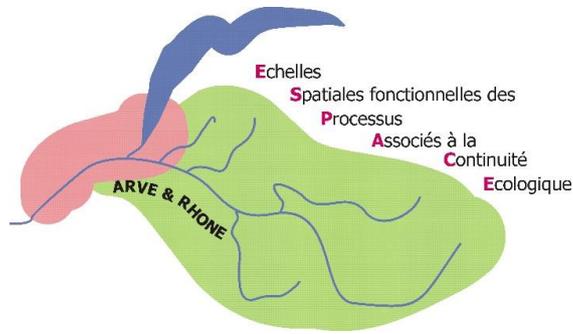


Figure 77 : Graphique de déplacements des chevaines définis comme migrants en fonction du temps et de leur point de marquage et cours d'eau d'origine.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Le bilan des statuts par cours d'eau pour cette espèce est dressé dans le **Tableau 19**.

Parmi l'ensemble des individus suivis, une petite majorité (54 %) est sédentaire. Ce constat est valable pour chaque cours d'eau de la partie française de la zone d'étude (Arve, Giffre et Menoge), avec un cas extrême, celui du Giffre où tous les individus suivis sont sédentaires. Dans le Rhône, les chevaines choisissent davantage une stratégie de migrants (pour 59 % des individus) ; cette tendance est aussi observée pour les barbeaux fluviatiles mais avec un contraste moins marqué entre la proportion de migrants et de sédentaires pour les chevaines. Le milieu homogène et fragmenté du Rhône genevois pousse vraisemblablement les individus à rechercher des habitats plus propices à leur développement.

Tableau 19 : Bilan des proportions des chevaines sédentaires et migrants par cours d'eau et par période de suivi.

Les pourcentages en italique sont donnés à titre indicatif mais n'ont pas de réelle signification étant donné le peu d'individus suivis sur ces cours d'eau.

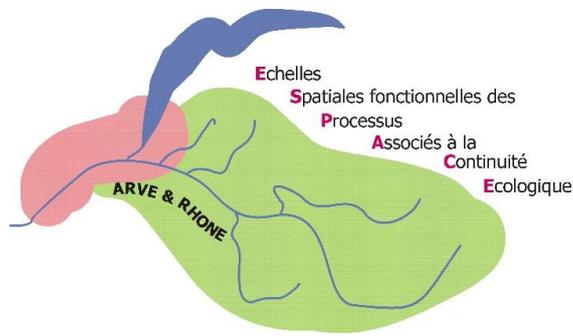
	Effectifs				Pourcentages			
	Chevaines sédentaires		Chevaines migrants		Chevaines sédentaires		Chevaines migrants	
	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai	Toute la période de suivi	Période de frai
Arve	8	3	3	3	73%	50%	27%	50%
Rhône	16	9	18	13	47%	41%	53%	59%
Giffre	7	6	0		100%	100%	0%	0%
Menoge	3	2	2	1	60%	67%	40%	33%
Total	34	20	23	17	60%	54%	40%	46%
Total BV Arve	18	11	5	4	78%	73%	22%	27%

D'autres déplacements encore plus importants ont pu être mis en évidence par les dispositifs PIT-tag de la Menoge aval (PTME) et d'Arthaz (PTAR). Dans la Menoge aval ont été enregistrés au mois d'avril 2015, 5 individus rhodaniens originaires du Port d'Aire-la-Ville, de l'amont de Verbois et de l'embouchure de la Laire. La Menoge aval pourrait faire fonction de zone de reproduction pour une partie des chevaines du continuum Rhône – Arve – Menoge. Les caractéristiques morphologiques de ces migrants du Rhône sont en moyenne de 309 mm [± 47] pour 368 g [± 160], ce qui les classe dans une gamme inférieure par rapport aux individus suivis en radiotéléométrie. Ils ont effectué des migrations vers l'amont comprises entre 25 km et 37 km. Leur dynamique de migration n'est cependant pas approchée par la technique des marques RFID. L'un de ces individus a franchi la passe à poissons d'Arthaz (PTAR) en octobre 2014. Ce contact montre que certaines grandes migrations ne sont pas forcément en lien avec le frai.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



La **Figure 78** fait état des moyennes mensuelles de déplacements pour l'ensemble des chevaines suivies en radiotélémetrie qui sont considérés comme des géniteurs potentiels. Les plus grands mouvements sont enregistrés à la fin du printemps et courant d'été (de mai à juillet) en lien avec la période de reproduction. D'août à mai (soit 10 mois sur 12) les individus sédentaires se déplacent sur des distances assez homogènes. Cette période est plus courte pour les individus migrants se cantonnant de novembre à avril (la moitié de l'année). Ces mois de la période hivernale et du début du printemps sont thermiquement peu favorables pour cette espèce dans le bassin de l'Arve et du Rhône genevois. En effet, à cette période la température des cours d'eau de la zone d'étude se situe généralement en dessous de 8°C qui est, selon plusieurs auteurs (ALABASTER & LLOYD, 1982 ; ELLIOTT, 1981), la température extrême minimale tolérée par cette espèce. En dessous de ce seuil, les fonctions physiologiques du chevine peuvent être affectées et il a tendance à économiser son énergie, par exemple, en limitant ses mouvements.

Pour les individus migrants les mois d'août à octobre sont une période de transition avant l'hiver ; les déplacements sont moindres par rapport à l'été synonyme de frai mais plus conséquents que ceux de la période de repos et stagnation de l'hiver.

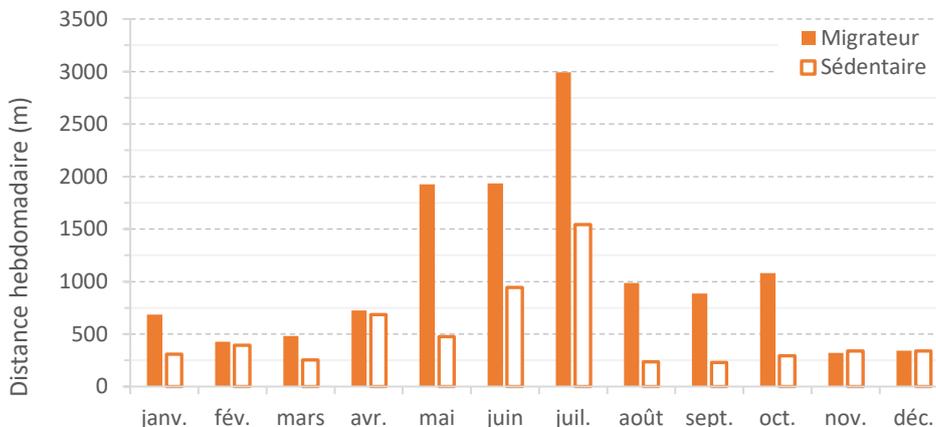


Figure 78 : Moyennes mensuelles des distances hebdomadaires (des mouvements validés) effectuées par les chevaines migrants et sédentaires suivies durant toute l'étude.

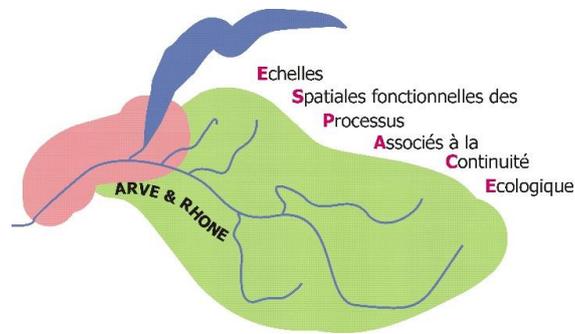
e. Influence des conditions hydrologiques et thermiques sur les déplacements

La mise en relation des distances et vitesses de montaison et dévalaison avec les variables thermiques et hydrologiques est présentée **Tableau 20**. Il a été défini qu'une variable environnementale influençait le comportement des poissons seulement si les corrélations étaient significatives et de même sens pour les deux paramètres (Distance et Vitesse) du fait que les vitesses sont calculées à partir des distances. On notera que les distances de dévalaison dans le Rhône ne sont pas corrélées avec les variables environnementales alors que les vitesses le sont. Ces dernières sont donc considérées comme peu valables.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Les chevaines, habitués aux zones lentiques, semblent être influencés par les débits moyen et maximum pour leurs mouvements de dévalaison dans l'Arve (**Tableau 20**). La corrélation est négative, autrement dit, plus les débits moyens et maximum sont élevés plus les distances et la vitesse de dévalaison sont faibles. La montaison quant à elle apparaît corrélée négativement avec la température et ce, pour les 3 variables (température moyenne journalière, maximale et minimale) (**Tableau 20**).

Les analyses effectuées pour le Rhône montrent des corrélations significatives positives (**Tableau 20**) : les distances et vitesses augmentent significativement lorsque le débit moyen journalier et le débit minimal du Rhône s'élèvent tout comme les températures extrêmes (minimale et maximale).

Pour le Giffre, ces analyses de mise en relation des déplacements avec les variables environnementales ne montrent aucune tendance. Il faut garder à l'esprit que les individus de ce cours d'eau sont sédentaires et se déplacent relativement peu.

Tableau 20 : Analyse de la corrélation des distances et vitesses de montaison (D+ et V+) et de dévalaison (D- et V-) avec les variables environnementales (débit et thermie) : matrice de corrélation de Spearman et p-values associées pour chacun des cours d'eau.

En bleu, les corrélations positives et en rouge, les corrélations négatives.

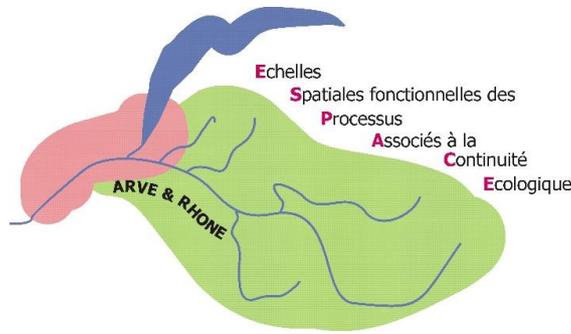
N B : Les variables de débit et de température pour le Rhône et l'Arve sont toutes corrélées positivement entre elles. Pour la Menoge, les corrélations sont négatives entre QMmax et les variables thermiques et entre TM/n et les variables de débit (Annexe 6).

Variables	Rhône				Arve				Menoge				
	D +	V +	D -	V -	D +	V +	D -	V -	D +	V +	D -	V -	
Matrice de corrélation (Spearman) CHE	QM/n	0,188	0,306	-0,084	-0,334	-0,188	-0,180	-0,320	-0,369	-0,004	0,039	0,057	0,137
	QM _{max}	0,133	-0,022	-0,117	0,074	0,054	0,048	-0,370	-0,363	-0,037	-0,037	-0,003	0,087
	QM _{min}	0,164	0,458	-0,056	-0,491	-0,279	-0,250	-0,181	-0,289	-0,066	0,001	0,102	0,174
	TM/n	0,110	0,337	-0,042	-0,359	-0,378	-0,370	-0,079	-0,136	0,051	0,036	-0,109	-0,147
	TM _{max}	0,134	0,224	-0,118	-0,214	-0,332	-0,348	-0,086	-0,115	-0,010	-0,029	-0,124	-0,155
	TM _{min}	0,123	0,450	-0,030	-0,455	-0,426	-0,404	-0,045	-0,122	0,079	0,065	-0,086	-0,132
p-values CHE	QM/n	0,002	< 0,0001	0,183	< 0,0001	0,033	0,041	0,001	< 0,0001	0,980	0,807	0,769	0,477
	QM _{max}	0,030	0,715	0,064	0,241	0,540	0,592	< 0,0001	0,000	0,816	0,814	0,990	0,650
	QM _{min}	0,007	< 0,0001	0,373	< 0,0001	0,001	0,004	0,061	0,003	0,678	0,994	0,596	0,365
	TM/n	0,072	< 0,0001	0,504	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,417	0,161	0,748	0,821	0,571	0,444
	TM _{max}	0,028	0,000	0,061	0,001	0,000	< 0,0001	0,375	0,237	0,952	0,856	0,520	0,421
	TM _{min}	0,044	< 0,0001	0,635	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,640	0,209	0,618	0,682	0,656	0,494



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



f. Domaines vitaux

La **Figure 79** présente les domaines vitaux de tous les individus de Chevaïne suivis en radiotéléométrie. Une forte variabilité individuelle des domaines vitaux est à noter, surtout dans les grands cours d'eau. La moyenne des domaines vitaux définie pour l'ensemble des chevaines s'élève à 1956 m [290 m ; 10460 m].

Les chevaines du Giffre ont un domaine vital moyen de 678 m ; les mouvements vers l'Arve sont anecdotiques (**Figure 79** et **Figure 80-a**). Dans la Menoge, les individus vivent sur un linéaire moyen de 650 m. La majorité des individus suivis sur le secteur Vétraz-Monthoux – Arthaz vivent tantôt dans l'Arve, tantôt dans la Menoge. Comme énoncé précédemment, un petit groupe remonte sur le 1^{er} kilomètre dans la Menoge notamment au moment de la reproduction alors que les autres utilisent les premières centaines de mètres en amont de la confluence avec l'Arve (**Figure 80-b**). Dans l'Arve les chevaines parcourent en moyenne 1258 m, soit le double par rapport aux domaines vitaux observés sur les affluents. Dans le Rhône, le domaine vital moyen d'un chevaïne est également deux fois celui observé pour les individus de l'Arve, soit 2403 m. La majorité des individus suivis en radiotéléométrie dans le Rhône s'y sont cantonnés, à l'exception de 2 individus qui vivent à la jonction avec un linéaire occupé dans l'Arve de plus de 1,1 km (**Figure 79** et **Figure 80-d**).

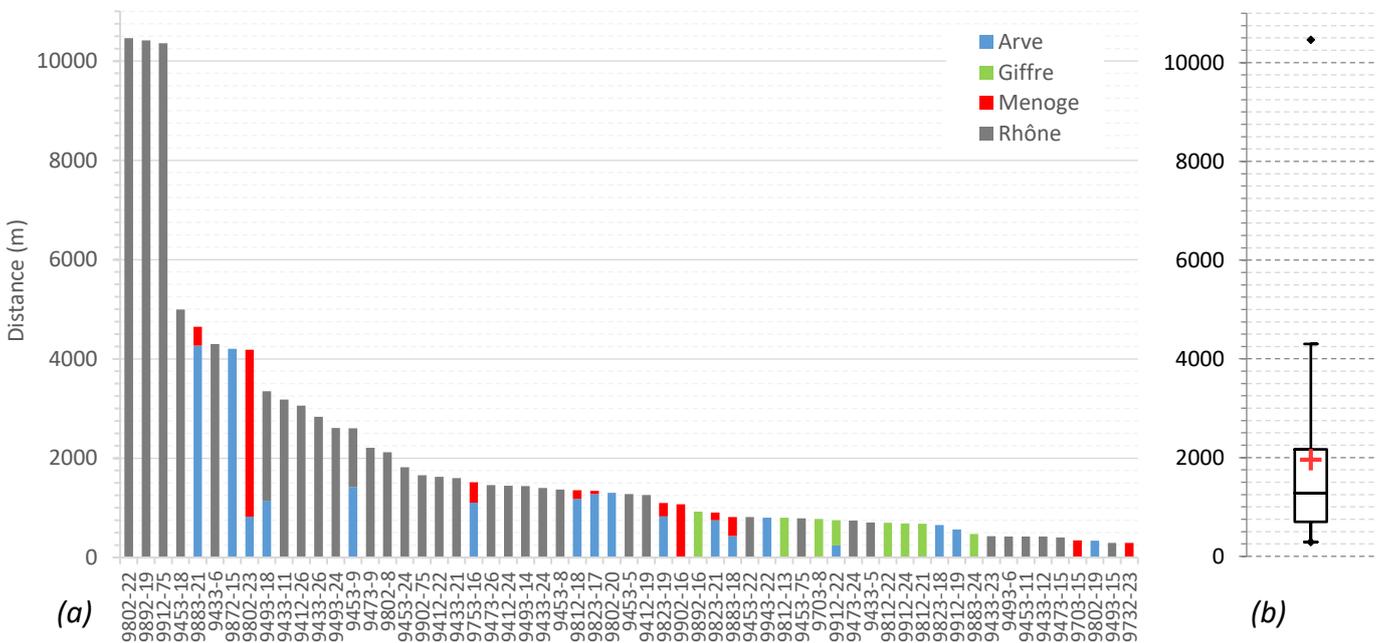
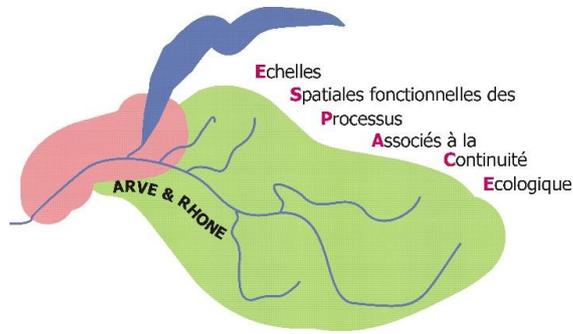


Figure 79 : (a) Domaine vital (en m) de chaque individu de chevaïne suivi en spécifiant les linéaires utilisés par cours d'eau et (b) box-plot pour visualiser la répartition en quartiles des domaines vitaux. Chaque couleur représente la part du linéaire vital de l'individu dans l'un des cours d'eau. La croix rouge sur le box-plot indique la longueur moyenne des domaines vitaux.

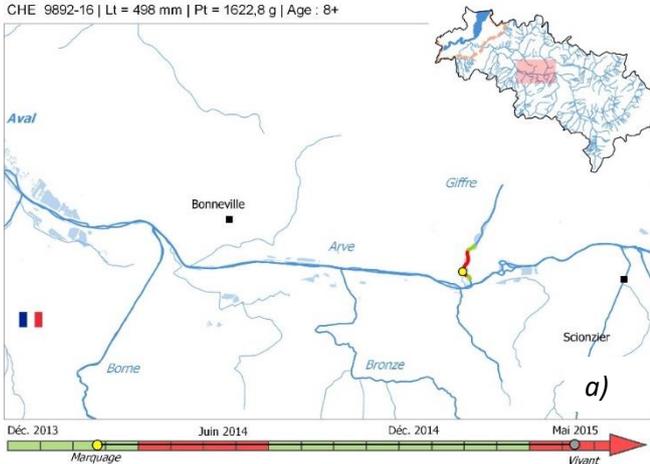


h e p i a

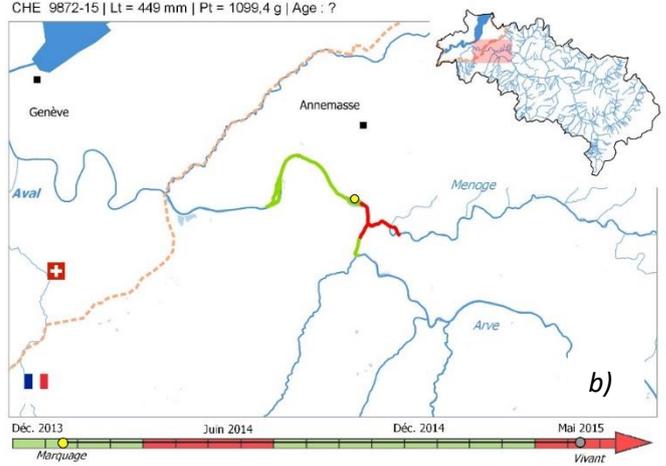
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



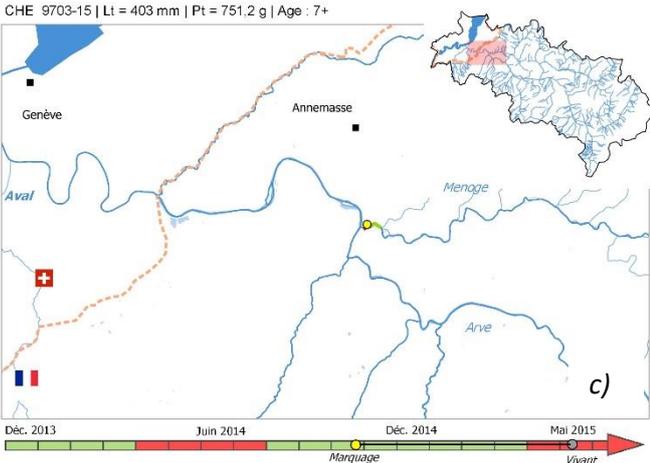
CHE 9892-16 | Lt = 498 mm | Pt = 1622,8 g | Age : 8+



CHE 9872-15 | Lt = 449 mm | Pt = 1099,4 g | Age : ?



CHE 9703-15 | Lt = 403 mm | Pt = 751,2 g | Age : 7+



CHE 9433-11 | Lt = 356 mm | Pt = 517 g | Age : 7+

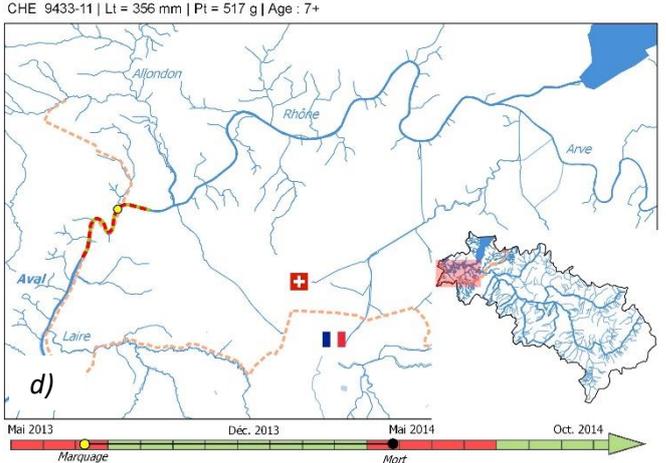


Figure 80 : Exemples de domaines vitaux cartographiés de chevaines.

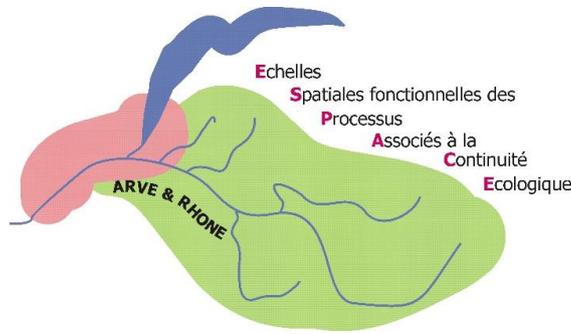
En vert, le linéaire utilisé en dehors de la période de reproduction et en rouge le linéaire utilisé durant la période de reproduction. Le point jaune localise le point de marquage de l'individu, soit le point initial du suivi. L'axe temporel spécifie la durée de suivi de l'individu. a) et c) sont des individus « sédentaires » et b) et d) des individus « migrants ».

L'étendue des domaines vitaux observés dans chacun des cours d'eau (valeurs plus faibles sur les affluents que sur les cours principaux) n'est significativement pas différente entre la Menoge, l'Arve et le Giffre (KW ; $p > 0.05$). Les domaines vitaux observés dans le Rhône sont significativement plus grands que ceux observés dans la Menoge (MW ; $p < 0.01$). Ceux des autres cours d'eau ne présentent pas de différence significative entre eux et sont considérés comme appartenant au même groupe.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Lorsqu'on compare la taille totale des domaines vitaux et le linéaire de cours d'eau utilisé durant la phase de reproduction, il apparaît qu'elles sont similaires pour les chevaines du Rhône et se chiffrent entre 421 m et 10 460 m (**Figure 81**). Ce constat est le même pour les barbeaux du Rhône.

Les individus sédentaires du Giffre occupent au cours de leur phase de reproduction un linéaire de cours d'eau se chiffrant en moyenne à 69 % de leur domaine vital [199 m ; 774 m] (**Figure 81**). Les autres chevaines du système Arve-Menoge ont des comportements individuels bien différents : certains vont occuper de très petits linéaires durant leur phase de frai (moins de 200 m) tandis que d'autres vont parcourir des distances plus conséquentes (plus d'1 km).

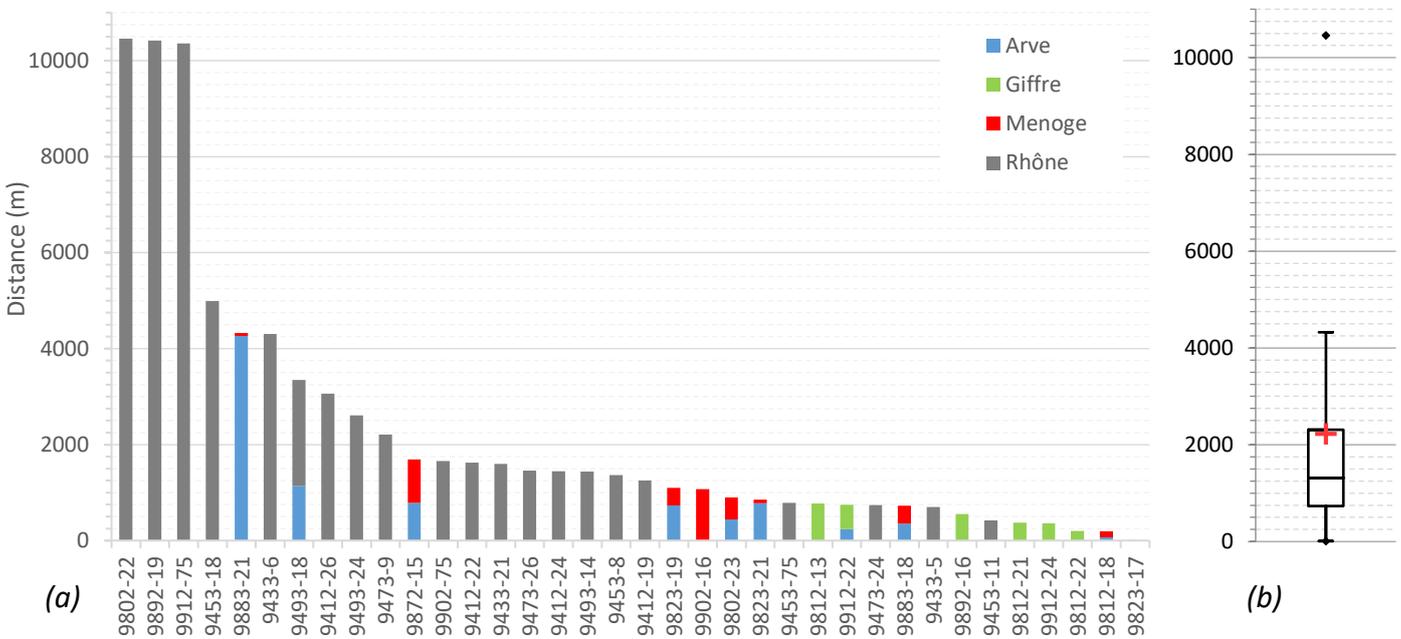


Figure 81 : (a) Distances parcourues dans chaque cours d'eau par chaque individu de brabeau fluvial pendant la période de reproduction (en m) et (b) box-plot pour visualiser la répartition en quartiles de ces distances. La croix rouge sur le box-plot indique la moyenne des distances parcourues.

Pour étudier l'influence des caractéristiques biométriques sur la taille des domaines vitaux des chevaines suivies durant une période qui intègre la phase de reproduction, il a été fait la différence entre les groupes de chevaines dont la taille et le poids étaient significativement différents (voir § III 4) C a). Les **Tableau 21** et **Tableau 22** mettent en évidence que les caractéristiques biométriques ne semblent pas influencer au sein des cours d'eau la taille des domaines vitaux des individus.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

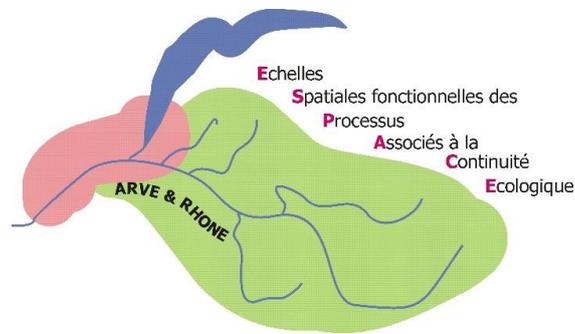


Tableau 21 : Matrice des corrélations de Spearman et p-values entre les domaines vitaux des chevaines originaires de l'Arve et du Giffre (et suivis durant une période qui intègre la phase de reproduction) avec leurs caractéristiques biométriques (taille, poids, âge).

Les corrélations positives sont indiquées en rouge tandis que les négatives sont indiquées en bleu.

Arve et Giffre	Matrice de corrélation (Spearman)				p-values			
	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Âge	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Âge
Domaine vital	1	0,182	0,084	0,009	0	0,572	0,800	0,989
Longueur totale (mm)	0,182	1	0,942	0,100	0,572	0	< 0,0001	0,776
Biomasse (g)	0,084	0,942	1	0,028	0,800	< 0,0001	0	0,945
Âge	0,009	0,100	0,028	1	0,989	0,776	0,945	0

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$

Tableau 22 : Matrice des corrélations de Spearman et p-values entre les domaines vitaux des chevaines originaires du Rhône et Affluents (et suivis durant une période qui intègre la phase de reproduction) avec leurs caractéristiques biométriques (taille, poids, âge).

Les corrélations positives sont indiquées en rouge tandis que les négatives sont indiquées en bleu.

Rhône et Affluents	Matrice de corrélation (Spearman)			p-values		
	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)	Domaine vital	Longueur totale (mm)	Biomasse (g)
Domaine vital	1	-0,363	-0,375	3,9502E-06	0,107	0,094
Longueur totale (mm)	-0,363	1	0,899	0,107	3,9502E-06	< 0,0001
Biomasse (g)	-0,375	0,899	1	0,094	< 0,0001	3,9502E-06

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0.05$

D. L'ombre commun

a. Bilan et caractérisation de l'effectif de poissons marqués

Cette espèce initialement dans la liste des espèces ciblées par l'étude en radiotélémétrie a vite été écartée du fait de la perte des individus équipés d'un émetteur.

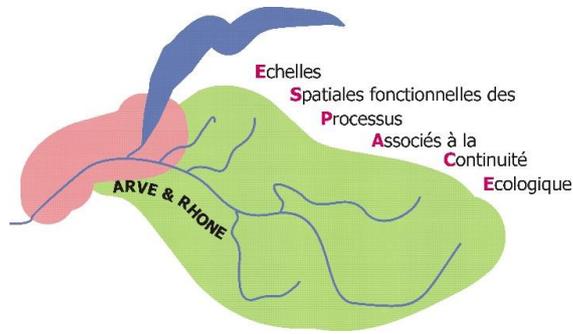
Onze ombres communs d'une longueur totale comprise entre 346 mm et 498 mm (moyenne = 411 mm [\pm 49]) ont été marqués avant leur phase de reproduction 2014 (soit entre le 16 janvier et 28 mars 2014). Le poids moyen des 11 individus échantillonnés s'élevait à 635 g [\pm 288]. La règle des 2 % admise pour les études télémétriques n'a pas été respectée stricto-sensu pour 6 individus (maximum du rapport poids de l'émetteur / poids du poisson = 3,15 %).

Aucun individu n'a pu être suivi en radiopistage durant plusieurs semaines puisque 6 ont été considérés disparu / mort post marquage, et les autres ont été rapidement perdus. Cette espèce semble bien plus sensible à l'opération de marquage que les 3 autres étudiées. Ce caractère de fragilité a également été décrit pour l'élevage de l'ombre commun en pisciculture (par exemple LAFFINEUR *et al.* (2002)). De plus, l'ombre commun est une espèce de pleine eau, difficilement capturable par pêche électrique. Dans l'Arve, les secteurs et la période de capture par pêche électrique sont restreints et se cantonnent essentiellement aux bras secondaires durant leur phase de reproduction. Cette période de



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



capture n'est pas idéale pour l'opération de marquage du fait que les individus allouent l'essentiel de leur énergie à la reproduction. De plus à cette période, les mâles sont très agressifs envers leur congénère pour défendre leur territoire de reproduction (PONCIN, 1996). Ce comportement induit déjà un taux de mortalité des mâles plus élevé après la période de reproduction (FABRICIUS & GUSTAFSON in PARKINSON *et al.*, 1999).

Les résultats de déplacements pour l'ombre commun ont été obtenus à partir de l'effectif marqué par PIT-tag. Soixante-seize individus ont été capturés dans l'Arve (68 % de l'effectif marqué) et dans trois affluents (la Menoge, le Nant de Sion et le Foron de la Roche) entre décembre 2013 et février 2015. Ils sont issus pour 74 % du secteur aval de l'Arve, c'est à dire entre Vessy et Arthaz-Pont-Notre Dame en incluant la Menoge et pour 26 % du secteur médian de l'Arve, entre Scientrier et Bonneville en incluant le Nant de Sion et le Foron de la Roche. Les individus marqués se caractérisaient au moment de leur capture par une longueur totale moyenne de 241 mm [± 78] et un poids moyen de 225 g [± 74] (Figure 82). Au moment du marquage, 26 % des individus étaient des alevins de l'année et 66 % des géniteurs entre 2 ans et 5 ans.

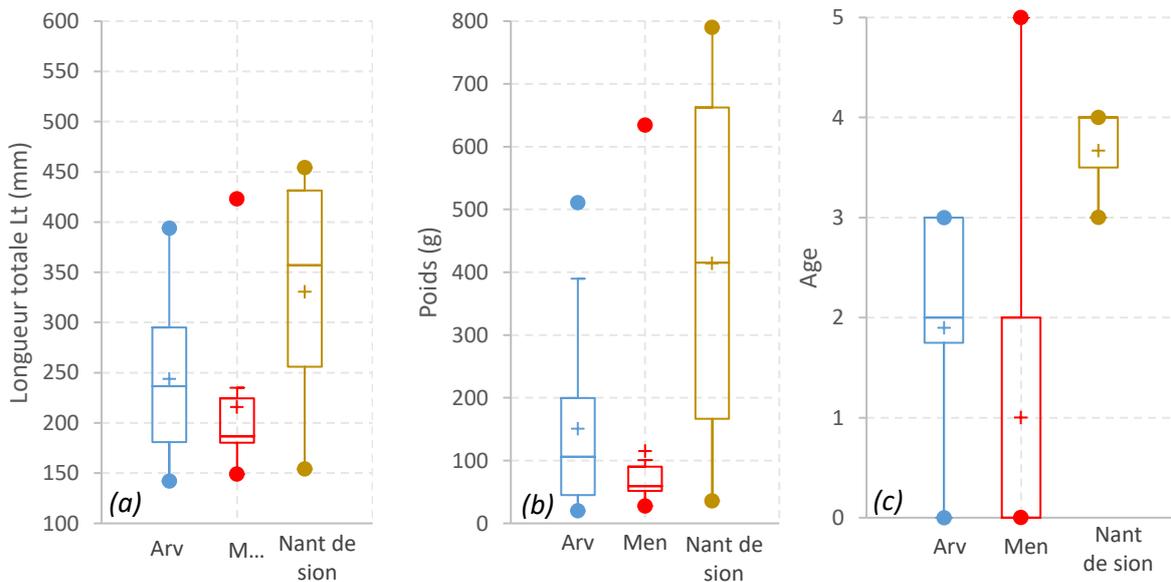


Figure 82 : Caractéristiques des ombres communs échantillonnés et marqués d'un PIT-tag, présentés par cours d'eau d'origine ou de relâcher pour la partie suisse ; (a) longueur totale en mm ; (b) Poids en g ; (c) Âge défini par la scalimétrie.

b. Distances et profils de déplacements

Concernant l'ombre commun, le présent programme n'a pas apporté beaucoup d'éléments nouveaux sur la dynamique des populations du bassin Arve – Rhône genevois et sur les flux entre cours principal et affluents. GADAIS en 2012 avait mis en évidence des migrations de dévalaison des géniteurs d'ombre des affluents Menoge et Nant de Sion vers l'Arve en phase de post-reproduction (Figure 83).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

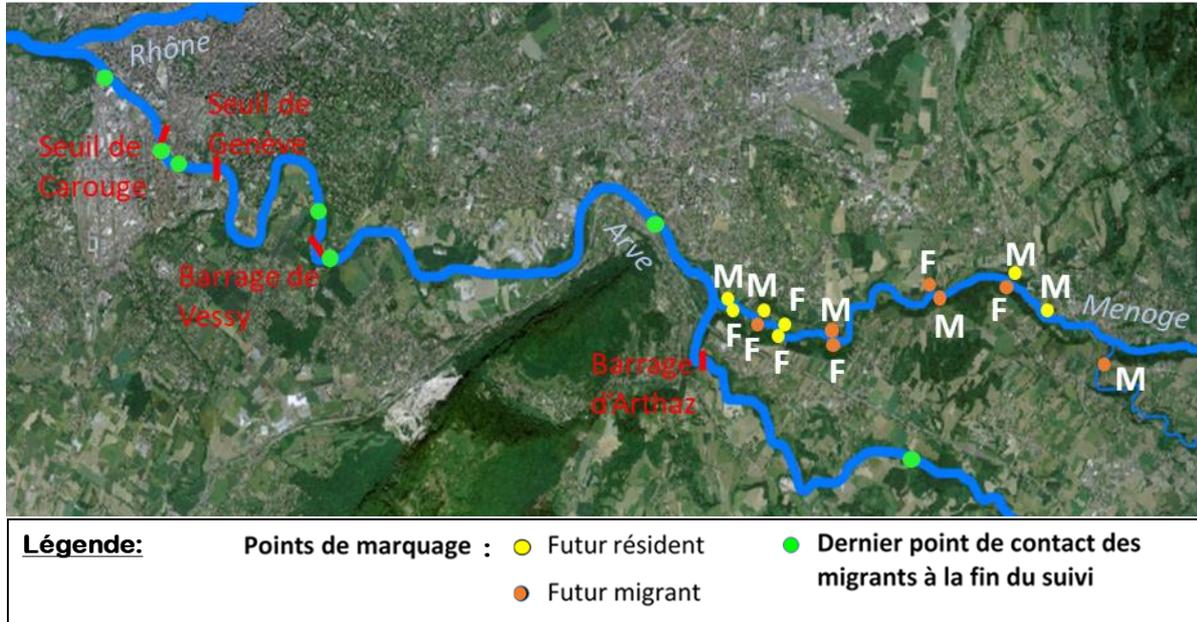
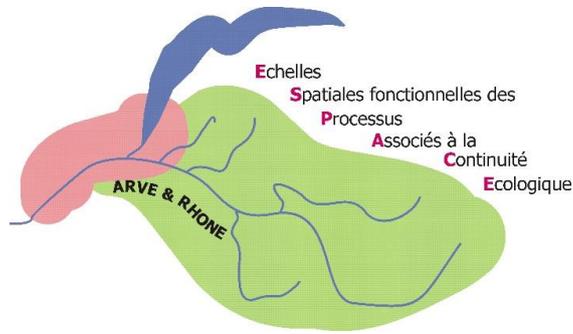


Figure 83 : Comportements de migration ou non des géniteurs d'ombre commun marqués dans la Menoge au printemps 2012 (source : GADAIS, 2012).

Les données de 2015 ont mis en évidence la montaison des géniteurs d'ombre commun issus de l'Arve française et suisse vers la Menoge. Dix individus sur 56 individus marqués sur ce secteur de la zone d'étude ont été enregistrés à la station PTME qui se situe à 0,8 km de la confluence Arve – Menoge. Parmi les individus détectés, 7 sont originaires de l'Arve, mettant ainsi en évidence les migrations pré-reproduction de l'Arve vers la Menoge. Leurs déplacements observés s'élèvent entre 1,4 km (pour ceux marqués dans le bras secondaire à l'aval de la confluence avec la Menoge) et 9,2 km (pour celui issu de Vessy) (Figure 84). On observe une concordance entre certains points de dernières localisations de l'étude de 2012 et des points de marquage 2013-2015.

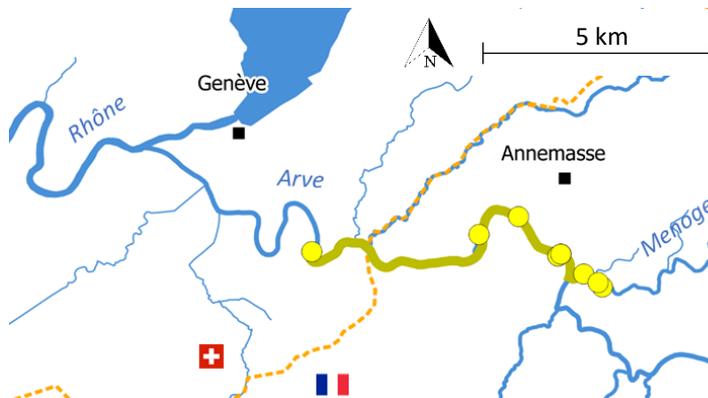
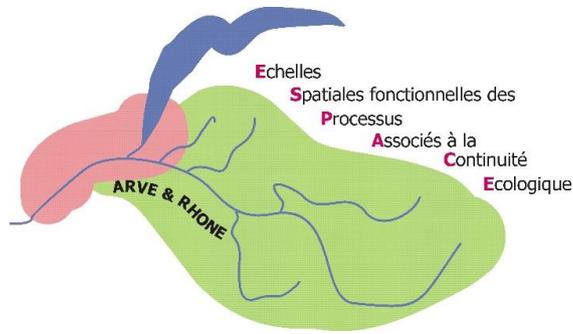


Figure 84 : Points de marquage 2013-2015 et linéaire parcouru par les individus d'ombre commun détectés à la station PTME située à 0.8 km de la confluence Arve – Menoge.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



5) Conséquences de la crue centennale d'Arve sur les mouvements des poissons

Le 1^{er} mai 2015, alors que la récolte de données sur le terrain s'était achevée la semaine précédente, une crue centennale est survenue sur l'Arve, occasionnant de nombreux dégâts. Sur les autres rivières du département et du canton de Genève, des crues de plus ou moins grandes ampleurs ont également eu lieu (crue vicennale sur le Menoge) (**Figure 85**).



Figure 85 : Situations en période de basses eaux puis au moment de la crue du mois de mai 2015 a) de l'Arve au niveau du barrage d'Arthaz et b) de la Menoge au niveau du site d'implantation des antennes PIT-tag (PTME) sur la commune de Vétraz-Mouthoux.

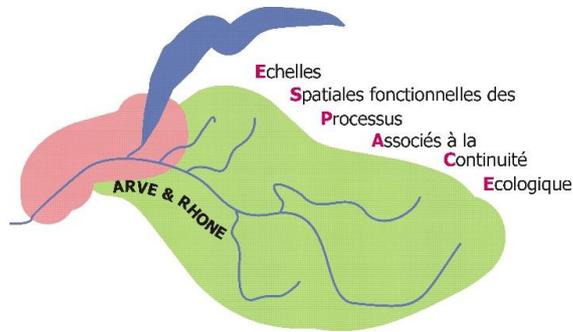
Concernant les poissons, un pistage a été réalisé 6 jours post-crue sur la zone aval de l'Arve et sur la Menoge ; 13 jours post-crue sur le Borne et 10 jours post-crue en Suisse. Du côté français, la majorité des poissons a pu être localisée dans la même zone qu'avant crue alors que de nombreux individus côté suisse n'ont pas pu être localisés.

Le relevé des données de stations fixes a fourni des informations intéressantes. En effet, au cours du suivi et bien avant la crue, deux truites avaient élu domicile au pied de deux de ces stations fixes : l'une à Bonneville et l'autre à Scientrier. La **Figure 86** montre les détections de ces deux individus



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



en ces deux points. Elle met en évidence qu'ils ne sont plus détectés à partir du 1^{er} mai. L'individu de la station de Bonneville est de nouveau détecté le 8 mai, alors qu'il faut attendre jusqu'au 20 mai pour redétecter celui de Scientrier. Deux hypothèses peuvent expliquer ces observations :

- soit ces individus ont été délogés par la crue et ont probablement dévalé jusqu'à trouver une zone refuge, après quoi ils auraient regagné leur habitat initial une fois les conditions hydrodynamiques redevenues plus clémentes ;
- soit la probabilité de détection des antennes a été fortement réduite du fait de l'augmentation sensible de la hauteur d'eau, et par conséquent les individus auraient pu rester en place mais sans être détectés.

La première hypothèse semble la plus probable. En effet, si la non-détection des individus était due aux conditions hydrologiques exceptionnelles et que les deux individus étaient toujours présents sur site, une fois les conditions de débit normales retrouvées, ils auraient été détectés de nouveau en simultané le 8 mai et pas avec un laps de temps de 12 jours entre les deux.

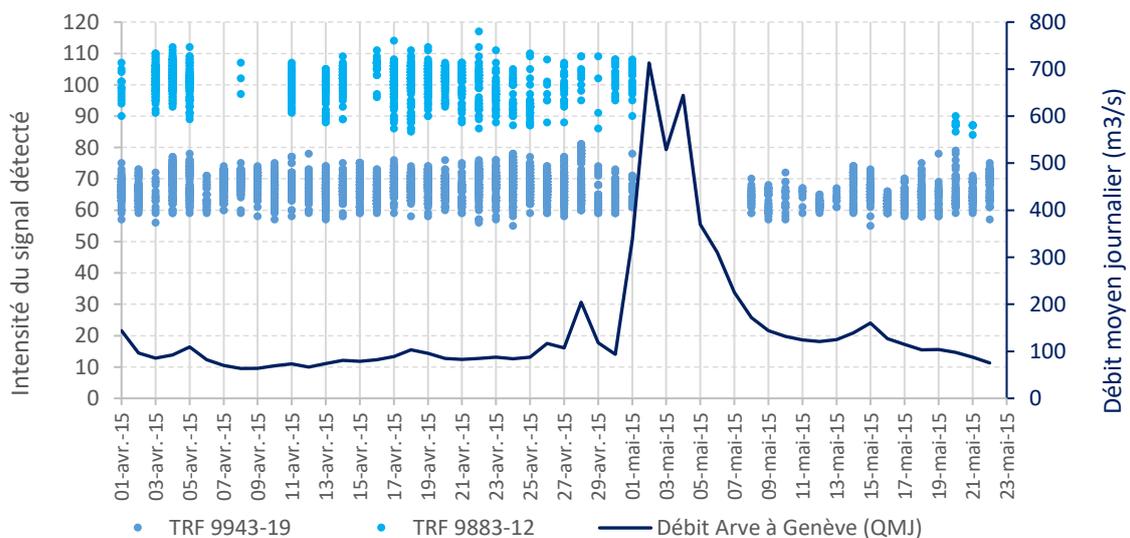


Figure 86 : Détections de deux truites détectées chacune à une station fixe (en bleu foncé celle de Bonneville et en bleu clair, celle de Scientrier) mises en relation avec le débit de l'Arve entre le 1^{er} avril et le 22 mai 2015.

Les suivis post-crue sur le secteur à proximité de la confluence Arve - Menoge ont montré que les individus de barbeau et de chevaine n'ont pas effectué de grands mouvements dans l'intervalle de temps de 15 jours entre la fin du mois d'avril et le début du mois de mai 2015. Les déplacements enregistrés sont de l'ordre de 425 m en moyenne [-165 ; 1510] pour les barbeaux et de 515 m en moyenne [-816 ; 710] pour les chevaines, c'est à dire du même ordre de grandeur que durant les suivis des semaines précédentes. Un seul individu de barbeau n'a pas été retrouvé après la crue.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

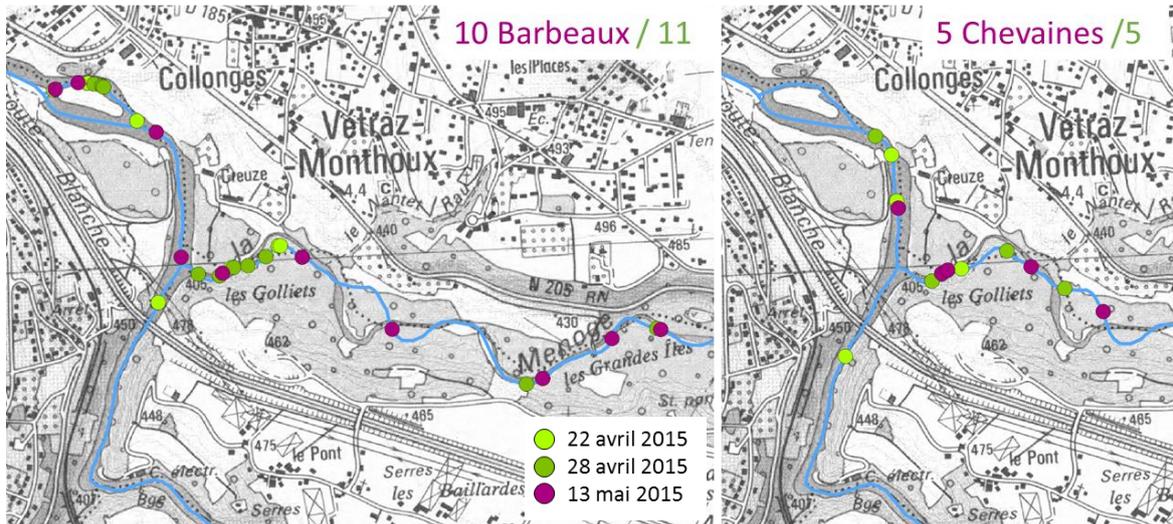
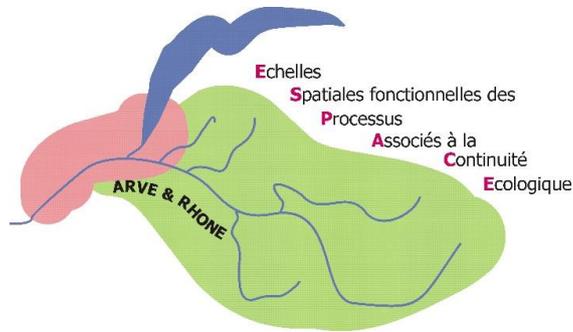


Figure 87 : Positions des deux espèces de Cyprinidés suivis dans le secteur de Vétraz-Monthoux (confluence Arve – Menoge) avant et après la crue du 1^{er} mai 2015.

Toutefois, côté suisse, des mouvements marqués ont été observés. Entre la frontière et l'amont de l'ouvrage de Vessy, les poissons qui étaient considérés comme vivants au 1^{er} mai ont tous dévalé sous l'ouvrage, se déplaçant entre 300 m et 6 km. Pour les poissons qui étaient présents en aval du barrage de Vessy avant la crue, aucun d'entre eux n'a été retrouvé, et l'hypothèse la plus probable est qu'ils ont dû rejoindre le Rhône (retenue de Verbois). De même sur le Rhône, très peu de poissons qui étaient encore suivis ont été retrouvés (3 individus seulement). Si peu de mouvements ont été observés sur le Rhône pour ces trois individus, la position des autres est hypothétique (calé en profondeur, hors de portée du signal radio ou dévalaison hors de l'aire d'étude).

6) Franchissements d'ouvrages

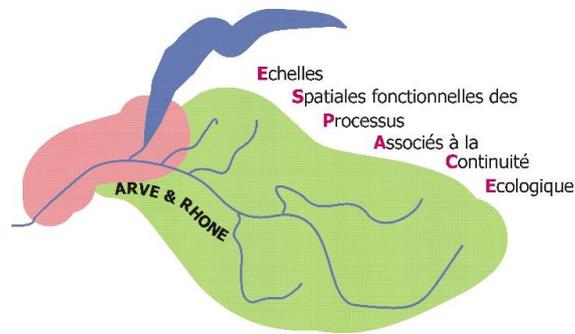
Les résultats de franchissements des ouvrages et seuils du Rhône genevois et de l'Arve présentés ci-après se décomposent en trois parties :

- Capacité et efficacité de franchissement des grands ouvrages du Rhône : cette partie présente les résultats obtenus pour les deux « grands » ouvrages du Rhône, ceux de Verbois et de Chancy-Pougny. Le comportement des poissons marqués par radio au pied du barrage est décrit, afin de vérifier si les comportements d'attraction par le débit élevé du canal de fuite observés sur d'autres ouvrages hydroélectriques (voir par exemple, LARINIER *et al.*, 2003 ; OVIDIO & PHILIPPART, 2007) sont adoptés par les poissons du Rhône genevois (hypothèse de la



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



rhéotaxie¹⁹). Cette hypothèse de départ sous-entend que le débit majoritaire issu du turbinage (qui attirerait préférentiellement les poissons) et pourrait « cacher » la présence de l'entrée de l'échelle à poissons. Pour chacun des ouvrages, l'efficacité de franchissement a ensuite été évaluée. Pour cette première partie, les données de franchissement (PIT-tag) sont prises en compte jusqu'au 30 avril 2015.

- Capacité et efficacité de franchissement des autres ouvrages du Rhône et de l'Arve : cette seconde partie s'intéresse aux autres ouvrages équipés d'échelle à poissons, notamment Arthaz-Pont-Notre-Dame, Vessy et Seujet. Du fait de leur configuration (pas de séparation entre turbines et vannes, et présence de voies alternatives de migration), les objectifs des stations fixes radio n'étaient pas exactement les mêmes. Les voies alternatives de franchissement sur Vessy et Seujet ont été décrites grâce à plusieurs systèmes de détection radio. Pour l'ouvrage d'Arthaz, le système de détection radio simple a permis de contrôler le temps de présence des individus au pied de l'ouvrage avant qu'ils le franchissent (ou pas) via la passe à poissons (existence éventuelle d'une stagnation au pied de l'ouvrage, synonyme d'un frein à la montaison, avant la détection des individus par le système PIT-tag de la passe à poissons) ;
- Franchissement des seuils du bassin de l'Arve : cette dernière partie décrit les franchissements des seuils du bassin de l'Arve, non équipés de système de détection spécifique, mais situés sur le linéaire suivi par lors des opérations hebdomadaires de pistage. Ceux sont :
 - les seuils du lit de l'Arve entre la jonction à Genève et les 2 seuils en enrochements de Scionzier (à l'aval immédiat de la restitution de l'usine hydroélectrique de Taninges),
 - les 3 seuils situés sur le Borne aval, de la confluence avec l'Arve jusqu'à l'entrée des gorges à Saint Pierre-en-Faucigny,
 - et le seuil de la RD19 sur le Nant de Sion.

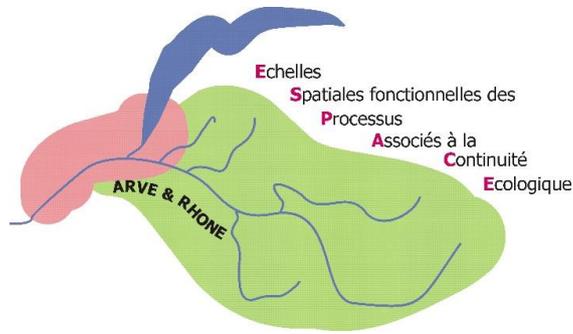
Les suivis mobiles par radiotélémetrie ont permis d'apporter des informations sur leur franchissabilité et uniquement pour le seuil du Nant de Sion, une installation PIT-tag a apporté des éléments complémentaires.

¹⁹ Réaction de locomotion orientée d'organismes mobiles, déclenchée et entretenue par un courant d'eau et s'effectuant soit dans sa direction (rhéotaxie positive), soit dans la direction contraire (rhéotaxie négative).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

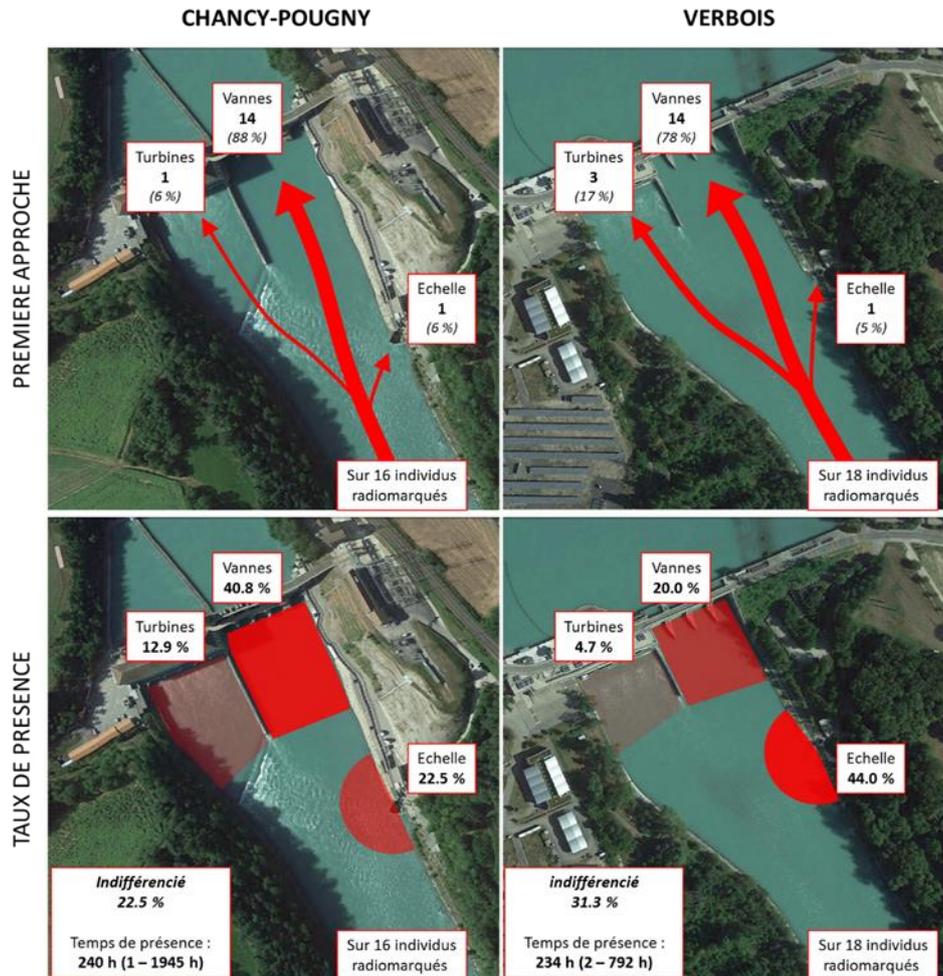


A. Capacité et efficacité de franchissement des grands ouvrages du Rhône

a. Verbois

Comportement sous barrage

Contrairement à l'hypothèse de départ de rhéotaxie, les stations d'enregistrement fixes radio ont montré que les individus n'approchaient pas du barrage sous les turbines, mais majoritairement sous les vannes (14 individus sur 18, **Figure 88**). Sur les 18 individus détectés au pied du barrage (Annexe 9), seulement trois sont finalement arrivés sous les turbines. Enfin, un seul est arrivé au pied de l'échelle à poissons et s'est arrêté un temps significatif (environ 4 jours) avant de stagner au pied du barrage entre les zones « turbines » et « vannes ».





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

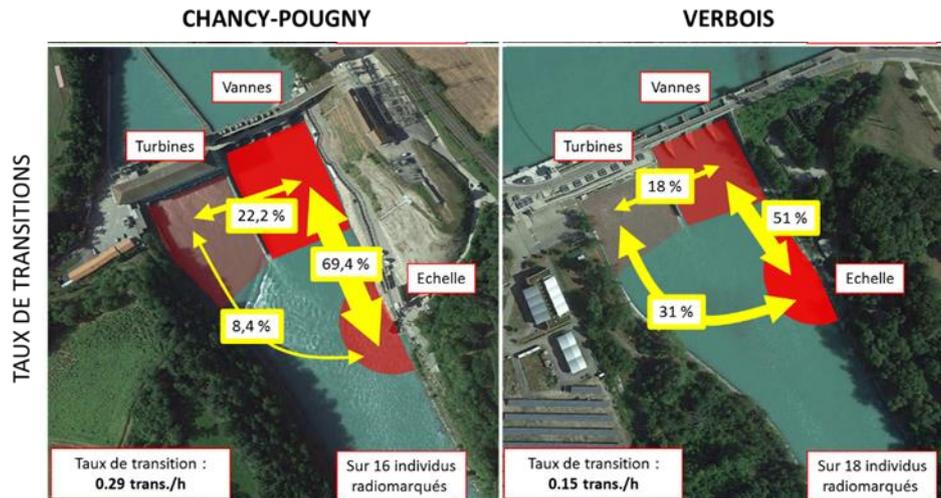
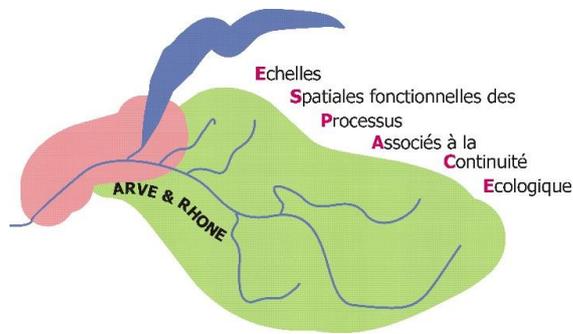


Figure 88 : Représentations graphiques des données comportementales observées sous les barrages de Chancy-Pougny et Verbois.

Les différentes phases de comportement au pied des barrages sont définies au § II. 8) A. a. L'image aérienne de l'ouvrage de Chancy-Pougny a subi une symétrie verticale afin de mieux pouvoir comparer ces deux ouvrages.

A cela, nous pouvons mettre en parallèle que sur les 17 individus qui sont remontés sous les vannes et turbines, 15 ont été détectés passant à proximité de l'échelle sans s'y arrêter (soit 88 %), ce qui pourrait indiquer une faible détectabilité de celle-ci.

Concernant le taux de présence dans chacune des zones, l'entrée de l'échelle à poissons est la plus exploitée sur l'ouvrage de Verbois, représentant en moyenne 44 % des détections. Ensuite, la zone des vannes représente en moyenne 20 % des détections. La zone comptant le moins de détections est l'aval des turbines (4.7 %). Ces détections représentent en moyenne un temps de présence au pied du barrage de 234 h (mini : 2 h ; maxi : 792 h).

De même que le taux d'occupation est en faveur de l'entrée de l'échelle et des vannes, les transitions sont majoritairement observées entre ces deux zones (51 % des transitions observées). Au second rang, ce sont les transitions entre l'entrée de l'échelle à poissons et les turbines qui sont observées le plus fréquemment (31 %). Les transitions entre les vannes et les turbines sont les moins fréquentes (18 %). Ces transitions apparaissent à une fréquence de 0.15 transitions par heure (soit une transition toutes les 6 à 7 h).

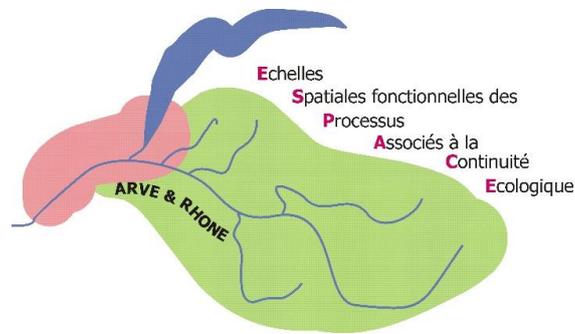
Franchissement

Les données de franchissement issues des Cyprinidés suivis par radio (N = 16) et des effectifs PIT-tag corrigés (N = 48) donnent des résultats environ similaires sur l'ouvrage de Verbois. En effet, les attractivités évaluées à partir de ces deux méthodes sont respectivement de 0.18 et 0.25, tandis que les estimations de franchissabilité sont identiques, de 0.67 (Tableau 23). Au final, la probabilité de



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



franchissement de l'ouvrage par les Cyprinidés est selon l'une et l'autre méthode de 0.12 et 0.17. On retiendra une probabilité de franchissement pour l'ouvrage de Verbois de 0.17 (car la méthode PIT-tag intègre un plus grand nombre d'individus).

Pour cette famille d'espèces, le temps moyen de franchissement de l'échelle à poissons est de 10 h 52' 52. Ce temps calculé majoritairement pour les chevaines est compris entre 4 h 07' 46 et 38 h 10' 12 (soit plus d'une journée et demi). Le seul barbeau dont nous avons pu estimer le temps de franchissement a été mesuré en 4 h 58' 50, comparable aux temps les plus faibles des chevaines.

Pour les Salmonidés enfin, les estimations ne sont données qu'à titre indicatif, étant donné leurs effectifs faibles. Il semble néanmoins que la probabilité de franchissement de l'ouvrage soit plus faible pour les truites, soit de 0.045.

Tableau 23 : Taux de franchissement de l'ouvrage de Verbois par espèce et famille taxonomique selon les individus marqués en Radio puis par PIT-tag (effectifs corrigés).

Espèce / Famille	Effectifs RADIO	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau fluviatile	15	2	1	0.13	0.5	0.07
Chevaine	1	1	1	1.0	1.0	1.0
Cyprinidés	16	3	2	0.18	0.67	0.12

Espèce / Famille	Effectifs PIT-tag corrigés	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau fluviatile	29	3	1	0.10	0.33	0.03
Chevaine	19	9	7	0.47	0.78	0.37
Truite fario	22	2	1	0.09	0.50	0.045
Cyprinidés	48	12	8	0.25	0.67	0.17
Salmonidés	22	2	1	0.09	0.50	0.045

b. Chancy-Pougny

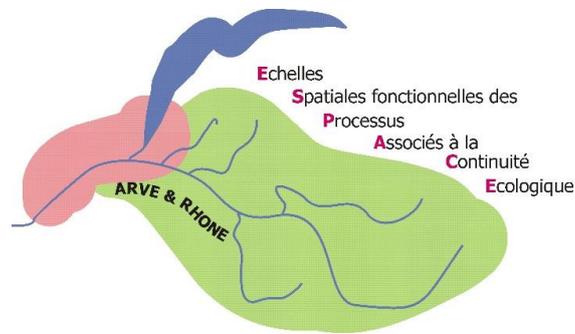
Comportement sous barrage

De même que pour l'ouvrage de Verbois, les stations d'enregistrement fixes radio installées sur le barrage de Chancy-Pougny ont montré que les individus effectuaient leur première approche du barrage sous les vannes (14 individus sur 19, **Figure 88**). Sur les 19 individus détectés au pied du



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



barrage (Annexe 10), un seul est finalement arrivé sous les turbines. De même, un seul est arrivé au pied de l'échelle à poissons et s'y est arrêté un temps significatif (> 1 jour) avant de changer de zone.

Sur les 15 individus qui sont remontés sous les vannes et turbines, 5 ont été détectés passant à proximité de l'échelle sans s'y arrêter (soit 33 %), ce qui pourrait également indiquer une faible détectabilité de celle-ci. Néanmoins, la proportion de ces individus est plus faible que sur le barrage de Verbois, alors que sous les deux ouvrages, les zones de détection de l'entrée de l'échelle couvrent approximativement un tiers de la largeur du cours d'eau.

Concernant le taux de présence dans chacune des zones, contrairement à l'ouvrage de Verbois, la zone des vannes est la plus exploitée sur l'ouvrage de Chancy-Pougny, représentant en moyenne 41 % des détections. La zone de l'entrée de l'échelle représente quant à elle en moyenne 22.5 % des détections. Pour l'ouvrage de Verbois, les taux de présence dans ces deux zones sont respectivement de 20 % et 44 %, soit l'inverse de ce qui est observé pour l'ouvrage de Chancy-Pougny. La zone comptant le moins de détections est à nouveau l'aval des turbines, ne représentant en moyenne que 13 % des détections individuelles de Chancy-Pougny.

Ces détections représentent un temps de présence au pied du barrage de 240 h en moyenne, quasiment identique à l'ouvrage de Verbois. Cependant, si le temps minimal de présence est comparable (1 h), il n'en est pas de même pour le temps maximal de présence d'un individu au pied du barrage de Chancy-Pougny, pouvant aller jusqu'à 1 945 h (soit plus de deux fois ce qui avait été observé sur Verbois). Ce constat peut résider dans le fait que la passe à poissons de Chancy-Pougny est plus récente que celle de Verbois (2012 contre 2000) ; les poissons n'ont peut-être pas encore intégré le fait qu'il y ait maintenant un dispositif de franchissement pour contourner le barrage de Chancy-Pougny.

De même que le taux d'occupation est en faveur des vannes et de l'entrée de l'échelle, les transitions sont à nouveau majoritairement observées entre ces deux zones (69.4 % des transitions observées au pied de l'ouvrage). Au second rang, ce sont les transitions entre les turbines et les vannes qui sont observées le plus fréquemment (22.2 %). Le nombre de transitions entre l'entrée de l'échelle et les turbines est le plus faible (8.4 %). Enfin, ces transitions sont en moyenne plus fréquentes que sur l'ouvrage de Verbois, soit à une fréquence de 0.29 transitions par heure (équivalant à une transition toutes les 3 h environ).

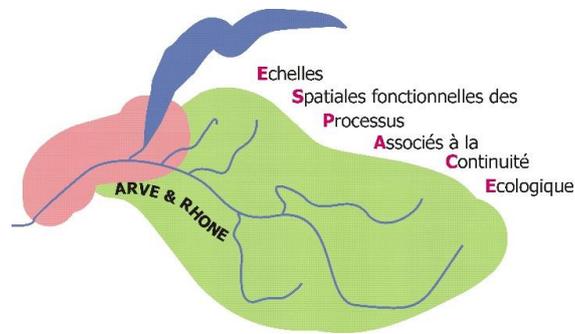
Franchissement

Les données de franchissement issues des individus Cyprinidés marqués par PIT-tag (effectifs corrigés, reposant sur 48 individus) montrent des valeurs d'attractivité et de franchissabilité de 0.38 et 0.72 (**Tableau 24**). Les données issues des individus marqués par radio (N = 19) donnent des résultats du même ordre de grandeur (respectivement 0.42 et 0.63). Ces résultats montrent que si la franchissabilité est similaire sur l'ouvrage de Verbois, l'attractivité semble plus élevée. Au final, la probabilité de franchissement de l'ouvrage de Chancy-Pougny par les Cyprinidés est de 0.27.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



A nouveau, les effectifs en truites sont plus faibles, mais montrent néanmoins que, comme pour Verbois, le taux de franchissement de l'ouvrage est plus faible, de 0.065. A nouveau, une faible attractivité (0.13) semble expliquer cela.

Du fait du dysfonctionnement du système de détection en amont de l'échelle, un seul temps de franchissement a pu être évalué sur un barbeau. Celui-ci a été estimé en 2h 30' 12, soit deux fois moins de temps que le franchissement le plus rapide sur Verbois.

Tableau 24 : Taux de franchissement de l'ouvrage de Chancy-Pougny par espèce et famille taxonomique selon les individus marqués en Radio puis par PIT-tag (effectifs corrigés).

Espèce / Famille	Effectifs RADIO	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau fluviatile	8	2	1	0.25	0.5	0.13
Chevaine	11	6	4	0.55	0.67	0.37
Cyprinidés	19	8	5	0.42	0.63	0.26

Espèce / Famille	Effectifs PIT-tag corrigés	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau commun	17	3	1	0.18	0.33	0.06
Chevaine	31	15	12	0.48	0.80	0.38
Truite fario	15	2	1	0.13	0.50	0.065
Cyprinidés	48	18	13	0.38	0.72	0.27
Salmonidés	15	2	1	0.13	0.50	0.065

c. Interprétation

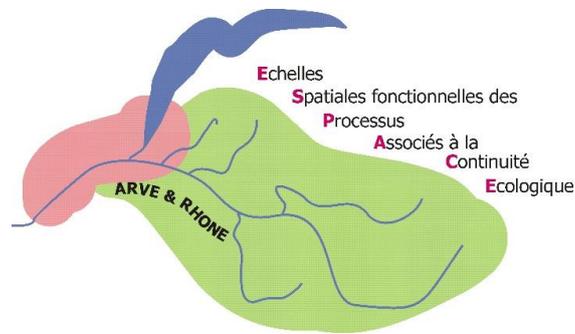
Les résultats obtenus sur les deux grands ouvrages du Rhône ont montré des tendances similaires, que ce soit dans le comportement des poissons ainsi que dans leur capacité de franchissement. La principale différence observée semble être liée à l'attractivité des deux échelles à poissons. Les commentaires évoqués par la suite ne concernent que les Cyprinidés ; les données décrivant le comportement des truites étant faibles, ne peuvent décrire le cas général.

Sur l'ouvrage de Verbois, nous avons pu voir, malgré le fait que les poissons migrants occupent majoritairement la zone à l'entrée de l'échelle, que seul un poisson sur cinq environ arrive à trouver l'entrée de celle-ci. Sur Chancy-Pougny, un poisson sur trois environ détecte l'entrée de l'échelle à poissons, et ce malgré le fait que la zone de détection à cet endroit ne soit pas la plus exploitée. Pour des débits du Rhône relativement similaires pour ces deux ouvrages, l'une des principales différences



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



dans la structure de ces ouvrages est le débit d'attrait à la sortie de l'échelle, débit devant, comme son nom l'indique, attirer les poissons en montaison. De $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur l'ouvrage de Chancy-Pougny (soit 1.2 % du débit moyen du Rhône), il n'est que de $2.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur l'ouvrage de Verbois (débits de la conduite d'attrait correspondant au turbinage de la microcentrale implantée en rive gauche) et de l'échelle confondus, soit 0.75 % du débit du Rhône). Cette différence pourrait expliquer cet écart d'attractivité entre les deux ouvrages, mais reste difficile à analyser plus en détail. Le faible nombre d'individus marqués rentrant dans l'échelle, de même que les variations journalières parfois importantes (éclusées) du débit turbiné, rendent difficile toute interprétation plus poussée.

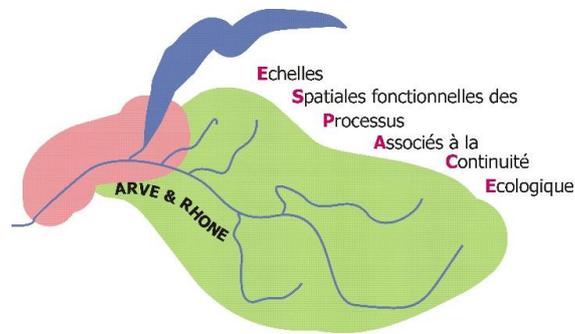
De plus, le fait qu'un poisson entre dans ou franchisse l'échelle ne semble pas relié à un temps de présence en aval de l'ouvrage, ni à un schéma précis du taux d'occupation ou taux de transitions. Des poissons ayant pénétré dans l'échelle peuvent avoir passé aussi bien un temps réduit en aval comme un temps très long. Même si les valeurs présentées précédemment reflètent une moyenne sur l'ensemble des individus détectés, une très grande variabilité du comportement au pied du barrage a été observée entre ceux-ci, et en extraire un schéma-type comportemental est difficile, que ce soit à l'échelle de l'espèce ou même de la famille (par exemple les données sur les Salmonidés sont trop restreintes). A titre indicatif, des exemples de comportements individuels sont présentés en annexe (Annexe 12 à Annexe 16) afin d'illustrer la variabilité de ces comportements au pied du barrage.

Nous avons pu observer une grande variabilité dans le temps de franchissement, pourtant à une période du cycle de vie qui laisserait supposer un franchissement rapide (reproduction). Des tests non-paramétriques n'ont pas permis de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre la taille des individus, l'espèce ou le sexe et les dates de première approche, d'entrée ou de franchissement des ouvrages (WMW et SPEARMAN ; $p > 0.05$). De même, les taux d'occupation ne semblent pas dépendre de l'espèce (chi^2 ; $p > 0.05$). Quelques cas exceptionnels sont également observés. En effet, un chevaline (9493-24) marqué en aval du barrage de Chancy-Pougny en juillet 2013 a été détecté au pied du barrage pendant 8 jours durant le même mois. Cet individu, qui a passé la majorité de son temps sous les vannes, et qui finalement n'est pas entré dans l'échelle à poissons, est reparti le 22 juillet 2013 puis a disparu de la zone d'étude (Annexe 16). Cet individu, dont l'émetteur a ensuite cessé de fonctionner, sera détecté à l'entrée de l'échelle (PIT-tag) en octobre 2014 sans la franchir (la question de la motivation hors période de reproduction prend alors tout son sens), puis à nouveau en avril 2015 où il franchit cette fois l'échelle. Il lui aura donc fallu attendre 2 ans avant de franchir le barrage de Chancy-Pougny malgré deux tentatives infructueuses les années précédentes. De même, sur Verbois, une truite (non suivi en radio ; $L_t = 355 \text{ mm}$) a effectué 25 « tentatives » de franchissement (entrée dans l'échelle mais ressortie par l'aval) de mars à novembre 2014 avant de franchir l'échelle le 15 novembre 2014. A nouveau, la question de la motivation en dehors de la période de reproduction est soulevée, et prend toute son importance quant à de telles études sur le franchissement et la migration piscicole.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Considérant maintenant le faible nombre d'individus entrés dans ou ayant franchi l'échelle à poissons, il est impossible de réaliser une modélisation poussée de ces comportements, et donc de prédire si les débits ont une influence sur ceux-ci. A première vue, la première approche, effectuée très majoritairement sous les vannes, ne semble pas due à leur ouverture. Il n'y a en effet aucune corrélation entre le moment où le poisson se présente en aval de l'ouvrage et les débits transitant par celui-ci, que ce soit le débit turbiné, ou le débit consécutif à l'ouverture des vannes de surverses (**Figure 89** et **Figure 90**). Cette première approche se fait indifféremment, après une période d'ouverture, comme avant, ou même hors des périodes d'activité de celles-ci.

Concernant les débits du Rhône, l'activité des poissons ne semble pas corrélée au marnage important dû aux éclusées (dans la mesure de ce qui peut être décrit). De plus, ce marnage artificiel est susceptible de tamponner toute influence que le débit du Rhône pourrait avoir. Les changements physiologiques à l'approche de la période de reproduction sont plus à même d'expliquer le comportement des poissons dans le cadre de cette montaison que les débits rencontrés.

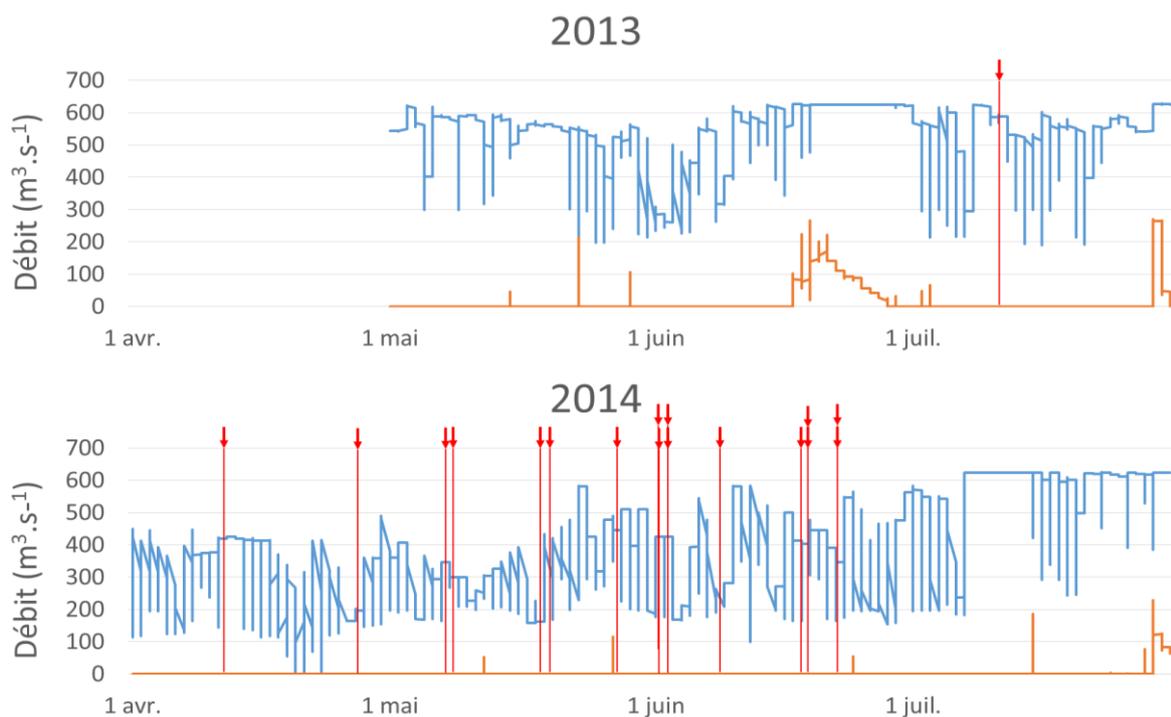


Figure 89 : Débits aux turbines (courbe bleue) et aux vannes (surverses, courbe orange) et date de première approche des individus marqués par radio sur le barrage de Verbois durant les périodes de reproduction des cyprinidés étudiés (du 1er avril au 31 juillet) en 2013 et 2014 (pas de montaison détectée par radio en 2015).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

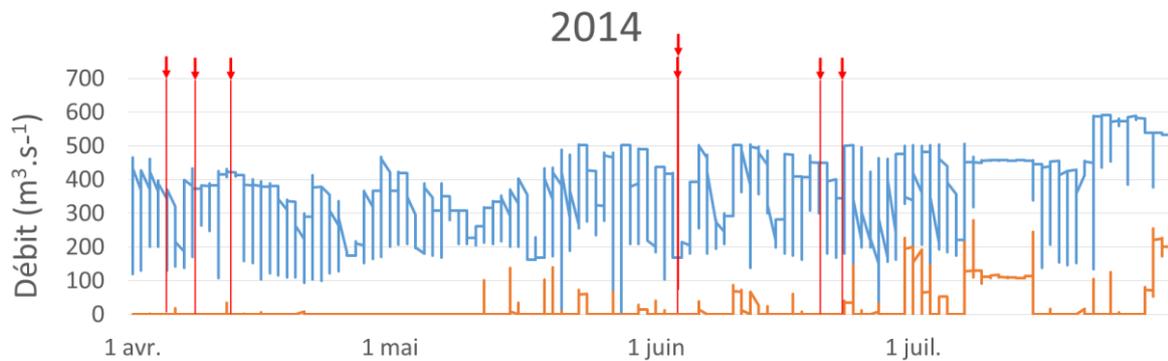
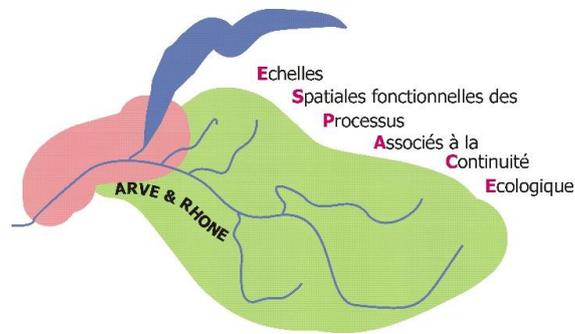


Figure 90 : Débits aux turbines (courbe bleue) et vannes (surverses, courbe orange) et date de première approche des individus marqués par radio sur le barrage de Chancy-Pougny durant les périodes de reproduction des cyprinidés étudiés (du 1^{er} avril au 31 juillet) en 2014.

Les données de débit des turbines et vannes n'étaient pas disponibles en 2013 (pas de montaison détectée par radio en 2015).

Une fois l'individu entré dans l'échelle à poissons, nous avons pu constater que la franchissabilité des deux échelles sont du même ordre de grandeur pour les Cyprinidés (0.67 sur Verbois vs. 0.72 sur Chancy-Pougny). Malgré leurs tailles relativement différentes (la longueur de l'échelle à poissons de Verbois étant 40 % plus grande que celle de Chancy-Pougny), les individus ne semblent pas éprouver plus de difficultés à franchir l'une ou l'autre. Néanmoins, il ressort de ces résultats qu'une part des individus (entre 33 % et 28 %) ne franchit pas l'échelle, même une fois dedans. Cela pourrait s'expliquer par :

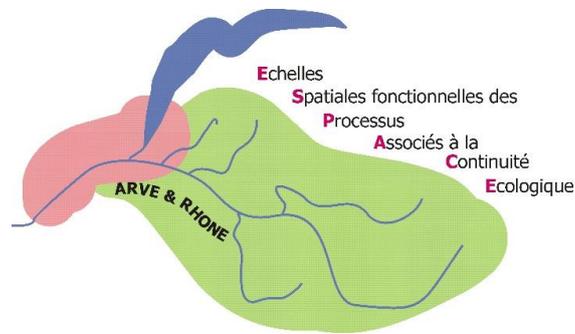
- un manque de motivation à le faire, par exemple lors de montaison en dehors des périodes de reproduction, ou parce que des habitats potentiels de reproduction sont disponibles dans l'échelle à poissons de Verbois du fait de la présence de sédiments grossiers dans certains bassins.
- l'encombrement temporaire de l'échelle à poissons par des embâcles ou déchets obstruant les fentes qui pourrait également gêner la progression des individus. Un entretien régulier afin de maintenir un écoulement aussi favorable que possible à la montaison est primordial dans ces processus de franchissement d'ouvrages.

Au final, les probabilités de franchissement mesurées sur ces deux ouvrages semblent assez faibles (0.17 et 0.27 pour Verbois et Chancy-Pougny, respectivement). Nous pouvons trouver dans la bibliographie que les quelques études qui se sont intéressées aux probabilités de franchissement des Cyprinidés rapportent des valeurs comprises entre 0.2 et 0.4 (moyenne : 0.30 ; NOONAN *et al.*, 2012), intervalle dans lequel nous retrouvons le taux estimé pour Chancy-Pougny (0.27), tandis que Verbois a une probabilité plus faible (0.17). Les suivis de nasses réalisés en parallèle de la présente étude par le bureau d'études COREALIS (de mai 2013 à juin 2015) montrent que 5 208 individus ont franchi l'échelle à poissons de Verbois, dont 60 barbeaux et 63 chevaines pour les Cyprinidés étudiés, ainsi que 10 truites fario et 38 truites lacustres concernant les Salmonidés (COREALIS, données



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



communiquées). Sur Chancy-Pougny, 1 403 individus ont été capturés dans le même temps suite à la mise en service de cette échelle, dont 102 barbeaux, 34 chevaines, 6 truites fario et 8 truites lacustres. Du fait de la durée du suivi et de la taille du fleuve Rhône, ces chiffres (suivi des nasses et présents résultats) semblent bien faibles. Il est cependant difficile de déterminer quelles sont les conséquences de telles probabilités sur le bon fonctionnement des populations. Il est vraisemblable que seule une analyse génétique des populations ou noyaux de populations de part et d'autre des ouvrages permettrait de déterminer si les échanges d'individus sont suffisants pour maintenir une variabilité génétique satisfaisante (sans effet de « goulot d'étranglement²⁰») parmi ces (noyaux de) populations.

La construction récente de l'échelle à poissons de Chancy-Pougny (2012) ouvre la voie aux individus présents sous ce barrage pour pouvoir coloniser ou migrer dans les secteurs en amont. Cependant, pour des individus qui tenteraient de rejoindre l'amont de Verbois (habitat de reproduction en amont du Seujet ou dans l'Arve), la probabilité de franchir ces deux ouvrages résulte du produit des deux probabilités de chaque ouvrage, soit une valeur de 0.046 ($p = 0.27 \times 0.17$). Ainsi, sur les 48 individus marqués par PIT-tag présents sous Chancy-Pougny et susceptibles de migrer (effectifs corrigés), seuls deux individus ont été détectés comme ayant franchi les deux ouvrages.

B. Capacité et efficacité de franchissement des autres ouvrages du Rhône et de l'Arve

a. Seujet

Comportement sous barrage

Sept individus ont été détectés en aval de l'ouvrage du Seujet, tous appartenant à la famille des Cyprinidés (Annexe 10). Six d'entre eux se sont postés en aval du barrage en première approche, tandis qu'un seul s'est dirigé directement dans l'écluse (**Tableau 25**).

Concernant le taux de présence dans chacune des zones, la majorité des détections a eu lieu dans la zone aval du barrage (83 %). Les 17 % de détections restantes proviennent de l'écluse, mais aucune n'a été réalisée en amont du barrage. Les données indiquent donc à ce jour aucun franchissement de l'ouvrage par l'écluse ou les vannes parmi les individus marqués en radio.

Ces détections représentent un temps de présence au niveau de l'ouvrage de 16.3 h en moyenne, avec une présence minimale de 4 h et maximale de 36 h. Du fait des présences uniquement détectées au niveau de la zone aval et de l'écluse, 100 % des transitions se font évidemment entre ces zones. Celles-ci ont été observées à une fréquence de 0.22 transitions par heure (soit une transition toutes les 4 à 5 h en moyenne).

²⁰ Un goulot d'étranglement de population est la perte d'allèles par dérive génétique, qui réduit la diversité génétique de la population et donc sa capacité à s'adapter à de nouvelles contraintes de l'environnement (perturbations).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

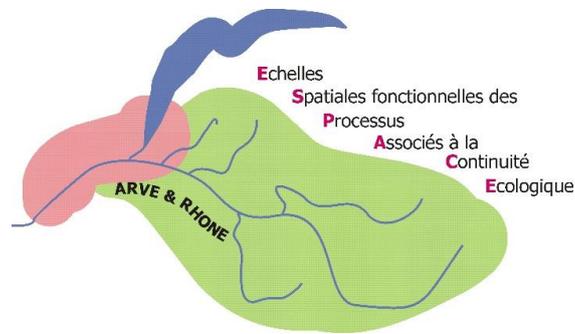


Tableau 25 : Données comportementales observées sous le barrage du Seujet.

Zone	« 1 ^{ère} approche »		Taux d'occupation (%)
	N	%	
Aval	6	85.7	82.6
Ecluse	1	14.3	17.4
Amont	0	0.0	0.0
<i>Indifférencié</i>	-	-	<i>0.0</i>

Franchissement

Les données de franchissement issues des individus Cyprinidés (effectifs PIT-tag corrigés, reposant sur 178 individus) montrent des valeurs d'attractivité et de franchissabilité de 0.08 et 0.60 (**Tableau 26**). Aucun des individus marqués par radio n'est entré dans l'échelle, aussi ni l'attractivité ni la franchissabilité n'ont pu être estimées à partir de cette méthode. Au final, la probabilité de franchissement de l'ouvrage par l'échelle à poissons, pour les Cyprinidés, est de 0.05.

Encore une fois sur le Rhône, les faibles effectifs de truite fario n'ont pas permis de réaliser ces estimations pour la famille des Salmonidés ; aucun individu (même marqué uniquement par PIT-tag) n'étant entré dans l'échelle à poissons.

Pour les Cyprinidés, le temps moyen de franchissement de l'échelle à poissons du Seujet (estimé uniquement sur des chevaines, N = 6) est de 0 h 58' 08. Ce temps est individuellement compris entre 0 h 04' 36 et 2 h 41' 26, soit un temps bien plus faible que ce qui a pu être globalement observé sur les deux grands ouvrages en aval.

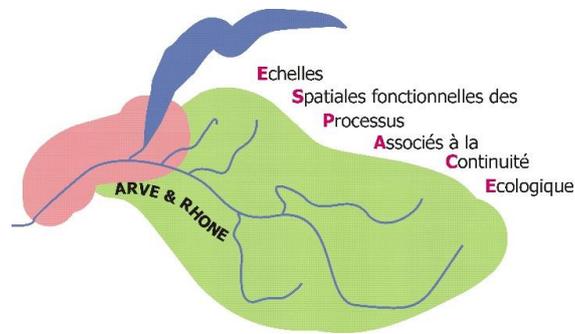
Tableau 26 : Taux de franchissement de l'ouvrage du Seujet selon les individus marqués par PIT-tag (effectifs corrigés).

Espèce / Famille	Effectifs corrigés	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau commun	41	3	1	0.07	0.33	0.02
Chevaine	137	12	8	0.09	0.67	0.06
Truite fario	35	0	0	0.00	-	-
Cyprinidés	178	15	9	0.08	0.60	0.05
Salmonidés	35	0	0	0.00	-	-



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Interprétation

L'ouvrage du Seujet est un barrage particulier, puisqu'en parallèle de l'échelle à poissons, deux voies alternatives de franchissement en montaison existent : l'écluse et ponctuellement les vannes. Les résultats montrent que peu de poissons ont utilisé l'échelle durant la période de suivi.

Les suivis de nasses (en amont de l'échelle) ont montré que jusqu'à présent, peu de chevaines ont emprunté l'échelle (N = 22 lors du suivi de décembre 2006 à novembre 2007, et N = 2 de janvier 2013 à avril 2014). Lors de ces mêmes suivis, aucun barbeau n'a été capturé dans la nasse, et ce malgré un rassemblement très important de barbeaux qui avait été observé fin 2006 dans la partie aval de l'échelle (chambre de dissipation ; ECOTEC, 2008). Les détections de la présente étude ont montré que malgré le nombre important de poissons potentiellement migrateurs et présents en aval du barrage (N = 178 Cyprinidés), seuls 12 chevaines et 3 barbeaux sont rentrés dans l'échelle. Les chevaines ont une bonne probabilité de franchissement (0.67) tandis que celle des barbeaux est deux fois inférieure à celle des chevaines (0.33).

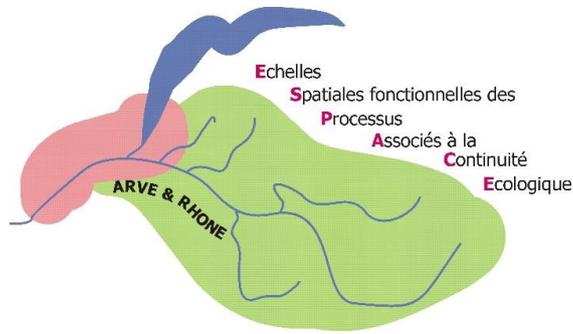
L'attractivité de l'échelle pose donc énormément de questions. En effet, des barbeaux ont été observés sous les turbines de l'ouvrage, de même que des bancs importants se rassemblent dans les zones de reproduction situées en amont du barrage. Il est donc tout à fait probable que des barbeaux franchissent pourtant le barrage. Pour expliquer cette faible attractivité de l'échelle, la première observation est que le débit d'attrait de l'échelle (0.7 à $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en fonction du niveau du Léman en amont) est faible par rapport au débit du Rhône à cet endroit (débit moyen : $277 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). De plus, au printemps (de février à mai), le niveau d'eau du Léman est suffisamment bas pour induire un débit très faible dans l'échelle à poissons, celle-ci devenant alors potentiellement inopérante. Les conditions hydrauliques qui en résultent sont alors susceptibles de limiter l'attractivité de l'échelle à poissons à la période critique pour la montaison piscicole des deux espèces de Cyprinidés étudiées (montaison liée à la phase de reproduction).

Les voies alternatives pourraient alors être favorisées pour la montaison des poissons migrants. Cependant, les poissons équipés par radio qui se sont présentés au pied du barrage n'ont pas permis d'identifier les voies de passage utilisées. Aucun des sept individus n'a franchi le barrage. Cet effectif reste néanmoins trop faible pour tirer des conclusions robustes quant à la franchissabilité de cet obstacle (probablement dû à un équipement du barrage tardif dans le cadre du programme ESPACE – mai 2014), et une poursuite de l'investigation au-delà du présent projet est nécessaire afin d'obtenir plus de données sur cet ouvrage (investigations toujours en cours).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



b. Vessy

Comportement sous barrage

Sur l'ouvrage de Vessy, seuls cinq individus présents en aval et marqués par radio sont remontés jusqu'à l'ouvrage, à nouveau tous appartenant à la famille des Cyprinidés (Annexe 11). Trois d'entre eux se sont présentés en première approche sous les vannes (du côté de l'entrée de l'échelle à poissons en rive gauche), les deux derniers étant passés par le lit principal (rive droite, **Tableau 27**). Aucun individu n'est allé en première approche dans le canal de fuite (sous les turbines).

Concernant le taux de présence dans chacune des zones, la majorité des détections s'est passée dans la zone de l'échelle rive gauche (83.5 %). Seize pourcent des détections ont été réalisées dans le lit principal (rive droite), et le reste des détections a été fait sous les turbines, montrant que les poissons marqués par radio ont pu venir dans un second temps dans cette zone (**Tableau 27**). Ces détections représentent un temps de présence sur l'ouvrage de 59.6 h en moyenne, avec une présence minimale de 3 h et maximale de 187 h.

Aucune transition n'a été observée entre la zone de l'échelle à poissons rive gauche et celle du lit principal (rive droite). Par contre, seulement deux transitions ont été observées :

- la première dans chacune des deux zones sous le barrage (échelle et turbines, voir **Figure 15**), Ce poisson initialement présent dans la zone de l'échelle à poissons n'a pas été détecté ni dans le lit principal, ni dans l'échelle à poissons (par les antennes PITtag). Il est donc vraisemblable qu'il ait dévalé l'Arve jusqu'au canal de fuite et soit remonté sous les turbines.
- la seconde concerne un individu qui est allé du lit principal sous les turbines. Pour cet individu, il est impossible de dire s'il a dévalé comme l'individu précédent, ou s'il a pu franchir l'échelle à poissons de la rive droite (non équipée) et dévalé par l'usine avant d'être détecté sous les turbines.

Tableau 27 : Données comportementales observées sous le barrage de Vessy.

Zone	« 1 ^{ère} approche »		Taux d'occupation (%)
	N	%	
Lit principal	2	40.0	16.2
Echelle	3	60.0	83.5
Turbines	0	0.0	0.3
Indifférencié	-	-	0.0

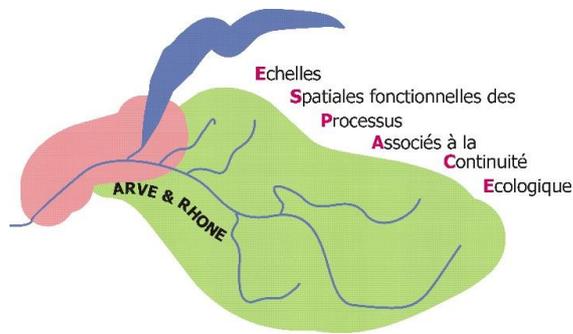
Franchissement

Les données de franchissement reposent uniquement sur les effectifs corrigés en Cyprinidés (N = 72, aucun salmonidé n'ayant franchi l'échelle en rive gauche). Les détections dans l'échelle ont permis d'estimer des valeurs d'attractivité et de franchissabilité de 0.18 et 0.61 (**Tableau 28**), pour une



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



probabilité de franchissement de l'ouvrage par l'échelle à poissons en rive gauche de 0.11 (pour les Cyprinidés).

Concernant les chevaines ayant franchi l'échelle à poissons, le temps moyen de franchissement de l'échelle à poissons en rive gauche de Vessy est de 0 h 16' 18 (N = 6) ; le temps individuel de franchissement étant compris entre 0h 08' 54 et 1 h 20' 17. Pour les deux barbeaux ayant franchi l'ouvrage, les temps individuels de franchissement ont été mesurés à 0 h 00' 49 et 0 h 22' 02.

Tableau 28 : Taux de franchissement de l'ouvrage de Vessy selon les individus marqués par PIT-tag (effectifs corrigés).

Famille	Effectifs corrigés	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Cyprinidés	72	13	8	0.18	0.61	0.11
Salmonidés	20	0	0	0.00	0.00	0.00

Interprétation

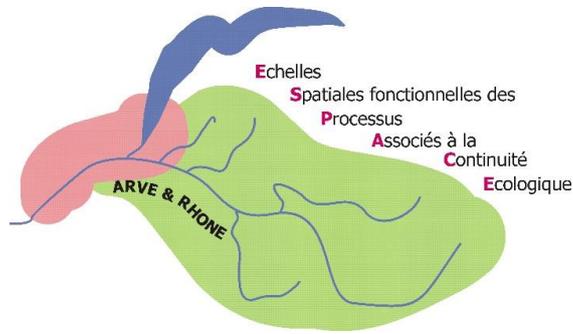
A nouveau, les faibles effectifs détectés sur ce site limitent les conclusions pour cet ouvrage. Néanmoins, sur les 5 individus radio détectés, deux sont passés par le lit principal et ont pu franchir l'ouvrage par l'échelle à poissons en rive droite qui n'était malheureusement pas équipée. De plus, le fait que le temps d'occupation soit relativement faible dans cette zone par rapport au pourcentage de poissons y passant, laisse penser que ces derniers pourraient franchir assez rapidement l'ouvrage par l'échelle en rive droite. A cela s'ajoute le fait que des individus marqués par PIT-tag n'ayant pas été détectés sur Vessy, ont été observés sur des systèmes de détection situés en amont, à Arthaz-Pont-Notre-Dame ou sur la Menoge, confortant le fait que des individus passent par l'échelle située en rive droite. De même, le suivi des nasses réalisé sur cet ouvrage en 2008 et 2009 a montré que le nombre de poissons capturés dans ces deux échelles était semblable (57 poissons capturés en rive gauche *versus* 53 poissons capturés en rive droite ; GREN, 2009). Ce suivi montre également que la majorité des barbeaux semblait passer plutôt en rive gauche, tandis que les truites passaient de manière équivalente dans les deux échelles. A noter que les chevaines semblaient plutôt privilégier l'échelle en rive droite, mais l'effectif faible (N = 18) limite la comparaison. En 2013, un nouveau suivi réalisé sur ces deux échelles à poissons a, à nouveau, démontré des franchissements de l'ouvrage, puisque 108 individus au total ont été capturés, majoritairement des barbeaux. L'échelle en rive droite n'a permis de capturer par contre que 3 individus, des soucis d'ensablement l'ayant rendu à plusieurs reprises inopérante. L'importance de l'entretien de ces ouvrages de franchissement est de nouveau démontrée par ce constat.

Ainsi, la probabilité de franchissement qui a pu être estimée pour l'ouvrage de Vessy lors de la présente étude (échelle en rive gauche, $p = 0.11$) est donc une estimation *a minima*, la seconde échelle à poissons améliorant les chances de franchir l'ouvrage pour un individu en montaison.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Mais il est également important de noter le fait que l'Arve propose en aval de l'ouvrage des habitats pouvant correspondre aux préférences des espèces étudiées pour des zones de frayères. Il est donc tout à fait possible que des individus présents dans l'Arve en aval de l'ouvrage (de même que dans la partie amont du Rhône genevois, dont potentiellement des poissons marqués) n'aient aucune intention de franchir le barrage de Vessy lors des migrations de reproduction.

c. Arthaz-Pont-Notre-Dame

Comportement sous barrage

Au total 7 individus équipés d'émetteur radio se sont présentés au pied du barrage d'Arthaz durant l'étude, à savoir 5 truites, 1 barbeau et 1 chevaine.

Le temps de présence des truites dans la zone de détection est en moyenne de 152.1 h (mini : 128.6 h ; maxi : 182.2 h). Les deux individus de Cyprinidés se sont présentés à plusieurs reprises au pied du barrage. En prenant en compte leurs tentatives indépendamment, la moyenne de leur temps de présence au pied du barrage est de 291.1 h (mini : 72.1 h ; maxi : 1264,8 h soit presque 53 jours).

N'ayant délimité qu'une seule zone de détection, ni les taux d'occupation ni les taux de transition ne sont applicables pour cet ouvrage (l'équipement de cet ouvrage n'ayant pas pour objectif de répondre à ces questions comportementales).

Franchissement

Parmi les individus marqués par radio et détectés au pied du barrage d'Arthaz, les deux cyprinidés n'ont pas réussi à trouver l'entrée de l'échelle à poissons et 4 des 5 truites ont franchi l'échelle à poissons. Pour cette dernière espèce, l'attractivité est donc de 0.80 et la franchissabilité de 1.0. Leur probabilité de franchissement de l'échelle à poissons d'Arthaz qui en résulte est de 0.80 (**Tableau 29**).

En tenant compte ensuite des effectifs corrigés des individus marqués par PIT-tag présents en aval de l'ouvrage et susceptibles d'essayer de le franchir (**Tableau 29**), nous pouvons voir que l'ouvrage semble plus facilement franchissable par les Salmonidés (0.17) que par les Cyprinidés (0.04).

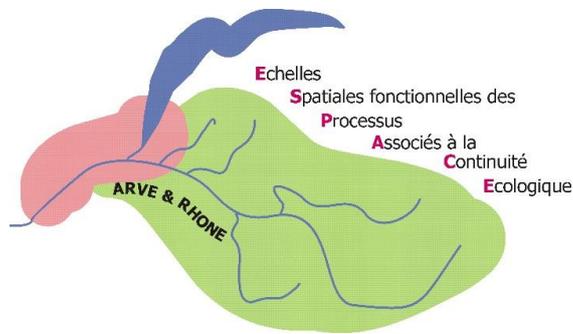
Tableau 29 : Taux de franchissement de l'ouvrage d'Arthaz-Pont-Notre-Dame selon les individus marqués par PIT-tag (effectifs corrigés).

Espèce / Famille	Effectifs RADIO	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau fluviatile	1	0	0	0.00	0.00	0.00
Chevaine	1	0	0	0.00	0.00	0.00



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Truite fario	5	4	4	0.80	1.00	0.80
Cyprinidés	2	0	0	0.00	0.00	0.00
Salmonidés	5	4	4	0.80	1.00	0.80

Espèce / Famille	Effectifs corrigés PITtag	N entré dans l'échelle	N ayant franchi l'échelle	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Barbeau commun	24	1	1	0.04	1.00	0.04
Chevaine	25	2	1	0.08	0.50	0.04
Ombre commun	23	1	1	0.04	1.00	0.04
Truite fario	86	20	18	0.23	0.90	0.21
Cyprinidés	49	3	2	0.06	0.67	0.04
Salmonidés	109	21	19	0.19	0.90	0.17

Enfin, les détections réalisées sur les différentes antennes PITtag ont montré que les truites fario franchissent l'échelle à poissons d'Arthaz en moyenne en 22 h 50' 53 (mini : 0 h 19' 42 ; maxi : 139 h 22' 51). Pour les deux Cyprinidés ayant franchi l'ouvrage, leurs temps de passage sont les suivants : 0 h 58' 15 pour le barbeau fluviatile et 0 h 55' 57 pour le chevaine.

Il est à noter que parmi les individus ayant franchi l'échelle à poissons (N = 21), 29 % (soit N = 6 (5 truites et le barbeau)) s'y sont repris à plusieurs fois avant de réussir le franchissement de l'ouvrage. L'analyse plus précise des données pour les truites a montré que le temps dépensé dans le dernier bassin par rapport au temps global du temps de passage correspondait en moyenne à 57 % du temps de passage et à 68 % du temps de tentative de passage. Ce constat valable également pour les cyprinidés montre que la difficulté de franchissement de l'échelle à poissons d'Arthaz réside dans la sortie. En effet, l'exutoire de l'échelle est perpendiculaire au lit de l'Arve et des accumulations de flottants colmatés avec des matériaux fins l'obstruent régulièrement créant ainsi une marche infranchissable.

Interprétation

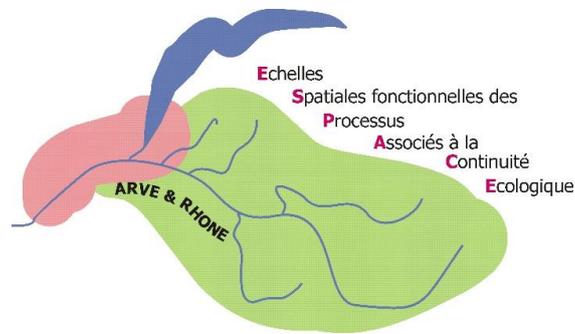
Il est important de mettre en relation étroite les résultats obtenus pour cet ouvrage dans le cadre de cette partie sur le franchissement avec les résultats obtenus précédemment dans la partie sur les domaines vitaux des espèces étudiées.

Concernant tout d'abord les Salmonidés, les résultats montrent une probabilité de franchissement assez importante. Même si à partir des données par PIT-tag le taux n'est que de 0.17, il faut envisager la présence d'habitats potentiels de reproduction dans l'Arve même en aval de l'ouvrage, de même que dans la Menoge (affluent proche de l'ouvrage), ce qui limiterait les besoins de



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



franchir ce barrage. En effet, si on considère les individus marqués par radio qui sont venus au pied du barrage, une grande majorité a franchi l'ouvrage. L'effectif considéré est certes faible (N = 5) mais l'observation assez claire. De plus, trois individus ayant franchi l'ouvrage étaient à l'origine des poissons provenant des zones amont et qui ont d'abord dévalé l'ouvrage avant de chercher à le franchir en montaison au moment de la reproduction. Aussi, il semble que pour les Salmonidés, la probabilité de franchir le barrage d'Arthaz-Pont-Notre-Dame est importante pour des individus migrants, dont le domaine vital s'étend aussi bien en aval qu'en amont de l'ouvrage d'Arthaz-Pont-Notre-Dame (où se trouveraient préférentiellement les zones de reproduction). Cette forte probabilité de franchissement de l'ouvrage est valable pour un entretien régulier de l'échelle à poissons. En effet, durant la réalisation du programme ESPACE, un nettoyage / dégrillage de l'exutoire était réalisé une à deux fois par semaine par un technicien de la fédération.

Ensuite, si nous nous intéressons aux Cyprinidés, la probabilité de franchissement que nous avons estimé sur l'effectif PIT-tag corrigé est somme toute assez faible et laisse présager de réelles difficultés à franchir cet ouvrage. Cependant, il est important de retenir des résultats décrits dans la partie précédente que la Menoge représente un milieu très important pour les Cyprinidés de l'Arve aval, en particulier pour la reproduction, comme le montrent les rassemblements observés ainsi que les suivis par radiopistage. Ainsi, il est peu vraisemblable qu'une part importante des populations de barbeaux ou chevaines aient une réelle volonté ou motivation à franchir l'ouvrage d'Arthaz-Pont-Notre-Dame. Aussi, une bonne part des individus marqués par PIT-tag (effectif corrigé) en aval de l'ouvrage n'avait donc probablement aucune velléité à se rendre au pied du barrage, et a préféré rejoindre la Menoge au moment de leur migration.

C. Franchissement des seuils du bassin de l'Arve

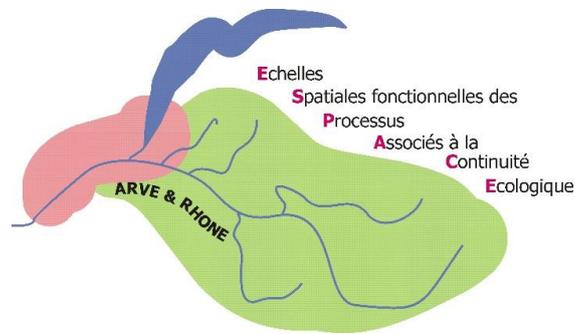
a. Seuils de l'Arve

Aucun des 11 seuils de l'Arve, présents sur la zone d'étude, n'a pu être équipé d'installations fixes de détection (radio ou PIT-tag). Cependant, les suivis mobiles radiotéléométriques permettent de décrire le mouvement des poissons suivis à proximité de ces seuils, et l'éventuel frein qu'ils pourraient représenter dans le cadre de leur migration.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Pour les individus de truite fario considérés comme migrants, aucun blocage ni même frein à la migration n'a pu être détecté pour les 11 seuils en enrochements libres présents sur le cours principal de l'Arve, et ce durant la période de reproduction ou même avant. Les profils présentés à la **Figure 91** peuvent apparaître comme évoquant le contraire du fait des stagnations d'individus se juxtaposant avec les emplacements de certains seuils. Ces individus ont été capturés dans les seuils en enrochements qui constituent pour la rivière Arve des habitats propices et facilement prospectables par pêche électrique pour la capture de géniteurs de truite. Aussi ces enrochements sont considérés comme étant le lieu de repos de ces individus qui affectionnent cet environnement oxygéné et muni de caches. On remarque que lorsque ces truites ont une motivation pour la montaison, comme notamment au moment de la reproduction, ces seuils ne représentent nullement une barrière à leurs déplacements.

Ainsi par exemple, l'individu 9883-12 (en bleu sur la **Figure 91** ; 560 mm) est resté 8.5 mois (du 04 février au 21 octobre 2014) au pied du seuil N°4 « Amont A40 Scientrier » avant d'effectuer une migration vers l'amont au moment de la reproduction de 10.5 km en 9 jours franchissant ainsi 3 seuils dans l'Arve et 1 dans le Borne. Il est ensuite revenu (dévalaison en 1 jour) à son point initial de repos, soit à l'aval du seuil N°4 le 18 décembre 2014.

Un autre exemple qui met en évidence le peu d'incidence des seuils pour la truite fario en terme de fragmentation physique sur le cours principal de l'Arve : l'individu de truite 9892-75 (en vert sur la **Figure 91** ; 428 mm) a franchi 6 seuils, depuis l'aval d'Arthaz-Pont-Notre-Dame (à 3.35 km en aval du seuil N°3) jusqu'au Giffre (soit une progression de plus de 18 km), en l'espace de 2 jours.

Pour les cyprinidés migrants, un seul individu de barbeau fluviatile a été confronté aux franchissements de seuils en enrochements en amont d'Arthaz. Ce dernier, relâché à l'amont du barrage d'Arthaz a franchi 3 seuils (N°3, 4 et 5 sur la **Figure 91**). Il est resté 24 jours en aval de celui-ci, oscillant entre l'aval direct du seuil et une position 250 m plus en aval. Le 26 juin 2014, lorsque la température de l'Arve a été supérieure à 12°C et le débit proche des 70 m³/s, celui-ci a franchi le seuil de Scientrier (N°4). Après être monté de plusieurs kilomètres, il s'est tenu durant 6 mois et demi à environ 1 km en aval du seuil de la STEP de Bonneville (N°6) sans jamais effectuer de tentative de montaison.

Enfin, concernant le double seuil de Scionzier, ainsi que les deux seuils en Suisse, aucun individu marqué par radio ne s'est présenté en aval immédiat de ceux-ci, et donc leur franchissabilité n'a pu être plus précisément estimée.

En conclusion, aucun élément observé durant cette étude ne laisse penser que les seuils en enrochements libres présents sur l'Arve puissent représenter un obstacle à la migration des géniteurs de truite fario. Concernant les géniteurs de Cyprinidés, le seul individu concerné ici ne permet pas de conclure sur une telle franchissabilité.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

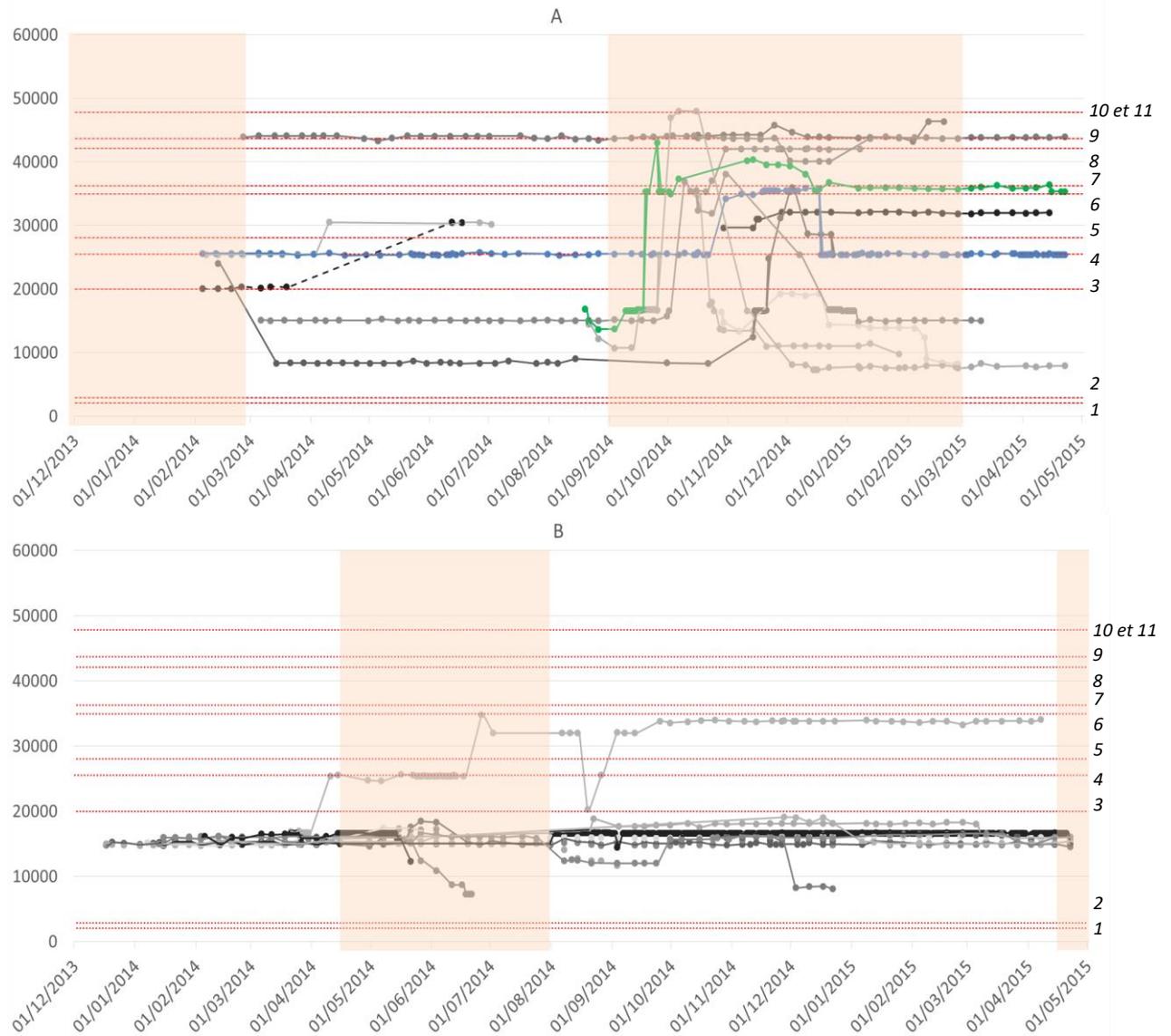
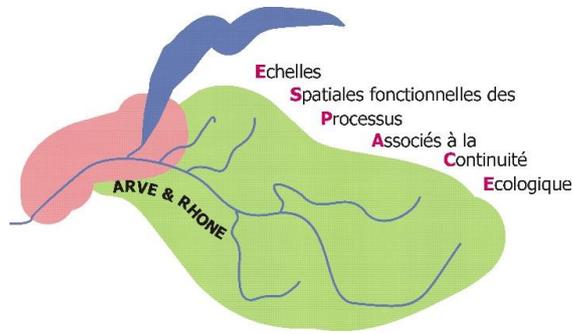


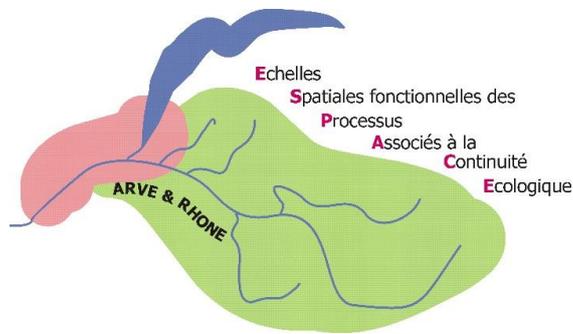
Figure 91 : Evolution des positions individuelles sur l'Arve des Salmonidés (A) et Cyprinidés (B) migrants. En pointillés rouges : position des différents seuils de l'Arve et en orange : périodes respectives de reproduction des espèces. En ordonnée, les Points métriques (Pm). La dénomination des seuils est listée ci-après :

N°	Nom / localisation	N°	Nom / localisation
1	Quai du Cheval Blanc (Suisse)	6	STEP Bonneville
2	Carouge (Suisse)	7	Pont de l'Europe Bonneville
3	Pont Neuf	8	Carrière de Vougy
4	Amont A40 Scientrier	9	Pont d'Anterne – amont confluence Giffre
5	Amont confluence Nant de Sion	10 et 11	Double seuil de Scionzier – amont conf. Foron



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



b. Seuil du Borne (« Seuil Méttral »)

Durant les migrations en période de reproduction, il a pu être montré que 4 truites migrantes de l'Arve vers le Borne ont franchi le seuil du Pont du Diable (prise d'eau Méttral), seuil qualifié jusqu'à de totalement infranchissable pour les truites dans le Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE, source ONEMA). La détection de truites lors des sessions de pistage provenant de l'Arve en amont de ce seuil (**Figure 92**) démontre la franchissabilité de l'obstacle à minima par des géniteurs pour cette espèce. Aucune investigation n'a été menée dans cette étude sur des juvéniles de truite (qui pourrait être réalisée par un équipement du seuil par un dispositif PIT-tag). De plus, la densité de positions répertoriées en amont et en aval de l'ouvrage étant similaire (pas de surdensité en aval du seuil), il n'y a aucun indice de frein à la montaison dû à cet obstacle pour les géniteurs de truite. Néanmoins, le nombre d'individus observé est faible ($N = 4$; $418 \text{ mm} \leq L_t \leq 456 \text{ mm}$).

Aussi, les données relevées à proximité du seuil par radiopistage montrent que celui-ci est franchissable pour la truite fario, mais l'absence d'équipement télémétrique sur l'ouvrage ne permet pas réellement de quantifier cette franchissabilité, ni de décrire les difficultés qu'il pourrait occasionner.

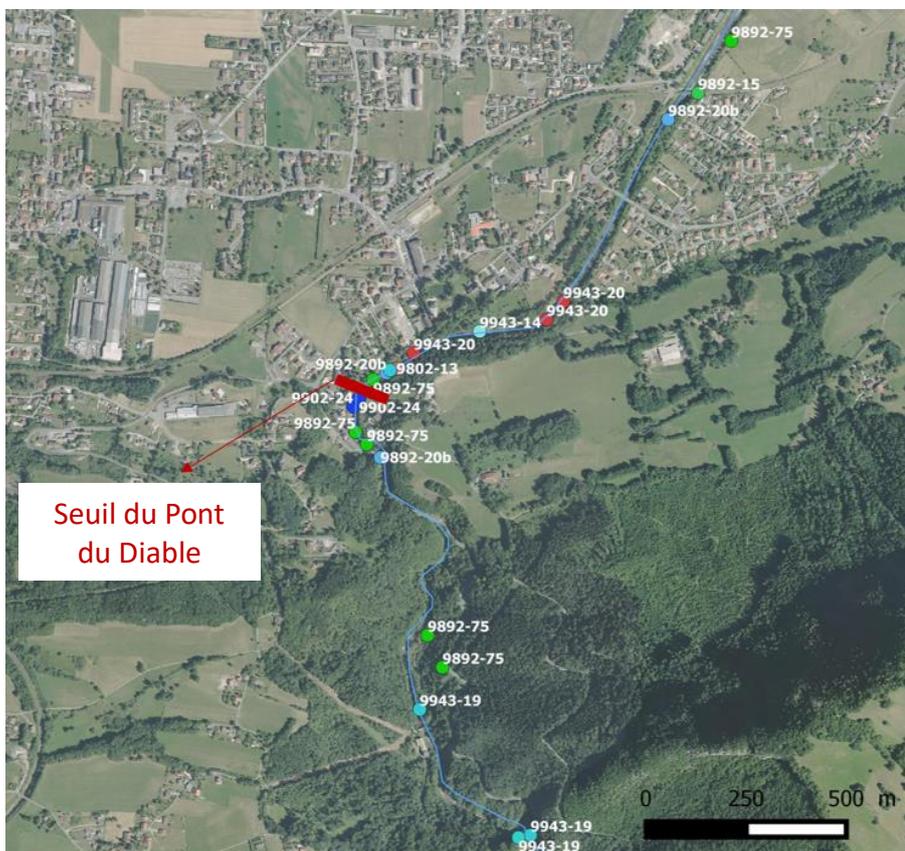
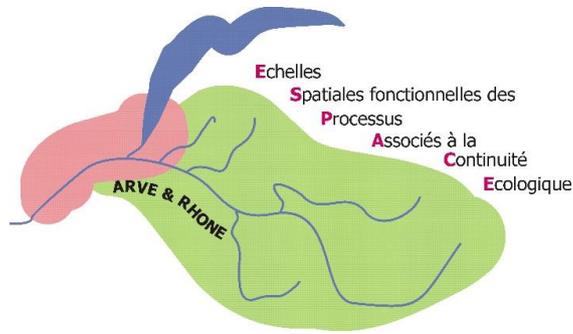


Figure 92 : Cartographie des localisations des truites ayant franchi le seuil de Pont du Diable. Les points de couleur représentent les détections géolocalisées sur la rivière, et chaque couleur représente un individu (les numéros correspondent à la fréquence radio + code de l'individu).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



c. Seuil de la RD19 du Nant de Sion

L'installation PIT-tag mise en œuvre au niveau du seuil de la RD19 sur le Nant de Sion avait pour but principal de préciser la franchissabilité du seuil en particulier pour l'ombre commun ; ce seuil étant classé comme « difficilement franchissable » au ROE. Il est considéré comme un « ouvrage complexe » selon la classification du ROE, c'est-à-dire composé de plusieurs éléments : un radier béton au niveau pont cadre et un seuil en enrochement libre à l'aval. Aussi, en périodes de basses eaux, la difficulté de franchissement semble résider dans la faible lame d'eau qui s'étale sur le radier.

Au total, 56 individus marqués par PIT-tag ont été détectés à l'aval de cette station, 47 chevaines et 9 truites. Malgré 28 individus d'ombre commun ($154 \text{ mm} \leq \text{Lt} \leq 498 \text{ mm}$) marqués dans le secteur proche de l'ouvrage (linéaire de 8.44 km d'Arve entre Scientrier et la confluence du Borne ainsi que 2 km d'affluents), aucun n'a cherché à remonter le Nant de Sion au-delà de la RD19.

Parmi les individus contactés au dispositif PIT-tag, 13 ont franchi le seuil et le radier de pont : 9 chevaines ($179 \text{ mm} \leq \text{Lt} \leq 272 \text{ mm}$) qui sont majoritairement passés au mois d'avril 2014 et 4 truites ($131 \text{ mm} \leq \text{Lt} \leq 269 \text{ mm}$) dont 2 ont franchi au printemps 2014 (27/03 et 28/04) et 2 le 16 novembre 2014. Les données de débit disponibles à partir du 25 juin 2014 permettent de caractériser les conditions hydrauliques de plusieurs franchissements (**Figure 93**). Ils ont eu lieu sur « un coup d'eau » avec une gamme de débit entre $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $2.13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (débit moyen du Nant de Sion pendant la période d'étude : $0.38 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; débit minimum observé : $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; débit maximum observé : $8.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

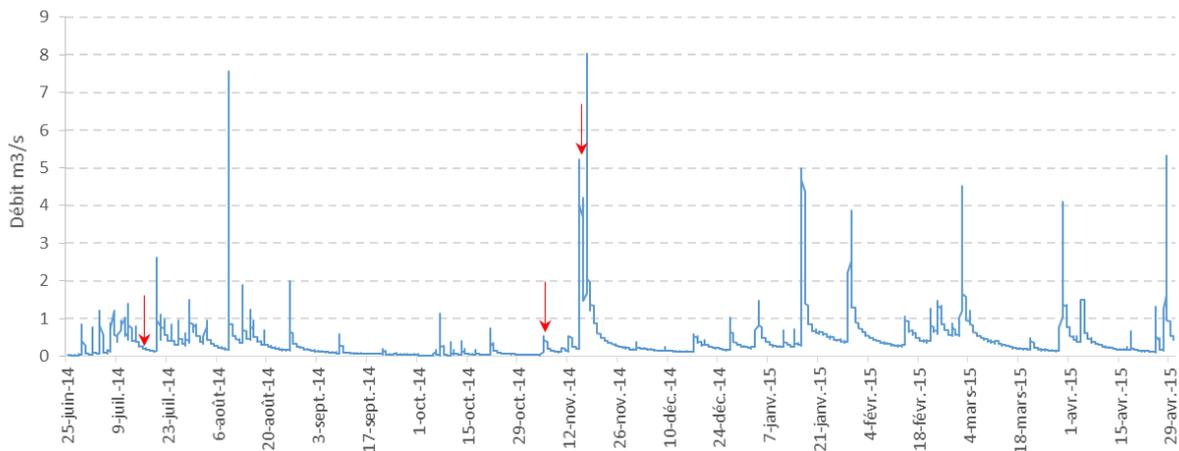


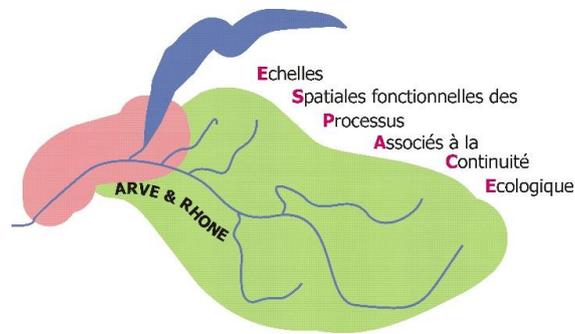
Figure 93 : Débit horaire du Nant de Sion sur la période de suivi et timing des franchissements du seuil (flèches rouges, données PIT-tag).

Le temps de passage moyen pour les chevaines est de 0 h 12' 21 s (mini (Lt = 212 mm) : 0 h 03' 41 s ; maxi (Lt = 240 mm) : 0 h 22' 17 s) tandis qu'il est de 0 h 42' 43 s pour les truites (mini (Lt = 226 mm) : 0 h 04' 43 s ; maxi (Lt = 131 mm) : 1 h 44' 33 s).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



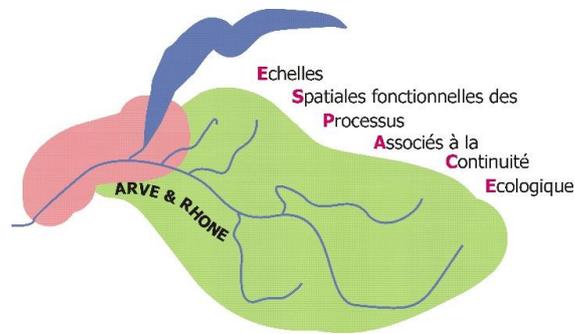
Il est à noter que certains chevaines, marqués à l'aval proche de la première antenne, stagnent parfois longtemps à proximité de celle-ci : 75 % des détections (N = 37 292) impliquent uniquement 3 individus. De plus, la présence d'une fosse en aval immédiat du seuil, représentant un habitat favorable pour cette espèce, peut expliquer les nombreux contacts enregistrés sans franchissement de l'ouvrage.

Même si l'étude n'a permis d'obtenir qu'un nombre restreint de franchissement et aucun résultat sur les ombres, le seuil de pont de la RD 19 est bien franchissable pour des juvéniles de truite et des adultes des deux espèces décrites. Les franchissements observés pour les chevaines laissent à penser que les géniteurs d'ombre n'auraient pas de difficulté à franchir cet ouvrage du fait de leur meilleure aptitude à la nage et au saut (BAUDOIN *et al.*, 2014). La structure composée de l'ouvrage facilite son franchissement mais celui-ci semble possible qu'à partir d'un certain débit ($0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour les observations 2014), débit qui permet la mise en eau suffisante du radier béton plane en amont des enrochements. Selon BAUDOIN *et al.* (2014), un minimum de 5 à 10 cm de tirant d'eau (suivant la taille des individus) est un minimum pour garantir les pleines capacités de nage des poissons et un franchissement potentiel. Il est donc peu probable que l'ouvrage soit franchissable en étiage.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



IV. Discussion et conclusion

1) Apports et limites des méthodes utilisées

La libre circulation des poissons dans les rivières est une problématique assez ancienne puisqu'il faut remonter au début du XVIII^{ème} siècle pour voir les premières lois empêchant la construction d'ouvrages pouvant bloquer la migration des poissons (loi gouvernementale du Massachusett : KATAPODIS & WILLIAMS, 2012). En Europe, les premières études scientifiques et d'ingénierie pour faciliter le franchissement de barrages datent du début du XX^{ème} siècle, avec les travaux de DENIL en France qui conduisirent à la création des échelles à poissons portant son nom (DENIL, 1909, dans KATAPODIS & WILLIAMS, 2012). En parallèle, l'utilisation de méthodes télémétriques pour l'étude des poissons démarra dans les années 50 avec la technologie acoustique, suivie par les technologies radio et PIT-tag respectivement dans les années 60 et 70 (revue dans COOKE *et al.*, 2013). Ces méthodes ont permis de développer les approches les plus informatives pour évaluer tant l'attraction des échelles à poissons, que leur franchissement (voir LUCAS & BARAS, 2001). Les auteurs concluent même à propos de l'utilisation de ces approches télémétriques que « *le développement de ces technologies devraient permettre des avancées dans le design et le fonctionnement des futures échelles à poissons, et fournissent une méthode formelle pour évaluer leur efficacité* » (p. 309, LUCAS & BARAS, 2001).

Aussi, dans le cadre du programme INTERREG ESPACE Arve & Rhône, le choix de ces méthodes s'est avéré pertinent, même si des problèmes inhérents à l'utilisation de ces méthodes ont été soulevés.

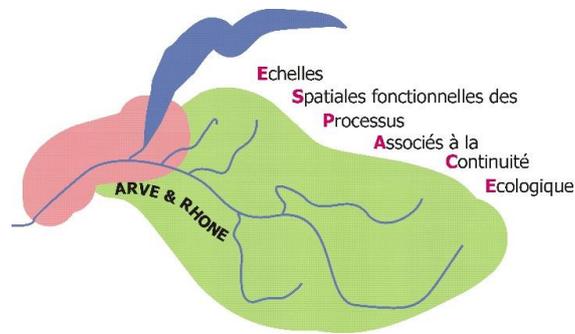
A. L'échantillonnage des individus / contraintes liées du milieu

Une des premières difficultés rencontrées a été la capture et le marquage d'un échantillon représentatif et suffisant des espèces ciblées par cette étude. Le régime nivo-glaciaire de l'Arve a obligé les opérateurs à échantillonner et marquer plutôt en période hivernale côté France. Les conditions hydrologiques exceptionnelles de l'hiver 2014 ont rendu les captures difficiles en raison des forts débits et hauteurs d'eau. Il a donc fallu redoubler la pression de pêche pour marquer un nombre suffisant de poissons sur l'aire d'étude côté France. La phase d'étude sur les déplacements piscicoles et domaines vitaux des populations dans laquelle la radiotélémétrie a été mise en jeu, a contraint (par la taille des émetteurs radio) de sélectionner des individus de taille corporelle suffisamment grande pour pouvoir être marqués. La recherche de ces grands individus notamment de truite a été chronophage. En effet côté France, 27.8 km cumulés de cours d'eau (Arve et premier kilomètre des affluents) ont été prospectés en 35 jours pour pouvoir marquer 53 individus de truite. Le marquage d'une truite dans le bassin de l'Arve a donc nécessité la prospection d'environ 500 m de cours d'eau. D'un point de vue horaire, il a fallu au cours des campagnes de marquage dépenser en moyenne les 2/3 d'une journée de pêche (soit entre 5 h et 6 h) pour capturer une truite dans le bassin de l'Arve.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Dans le Rhône, les captures par pêches électriques de sondage apparaissent également compliquées, et souvent cantonnées à des échantillonnages de bordure. Ces derniers ne permettent pas de capturer les espèces visées ni des individus de taille suffisante pour être marqués. Les captures côté Suisse ont donc dû se concentrer sur la période où les poissons étaient le plus facilement accessibles – migration de reproduction – et là où leur capture était possible, c'est à dire dans les affluents et les échelles à poissons. Cette contrainte a limité le nombre de poissons marqués, et en conséquence le nombre de poissons détectés, en particulier sur certains ouvrages tel que le Seujet. En effet, malgré le nombre relativement important de poissons marqués dans cette étude, l'ensemble des poissons n'a pas remonté la rivière jusqu'au barrage le plus proche en amont. Les espèces étudiées ne sont pas des migratrices strictes (comme des poissons anadromes par exemple, tels que les saumons). Aussi, seule une proportion des individus est susceptible de remonter ou dévaler suffisamment les cours d'eau pour être détectée aux divers ouvrages suivis.

De plus, plus le milieu est grand, plus l'effet de dilution des individus marqués dans le milieu se fait ressentir. En effet, parmi les 1779 individus équipés d'un PIT-tag durant la durée du programme, seuls 179 ont été détectés par l'ensemble des dispositifs en place, soit 10 % de retour. Ce faible pourcentage s'explique aussi par les déplacements diffus et non unidirectionnels des espèces étudiées. Aussi, pour un milieu comme le Rhône, la pression de marquage doit être considérable pour avoir un nombre de recontacts suffisants permettant d'informer sur les mouvements et franchissements.

Les espèces choisies, barbeau fluviatile, chevaine, truite fario et l'ombre commun, sont représentatives du bassin du Rhône genevois et de l'Arve, à savoir qu'elles sont communément capturées sur l'aire d'étude et sont présentes sur les deux territoires, France et Suisse. Mais le manque de connaissances du peuplement piscicole du Rhône et de l'Arve (partie la plus en aval) ne permet pas de dire quelle part de la biomasse piscicole ces espèces représentent. De plus, les suivis par nasses des échelles à poissons côté Suisse ont montré que ces espèces ne montrent pas forcément les effectifs les plus importants qui transitent dans ces ouvrages (ECOTEC, 2002 ; ECOTEC, 2008 ; GREN, 2009 ; ECOTEC, 2010 ; COREALIS, COMMUNICATION PERSONNELLE). L'espèce majoritaire observée sur le Rhône utilisant les échelles à poissons est le gardon (*Rutilus rutilus*), dont seuls les individus les plus gros sont susceptibles d'être marqués par radio. Ils montrent de plus un comportement beaucoup plus grégaire que les espèces étudiées, et il est probable que les processus dont dépendent l'attraction et la franchissabilité de ces bancs de gardons soient différents. Il serait donc intéressant à l'avenir d'intégrer cette espèce dans de telles études.

B. L'opération de marquage

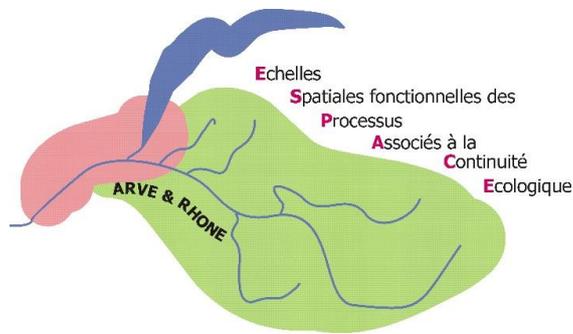
Côté France, ce sont les marques actives implantées dans la cavité intrapéritonéale qui ont été utilisées uniquement : cette méthode a prouvé son efficacité dans de nombreuses études (BARAS *et al.*, 1996 ; BRIDGER & BOOTH, 2003 ; GOSSET ET RIVES, 2004), et elle induit de nombreux avantages en comparaison à des autres types de marques actives (externes ou intragastriques) :

- l'émetteur est positionné à proximité du centre de gravité du poisson ;



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- une fois la cicatrisation faite, l'individu est protégé des interactions avec l'environnement et n'est pas gêné pour la nage ;
- l'appétit de l'individu n'est pas modifié ;
- et l'individu n'est pas rendu plus visible face aux prédateurs (BRIDGER & BOOTH, 2003).

Une fois la cicatrisation obtenue, la survie de l'individu est maximale par rapport aux autres méthodes plus intrusives. L'implantation de l'émetteur radio est une opération lourde qui nécessite une anesthésie profonde ; l'ouverture de la cavité intra-péritonéale engendre un risque plus élevé d'infection (BRIDGER & BOOTH, 2003). Cette phase est cruciale pour le devenir de l'individu et la réussite de l'étude. Les résultats des marquages ont montré que les individus de truite et de chevaine ont moins bien supportés cette opération. Côté suisse, les marques externes ont dû être préférées du fait des contraintes d'échantillonnage évoquées précédemment (période de marquage dépendante de la possibilité de capture des individus).

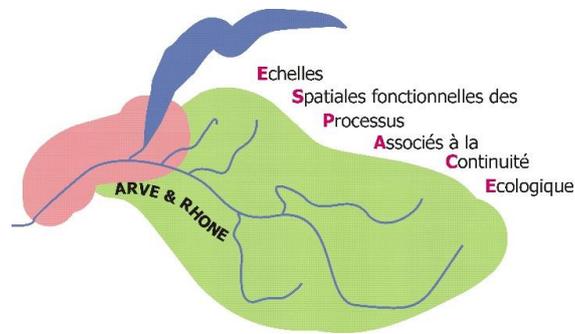
Certains individus supportent moins bien le stress lié à cette opération. Les géniteurs d'ombre commun, capturables uniquement sur des secteurs très localisés de l'Arve lors de leur phase de pré-reproduction, sont particulièrement sensibles à l'opération de marquage. Il semble que le respect strict de la règle des 2 % pour cette espèce soit de mise. Certains auteurs (par exemple PARKINSON *et al.*, 1999 ; OVIDIO *et al.*, 2004 ; HORKA *et al.*, 2014) ne mentionnent que de très faibles pertes (< 5 %) en respectant cette condition tandis que VEHANEN *et al.* (2003) indiquent des pertes et/ou disparitions de l'ordre de 33 %. Le constat d'une disparition / mortalité élevée post-marquage a engendré l'arrêt net et précoce des opérations de marquage radio pour cette espèce. Les nouvelles connaissances pour cette espèce ont été acquises grâce à la télémétrie RFID.

Pour les deux espèces que sont la truite et la chevaine, plusieurs contraintes peuvent expliquer le plus fort taux de disparition / mortalité post-marquage constaté que chez la 3^{ème} espèce, le barbeau fluviatile. D'une part, les individus de truite étant difficilement capturables sur l'Arve, la règle des 2 % habituellement suivie pour les marquages, n'a pas été strictement respectée ; certains individus avaient un ratio poids de la marque/ poids du corps supérieur à 3 %. La période hivernale n'est pas non plus la plus favorable pour les marquages ; à cette saison les individus de truite sont affaiblis suite à la reproduction et le milieu n'offre pas encore les conditions optimales pour « se refaire une santé ». Une partie des individus (30 %) a été marquée au début de la période de reproduction, à l'automne 2014. La disparition / mortalité observée sur ces individus a été plus forte (37 %) que celle de la 1^{ère} campagne de marquage (6 %). Cette période n'apparaît donc pas favorable pour ce type d'opération puisque les individus sont souvent immuno-déficients et donc indisposés à combattre l'intrusion de pathogènes. D'autre part, les chevaines ont des muscles beaucoup plus innervés que les autres espèces. Le réseau dense de vaisseaux sanguins et de nerfs a accentué la difficulté de l'opération chirurgicale. En effet, les hémorragies accompagnées de soubresauts n'étaient pas rares lors de l'opération de marquage des chevaines. Ceci a engendré un temps plus long et davantage d'approximation dans les gestes chirurgicaux des opérateurs.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Dans cette étude côté France, les taux de disparition / mortalité post- marquage enregistrés sont de l'ordre de 3 % pour les barbeaux et 23 % pour les truites et les chevaines. La bibliographie recense peu de taux de mortalité chiffrés avec l'utilisation de cette méthode. Néanmoins, lorsque cela a été mentionné (uniquement pour la truite), il semblerait que les taux de disparition / mortalité en post-marquage soient cohérents avec nos résultats (de l'ordre de 20 %). Ainsi, pour la truite, suivant les études, les taux observés de mortalité post-marquage varient entre 23 % HUDSON (1993) et 66% (CLAPP *et al.*, 1990 ; pour un effectif de 24 individus marqués pour 1 an de suivi). Concernant le chevine, FREDRICH *et al.* (2003) affirment qu'il n'y a pas eu de mortalité sur les 50 individus suivis pendant un an sur la rivière Spree.

Nous n'avons pas d'explications précises quant à cette disparition ou mortalité liée à l'opération marquage, mais plusieurs hypothèses peuvent être dressées :

- un défaut dans la procédure de marquage avec un matériel non adapté à ce type de suture (fil de suture tressé, aiguille à pointe triangulaire, gants non stériles, ...) ;
- des opérateurs avec peu d'expérience notamment en début de projet ;
- une infection de la cicatrice par les germes présents dans l'eau : il a été notamment vérifié que certains individus de barbeau n'ayant pas reçu leur dose de Marbocyl à 2 % après l'opération n'ont pas survécu dans l'Arve ;
- des individus marqués dans un état affaibli du fait de la période de marquage (cet état de santé étant non visible à l'examen sanitaire du poisson) ;
- mauvais fonctionnement de l'option « mortalité » sur les émetteurs (il a été vérifié que certains émetteurs encore en mouvement émettaient un signal de mortalité) ;
- une pression de la pêche de loisir (tous les pêcheurs ne restituant pas les marques récupérées dans leurs captures), mais aussi celle des prédateurs (dans la zone d'étude, présence de hérons cendrés, harles bièvres, cormorans, etc.).

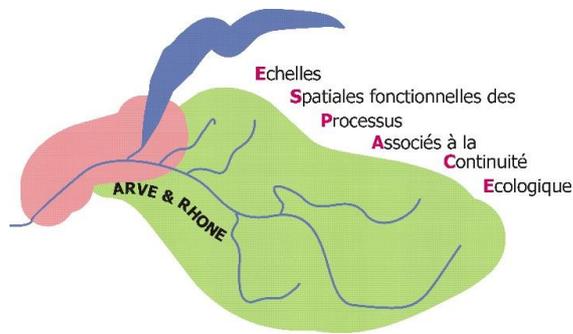
Quelques références bibliographiques font état de taux de mortalité « naturel » ou « post-reproduction ». BRITTON & PEGG (2011) mentionne un taux de mortalité naturel annuel faible chez le barbeau fluviatile tandis que KEITH *et al.* (2011) spécifie que la perte annuelle d'une population de chevine non exploitée peut être estimée à 33%. Pour les populations sauvages de truite, plusieurs auteurs (VIBERT & CUINAT, 1961 ; CUINAT, 1970) font état d'un taux de survie annuel plutôt faibles, de l'ordre de 30% sans jamais dépasser 50 %. Les mortalités totales comptabilisées à l'issue des suivis sont de 20% pour le barbeau fluviatile, 40 % pour le chevine et 32 % pour la truite. La perte chez les Cyprinidés apparaît donc plus importante que les chiffres recensés dans la littérature.

En faisant un focus sur les pertes (disparition ou mortalité) ayant eu lieu au moment de la période de reproduction de chaque espèce, il semblerait que cette époque soit fatale pour environ 1 quart des individus suivis et ce, quelle que soit l'espèce considérée. Cela représente un chiffre non négligeable, mais est-il représentatif de la réalité ? On peut se demander si ce taux de mortalité



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



observé en période de reproduction concerne toute la population ou uniquement les individus « affaiblis » par le marquage.

C. Les contraintes du milieu pour l'utilisation de la technologie radio

Parmi les espèces étudiées, le barbeau fluviatile est susceptible de se caler au fond du lit pendant de longues périodes notamment en hiver en lien avec les basses températures (BARAS, 1995a et b in BRITTON & PEGG, 2011). Nos suivis radio-téléométriques ont mis en évidence ce même comportement, notamment dans l'Arve à l'aval d'Arthaz. Le Rhône et l'extrême aval de l'Arve sont des milieux qui peuvent être profonds par endroit comme par exemple dans la retenue de Verbois. Cette morphologie de cours d'eau n'est pas idéale pour des détections optimales en radiotéléométrie. En effet, LUCAS & BARAS (2000) ont mis en évidence qu'une profondeur $> 5\text{m}$ et une conductivité $> 500 \mu\text{S/cm}$ impactaient l'intensité du signal radio. Sur le Rhône, aucun test n'a été entrepris pour évaluer les pertes de détection au regard de l'épaisseur de la lame d'eau. Pour l'Arve, les facteurs limitants peuvent être liés à la hauteur d'eau en période de hautes eaux mais aussi une conductivité élevée (entre 500 et 600 $\mu\text{S/cm}$ en hiver) qui peut être problématique pour les détections des signaux radio. Les tests avec les émetteurs fixes sur les cours d'eau français ont montré que les forts débits, plus que la conductivité, jouaient un rôle dans les non-détections. Il faut préciser qu'en hiver, lorsque la conductivité affiche ses maxima, les hauteurs d'eau de l'Arve sont faibles puisqu'on se situe en période d'étiage pour cette rivière glaciaire ; ces basses eaux favorisent la propagation du signal.

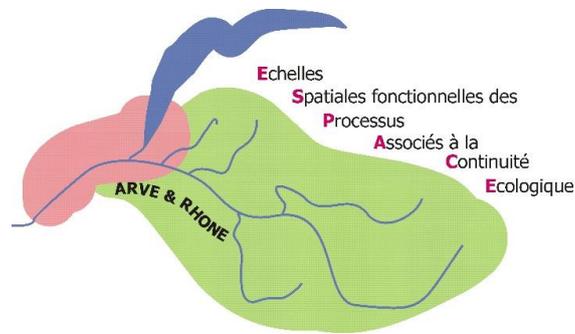
D. Contraintes liées aux sites d'implantation des stations de suivi téléométrique

Même si le matériel téléométrique existant est issu d'un long processus de développement, et peut être actuellement considéré comme efficace et au point, nous avons dû faire face à des soucis de pannes parfois récurrents, et à des contraintes quant à l'utilisation de ce type d'équipement. Outre les risques de casse matérielle due aux crues et aux embâcles, l'alimentation électrique est une contrainte majeure pour faire fonctionner de manière permanente et sur le long terme ces dispositifs. En effet, ces boîtiers de détection nécessitent une alimentation continue, et la possibilité d'un raccordement à proximité sur le réseau domestique est à privilégier. Le suivi d'ouvrage hydroélectrique facilite en général ce raccordement. Certains font exception comme par exemple l'ouvrage d'Arthaz situé dans un secteur de gorges ; l'usine électrique se trouve en rive droite tandis que la passe à poissons est implantée en rive gauche sans aucun raccordement possible au réseau électrique sur cette rive. La solution a été de faire traverser un câble électrique au-dessus du cours d'eau avec toutes les précautions nécessaires. Ces dernières n'ont pas suffi pour résister à la crue exceptionnelle du mois de mai 2015. Dans le cadre du programme ESPACE, seuls les ouvrages à proximité de possibilités de raccordement au réseau électrique ont été suivis. Aussi, certains sites éloignés de toute possibilité de raccordement à la source électrique n'ont pu malheureusement être suivis, comme par exemple la rivière de contournement de Scionzier ou encore l'échelle à poissons située en rive droite sur le barrage de Vessy. Pour ces sites, deux méthodes alternatives de fourniture électrique ont été



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



étudiées : l'utilisation de batteries et la pose d'un système de production solaire. Chacune d'entre elles apporte ses contraintes :

- Pour les batteries, la consommation électrique des systèmes de détection PIT-tag nécessite l'utilisation de batteries de forte capacité (et donc d'un poids élevé) et un changement fréquent de celles-ci. Un éloignement des voies d'accès en véhicule rend donc le transport de batteries difficilement réalisable ; cette configuration s'est présentée pour l'échelle à poissons située en rive droite sur le barrage de Vessy.
- Pour les panneaux solaires, il faut une exposition lumineuse suffisante pour pouvoir rendre autonome électriquement une station de télémétrie. Des sites comme la rive droite de Vessy ou la rive gauche à Arthaz ne reçoivent pas une quantité d'énergie solaire suffisante notamment en période hivernale pour faire fonctionner en continu un dispositif PIT-tag.

De plus, ces dispositifs (batteries et panneaux solaires) sont coûteux et doivent donc être protégés du vandalisme et du vol qui sont fréquents auprès des cours d'eau sur un bassin urbanisé comme celui du Rhône genevois et de l'Arve.

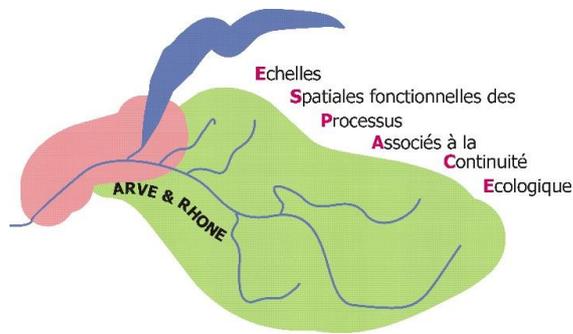
Malgré la disponibilité d'un raccordement au réseau et un bon fonctionnement de la station lors des essais, la station située en amont de l'échelle à poissons de Chancy-Pougny a subi des dysfonctionnements répétés. Alors que l'instabilité de l'alimentation électrique fut soupçonnée, les changements de matériel (boîtier d'alimentation 220 - 12 V, lecteur PIT-tag) ainsi que la pose d'un onduleur (censé prévenir toute surtension ou coupure de courte durée) n'ont pas permis de faire fonctionner correctement cette station (du moins sur le long terme). Des pannes récurrentes ont été observées sur ce dispositif, ainsi que des destructions répétées du lecteur (cartes électroniques défectueuses). A ce jour, l'hypothèse la plus probable de ces dysfonctionnements est de nature électromagnétique, due à la structure même du barrage à proximité de cette station. Ainsi, face aux pertes de détections récurrentes, une hypothèse de travail a dû être adoptée : tout poisson rentré dans l'échelle, et dont nous n'avons pas pu déterminer ni la sortie par l'aval de l'échelle, ni la présence avérée lors d'une vidange de l'échelle ultérieure, a été considéré comme ayant franchi l'ouvrage. Malheureusement, nous ne disposions alors ni de l'heure ni du temps de franchissement.

Sans présenter tous les dysfonctionnements encourus à la station PIT-tag de Chancy-Pougny, certains sites radio implantés à proximité de grosses infrastructures routières ou d'autres centrales hydroélectriques ont montrés des anomalies dans les détections et enregistrements des signaux. Certaines stations fixes en radiotélémétrie (comme celle de Scientrier (RFSC)) généraient des « faux codes ». Lorsque ceux-ci ne correspondaient à aucun poisson marqué, le problème était rapidement identifié. Toutefois, il n'est pas impossible que ces « faux codes » correspondent à des émetteurs existants utilisés dans le panel de poissons marqués. En analysant les données, nous avons pu mettre ces incertitudes de côté lorsqu'une détection nous a paru « aberrante » (par exemple un poisson détecté le jour même dans le Giffre en prospection mobile et quelques heures après à la station fixe d'Arthaz). Le fait d'avoir un réseau de stations fixes étendu sur toute la zone d'étude permet de faire les recoupements nécessaires et d'écarter les données erronées. En effet un poisson détecté en amont



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



alors qu'il se trouvait initialement sur la zone aval devait être passé et enregistré par toutes les stations fixes de suivi intermédiaires. Si ce n'était le cas, la donnée a été supprimée.

Une autre contrainte a été le choix de la position des antennes en aval des échelles à poissons. En aval de la passe, les derniers bassins sont régulièrement immergés par le niveau aval de la rivière. Ils fournissent alors des conditions d'écoulement bien plus faibles, et peuvent servir de refuge à des poissons qui peuvent ne pas « vouloir » franchir l'ouvrage. Afin de ne pas comptabiliser ces poissons comme « tentatives » de franchissement (et alors surestimer le taux d'échec de franchissement), nous avons choisi de ne pas les prendre en considération. Aussi, dans le cadre de l'étude, nous avons choisi de disposer ces antennes à la cassure de pente du courant dans l'échelle, soit au premier bassin nécessitant de la part du poisson un véritable effort de montaison. Cependant, nous sommes conscients qu'un tel choix ne permet pas de déterminer avec précision la date et l'heure d'entrée dans l'échelle, empêchant alors d'évaluer finement l'impact de variables environnementales qui pourraient participer à l'attractivité de ces échelles, tels que le débit d'attrait en comparaison avec le débit de la rivière.

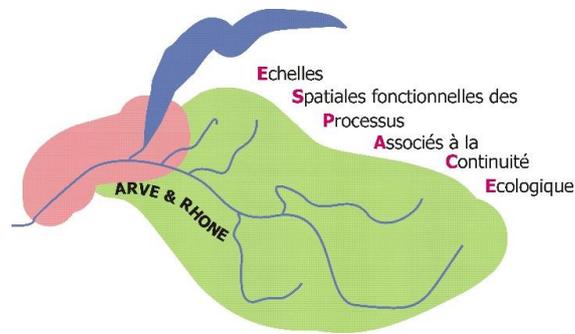
En dehors de ces contraintes que nous avons eu à gérer, la présente étude a tout de même montré que l'utilisation de méthodes télémétriques dans l'évaluation du franchissement d'ouvrages de montaison est tout à fait opportune et adaptée aux objectifs. La complémentarité des techniques RFID et radiotélémetrique ont apporté beaucoup d'informations nouvelles quant au fonctionnement des populations du bassin Arve-Rhône genevois, ainsi que des processus comportementaux et de l'efficacité de franchissement des barrages. Cependant, les méthodes de suivi télémétrique toutes aussi fiables qu'elles sont, ne permettent pas de s'affranchir du non contrôle vis-à-vis des comportements des usagers de la rivière. En effet, le comportement inhabituel de 2 truites montées dans un étang pose de réelles questions sur la naturalité de ce fait. Un transfert par un pêcheur semble davantage plausible.

A noter qu'en marge de cette étude, des tests ont été réalisés à partir des méthodes radiotélémetriques pour essayer d'estimer le franchissement de dévalaison (sur le barrage de Chancy-Pougny). Même si les dispositifs mis en place ont apporté des informations, les contraintes inhérentes à cette méthode ne permettent pas de conclure quant à la représentativité des résultats. La faible détection en profondeur par radiotélémetrie (depuis une antenne de surface ou autour d'antennes immergées, voir aussi PETERS *et al.*, 2008) peut conduire à rater le passage d'individus, et ainsi mal évaluer le trajet de ceux-ci (dévalaison par les vannes de surverses *versus* groupe de production / turbines). Dans ce cadre, des méthodes télémétriques sont bien plus adaptées à ces milieux profonds, permettant de détecter des individus à plusieurs dizaines voire centaines de mètres : télémétrie acoustique par exemple (voir MARTINS *et al.*, 2014). Il est ainsi recommandé pour toute étude ultérieure sur la dévalaison de ces ouvrages de faire appel à telles méthodes.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



E. Le traitement des données

a. Evaluation des distances parcourues et des comportements de déplacements

Les distances et vitesses calculées à partir de nos données hebdomadaires sont une sous-évaluation des déplacements réels des individus. Selon BARAS (1997), l'intervalle optimal de positionnement est journalier. Effectivement, cet auteur a mis en avant les différences de « home-range » (ou domaine vital) et de distances parcourues en localisant chaque jour des barbeaux et en exploitant les résultats jour par jour ou en agrandissant l'intervalle de temps. Toutefois, même s'il est évident que la localisation quotidienne est plus précise, l'hebdomadaire est la plus efficace en termes de coûts-bénéfices. Les positions hebdomadaires définissent un domaine vital avec une imprécision de 5 % d'après BARAS (1997) ; imprécision somme toute acceptable pour les objectifs initiaux de ce programme. De plus, à l'échelle de travail où nous nous plaçons (80 km de cours d'eau suivis), il serait très difficile et très coûteux de faire du radio-tracking tous les jours. Ceci demanderait la mobilisation d'une main d'œuvre importante et aussi d'une quantité de matériel conséquente. Pour définir les domaines vitaux à l'échelle du bassin Arve- Rhône genevois de chaque espèce cible, le positionnement journalier des poissons n'était pas une nécessité.

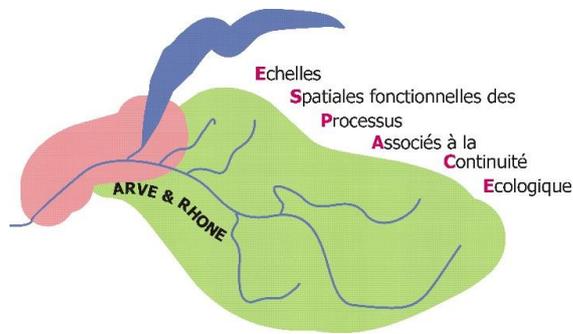
Pour estimer la précision de localisation, des émetteurs-tests (fixes) ont été placés dans l'eau en pied de berge dans chacun des cours d'eau prospectés en France, et ce à partir du mois de mai 2014. Cette phase de tests est indispensable pour savoir quelle marge d'erreur nous pouvons appliquer aux localisations des poissons et quantifier le taux de détection. Lors du « premier pistage », l'opérateur ne sachant pas où se situent ces émetteurs va, ou pas, les détecter et les localiser de la même manière que les poissons marqués. Ces émetteurs n'étant pas déplacés chaque semaine, une certaine « habitude » de positionnement a pu être commise par les opérateurs. Pour pallier ce biais, il aurait été nécessaire de déplacer chaque semaine ces émetteurs-tests. Cela n'a pas été fait car cette opération de récupération/repose était trop chronophage.

Pour ce qui est des paramètres hydrologiques et thermiques, à notre échelle de travail, c'est-à-dire hebdomadaire, nous ne pouvons décrire que des tendances et non une description précise de l'influence de ces deux paramètres sur les comportements migratoires. D'après OVIDIO *et al.* (1999), les paramètres environnementaux agissent sur le comportement de manière quotidienne. Il faudrait donc, pour obtenir une évaluation plus fine de l'action des variables environnementales sur le patron de déplacement des individus, des localisations et des données journalières, mais aussi acquérir des données sur d'autres paramètres susceptibles d'influencer le comportement du poisson (photopériode, comportement social, condition de l'individu etc.).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



b. Evaluation des franchissements

L'évaluation du taux de franchissabilité pose la question de la motivation des individus à franchir les ouvrages. Cette motivation a été l'une des principales contraintes méthodologiques à laquelle nous avons dû faire face. Une estimation de franchissement ne se base pas uniquement sur le nombre de poissons franchissant l'ouvrage, mais en rapportant ce chiffre sur le nombre de poissons présents en aval de l'ouvrage et susceptibles d'essayer de le franchir (migrateurs), ainsi que sur le délai dans la migration que ce franchissement entraîne (TRAVADE & LARINIER, 2002). Dans le cas des études sur les grands migrateurs (généralement les Salmonidés), les poissons passant en milieu dulçaquicole doivent remonter un certain nombre d'ouvrages afin d'atteindre les sites de reproduction généralement situés en tête de bassin. Dans ce cas, tous les individus doivent donc franchir les ouvrages, et tout individu marqué participe à l'estimation de la probabilité de franchissement (exemple du saumon Chinook sur la Columbia River : KEEFER *et al.*, 2004). Diverses études montrent que la plupart des poissons marqués dans ce but sont recontactés au barrage suivant. Les poissons n'atteignant pas l'ouvrage sont généralement soit morts, soit capturés par des pêcheurs en aval de l'ouvrage (GOWANS *et al.*, 1999 ; GOWANS *et al.*, 2003). Lorsque les espèces étudiées ne sont que des migrateurs partiels, il est difficile d'estimer la part de la population réellement susceptible de franchir un ouvrage donné (contrainte expliquant très vraisemblablement le peu d'études de franchissement chez ces poissons). Outre la possibilité de voies alternatives de franchissement, un milieu complexe proposant des affluents avec de potentiels sites de reproduction (même parfois dans le lit principal) en aval de l'ouvrage peut conduire une part de la population présente à ne pas vouloir franchir cet ouvrage. Il faut donc estimer un effectif constituant cette base, avec toute l'incertitude que cela comporte. Dans le cadre des suivis en radiotélémetrie (cf. III. 4)), les résultats ont permis d'estimer une part d'individus migrants pour chacune des espèces étudiées. Nous avons donc, à partir de ce pourcentage de migrants, calculé un effectif marqué par PIT-tag corrigé, afin de refléter au mieux ce caractère migrant ou sédentaire. Cet effectif corrigé a donc constitué la base pour les estimations des franchissements.

2) Comportement des poissons

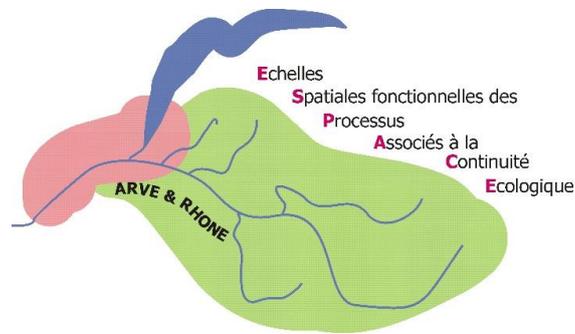
A. Distances de déplacement post marquage

Dans notre cas, plusieurs individus de truite ont dévalé sur une grande distance (jusqu'à 15 km) dans un premier temps après l'opération de marquage. Toutefois, la dévalaison ne semble pas forcément un signe de mortalité chez cette espèce mais plutôt un temps de récupération plus long. Par contre pour le barbeau fluviatile, des migrations « éclair » de l'ordre de 6 km vers l'amont ont été observées sur le Rhône juste 1 ou 2 jours après le marquage. La littérature scientifique ne relate pas de faits similaires pour cette espèce.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



B. Domaine vital spécifique annuel

a. *La truite fario*

La truite fario est souvent qualifiée d'espèce « territoriale » (KEITH *et al.*, 2011), avec des déplacements ne dépassant pas les quelques kilomètres hors période de reproduction : d'après HUDSON (1993), la moyenne des domaines vitaux en été est de 1752 m dans une rivière du Michigan. OVIDIO *et al.* (1998) ont montré que la truite n'effectuait pas plus de 300 m par jour pour répondre à ses besoins alimentaires. Outre cette territorialité durant une grande partie de l'année, la truite fario est capable d'effectuer de véritables migrations pour se reproduire. En effet, CLAPP *et al.* (2011) ont observé des distances allant jusqu'à 33,420 km ; OVIDIO *et al.* (1998) jusqu'à 22,95 km, RUSTADBAKKEN *et al.* (2003) jusqu'à 20 km et HUDSON (1993) jusqu'à 29 km en période de reproduction. Ces résultats confortent ceux de cette présente étude, avec des domaines vitaux allant jusqu'à 40 km dans l'Arve en période de reproduction. De plus, les résultats d'OVIDIO & PHILIPPART (2002) ont montré que le taux de migration dépendait fortement du cours d'eau (ce taux varie de 17 % à 88 % sur les différents cours d'eau étudiés). Nous avons pu montrer le cas similaire entre les truites capturées dans l'Arve (73 % de migrantes) et celle du Borne (14 % de migrantes).

b. *Le barbeau fluviatile*

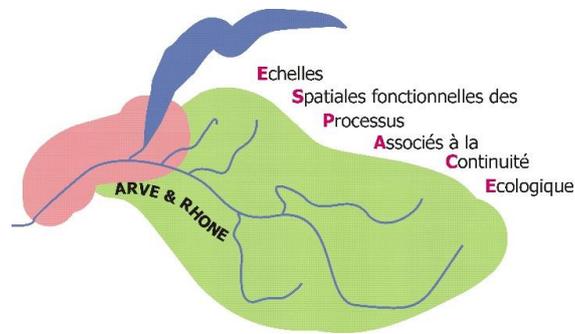
L'activité du barbeau fluviatile est saisonnière avec des déplacements pouvant être importants : jusqu'à 20 km en période de pré-reproduction et reproduction (OVIDIO *et al.*, 2007 ; DE LEEUW & WINTER, 2008 ; in BRITTON & PEGG, 2011). Les migrations liées à cette période observées sur le secteur Arve-Menoge ne sont pas de cette ampleur. Un seul individu a parcouru 18 km vers l'amont dans l'Arve au moment de la période de reproduction 2014 ; les autres ont eu des déplacements de l'ordre de quelques centaines de mètres à 3 km mais ont changé de milieu (changement de cours d'eau ou déplacement vers des bras secondaires). DE VOCHT & BARAS (2005) ont montré que les petits mouvements des barbeaux adultes coïncidaient généralement à une richesse d'habitats accessibles ; les individus n'ont pas besoin de parcourir de longues distances pour trouver tous les habitats favorables pour se nourrir, se reproduire et se reposer. En effet, les barbeaux du Rhône (et de l'Arve) parcourent des plus grandes distances que ceux des affluents où les diversités de faciès et d'habitat sont plus accrues.

LUCAS & BARAS (2001) ont démontré que la taille des domaines vitaux pouvait varier considérablement entre les individus d'un même cours d'eau et entre cours d'eau différents, entre 1 km et 30 km. La fourchette observée n'est pas la même (300 m à 18 km) sur la zone étudiée mais le constat est similaire : la diversité individuelle est grande et ce quel que soit le cours d'eau à l'exception du Rhône où une grande majorité des domaines vitaux ont la même taille, soit celle du tronçon entre les deux ouvrages hydroélectriques.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



c. *Le chevaine*

Cette espèce est aussi connue pour ces migrations de reproduction printanière. FREDRICH *et al.* (2003) ont mis en évidence que 90 % de leur effectif suivi effectuaient des migrations de montaison au mois de mai de l'ordre de 100 m à 16 km ; certains individus effectuent deux migrations de reproduction et participent à des reproductions multiples. Ces migrations sont aussi recensées par WALKER & ADAMS (2014) avec des migrations saisonnières de 179 m à 1069 km en moyenne. Parmi les individus suivis dans le cadre de cette étude, certains ont montré la même tendance notamment les migrants du secteur Arve-Menoge. Cependant les plus grands déplacements ont été observés à la période estivale, notamment pour les chevaines dans le Rhône qui explorent des linéaires « inconnus » à ce moment de l'année.

d. *L'ombre commun*

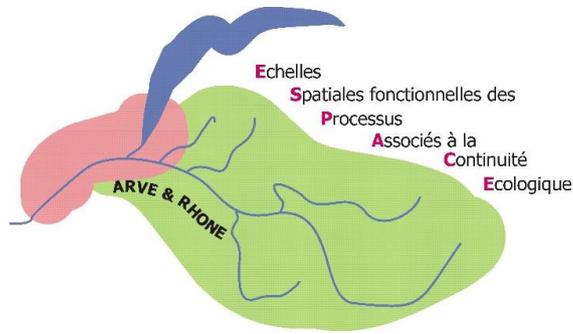
Comme pour les autres espèces, l'ombre commun est capable d'effectuer de longues distances pour réaliser sa phase de reproduction. Nos résultats et ceux de GADAIS (2012) montrent que les ombres de l'Arve migrent vers l'amont pour se reproduire dans la Menoge ou les bras secondaires de l'Arve médian, parcourant ainsi jusqu'à 29 km (moyenne 8.9 km \pm 1.1 km). Ces deux études complémentaires semblent indiquer que les géniteurs d'ombre commun reviennent sur leur lieu de repos / alimentation après la reproduction. Ce phénomène a également été observé dans l'Ainse en Belgique (OVIDIO *et al.*, 2004 ; PARKISON *et al.*, 1999). Les domaines vitaux mesurés dans le bassin de l'Arve apparaissent plus étendus que ceux observés dans l'Ainse mais du même ordre de grandeur que ceux définis par MEYER (2001) dans l'Ilnenau (Allemagne). La taille des cours d'eau, leur fragmentation et la disponibilité des zones de frayères conditionnent fortement la taille des domaines vitaux.

Ainsi, les cartes présentées à la **Figure 94** globalisent les domaines vitaux individuels pour définir les aires de vie de chacune des espèces cibles. Ces aires de vie sont minimales puisqu'elles ne font référence qu'aux individus ayant été suivis par les méthodes télémétriques. Elles représentent un continuum occupé par les individus d'une même espèce.

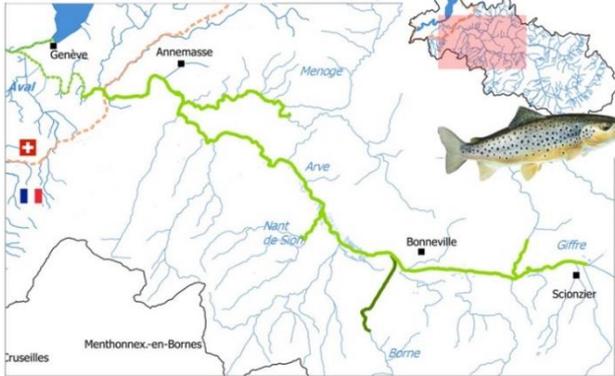


h e p i a

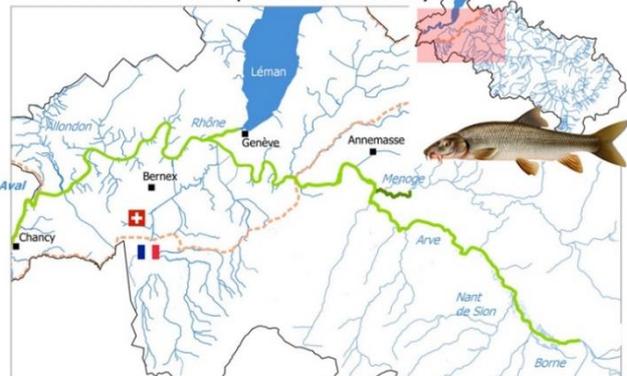
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



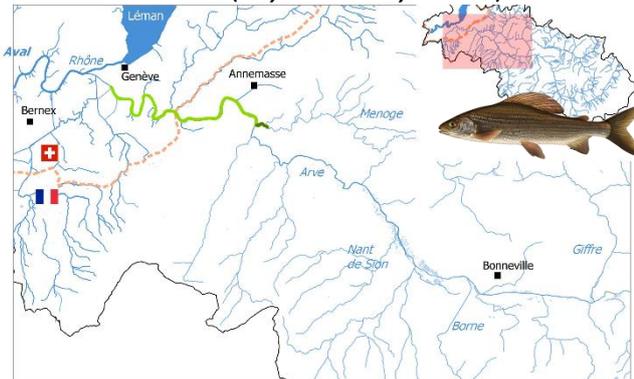
Truite de rivière (*Salmo trutta*)



Barbeau fluviatile (*Barbus barbus*)



Ombre Commun (*Thymallus thymallus*)



Chevaine (*Squalius cephalus*)

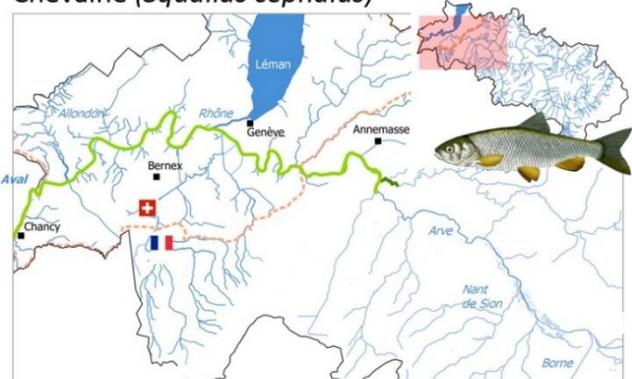


Figure 94 : Aires de vie de la Truite fario, du Barbeau fluviatile, du Chevaine et de l'Ombre commun, définies à partir des suivis en radiotélémetrie et les transpondeurs RFID.

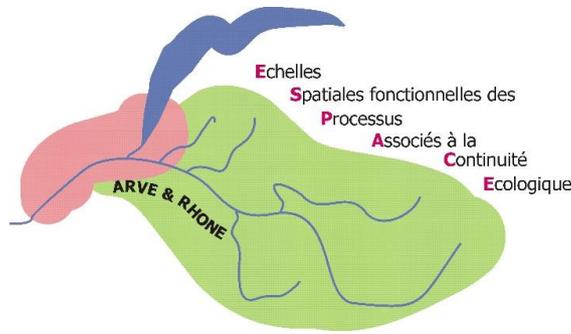
C. Activité au cours d'une journée

Les pistages hebdomadaires n'avaient pas pour objectif de définir les périodes d'activité des espèces. Cependant certaines stations fixes radio, celles de Scientrier et Bonneville, ont permis d'approcher quelques comportements journaliers compte tenu que deux ou trois individus de truite se trouvaient à proximité ou dans le champ de détection des antennes radio. Par exemple, la truite 9943-19 (Lt = 429 mm) capturée et marquée au niveau de la confluence Arve-Borne a séjournait durant tout le suivi sur cette zone (en dehors de la période de reproduction) tout en alternant ses déplacements entre les deux cours d'eau. Cette distinction a été possible grâce aux deux antennes « râteau » de la station de fixe de Bonneville, dirigées l'une vers le Borne et l'autre vers l'Arve. La Figure 95 met en évidence une préférence pour le Borne durant la « nuit » au printemps (avril – mai) et en période pré-reproduction (août – septembre) tandis que durant l'hiver (décembre à février), elle était présente en journée dans l'Arve au niveau de la confluence. Ces observations de changement de milieu et/ou de secteur entre la nuit et le jour peuvent être mises en relation avec celles faites par CLAPP *et al.* (2011) dans la branche sud de la rivière Au Sable (Michigan, Etats-Unis), où durant le printemps et l'été, les truites bougent peu le jour mais effectuent des déplacements nocturnes quittant ainsi leur



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



lieu de repos pour y revenir bien souvent exactement au lever du soleil. OVIDIO *et al.* (1998) ont aussi mis en évidence cette activité nocturne dans les rivières Ourthe et Aisne (affluents de la Meuse, Belgique) avec les plus grands mouvements observés au cours de la nuit à la saison automnale.

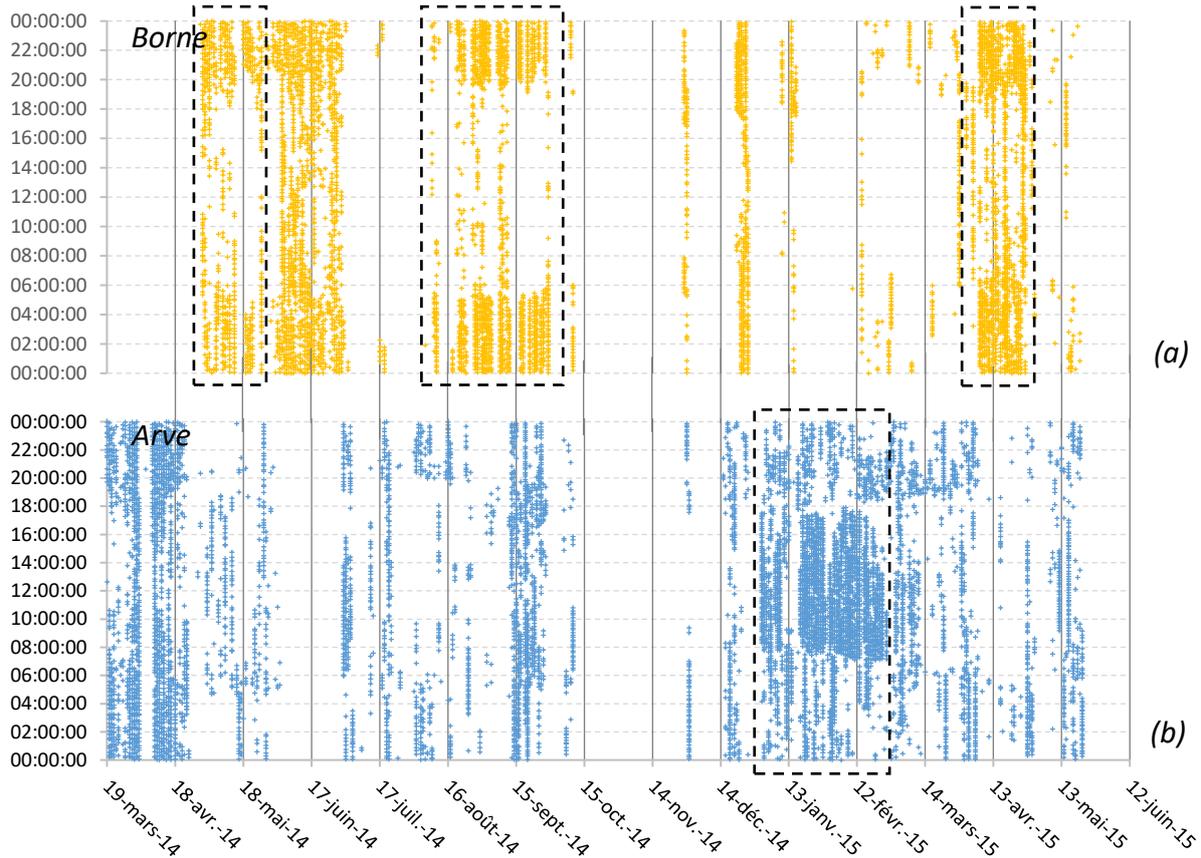


Figure 95 : Détections au niveau de la station fixe radio de Bonneville (RFBO) de la truite fario 9943-19 (Lt = 429 mm) a) sur l'antenne 2 tournée vers le Borne (orange) et b) sur l'antenne 1 tournée vers l'Arve (bleu) entre le 19 mars 2014 et le 22 mai 2015.

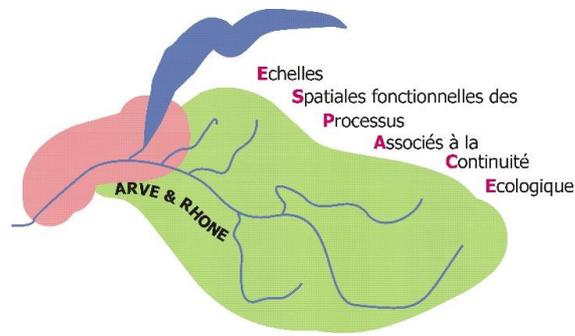
D. Homing et génétique

Concernant l'origine des truites marquées, nous avons vu que la quasi-totalité des truites du Borne était de souche méditerranéenne (suivant un diagnostic basé sur deux marqueurs microsatellites), c'est-à-dire une des souches autochtones du grand bassin rhodanien. CAUDRON *et al.* (2006) ont mis en évidence l'existence de cette population de souche autochtone sur le bassin du Borne (unique sur tout le bassin de l'Arve) au début des années 2000. De même, les truites qui ont migré dans le Borne depuis l'Arve, appartiennent à la même lignée génétique. Cet état de fait nous conforte dans l'hypothèse que le Borne puisse « alimenter » l'Arve en truites de souche méditerranéenne. Il est probable que ces truites se déplaçant dans le Borne depuis l'Arve pour s'y reproduire, soient elles-mêmes nées dans cet affluent. Un suivi plus long, intégrant au moins deux



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



périodes de reproduction, permettrait de savoir si ces truites ont un comportement de « homing » et si elles utilisent chaque fois les mêmes sites de frai. Cette préconisation est également valable pour les Cyprinidés dans la Menoge même si le lien avec le profil génétique des individus n'a pas été réalisé. En effet, OVIDIO *et al* (2007) a observé un homing relativement strict pour les barbeaux sur l'Ourthe ; 3 des 6 individus suivis 2 ans de suite se sont reproduits exactement au même endroit. Etant donné la quantité de Cyprinidés présents sur la Menoge aval et les migrations de reproduction observées de l'Arve vers cet affluent, cette question de homing reste en suspens mais trouve son intérêt pour la compréhension de la dynamique de ces populations sur ce secteur.

Même si le homing n'a pu être montré dans le cadre de ce programme, il a été mis en évidence une certaine fidélité des truites « migrantes » à leur site de repos, c'est-à-dire le site qu'elles utilisent le plus clair du temps au cours de l'année en dehors de la phase caractéristique de reproduction. En effet, après des longues migrations de reproduction (vers l'amont majoritairement), les truites migrantes de l'Arve ont dévalé pour se repositionner exactement au niveau de leur point initial pré-reproduction. Ce site est bien souvent celui où elles ont été marquées.

E. Place des affluents et annexes dans le fonctionnement des populations piscicole de l'Arve

Pour les truites et les barbeaux fluviaux, la phase de reproduction constitue la période où l'essentiel des mouvements est opéré et en une moindre mesure pour les chevaines.

Pour les Cyprinidés et l'ombre commun, c'est la Menoge et les bras secondaires de la partie aval de l'Arve qui trouvent une place d'importance et assurent des sites d'accueil de l'évènement de reproduction. Comme cela a été vu précédemment, ces milieux jouent également le rôle de « zones refuge » lors des augmentations de débit de l'Arve en particulier pour les barbeaux (cf. III.B.g.). Les suivis ont montré que les Cyprinidés du Rhône venaient fréquenter ces milieux au printemps. Le brassage génétique existe bien et semble suffisant pour assurer la pérennité des populations.

Plus haut dans le bassin versant, un autre affluent de l'Arve accueille aussi des Cyprinidés mais ceux-ci ont été identifiés comme étant tous sédentaires. Ils se cantonnent a priori à cet affluent et les échanges avec l'Arve semblent quasiment nuls. Il faut dire qu'à ce niveau, l'Arve offre des conditions de milieu d'un cours d'eau nivo-glaciaire allant de pair avec son peuplement piscicole typique de zone à truites (BEAUFILS, 2014). Les eaux du Giffre aval se caractérisent quant à elles par un réchauffement thermique lié au fonctionnement hydrologique du barrage de Taninges (VIGIER, 2011), réchauffement qui est propice aux Cyprinidés qui y trouvent des conditions de milieu plus en adéquation avec leurs exigences biologiques.

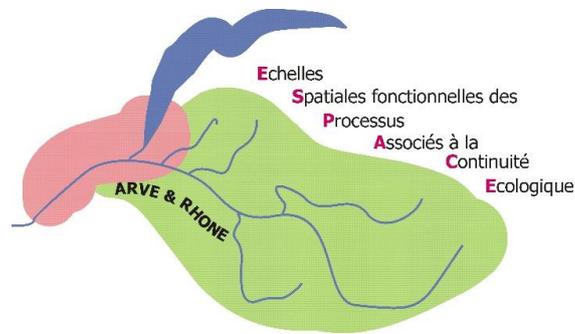
Pour la truite, le Borne représente un site important pour le frai et la préservation de la truite de souche autochtone (méditerranéenne) dans le bassin de l'Arve.

Concernant l'ombre commun, le présent programme n'a pas apporté beaucoup d'éléments nouveaux sur la dynamique des populations du bassin Arve – Rhône genevois et sur les flux entre cours principal et affluents. GADAIS en 2012 avait mis en évidence des migrations de dévalaison des géniteurs



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



d'ombre des affluents Menoge et Nant de Sion vers l'Arve. Les données de 2015 ont mis en évidence la montaison des géniteurs de l'Arve française et suisse vers la Menoge.

Par conséquent, il semblerait que les populations de l'Arve dépendent fortement du bon fonctionnement des affluents. Actuellement, nous ne pouvons donner d'estimation quantitative sur la taille des populations. Mais, les difficultés rencontrées quant à la capture d'un effectif suffisant d'individus marqués notamment pour les truites, nous alerte. En effet, on pourrait s'attendre à une densité de truites bien plus élevée dans une telle rivière.

3) *Franchissement piscicole et continuité écologique*

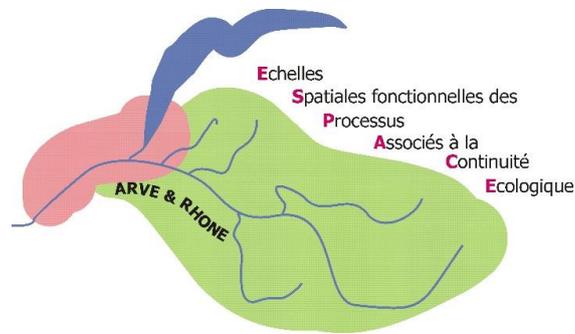
La présente étude a permis de répondre à l'un des objectifs prioritaires de cette étude, par l'évaluation du taux de franchissement des ouvrages suivis sur le bassin Arve-Rhône pour les Cyprinidés. Ce type d'étude, aujourd'hui courant, traite généralement des grands migrateurs (saumons, anguilles, etc.). Par contre, assez peu de littérature est disponible pour les franchissements des Cyprinidés. Pour les Salmonidés, les effectifs marqués sur le Rhône n'ont malheureusement pas permis une évaluation. En fonction des ouvrages, la probabilité de franchissement est très différente. Pour les Cyprinidés, les valeurs les plus basses ont été trouvées sur les ouvrages d'Arthaz-Pont-Notre-Dame, de Vessy et du Seujet, des ouvrages qui comportent des voies alternatives de migration ou des affluents à proximité, ayant été démontrés comme utilisés dans les migrations piscicoles. De plus, l'Arve aval ne se place pas comme un cours d'eau typique à Cyprinidés. En effet, BEAUFILS (2014) a défini pour ce secteur un niveau typologique de B3.5 selon la biotypologie de Verneaux ce qui correspond à une zone à truites selon la zonation piscicole de Huet. Au final, la capacité de franchissement pour ces ouvrages est difficile à estimer, puisqu'entre ces autres voies et l'attrance pour ces affluents (par exemple la Menoge), l'effectif de base des poissons susceptibles de franchir l'ouvrage, sur lequel repose cette évaluation, est impossible à déterminer. De même, les voies alternatives ne permettent pas de contrôler tout passage d'individus. Les évaluations les plus claires ont été obtenues pour les ouvrages de Verbois et Chancy-Pougny, où les échelles à poissons suivies sont les seules voies de montaison pour les poissons. Ces probabilités de franchissement ont été estimées à des valeurs de 0.17 et 0.27 respectivement. Ces valeurs sont dans la fourchette basse des évaluations que l'on peut trouver pour cette même famille de poissons dans la littérature (NOONAN *et al.*, 2012). Ces estimations sont très en deçà des objectifs que devraient atteindre ces capacité de franchissement ; lors d'études précédentes, des auteurs (par exemple LUCAS & BARAS, 2001) relatent des taux > 90 % pour des espèces migratrices strictes. Même s'il est difficile d'estimer quelle probabilité de franchissement permet de maintenir une variabilité génétique suffisante pour la conservation des populations de poissons migrateurs partiels, il est probable que les taux mesurés soient malheureusement faibles.

Les résultats ont montré que, globalement, la franchissabilité (capacité des poissons à franchir l'échelle à poissons une fois qu'ils sont rentrés) était assez élevée sur l'ensemble des ouvrages puisque pour les Cyprinidés, elle est supérieure à 0.60. Sur Verbois, il n'est pas rare d'observer des individus vivants à l'année dans la passe. De plus, il n'apparaît pas d'importantes différences de franchissabilité entre des ouvrages longs à franchir comme l'ouvrage de Verbois et des ouvrages très courts comme



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



les échelles du Seujet et Vessy. Cette variabilité des comportements observés, de même que la durée de franchissement, sont difficiles à expliquer à partir des données dont nous disposons. Plusieurs hypothèses apparaissent dans la littérature, surtout concernant le temps de franchissement. La température pourrait être un facteur affectant la vitesse de progression. Les travaux de GOWANS *et al.* (1999) montrent une corrélation positive entre le taux de montée des saumons atlantiques dans une échelle à poissons en Ecosse et la température de l'eau, suggérant que l'élévation des températures pourrait améliorer la récupération énergétique ainsi que l'accroissement de la portée lors d'efforts.

Par contre, l'attractivité (capacité des poissons cherchant à franchir l'ouvrage à trouver l'entrée de l'échelle à poissons) semble être le problème majeur dans la capacité de franchissement qu'offrent ces barrages (**Tableau 30**). Les résultats ont montré que sur ces grands ouvrages du Rhône, les comportements au pied des barrages des individus migrateurs n'étaient pas tout à fait ceux attendus. La première observation est que les Cyprinidés ne remontent pas sous les turbines, comme nous nous attendions d'après l'hypothèse de la rhéophilie (MONTGOMERY *et al.*, 1997 ; LUCAS & BARAS, 2001) et des observations réalisées par nous-mêmes ainsi que par le personnel des ouvrages, mais préférentiellement par la zone des vannes de surverses. Ces remontées ne semblent pas corrélées à des ouvertures de ces vannes, qui auraient pu créer un appel d'eau suffisant pour attirer le poisson. Il est plus vraisemblable, au vu des résultats, que les Cyprinidés remonteraient par les zones dites de moindre courant (berges et zones calmes le long de la rivière). Ces zones offrent moins de résistance à la nage des individus et donc leur permet d'économiser de l'énergie dans le cadre de ces migrations. De même, certains comportements observés laisseraient penser qu'un même individu peut changer de phénotype (sédentaire ou migrateur) au cours de son existence, puisque certains poissons suivis plusieurs années n'ont pas été détectés en aval d'un ouvrage une année (alors qu'il était très vraisemblablement déjà adulte), et qu'il soit par contre remonté l'année suivante. Ce fut par exemple le cas du chevaine 9493-24, détecté au barrage de Chancy-Pougny durant la période de reproduction en 2013 et 2015, mais pas en 2014 (alors que son émetteur était encore actif).

Tableau 30 : Récapitulatif des taux d'attractivité, de franchissabilité et de franchissement sur les 5 ouvrages hydroélectriques du bassin Arve-Rhône genevois (issus de l'évaluation PIT-tag).

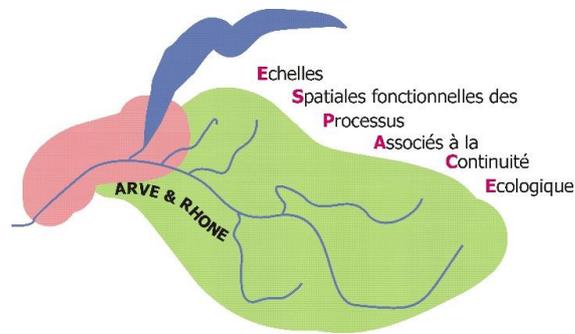
Barrage	Cyprinidés			Salmonidés		
	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement	Attractivité	Franchissabilité	Probabilité de franchissement
Chancy-Pougny	0.38	0.72	0.27	0.13	0.50	0.065
Verbois	0.25	0.67	0.17	0.09	0.50	0.045
Seujet	0.08	0.60	0.05	0.00	-	-
Vessy	0.18	0.61	0.11	0.00	-	-
Arthaz	0.05	0.67	0.03	0.22	0.90	0.19

Mais le fait que les individus remonteraient le long des bordures pose encore plus de questions quant à la faible attractivité des échelles à poissons. L'une des principales hypothèses quant à cette faible détection de l'échelle, est le débit d'attrait de celle-ci n'est pas suffisant. Des études précédentes



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



ont suggéré qu'une passe à poissons deviendrait réellement attractive (pour les salmonidés anadromes) si le débit d'attrait correspond à environ 5-10% du débit de la rivière (NMFS, 2008 ; KATOPODIS & WILLIAMS, 2012). Chez le saumon atlantique et la truite de mer, LAINE *et al.* (2002) ont également observé que les remontées de poissons dans l'échelle se faisaient majoritairement lorsque les eaux en aval du barrage étaient moins turbulentes (basses eaux, fermeture des vannes de surverses), ce qui évite la perturbation du poisson qui détecte alors mieux le débit d'attrait. Or, les débits d'attrait des échelles à poissons du bassin Rhône-Arve sont bien inférieurs, n'atteignant au plus qu'1.2 % du débit moyen du cours d'eau pour le barrage de Chancy-Pougny, et moins de 1% pour les autres ouvrages. Ceci pourrait expliquer pourquoi l'attractivité la plus forte est observée précisément sur Chancy-Pougny.

Un autre point, à considérer avec précaution néanmoins, est le nombre de poissons remontant par la berge où se trouve l'échelle à poissons. Même si l'étude n'avait pas pour objectif de déterminer la berge de remontée privilégiée, les données des stations fixes de détection radio placées à l'entrée des passes ont montré que sur Verbois, 14 des 17 individus qui sont remontés sous le barrage sont passés à proximité de l'échelle (détection initiale mais temporaire dans la zone de détection de l'échelle), tandis que sur Chancy-Pougny, ce ne furent que 5 poissons sur 15. Un dispositif adapté (antennes de détection sur chaque berge) permettrait de préciser ces estimations, mais les premiers éléments montrent que si sur Verbois la plupart des poissons semblent remonter par la berge gauche (où se trouve l'échelle), ce n'est pas forcément le cas sur Chancy-Pougny. Néanmoins, la structure du substrat sous chacun des ouvrages peut expliquer cette différence (bancs de gravier importants sous le barrage de Verbois formant un haut fond et induisant potentiellement une détection plus élevée). Aussi, il est primordial avant de déterminer d'éventuelles actions drastiques pour faciliter ce franchissement (construction d'une passe en rive opposée par exemple), de vérifier ces voies préférentielles de migration à l'approche des barrages.

Ainsi, les résultats obtenus dans le cadre du programme INTERREG ESPACE Arve & Rhône montrent que globalement, les grands ouvrages hydroélectriques présents sur le Rhône peuvent représenter un frein à la montaison :

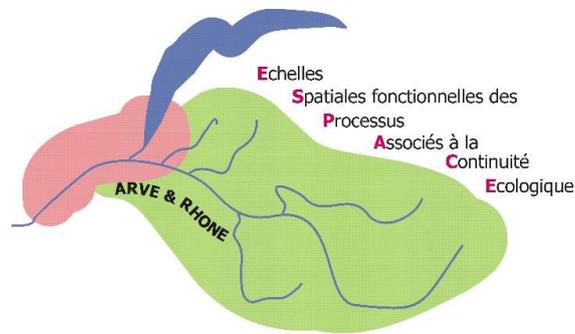
- la probabilité de franchissement est assez faible, dans la fourchette basse de la littérature ;
- les individus remontant sous l'ouvrage restent parfois très longtemps en recherche active d'une voie de passage, sans la trouver pour un grand nombre d'entre eux.

Aussi, la fragmentation sur le Rhône est donc relativement importante pour le peuplement piscicole, avec les risques que le ralentissement ou l'obstruction à la migration par des ouvrages difficilement franchissables puissent représenter pour les populations les plus fragiles une limitation de la contribution à la reproduction ou une baisse du recrutement (LUCAS & FREAR, 1997). Dans un milieu subissant potentiellement des perturbations importantes pour les peuplements piscicoles présentant une résilience faible (vidanges de réservoir notamment ; GRIMARDIAS *et al.*, 2012 ; GRIMARDIAS *et al.*, 2014), une connectivité optimale permettant la libre circulation des poissons est primordiale pour leur conservation. Des suivis à long terme sur ces ouvrages de franchissement (comptage par captures en nasses, vidéos, etc.) peuvent s'avérer utiles pour collecter des informations



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



sur les peuplements piscicoles, telles que les dates de migration et de reproduction, les espèces présentes, mais apportent également un indice important des changements dans l'abondance relative de ces populations (STUART, 1999). Sous ce contexte, les suivis réalisés sur l'ouvrage de franchissement de Verbois depuis 2000, montrent des tendances malheureusement inquiétantes pour les espèces étudiées. En effet, les différents suivis réalisés de 2000 à 2015 (suivis de nasses sur une année) montrent une tendance à une forte baisse des taux de captures pour le barbeau fluviatile, le chevaine et les truites (de rivière et lacustres ; **Figure 96**).

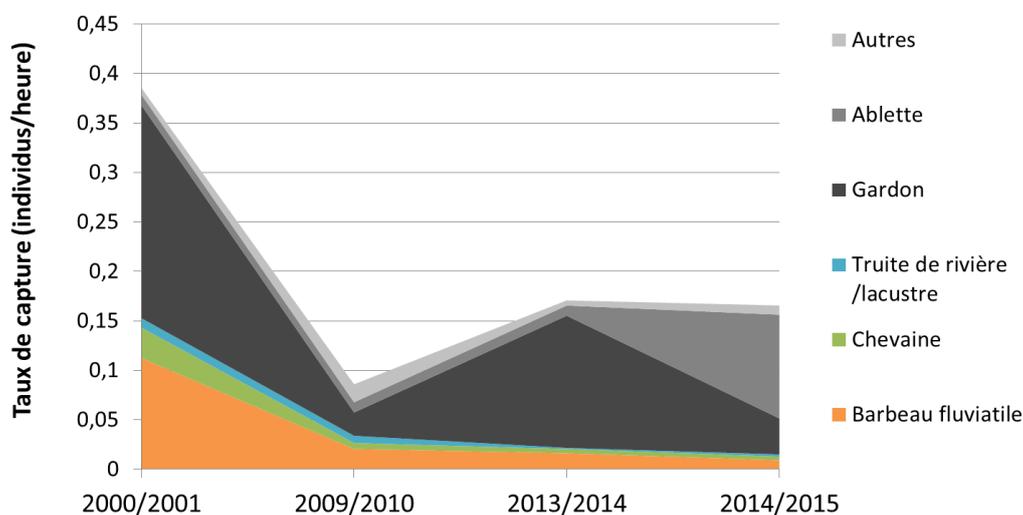


Figure 96 : Taux de capture des individus (individus/heure) pendant les différentes campagnes de captures en nasses des individus franchissant l'échelle à poissons de Verbois. Ces taux de captures sont obtenus en rapportant les effectifs capturés sur le nombre d'heures d'effort de captures (données disponibles : <http://www.rhone-geneve.ch/montaison-piscicole2.html>).

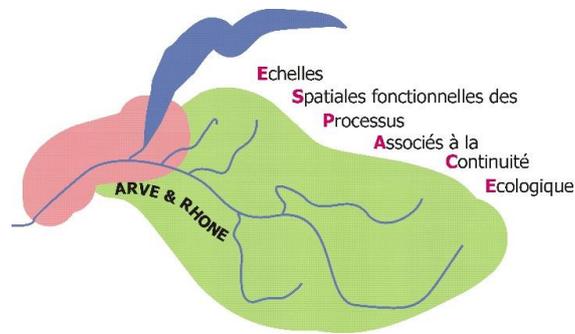
Etant les seuls indices dont nous disposons pour estimer l'évolution des abondances relatives des populations du Rhône, il est à craindre que celles-ci soient en baisse pour les espèces étudiées. Aucun élément tiré de la présente étude ne permet d'incriminer les faibles capacités de franchissement des ouvrages du Rhône dans cette baisse marquée. Mais améliorer cette probabilité de franchissement, et donc la connectivité, dans de tels milieux fragmentés ne peut qu'avoir des impacts positifs vis-à-vis de ces populations, de leur gestion à leur conservation (PRACHEIL *et al.*, 2014). Dans des milieux canalisés et dégradés, l'adaptabilité des organismes à la reproduction tend à favoriser les espèces eurytopes, comme le gardon, l'ablette ou la brème (parmi les plus rencontrées lors des campagnes de captures ou suivis de nasses sur le Rhône), alors que les espèces plus spécialisées comme les poissons rhéophiles (parmi lesquels, le chevaine, le barbeau fluviatile ou la truite) ont plutôt tendance à disparaître (JURAJDA, 1995 ; HORKÝ *et al.*, 2007). Mettre en place une meilleure attractivité des échelles à poissons est donc le principal objectif.

Sur l'Arve, les conditions sont différentes. La complexité du milieu dans le lit principal, fournissant potentiellement des habitats de reproduction, et les connections avec les affluents dont



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



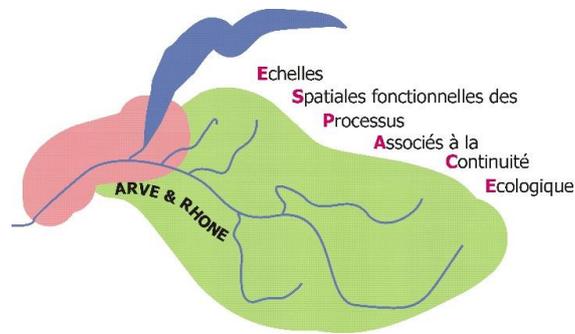
l'importance dans le cycle de vie des espèces étudiées a été précédemment montrée (cf. III. 4)), permettent aux espèces d'avoir accès aux habitats nécessaires à la réalisation du cycle de vie complet. De plus, les obstacles présents sur le cours d'eau n'ont pas montré de signes inquiétants quant aux migrations piscicoles. La truite, appartenant à la famille des Salmonidés (famille dominante sur l'Arve), a montré une bonne capacité à franchir les ouvrages comme le passe à poissons d'Arthaz (lorsqu'elle est entretenue et en eau, elle est fonctionnelle), de même que les seuils en enrochements libres présents dans le lit principal et les affluents (par exemple le seuil de la RD19 sur le Nant de Sion).

Sur le Borne, le franchissement du seuil du Pont du Diable par des géniteurs de truites, classé « infranchissable » (classe 5) par le ROE (voir CHASSERIEAU, 2010), remet en cause son statut. Néanmoins, il est à rappeler que les individus marqués sont des adultes de grandes tailles et que ces résultats ne permettent pas de montrer le franchissement à différents débits, notamment en étiage, ni par des individus de plus petites tailles. Un suivi journalier aurait également permis de savoir si la taille de l'obstacle entraînait une difficulté de franchissement et si les truites étaient stoppées à son pied pendant plusieurs jours. Ainsi, ce seuil peut être qualifié de « partiellement franchissable ». Actuellement, une étude de son aménagement est en cours de discussion afin de faciliter son passage par le plus grand nombre d'individus.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



V. Perspectives et recommandations

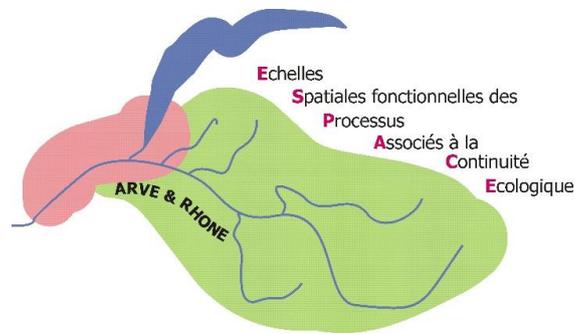
Les bassins de l'Arve et du Rhône genevois présentent une fragmentation importante du continuum fluvial, à des degrés divers. Si les mouvements piscicoles restent relativement peu entravés sur l'Arve, ceux-ci sont bien plus contraints sur le Rhône, ce qui, dans un milieu parfois sévèrement perturbé, peut limiter la capacité de résilience des populations. Dans ce cadre, et du fait des résultats obtenus, il est primordial de :

- i) maintenir la connectivité au niveau des confluences des affluents et des bras secondaires. Ces milieux ont montré leurs importances pour la conservation des populations de l'ensemble du bassin. En plus de la connectivité, il est essentiel que ces milieux retrouvent ou restent de qualité afin qu'ils puissent assurer le bon développement de chaque stade et alimenter en poisson le cours principal de l'Arve.
- ii) améliorer les capacités de franchissement des espèces présentant des migrations de reproduction : truites de rivière et lacustres, barbeaux fluviatiles, et plus accessoirement les chevaines (plus faible proportions de migrateurs) et gardons (pas de baisse visible dans les taux de capture). Dans ce but, les auteurs recommandent de :
 - Améliorer l'attractivité des échelles à poissons existantes : l'augmentation des débits d'attrait semble l'une des mesures principales et simples à mettre en œuvre (pour rappel, la littérature tend à recommander un rapport de 0.05 à 0.1 entre le débit d'attrait et le débit du cours d'eau ; KATOPODIS & WILLIAMS, 2012) ;
 - Maintenir une forte franchissabilité par un entretien régulier des échelles à poissons : vidange et entretien annuel *a minima* pour les grands ouvrages du Rhône, en intervenant à l'approche du (des) pic(s) de migration ; pour celle d'Arthaz, la création d'un déflecteur à l'amont immédiat pourrait soustraire les flottants de la grille de sortie de la passe à poissons et ainsi éviter l'encombrement (colmatage par les flottants et le substrat fin) qui empêche la sortie de celle-ci par les poissons. Cet aménagement permettrait d'étendre à une semaine la période entre 2 dégrillages à la main (à la place d'un nettoyage journalier nécessaire pour le bon fonctionnement en période de fort charriage de l'Arve c'est-à-dire au printemps et à l'automne) ;
 - Poursuite des suivis sur les ouvrages n'ayant vu qu'un faible nombre d'individus détectés, tel que l'ouvrage du Sujet : la présence de zones de reproduction en amont de cet ouvrage rend le franchissement de celui-ci important pour la conservation des populations de barbeaux fluviatiles. Mieux évaluer leur capacité de franchissement est donc primordial.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



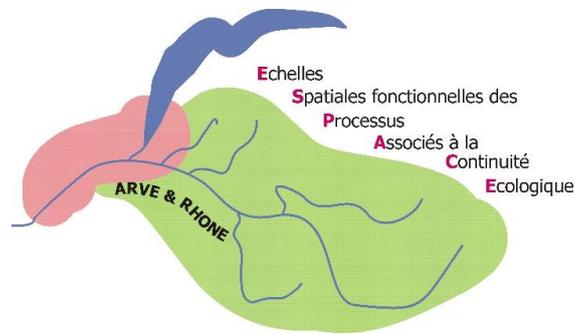
Dans l'éventualité de toute action importante de modification ou ajout d'ouvrage de franchissement, il est recommandé de faire à nouveau appel à une étude télémétrique avec un dispositif adapté afin de déterminer 1) l'intérêt de construire un dispositif supplémentaire sur la rive opposée (voies de montaison privilégiées par les poissons), et 2) la position de l'entrée de l'ouvrage (zone de rassemblement ou de passages répétés des poissons en aval du barrage).

Enfin, dans le cadre des franchissements en dévalaison, l'évaluation de l'efficacité des dispositifs existants, de même que l'éventuelle construction d'un dispositif dédié, devrait faire l'objet d'études complémentaires grâce à des technologies télémétriques plus adaptées que la radiotélémétrie et la RFID (peu performantes dans des milieux profonds), telle que la télémétrie acoustique.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



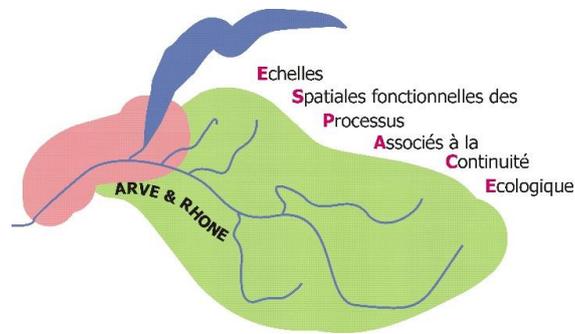
VI. Bibliographie

- ALABASTER J.S. & LLOYD R., 1982. Water temperature. In *Water quality criteria for freshwater fish*. J.S. Alabaster and R. Lloyd Eds., pp. 47-102.
- BARAS E., 1995a. Seasonal activities of *Barbus barbus* L.: Effect of temperature on time-budgeting. *J. Fish Biol.*, 46: 816-828.
- BARAS E., 1995b. Thermal related variations of seasonal and daily spawning periodicity in *Barbus barbus*. *J. Fish Biol.*, 46: 915-917.
- BARAS E., BIRTLES C., WESTERLOPPE L., THOREAU X., OVIDIO M., JEANDRAIN D. & PHILIPPART J-C., 1996. A critical review of surgery techniques for implanting telemetry devices into the body cavity of fish. *Laboratory of Fish Demography and Aquaculture, University of Liège*. 12 p.
- BARAS E., 1997. Selection of optimal positioning intervals in fish tracking: an experimental study on *Barbus barbus*. *Hydrobiologia*. Vol. 371-372, n° 0, p. 19-28.
- BARAS E., BENECH V., MARMULLA G. & LUCAS M., 2001. Manuel de Biotélémetrie aquatique. Atelier pilote IER – ODRS – IRD – Ulg – FAO, *Sélingué, Mali 29 janv. – 10 fév. 2001*, p 160.
- BAUDOIN J.M., BURGUN V., CHANSEAU M., LARINIER M., OVIDIO M., SREMSKI W., STEINBACH P. & VOEGTLE B., 2014. Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. ONEMA. 200 p.
- BEAUFILS, M., 2014. Contribution à l'amélioration des connaissances sur les comportements migratoires de la truite, du barbeau et du chevesne dans le cas d'une rivière à régime nivo-glaciaire : l'Arve, Rapport de stage de Master 2 – Université de Franche Comté, 52 p. + annexes.
- BRIDGET C. J. & BOOTH R.K., 2003. The effects of biotelemetry transmitter presence and attachment procedures on fish physiology and behavior. *Reviews in Fisheries Science*. Vol. 11, n° 1, p. 13–34.
- BRITTON J. R., 2007. Reference data for evaluating the growth of common riverine fishes in the UK. *J. Appl. Ichthyol.*, 23: 555–560.
- BRITTON, J. R., & PEGG, J., 2011. Ecology of European Barbel *Barbus barbus*: implications for river, fishery, and conservation management. *Reviews in Fisheries Science*, 19(4), 321-330.
- BROWN R. S., COOKE S. J., ANDERSON W. G. & MC KINLEY R. S., 1999. Evidence to Challenge the "2% Rule" for Biotelemetry, *North American Journal of Fisheries Management*, 19: 867–871.
- BRUSLE, J., & QUIGNARD, J. P., 2001. Biologie des poissons d'eau douce européens. *Tec & Doc^e éd.* Paris.
- CAUDRON A., CHAMPIGNEULLE A. & LARGE A., 2006. Etats et caractéristiques des populations autochtones de truite commune identifiées en Haute-Savoie et qualité globale du milieu. p. 55-118 in programme INTERREG III A- Identification, sauvegarde et réhabilitation des populations de truites autochtones en vallée d'Aoste et en Haute-Savoie. Rapport final.06/02. 153 p + annexes.
- CHASSERIEAU C., 2010. Recensement des ouvrages transversaux sur le réseau hydrographique de Haute-Savoie et continuité piscicole, Campagne 2010. Rapport FDP74.10/07. 44p + annexes.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

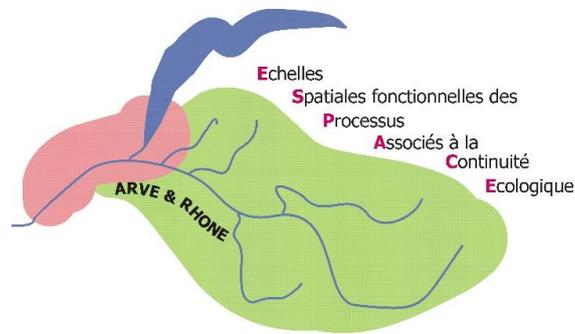


- CLAIREAUX G. & LEFRANÇOIS C., 1998. A method for the external attachment of acoustic tags on roundfish, *Hydrobiologia*, 371/372: 113–116. (eds LAGARDÈRE J.-P., BÉGOUT ANRAS M.-L. & CLAIREAUX G., *Advances in Invertebrates and Fish Telemetry*. Kluwer Academic Publishers. Printed in Belgium).
- CLAPP D, DIANA J & CLARK R, 1990. Range, Activity, and Habitat of Large, Free-Ranging Brown Trout in a Michigan Stream. *Institute for fisheries research Ann Arbor*. Vol. 119, p 1022-1034.
- COOKE S.J., MIDWOOD J.D., THIEM J.D., MLIMLEY P., LUCAS M.C., THORSTAD E.B., EILER J., HOLBROOK C. & EBNER B.C., 2013. Tracking animals in freshwater with electronic tags : past, present and future. *Animal Biotelemetry*, Vol. 1, Article 5.
- CUINAT R., 1970. Ecologie et peuplements des cours d'eau à Truites – Première partie, Chap. III : Repeuplements d'entretien. *Bulletin Français de Pisciculture*, N°240, p 74-103.
- DAVID B.O. & CLOSS G.P., 2001. Continuous remote monitoring of fish activity with restricted home ranges using radiotelemetry; *Journal of Fish Biology* 59, 705-715.
- DE LEEUW J.J. & WINTER H.V., 2008. Migration of rheophilic fish in the large rivers Meuse and Rhin, the Netherlands. *Fisheries Manag. Ecol.*, 15: 409-415.
- DE VOCHT A. & BARAS E., 2005. Effect of hydropeaking on migrations and home range of adult Barbel (*Barbus barbus*) in the River Meuse, PP. 35-44. In *Aquatic Telemetry held in Europe* (SPEDICATO M. T., LEMBO G. & MARMULLA G., Eds.), 9-13 June 2003, Ustica, Italy. Rome FAO/COISPA.
- DENIL G., 1909. Les échelles à poissons et leur application aux barrages de Meuse et d'Ourthe. *Annales des travaux publics de France*, Bruxelles, 152pp.
- ECOTEC, 2002. Suivi de la passe à poissons de Verbois 2000/2001. Rapport pour les Services Industriels de Genève. 19 p. http://www.rhone-geneve.ch/uploads/5/5/4/2/5542234/suivi_pp_verbois_2001_ecotec.pdf
- ECOTEC, 2008. Suivi de la passe à poissons du barrage du Seujet – période : décembre 2006 à novembre 2007. Rapport pour les Services Industriels de Genève. 15 p. http://www.rhone-geneve.ch/uploads/5/5/4/2/5542234/suivi_pp_seujet_2006-2007.pdf
- ECOTEC, 2010. Suivi de la passe à poissons du barrage de Verbois. Période : juin 2009 – juin 2010. Rapport pour les Services Industriels de Genève. 10 p. http://www.rhone-geneve.ch/uploads/5/5/4/2/5542234/suivi_pp_verbois_2010_ecotec.pdf
- ELLIOTT J.M., 1981. Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. In *Stress and fish*. A.D. Pickering Ed., pp. 209-245.
- ENGBRECH C.C., LARGIADÈR C.R., HANFLING B. & TAUTZ D., 1999. Isolation and characterization of polymorphic microsatellite loci in the European bullhead *Cottus gobio* L. (Osteichthyes) and their applicability to related taxa. *Molecular Ecology* 8(11), 1966-1969.
- ESPACE A&R, 2013. *Interreg IV A 2007-2013 France-Suisse*. Document de présentation. 40 p.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

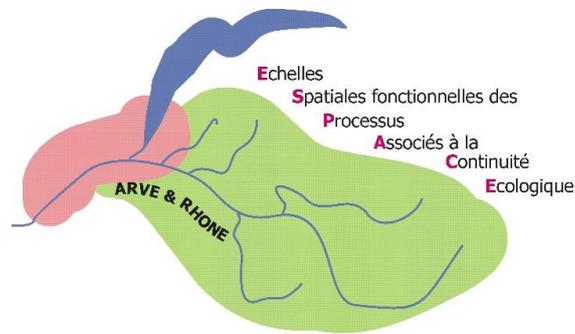


- FREDRICH, F., OHMANN, S., CURIO, B. ET KIRSCHBAUM, F., 2003. Spawning migrations of the chub in the River Spree, Germany. *Journal of Fish Biology*. Vol. 63, n° 3, p. 710–723.
- FREUD J.G. & HARTMAN K.J., 2002. Influence of depth on detection distance of flow-frequency radio transmitters in the Ohio River. *North American Journal of Fisheries Management* 22 ; 1301-1305.
- FROST W. E., BROWN M.E., 1972. The Trout. *Collins Edition, London.*, 286 pp.
- GADAIS, R., 2012. Étude des déplacements migratoires post-reproduction chez l'ombre commun (*Thymallus thymallus*) par radiopistage sur le bassin versant de l'Arve. *Rapport de stage Master 2*. 50 p. + annexes.
- GALLEPP G.W. & MAGNUSON J.J., 1972. Effects of negative buoyancy on the behavior of the bluegill, *Lepomis macrochirus* Rafinesque. *Transactions of the American Fisheries Society*, 101, 507±512.
- GOSSET C. & RIVES J., 2004. Anesthésie et procédures chirurgicales pour l'implantation de radio-émetteurs dans la cavité ventrale de truites communes adultes (*Salmo trutta*). *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. N° 374, p. 21–34.
- GOWANS A.R.D., ARMSTRONG J.D. & PRIEDE I.G., 1999. Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder. *Journal of Fish Biology*, Vol. 54, p. 713-726.
- GOWANS A.R.D., ARMSTRONG J.D., PRIEDE I.G. & MCKELVEY S., 2003. Movements of Atlantic salmon migrating upstream through a fish-pass complex in Scotland. *Ecology of Freshwater Fish*, Vol. 12, p. 177-189.
- GREN, 2009. Centrale hydroélectrique de Vessy : suivi du franchissement des passes à poissons (suivi de mise en service). Rapport de suivi pour les Services Industriels de Genève. 29 p. http://www.rhone-geneve.ch/uploads/5/5/4/2/5542234/suivi_pp_vessy_2009.pdf
- GRIMARDIAS D., GUILLARD J. & CATTANEO F., 2012. Impact de la vidange de la retenue de Verbois sur le peuplement piscicole : biomasse piscicole et comportement individuel. Rapport pour les Services Industriels de Genève, pp. 102. http://www.rhone-geneve.ch/uploads/5/5/4/2/5542234/12-vidange_2012_tome2_rapport_hepia_2012.pdf
- GRIMARDIAS D., GUILLARD J. & CATTANEO F., 2014. Impact de la vidange de la retenue de Verbois sur le peuplement piscicole – rapport complémentaire : biomasse piscicole 2013. Rapport pour les Services Industriels de Genève, pp. 33. http://www.rhone-geneve.ch/uploads/4/0/5/4/40541689/rapport_hepia-inra_verbois_2013.pdf
- HARRANG E., COLARD A, GUYOMARD R. & CAUDRON A., 2014. Dynamique spatiale et temporelle de l'introggression des populations de truites migratrices et résidentes du bassin du lac d'Annecy. Rapport FDP74.14/01, 23 p. + annexes.
- HAURY, J., OMBREDANE, D., & BAGLINIERE, J. L., 1991. L'habitat de la truite commune (*Salmo trutta* L.) en cours d'eau. *La truite : biologie et écologie*. JL Baglinière et G. Maise (eds) INRA éditions, 47-96.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

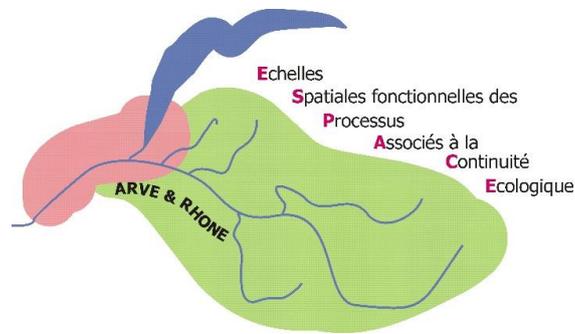


- HORKÁ P., HORKÝ P., RANDÁK T., TUREK J., RYLKOVÁ K. & SLAVÍK O., 2015. Radio-telemetry shows differences in the behaviour of wild and hatchery-reared European grayling *Thymallus thymallus* in response to environmental variables. *Journal of fish biology*, 86(2), 544-557.
- HORKÝ P., SLAVÍK O., BARTOŠ L., KOLÁŘOVÁ J. & RANDÁK T., 2007. Behavioural pattern of cyprinid fish below a weir as detected by radio telemetry. *Journal of Applied Ichthyology*, Vol. 23, p. 679-683.
- HUDSON, J., 1993. Seasonal and Daily Movements of Large Brown Trout in the Mainstream Au Sable River, Michigan. *Fisheries Division Research Report*. N° 1998, p. 75.
- JUNKER J., PETER A., WAGNER C.E., MWAIKO S., GERMANN B., SEEHAUSEN O. & KELLER I., 2012. River fragmentation increases localized population genetic structure and enhances asymmetry of dispersal in bullhead (*Cottus gobio*). *Conservation Genetics* 13(2), 545-556.
- JURAJDA P., 1995. Effect of channelization and regulation on fish recruitment in a floodplain river. *Regulated Rivers: Research and management*, Vol. 10. p. 207-215.
- KATOPODIS C. & WILLIAMS J.G., 2012. The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering*, Vol. 48, p. 8-18.
- KEEFER M.L., PEERY C.A., JEPSON M.A. & STUEHRENBURG L.C., 2004. Upstream migration rates of radio-tagged adult Chinook salmon in riverine habitats of the Columbia River basin. *Journal of Fish Biology*, Vol. 65, p. 1126-1141.
- KEITH P., PERSAT H., FEUNTEUN E. & ALLARDI J., 2011. Les poissons d'eau douce de France. Coll. Inventaires & Biodiversité. *Biotope Editions-Muséum national d'histoire naturelle*. 552 p.
- KEMP P.S. & O'HANLEY J.R., 2010. Procedures for evaluating and prioritizing the removal of fish passage barriers : a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, 17, 297-322.
- KIRCHHOFFER A., BREITENSTEIN M. & ZAUGG B. 2007. Liste rouge poissons et cyclostomes – Liste rouge des espèces menacées en Suisse, Office fédéral de l'environnement, Berne, et Centre Suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel.
- KNAEPKENS G., BRUYNDONCX L. & EENS M., 2004. Assessment of residency and movement of the endangered bullhead (*Cottus gobio*) in two Flemish rivers. *Ecology of Freshwater Fish* 13, 317-322.
- LAFFINEUR B., DELVINGT W. & LAMOTTE A., 2002. Essai d'amélioration de la pisciculture de l'ombre commun (*Thymallus thymallus* (L.)). *Les cahiers forestiers de Gembloux*, N°8, p 3-14.
- LAINÉ A., JOKIVIRTA T. & KATOPODIS C., 2002. Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and sea trout, *Salmo trutta* L., passage in a regulated northern river – fishway efficiency, fish entrance and environmental factors. *Fisheries Management and ecology*, Vol. 9, p. 65-77.
- LARINIER M., CHANSEAU M., BAU F. & CROZE O., 2003. The use of radio telemetry for optimizing fish pass design, in *Aquatic telemetry : advances and applications*, p. 53-60.
- LUCAS M.C. & FREAR P.A., 1997. Effects of a flow-gauging weir on the migratory behaviour of adult barbel, a riverine cyprinid. *Journal of Fish Biology*, Vol. 50, p. 382-396.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

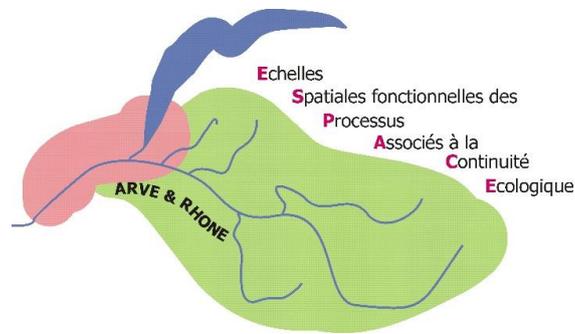


- LUCAS M.C. & BARAS E., 2000. Methods for studying spatial behavior of freshwater fishes in the natural environment. *Fish and Fisheries* 1, 283-316.
- LUCAS M.C. & BARAS E., 2001. *Migration of Freshwater Fish*. Blackwell Science, Oxford.
- MARTINS E.G., GUTOWSKY L.F.G., HARRISON P.M., FLEMMING J.E.M., JONSEN I.D., ZHU D.Z., LEAKE A., PATTERSON D.A., POWER M. & COOKE S.J., 2014. Behavioral attributes of turbine entrainment risk for adult resident fish revealed by acoustic telemetry and state-space modelling. *Animal Biotelemetry*, Vol. 2, Article 13.
- MEYER L., 2001. Spawning migration of grayling *Thymallus thymallus* (L., 1758) in a Northern German Lowland river. *Archiv für Hydrobiologie*, 99-117.
- MONTGOMERY J.C., BAKER C.F. & CARTON, A.G., 1997. The lateral line can mediate rheotaxis in fish. *Nature*, Vol. 389, p. 960-963.
- NMFS, 2008. Anadromous salmonid passage facility design. National Marine Fisheries Service, Northwest Regional Office, pp. 135.
- NOLTE A.W., STEMSHORN K.C. & TAUTZ D., 2005. Direct cloning of microsatellite loci from *Cottus gobio* through a simplified enrichment procedure. *Molecular Ecology Notes* 5, 628–636.
- NOONAN M.J., GRANT J.W.A. & JACKSON C.D., 2012. A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, Vol. 13, p. 450-464.
- OFCOM, 2014. *Swiss National Frequency Allocation Plan and Specific Assignments*.
- O'HANLEY J.R. 2011. Open rivers: Barrier removal planning and the restoration of free-flowing rivers. *Journal of Env. Management* 92 3112-3120.
- O'HANLEY J.R, WRIGHT J., DIEBEL M., FREDORA M.A. & SOUCY C.L. 2013. Restoring stream habitat connectivity : A proposed method for prioritizing the removal of resident fish passage barriers. *Journal of Environmental Management* 125, 19-27.
- OVIDIO, M., 1999. Cycle annuel d'activité de la truite commune (*Salmo trutta L.*) adulte : Étude par radio-pistage dans un cours d'eau de l'Ardenne belge. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. N° 352, p. 1–18.
- OVIDIO, M. & PHILIPPART, J.C. (AVEC LA COLLABORATION DE NEUS Y., RIMBAUD G., GUILLAUME N., OTTE D., DE WESPIN A. & COURTOIS J.) 2007. Caractérisation des déplacements et migrations de poissons salmonidés et cyprinidés rhéophiles dans la zone de restitution de l'eau turbinée par la centrale hydro-électrique de Hé de Goreu (Remouchamps) sur l'Amblève non navigable. Implantation pour le fonctionnement de la nouvelle échelle à poissons du barrage de Lorcé. *Rapport final au Ministère de la Région Wallonie, DGRNE – Division de l'Eau, Direction des Cours d'eau non navigables. Université de Liège, Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie*, 82 p.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

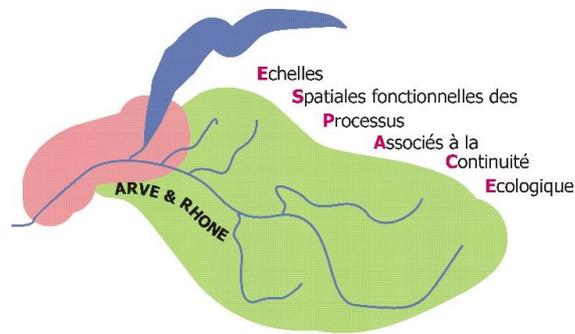


- OVIDIO, M., PHILIPPART, J.C. & BARAS, E., 2000. Methodological bias in home range and mobility estimates when locating radio-tagged trout, *Salmo trutta*, at different time intervals. *Aquatic Living Resources*. Vol. 13, n° 06, p. 449–454.
- OVIDIO M., PARKINSON D., SONNY D. & PHILIPPART J. C., 2004. Spawning movements of European grayling *Thymallus thymallus* in the River Aisne (Belgium). *Folia Zoologica*, 53(1), 87-98.
- OVIDIO M., PARKINSON D. PHILIPPART J.C. & BARAS E., 2007. Multiyear homing and fidelity to residence areas by individual barbel (*Barbus barbus*). *Belg. J. Zool.*, 13 :183-190.
- OVIDIO, M., BARAS, E., GOFFAUX, D., GIROUX, F. & PHILIPPART, J.C., 2002. Seasonal variations of activity pattern of brown trout (*Salmo trutta*) in a small stream, as determined by radio-telemetry. *Hydrobiologia*. Vol. 470, n 1-3, p. 195–202.
- OVIDIO M., DETAILLE A., BONTINCK C., NEUS Y., RIMBAUD G. & PHILIPPART J.C., 2007. Élaboration de recommandations pratiques pour la préservation-restauration d'éléments de l'habitat hydraulique du chabot dans les cours d'eau non navigables de Wallonie. Rapport pour le Ministère de la Région Wallonie, Division de l'Eau Direction des Cours d'Eau Non Navigables. Université de Liège, LDPH, 116 p+ annexes.
- PARKINSON D., PHILIPPART J. C. & BARAS E., 1999. A preliminary investigation of spawning migrations of grayling in a small stream as determined by radio-tracking. *Journal of Fish Biology*, 55(1), 172-182.
- PAQUET G., 2002. Biologie et écologie de l'ombre commun (*Thymallus thymallus* L.) dans l'Orbe à la Vallée de Joux, canton de Vaud, Suisse. *Thèse de doctorat, Université de Lausanne, Lausanne*.
- PERSAT H., 1977. Ecologie de l'ombre commun. *Bull. Fr. Piscic.* (266), 11-20.
- PERSAT H., 2011. Les poissons d'eau douce de France, l'Ombre commun. (*Biotope*^e éd.). Mèze : *Muséum National d'Histoire Naturelle* (Paris).
- PETERS L.M., REINHARDT U.G. & PEGG M.A., 2008. Factors influencing radio wave transmission and reception: use of radiotelemetry in large river systems. *North American Journal of Fisheries Management*, Vo. 28, p. 301-307.
- PONCIN P., 1996. A field observation on the influence of aggressive behaviour on mating success in the European grayling. *Journal of fish biology*, 48(4), 802-804.
- PRACHEIL B.M., MESTL G.E. & PEGG M.A., 2014. Movement through dams facilitates population connectivity in a large river. *River research and Applications*, Vol. 31, p. 517-525.
- RICHARD, A., O'ROURKE, J., CAUDRON, A., & CATTANÉO, F. (2013). Effects of passive integrated transponder tagging methods on survival, tag retention and growth of age-0 brown trout. *Fisheries Research*, 145, 37-42.
- RUSTADBAKKEN, A., L'ABÉE-LUND, J. H., ARNEKLEIV, J. V. ET KRAABØL, M., 2004. Reproductive migration of brown trout in a small Norwegian river studied by telemetry. *Journal of Fish Biology*. Vol. 64, n° 1, p. 2–15.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

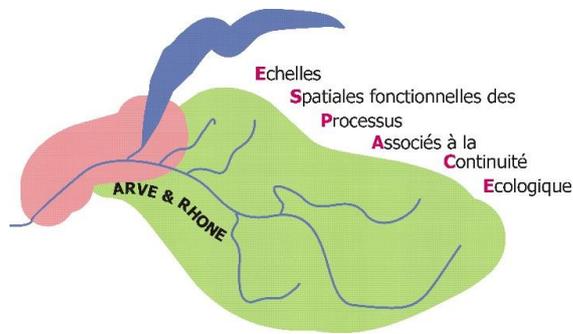


- STUART I., 1999. Fishways as tools for monitoring movement patterns of large fish populations. In Fish movement and Migration (EDS. HANCOCK, D.A., SMITH, D.C. & J.D. KOEHN). Australian Society for Fish Biology Workshop Proceedings, Bendigo, Victoria, Australie, 28-29 Septembre 1999.
- TAYLOR A. A., BRITTON J. R. & COWX I. G., 2004. Does the stock density of stillwater catch and release fisheries affect the growth performance of introduced cultured barbel? *J. Fish Biol.*, **65**: 308–313.
- TRAVADE F. & LARINIER M., 2002. Monitoring techniques for fishways. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, Vol. 364 Suppl., p. 166-180.
- UICN-FRANCE, MNHN, SFI & ONEMA. 2010. La liste rouge des espèces menacées en France. In Chapitre Poissons d'eau douce de France métropolitaine, Paris, France.
- UTZINGER J., ROTH C. & PETER A. 1998. Effects of environmental parameters on the distribution of bullhead *Cottus gobio* with particular consideration of the effects of obstructions. *Journal of Applied Ecology* **35**(6): 882-892.
- VELLE J.I., LINDSAY J.E., WEEKS R.W. & LONG F.M., 1979. An investigation of the loss mechanisms encountered in propagation from a submerged fish transmitter. In Proceedings of the second international conference on Wildlife Biotelemetry (ed. F.M. Long). University of Laramie Press, Laramie, Wyoming, pp. 228-237.
- VEHANEN T., HUUSKO A., YRIÄNÄ T., LAHTI M. & MÄKI-PETÄYS A., 2003. Habitat preference by grayling (*Thymallus thymallus*) in an artificially modified, hydropeaking riverbed: a contribution to understand the effectiveness of habitat enhancement measures. *Journal of Applied Ichthyology*, **19**(1), 15-20.
- VIBERT R. & CUINAT R., 1961. Possibilités actuelles de la pêche électrique en France. *Bulletin Français de Pisciculture*, N°200, p 89 - 98.
- VIGIER L., 2011. Etude de la structure thermique du cours principal di Giffre : évaluation des effets du barrage de Taninges sur le régime thermique du Giffre, Rapport FDP74.11/02, 14 p. + annexes.
- WALKER R.H. & ADAMSG.L., 2014. Ecological factors influencing movement of creek chub in an intermittent stream of the Ozark Moutains, Arkansas. *Ecology of Freshwater Fish*.
- WINTER J. D., 1983. Underwater biotelemetry. Pages 371–395 in L. A. NIELSEN and D. L. JOHNSON, editors. Fisheries techniques. *American Fisheries Society*, Bethesda, Maryland.
- WINTER J., 1996. Advances in underwater biotelemetry, Fisheries Techniques (eds MURPHY B.R. & WILLIS D.W.), 2nd edn. *American Fisheries Society*, Bethesda, Maryland, pp. 555±590.
- WOJTENKA J., 1985. Schéma Départemental à Vocation Piscicole de Haute-Savoie (p. 497). Annecy: Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de la Haute-Savoie, Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Chapitre 3 Fonctionnement des populations de Chabots (*Cottus gobio*) - Diversité et Structuration génétique de l'espèce le long de l'Arve et de ses affluents

LIZEE MH. (a), HUCHET P. (a), CHASSERIEAU C. (a), GRENIER R. (b), MEGLE CZ E. (b), CHAPPAZ R. (b), DUBUT V. (b)

(c) *FDPPMA 74 – Fédération de pêche de Haute-Savoie*



"Le Villaret"

2092, route des Diacquenods
74370 SAINT-MARTIN BELLEVUE

(d) *IMBE – Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Biodiversité*



[UMR Aix Marseille Université - CNRS 7263 / IRD 237]

Equipe Evolution Génome Environnement
Centre St Charles - case 36
3, place Victor Hugo 13331 MARSEILLE

Résumé

Ici, les relations inter-populations et l'impact de la fragmentation des habitats sont étudiés par le biais de la biologie moléculaire. L'outil moléculaire, basé sur l'analyse du polymorphisme des microsatellites de l'ADN nucléaire, se montre suffisamment sensible pour mettre en évidence des divergences récentes et permet une analyse fine de la structure génétique des populations de chabots.

Les résultats de ces analyses révèlent une forte structuration de l'espèce à l'échelle du bassin versant « Arve-Rhône », chaque affluent correspondant à un sous-ensemble génétiquement différencié. Cette différenciation importante traduit un patron d'isolement par la distance et met également en lumière l'impact de plusieurs ensembles d'ouvrages et d'altérations du milieu en termes de connectivité piscicole.

De par ses capacités de dispersion relativement limitées, le chabot apparaît sensible à la présence de certaines barrières (physiques, chimiques ou thermiques) affectant, notamment, les déplacements vers l'amont des cours d'eau (montaison). Les taux de migration entre populations révèlent ainsi une asymétrie de flux au bénéfice de l'aval, qui se traduit par une diminution de la diversité génétique au niveau des têtes de bassins.

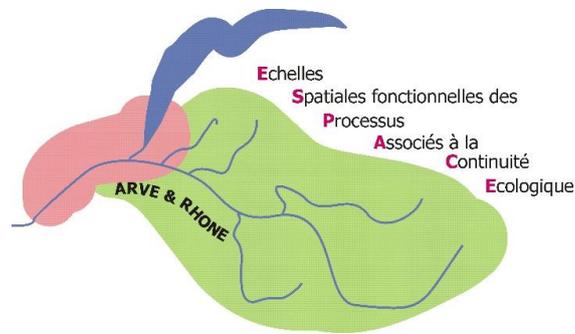
Les analyses réalisées dans le cadre de cette étude ont mis en évidence 10 groupes génétiquement bien différenciés. Ces groupes ont ainsi permis de définir 14 unités fonctionnelles pouvant servir de découpage de base pour la mise en place d'opérations de gestion.

Mots-clés : *Cottus gobio*, marqueurs microsatellites, diversité génétique, différenciation génétique, structuration, flux de gènes, taux de migration, continuité écologique, INTERREG ESPACE, Arve.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



I. Introduction

Le projet ESPACE²¹ « Arve et Rhône » réunit 2 structures (la FDPPMA74²² et l'HEPIA²³) autour d'une thématique commune relative à la continuité écologique sur les bassins versants de l'Arve et du Rhône genevois. Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme franco-suisse INTERREG IV et a pour objectif la mise en place d'un outil d'aide à la décision sous la forme d'un modèle spatialisé, simple d'utilisation et adapté aux gestionnaires.

La première étape du projet consiste à réaliser un diagnostic de la fonctionnalité biologique à partir de l'étude de 5 espèces-cibles, appartenant à 3 familles différentes et sélectionnées comme « modèles biologiques représentatifs » : l'Ombre commun et la Truite de rivière (Salmonidés), le Barbeau fluviatile et le Chevaie (Cyprinidés) et enfin, le Chabot (Cottidés). Ce diagnostic se focalisera sur (1) les échelles de fonctionnement des populations et sur (2) leur capacité à franchir différents types d'ouvrages. En effet, le bassin de l'Arve est fortement marqué par l'anthropisation qui se traduit par une artificialisation importante des milieux aquatiques (endiguements, infrastructures hydro-électriques, extractions de matériaux,...) et une altération de leur dynamique associée à la fragmentation des habitats. Une meilleure compréhension du fonctionnement des populations piscicoles en lien avec les contraintes de l'environnement est une étape indispensable à la conservation de la biodiversité, tout comme au maintien des services rendus par cet écosystème d'eau douce.

Cette étude a pour objectif une meilleure appréhension du fonctionnement des populations de chabots à l'échelle du bassin versant « Arve-Rhône ». Le Chabot (*Cottus gobio*) représente un modèle biologique particulièrement intéressant pour évaluer les effets de la fragmentation sur les organismes aquatiques. De par ses capacités de dispersion relativement limitées (KNAEPKENS *et al.*, 2004), l'espèce apparaît particulièrement sensible à la présence de barrières affectant, notamment, les déplacements vers l'amont des cours d'eau (montaison) (JUNKER *et al.*, 2012). Il s'agit d'une espèce typique de la zone à truite (GAUDIN & CAILLÈRE, 1990), appréciant les eaux fraîches et bien oxygénées. Ce poisson, au mode de vie benthique, recherche par ailleurs des substrats plutôt durs et grossiers (pierres et graviers de différentes tailles). Ces derniers lui procurent non seulement abris et protections, mais sont aussi essentiels pour sa reproduction car utilisés pour le frai (LELEK, 1987). Son caractère fortement sédentaire, couplé à des exigences précises en termes de préférences écologiques, impliquent la présence de toute une mosaïque d'habitats dans un périmètre restreint, afin qu'il puisse accomplir son cycle vital (ZBINDEN *et al.*, 2004). Le chabot combine ainsi différentes caractéristiques intéressantes par rapport aux autres espèces-cibles visées par le diagnostic de la fonctionnalité biologique. Mais surtout, il s'agit d'une espèce sans valeur économique, ni halieutique,

²¹ Échelles Spatiales fonctionnelles des Processus Associés à la Continuité Écologique.

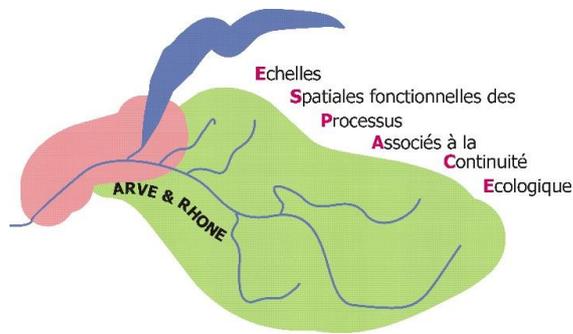
²² Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique.

²³ Haute École du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



qui n'est *a priori* pas manipulée par l'homme et dont la structure des populations est sensée refléter leur fonctionnement naturel (ENGLBRETCH *et al.*, 2000).

S'interroger sur les échelles de fonctionnement des populations piscicoles et sur leur capacité à franchir les ouvrages, revient à questionner la dispersion des espèces visées par le diagnostic. Deux grands types d'approches sont couramment utilisés pour mesurer la dispersion (TROCHET *et al.*, 2014). Tout d'abord, les méthodes de mesures directes qui consistent en des suivis de mouvements individuels (par radio-télémetrie ou capture-marquage-recapture) permettant d'estimer la proportion d'individus dispersants ou encore les distances parcourues. Cependant, la dispersion correspond à un mouvement individuel pouvant aussi induire des flux de gènes entre populations (on parlera de dispersion efficace). Dès lors, une approche indirecte d'estimation de cette dispersion peut être envisagée via l'analyse de flux de gènes à l'aide de l'outil moléculaire.

Ainsi, si pour les espèces-cibles les plus mobiles (Ombre, Truite, Barbeau, Chevaine), l'échelle de fonctionnement des populations est évaluée par radio-télémetrie et PIT-taging, cette appréciation directe de la dispersion n'apparaît pas adéquate pour le Chabot, considéré comme peu mobile (OVIDIO *et al.*, 2007). Pour cette espèce, les relations inter-populations et l'impact de la fragmentation des habitats ont donc été étudiés par le biais de la biologie moléculaire. Il s'agit ici de travailler sur une image, décalée dans le temps, des événements de reproduction passés qui nous renseignera sur les déplacements réalisés et ayant donné lieu à de la reproduction.

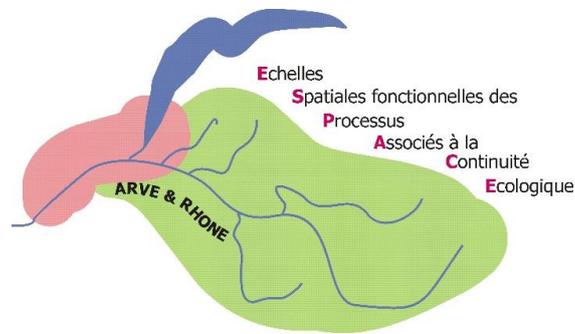
Pour ce travail, les analyses génétiques ont été réalisées à l'IMBE²⁴ (équipe Evolution Génome Environnement). Un total de 25 marqueurs microsatellites a été amplifié pour chaque chabot échantillonné. Plus concrètement, un microsatellite correspond à une séquence d'ADN particulière correspondant à la répétition, un nombre de fois variable, d'un petit motif nucléotidique de base (2 à 10 nucléotides). C'est le nombre de répétitions qui constituent les différentes versions d'un même marqueur (on parlera d'allèles). Il s'agit donc d'un polymorphisme facilement identifiable, une fois l'emplacement du gène localisé et les amorces définies. Ainsi, l'outil moléculaire, basé sur l'analyse du polymorphisme des microsatellites de l'ADN nucléaire, se montre suffisamment sensible pour mettre en évidence des divergences récentes (SUK & NEFF 2009) et permet une analyse fine de la structuration génétique des populations (JUNKER *et al.*, 2012). En effet, les microsatellites apparaissent comme des marqueurs de choix en génétique des populations : ils sont nombreux, distribués de façon homogène à travers le génome, souvent co-dominants et surtout très variables, même dans des populations avec un faible polymorphisme allozymique ou mitochondrial (ESTOUP *et al.*, 1995). De plus, il s'agit de marqueurs sélectivement neutres (EDWARDS *et al.*, 1991), sensés refléter les seuls événements démographiques (colonisation, effondrement de population, migration...).

²⁴ Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



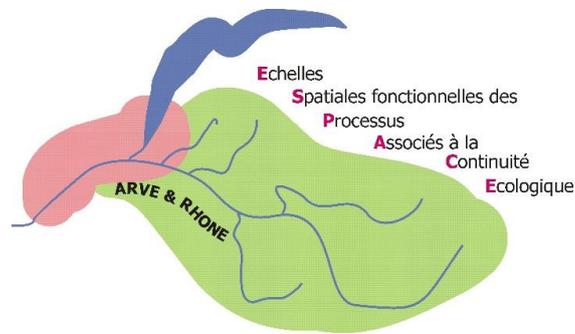
Avec pour hypothèse de départ que la réponse des individus au degré de connectivité (et donc aux possibilités de déplacements) sera traduit au niveau populationnel en termes de diversité et de structure génétique, nous avons cherché à caractériser chaque station échantillonnée en fonction des fréquences alléliques qui y ont été observées. L'objectif de ce travail est de comprendre, au travers des patrons de distribution de ces fréquences alléliques, comment la dispersion (ou inversement la présence de barrières) a pu façonner l'arrangement spatial de la diversité génétique. Il s'agira tout d'abord, d'estimer la diversité génétique de chaque station à l'aide de statistiques descriptives couramment utilisées en génétique des populations (« *F-statistics* » – WRIGHT, 1950). Puis, dans un second temps, nous analyserons la structure génétique des populations de chabots à l'échelle du bassin versant afin (1) d'évaluer l'échelle de fonctionnement de ces populations, mais aussi (2) de quantifier les flux de gènes existants ou au contraire la présence de barrières à ces flux, mettant en lumière d'éventuels problèmes de connectivité.

L'objectif final de cette étude est ainsi de répartir les différentes stations échantillonnées au sein d'unités homogènes en termes de fonctionnement, qui pourront ensuite servir de découpage de base pour la mise en place d'opérations de gestion.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



II. Matériel et méthodes

1) Echantillonnage :

Initialement, une soixantaine de stations étaient envisagées concernant l'échantillonnage des chabots le long de l'Arve et de ses affluents (**Figure 97**). Différentes bases de données, élaborées et actualisées par la FDPPMA74²⁵ et l'ONEMA²⁶, ont permis de construire le plan d'échantillonnage.

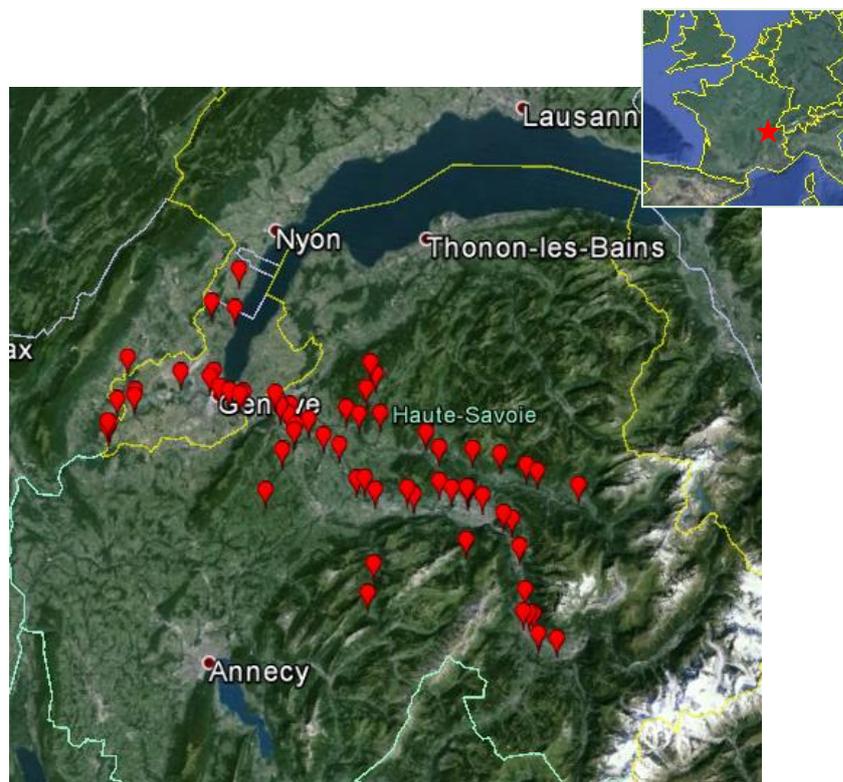


Figure 97 : Plan d'échantillonnage théorique initial (Google Earth)

Un atlas des ouvrages transversaux existant sur le réseau hydrographique de Haute-Savoie (CHASSERIEAU, 2010), couplé à l'emplacement des confluences (BD Carthage – IGN, 2006), a été utilisé pour délimiter les cours d'eau principaux (Arve + Rhône) en une quinzaine de tronçons. Ce premier découpage a ensuite été croisé avec les données de présence « historique » du chabot (observations entre 1999 et 2013). Ainsi, pour chaque affluent de l'Arve où le chabot était connu comme présent, ont été déterminés : (i) un point d'échantillonnage à la confluence, (ii) un autre point en amont du premier obstacle, et (iii) un dernier point au niveau du tronçon correspondant sur le cours d'eau principal. Il était prévu de prélever entre 30 et 50 individus au niveau de chacune de ces stations, le but étant d'atteindre un total de 1600 chabots échantillonnés.

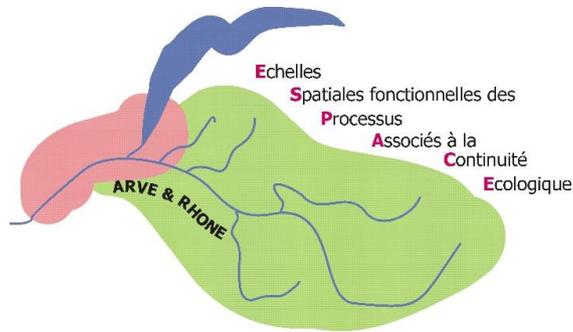
²⁵ Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique.

²⁶ Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Au final, 45 stations ont présenté des effectifs suffisants pour pouvoir être échantillonnées. Le matériel biologique a été collecté par pêche électrique (**Figure 98**) et seuls les individus d'une taille supérieure à 8 cm ont été considérés pour les prélèvements. Chaque chabot pris en compte dans cette étude a donc été pesé, mesuré et un morceau de nageoire caudale de quelques mm² a été prélevé avant de relâcher l'individu dans le cours d'eau. Les prélèvements réalisés en vue des analyses génétiques ont été conservés dans des tubes Eppendorf contenant de l'éthanol (96%).



Figure 98 : Echantillonnage par pêche électrique par la FDPPMA74, biométrie (ici, mesure de longueur) et prélèvement d'un morceau de la nageoire caudale.

Les 45 stations d'échantillonnage correspondent à un total de 1690 chabots (**Figure 99** - page suivante - et Annexe 20 pour la carte des ouvrages).

2) Extraction de l'ADN et amplification des marqueurs microsatellites²⁷ :

A. Mise au point de 2 kits d'amplification multiplexée :

La première étape a consisté en une recherche bibliographique des marqueurs existants ayant déjà été utilisés pour l'amplification de microsatellites chez *Cottus gobio* ou d'autres espèces du genre *Cottus*. Quarante-deux marqueurs microsatellites ont ainsi été présélectionnés en vue de la constitution des kits multiplex (ENGBRETCH *et al.*, 1999 ; NOLTE *et al.*, 2005 ; FUJISHIN *et al.*, 2009). Certaines amorces ont, par ailleurs, été « re-designées » afin d'obtenir des tailles de fragments satisfaisantes. Le multiplexage implique de jouer sur la longueur des fragments amplifiés (3 à 4 longueurs différentes) et sur leur marquage avec différents fluorochromes (4 "couleurs" différentes). En effet, l'utilisation d'amorces marquées par des fluorochromes absorbant à des longueurs d'ondes différentes permet de réaliser des co-amplifications au moyen d'une même PCR (*Polymerase Chain Reaction*), c'est-à-dire plusieurs amplifications dans un même tube.

Dans un premier temps, l'amplification a été testée séparément pour chacun des marqueurs, ce qui a permis d'éliminer une première série de marqueurs qui n'amplifiaient pas pour tous les individus (32 marqueurs conservés). Puis, des amorces marquées ont été commandées pour les marqueurs restants et l'amplification a été testée à nouveau sur ces amorces marquées. Les résultats du génotypage ont ainsi permis (en fonction du profil des pics, du polymorphisme des marqueurs et de la gamme de taille des fragments obtenus) de sélectionner 25 amorces dans le but de constituer 2 kits multiplex (**Figure 100**).

²⁷ En collaboration avec l'IMBE : Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale – UMR Aix-Marseille Université/CNRS/IRD/Avignon Université.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

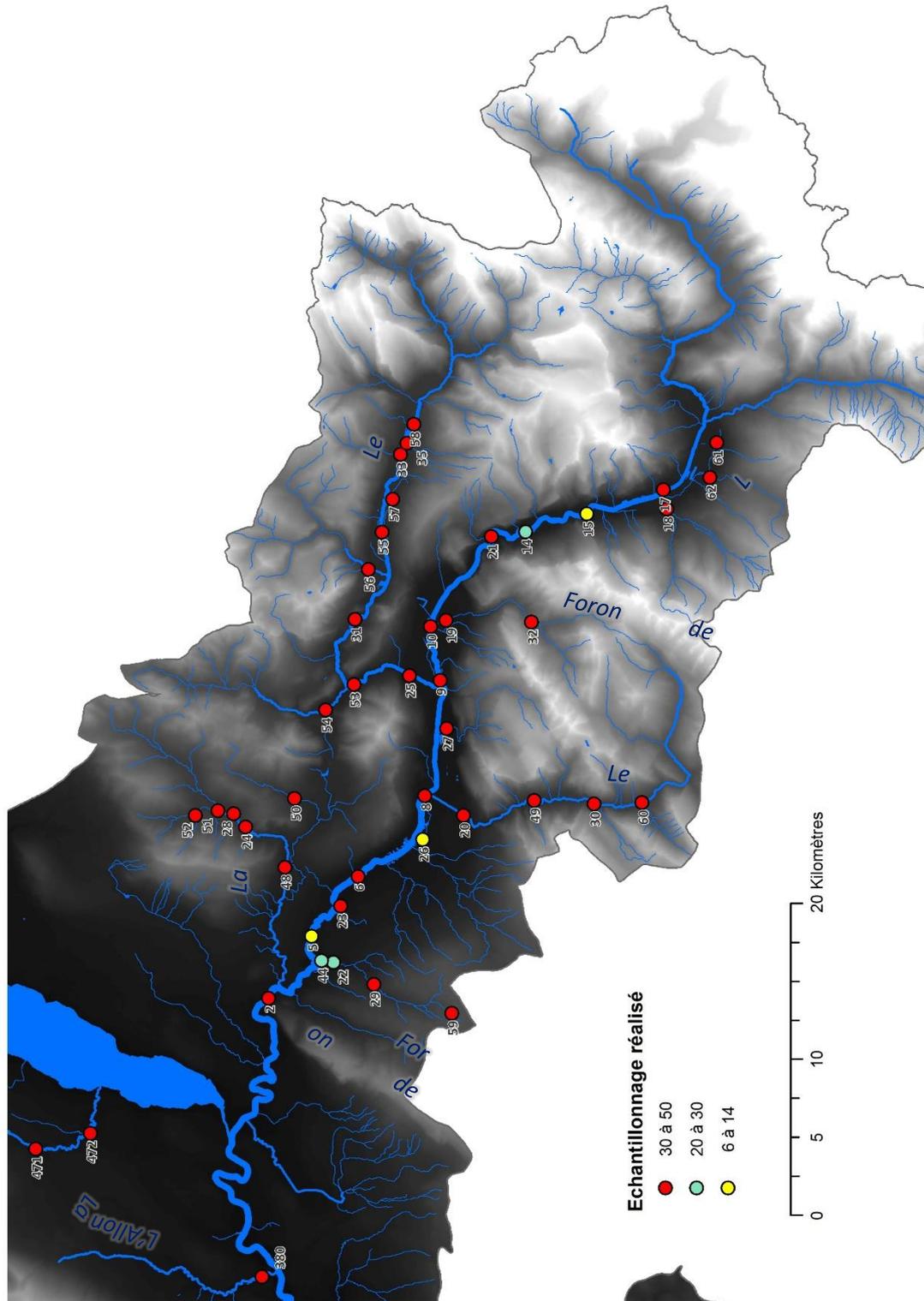
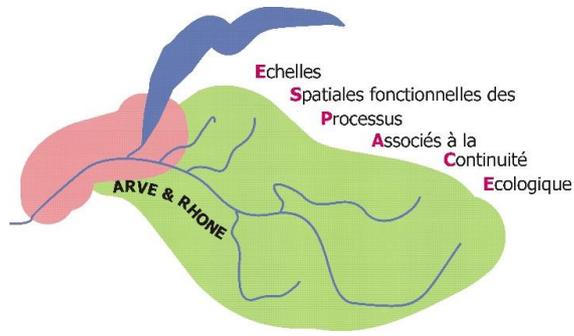


Figure 99 : Les 45 points d'échantillonnage de chabot



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

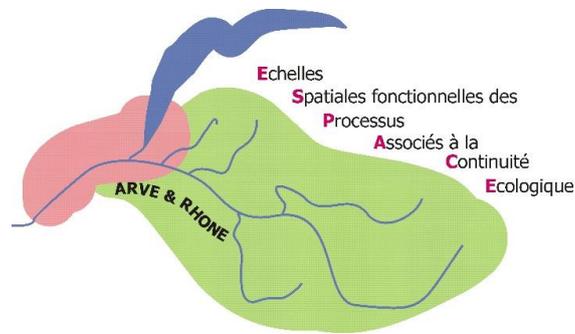


Tableau 31 : Tables synthétisant la composition des 2 kits multiplex (Cg1 et Cg2)

Les 2 tableaux résumant les marqueurs utilisés, le motif répété correspondant, la coloration qui leur a été associée et la gamme de taille des fragments correspondants en paire de bases (pb)

Locus	Motif de base	Fluorochrome	Gamme de taille (pb)	
Cott708#	AC	FAM	97	107
Cco17	AAG	FAM	120	191
Cott686	GCA	FAM	234	254
CottES1#	AG	NED	80	92
LCE59	TG	NED	163	221
LCE88	AG	NED	238	261
Cott150#	GT	PET	92	117
Cott255	CT	PET	179	206
Cott138	CA	PET	271	296
Cott210#	GT	VIC	88	141
CottE13	GT	VIC	147	183
Cott588	TG	VIC	229	314

Locus	Motif de base	Fluorochrome	Gamme de taille (pb)	
Cgo1033PBBE	CA	FAM	90	112
LCB16	AC	FAM	149	174
LCE89	TATC	FAM	199	280
LCE43#	TG	A550	116	148
LCE46	TG	NED	189	197
CottE10	AC	NED	264	346
Cott687#	CT	PET	123	153
LCE78	TG	A565	186	196
Cgo56MEHU	GT	PET	231	280
Cott105	CA	PET	321	352
CottE6#	GT	VIC	72	85
Cgo1114PBBE	(GT)7.TT(GT)	VIC	121	127
LCE51	GT	YKY	244	296

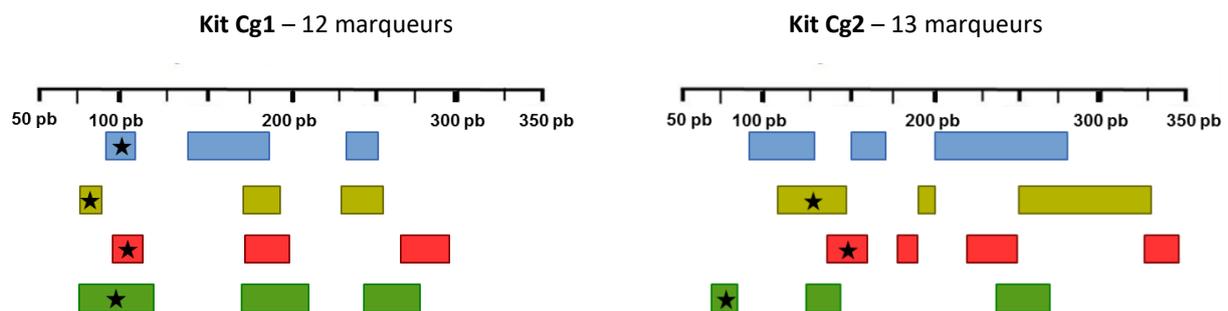


Figure 100 : Schémas illustrant les 2 kits d'amplification (Cg1 et Cg2)

Les marqueurs sont représentés en fonction de leur coloration et de la taille des fragments (les marqueurs signalés par une étoile correspondent aux amorces qui ont fait l'objet d'un « re-design »).

B. Extraction de l'ADN et analyses génétiques :

Pour chacune des stations échantillonnées, 35 individus ont été considérés pour les analyses génétiques (quand l'effectif d'échantillonnage le permettait), pour aboutir à un total de 1402 chabots pour lesquels l'ADN nucléaire a été extrait, puis amplifié pour 25 marqueurs microsatellites à l'aide des 2 kits multiplex. Les extractions d'ADN à partir des fragments de nageoire caudale ont été réalisées au Chelex 5%. Chaque mélange d'amplification (10 µl) était constitué de 2 µl d'ADN (concentré à environ 20 ng/µl), 5 µl de Quiagen Multiplex PCR Master Mix (2x), 0,2 µl de mélange d'amorces et 5,8 µl d'eau pure. Le détail des procédures d'extraction et d'amplification sont disponibles auprès des auteurs sur demande. Après amplification, les produits de PCR ont été envoyés au laboratoire CBGP²⁸ à Montpellier en vue du séquençage. Puis les résultats ont été génotypés à Marseille (IMBE) l'aide du logiciel GeneMapper v.5.0 (CHATTERJEE & PACTER, 2006) (**Figure 101**).

²⁸ CBGP : Centre de Biologie pour la Gestion des Populations – UMR INRA/IRD/CIRAD/Montpellier SupAgro



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

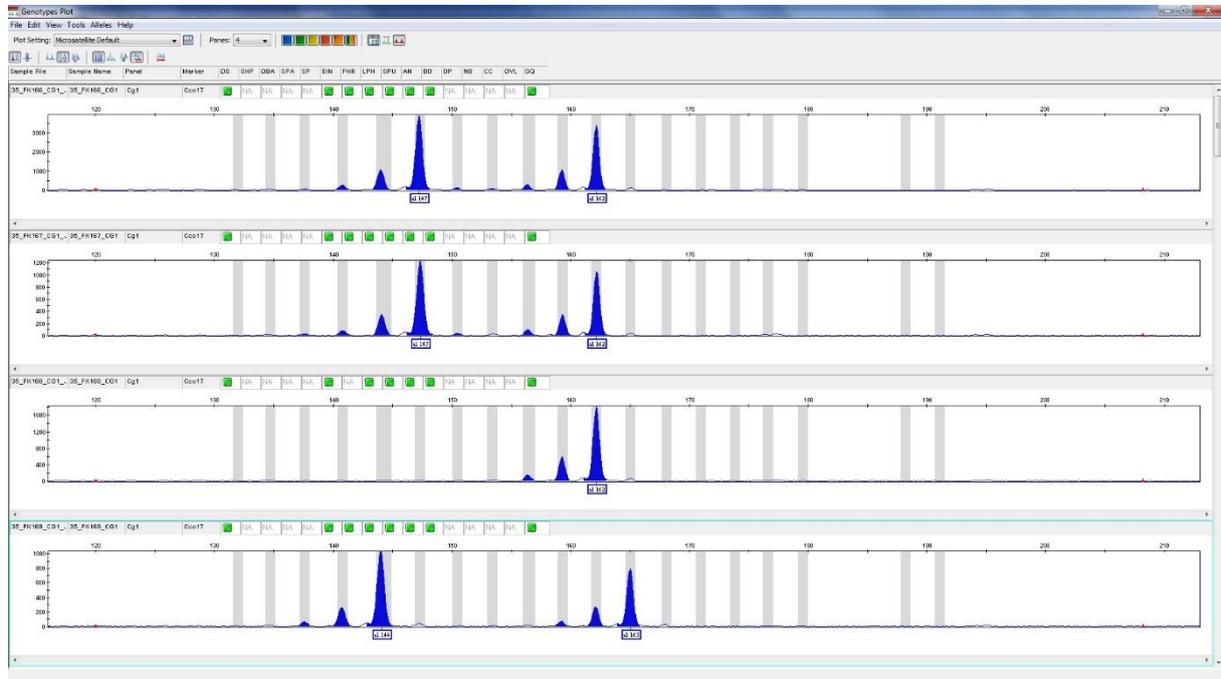
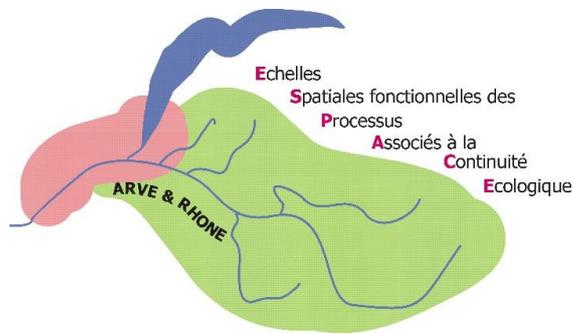


Figure 101 : Exemples de profils obtenus pour 4 individus différents concernant le locus microsatellite Cco17. Le nom des allèles correspond à la taille des fragments obtenus (147/162 pour les 2 premiers individus hétérozygotes, 162/162 pour le troisième individu homozygote, 144/165 pour le dernier individu hétérozygote)

Ce qui nous intéresse ici, c'est d'identifier les allèles présents dans l'échantillon pour chacun des 25 marqueurs. En effet, la première étape des analyses génétiques consiste à caractériser chacune des 45 stations d'échantillonnage en fonction des fréquences alléliques qu'on y a observées.

Suite au génotypage, 2 marqueurs ont été laissés de côté (LCB16 et CottE6) car ils présentaient des allèles nuls pour certaines stations²⁹. Les traitements de données qui suivent correspondent donc à l'analyse des 23 microsatellites restants.

3) Traitements de données et analyses statistiques

A. Descripteurs à l'échelle des 45 stations

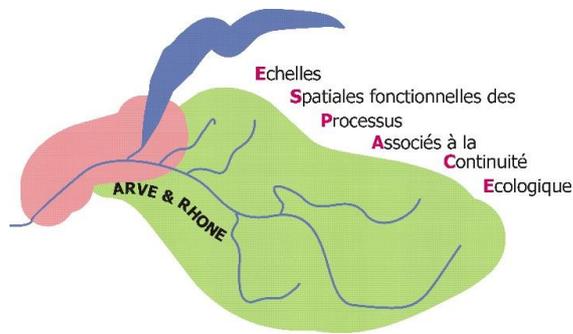
Les amplifications ont fonctionné pour 1340 individus sur le total de 1402. Le package 'DiveRsity' (KEENAN *et al.*, 2013) du logiciel R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008) a été utilisé pour évaluer le nombre d'allèles par locus (**A**), la richesse allélique (**Ar**), les taux d'hétérozygotie observée (**Ho**) et attendue (**He**), et le coefficient de consanguinité (**Fis**). La richesse allélique a ensuite été réévaluée par

²⁹ Pour les microsatellites, l'existence d'allèles nuls correspond le plus souvent à l'apparition d'une mutation dans la séquence flanquante du locus considéré, au niveau de certaines paires de bases correspondant aux amorces utilisées, ce qui empêche l'amplification correcte de cet allèle (DE MEEUS, 2012).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



raréfaction, en laissant de côté les stations 05, 15 et 26 (qui comptabilisent respectivement 6, 8 et 17 individus – cf. points jaunes sur la **Figure 99**), afin de pouvoir estimer cette richesse allélique pour un effectif minimum conséquent de 24 individus.

Les écarts à l'équilibre d'Hardy-Weinberg (EHW) ont été testés statistiquement à l'aide du logiciel GENEPOP v.4.0 (Option1 : « *Hardy-Weinberg exact test* », sous-option3 : « *Probability test* ») pour chacune des 45 stations, et ce, pour chacun des 23 marqueurs microsatellites (RAYMOD & ROUSSET, 1995 ; ROUSSET, 2008). Puis les valeurs renvoyées par les différents tests ont été ajustées en utilisant la correction de BENJAMINI & HORCHBERG (1995) concernant les comparaisons multiples avec pour seuil de décision $\alpha = 0,05$.

Le package 'DiveRsity' (logiciel R) a également été utilisé pour calculer la différenciation génétique existant entre paire de stations, évaluée à partir du **Fst** (WEIR & COCKERHAM, 1984). Dans le but de tester l'existence d'un patron d'isolement par la distance (IBD), cette mesure de distance génétique entre stations (Fst) a été confrontée à la distance hydrologique séparant ces mêmes stations (= longueur de cours d'eau mesurée en kilomètres). Dans la même perspective, nous avons voulu tester l'hypothèse d'une différenciation génétique entre stations liée, non pas aux distances kilométriques les séparant, mais aux nombres d'ouvrages situés entre les stations (cf. Annexe 19). Puis, nous avons cherché à évaluer l'influence relative de ces 2 types de distances (distance hydrologique et nombre d'ouvrages) sur la différenciation génétique existant entre paires de stations. Pour cela, des tests de Mantel, simples et partiels (MANTEL, 1967), ont été réalisés à l'aide du package 'EcoDist' (GOSLEE & URBAN, 2007) (logiciel R). Les tests partiels de Mantel permettent justement de tester statistiquement l'existence d'une corrélation entre 2 matrices de distances tout en contrôlant l'influence d'une troisième matrice sur cette corrélation.

B. Structuration génétique et taux de migrations entre stations :

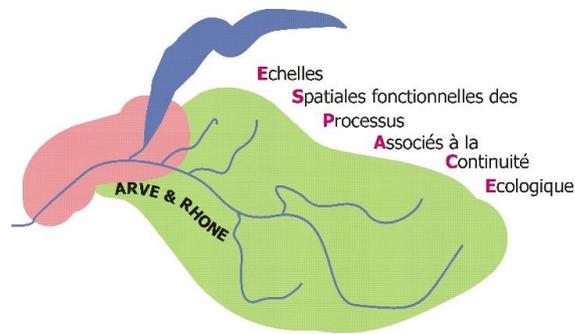
La représentation des différentes versions de chaque gène (= allèles) à l'intérieur de chaque échantillon, de même que la fréquence d'apparition de leurs combinaisons 2 à 2 (= génotypes), permettent de caractériser respectivement la structure allélique et la structure génotypique de chacune des stations échantillonnées. Ainsi, l'ensemble formé par la structure allélique et la structure génotypique permet d'évaluer la structure génétique des populations de chabots à l'échelle de l'Arve.

Pour cette étape du travail, nous avons utilisé un logiciel appelé 'STRUCTURE' v.2.3.4 (PRITCHARD *et al.*, 2000) dont le but est de grouper des individus en unités populationnelles sur la base de leur génotype. Au-delà, cette procédure permet également d'évaluer le degré de brassage génétique, d'inférer l'origine d'un allèle donné, mais surtout d'estimer le nombre de groupes génétiques différenciés représentés au sein de l'échantillon. En effet, si l'on s'intéresse à l'évolution du patrimoine génétique d'une espèce donnée, il est fondamental de pouvoir répartir les individus d'un échantillon au sein d'unités homogènes en termes de fonctionnement qui seront ensuite considérées comme unités de base pour la gestion.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



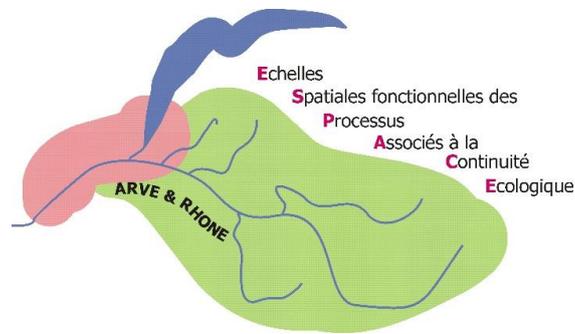
L'algorithme utilisé par STRUCTURE repose sur des principes d'analyse statistique bayésienne (probabilités conditionnelles). Sur la base des 1340 génotypes individuels correspondant aux 23 marqueurs microsatellites analysés, le but de la procédure est de déterminer le nombre « K » de groupes génétiquement différenciés (ou clusters) présents au sein de l'échantillon. Il s'agit ainsi d'évaluer la structure génétique correspondant au jeu de données en assignant les individus à des groupes en équilibre d'Hardy-Weinberg (= clusters génétiques), sans a priori sur leur localisation géographique ou leur appartenance à une station d'échantillonnage donnée. Le nombre de groupes génétiques est déterminé *a posteriori*. En effet, plusieurs valeurs de « K » sont testées et, pour chacune, STRUCTURE calcule la proportion du génome de chaque individu provenant des différents groupes génétiques inférés. Pour déterminer le nombre « K » le plus probable de clusters génétiques, les résultats STRUCTURE ont été analysés en ligne avec STRUCTURE HARVESTER (EARL *et al.*, 2012). Nous avons conduit cette analyse en utilisant le modèle avec mélange ou introgression supposant la corrélation des fréquences alléliques entre échantillons (« *admixture model with correlated allele frequencies among populations* »), en faisant varier les valeurs de K de 1 à 20, avec un burn-in de 100 000, suivi de 1 000 000 d'itérations (chaîne de Markov). Pour chaque valeur de K testée, 20 réplicats indépendants ont été réalisés.

Enfin, le logiciel 'BAYESASS' v.3.0.3 (WILSON & RANNALA, 2003) a été utilisé pour estimer les taux de migration récents et la direction de ces migrations entre chaque paire de stations échantillonnées. La procédure utilisée fait, ici aussi, appel aux statistiques bayésiennes et aux chaînes de Markov. Elle permet d'évaluer les flux de gènes récents ayant eu lieu, entre paires de stations, au cours des 2 à 3 dernières générations. Plus concrètement, si l'on considère le couple de stations [*i* ; *j*], la procédure permet d'estimer, à partir des fréquences alléliques multi-locus, la probabilité qu'un individu échantillonné à la station *i* soit un migrant provenant de la station *j*, et réciproquement. Il faut noter que l'algorithme utilisé par BAYESASS limite la proportion de migrants par génération à 1/3 des individus (la proportion de migrants ne peut pas excéder 33% par génération). Ainsi, la proportion d'individus sédentaires par génération ne peut pas être inférieure à 2/3 des individus (soit 66% par génération). Par conséquent, des taux de migration situés dans ces gammes de valeurs ne peuvent être considérés comme indicateurs de proportions réelles.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



C. Calcul des effectifs efficaces et détection de goulots d'étranglement :

Le but des analyses, évoquées ci-dessus, est de définir des unités homogènes en termes de fonctionnement pouvant servir de découpage de base pour les actions de gestions. A l'échelle de ces unités fonctionnelles, nous avons calculé les mêmes statistiques descriptives que pour les 45 stations d'échantillonnage (package 'DiveRsity'). De plus, 2 nouveaux traitements ont été réalisés.

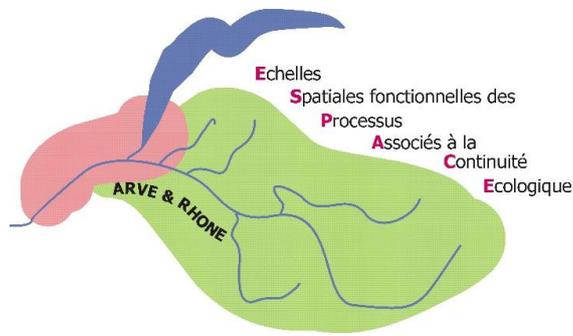
Tout d'abord, l'effectif efficace de chaque unité a été calculé avec le logiciel NeEstimator v2.01 (Do *et al.*, 2014) en utilisant la méthode du déséquilibre de liaison (LD) (HILL, 1981 ; WAPLES, 2006 ; WAPLES & DO, 2010). Le principe de cette méthode 'LD' est que la dérive génétique génère des associations non aléatoires entre les allèles à des loci différents (déséquilibre de liaison) quand l'effectif efficace (N_e) diminue (HILL, 1981). Il est dès lors possible d'utiliser le déséquilibre de liaison entre marqueurs pour estimer l'effectif efficace d'une population. Les valeurs obtenues ne doivent pas être comprises comme un effectif réel, mais plutôt considérées comparativement afin de détecter les unités les plus « à risque », sur lesquelles les efforts de conservation doivent être menés en priorité.

Enfin, la survenue éventuelle d'un goulot d'étranglement récent a été testée avec le logiciel 'BOTTLENECK' v1.2.01 (PIRY *et al.*, 1996 ; CORNUET & LUIKART 1997). En effet, dans une population ayant subi une réduction récente de ses effectifs, la diminution de la diversité allélique sera plus rapide que la réduction de l'hétérozygotie attendue sous l'EHW ($H_o > H_e$). Le test de rang de Wilcoxon, implémenté dans le logiciel, permet de déterminer si le nombre de marqueurs qui sont en situation d'excès, tel qu'il est attendu lors d'un effondrement démographique, est significatif ou non. Deux modèles de mutation, considérés comme les plus réalistes concernant l'évolution de marqueurs microsatellites (HÄNFLING & WEETMAN, 2006), ont été testés : (1) le modèle de mutation en 2 phases (TPM, *Two-Phase Mutation Model*) et (2) le modèle mutationnel pas à pas (SMM, *Stepwise Mutation Model*)



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



III. Résultats et Discussion

1) Diversité génétique à l'échelle des 45 stations :

- Richesse allélique / taux d'hétérozygotie observée et attendue / indice(s) de fixation -

Le nombre d'allèles observés par locus varie de 2 à 28, avec une moyenne de 11,4 allèles par locus. Ceci résulte en une richesse génotypique allant de 3 à 115 génotypes différents par locus (génotype pour 1 locus donné = combinaison de 2 allèles) (Annexe 20). Ainsi, sur l'ensemble des 1340 individus analysés, on observe un total de 262 génotypes différents pour les 23 loci considérés.

A l'échelle des stations, les taux d'hétérozygotie observée (H_o) et attendue (H_e) s'échelonnent respectivement de 0,20 à 0,58, et de 0,22 à 0,55 (cf. **Tableau 32** pour les résultats par station et Annexe 21 pour les résultats détaillés par marqueur pour chaque station). Sur l'ensemble des marqueurs, 2 stations présentent un écart significatif à l'équilibre d'Hardy-Weinberg (EHW) : les stations 10 (rivière de contournement de Scionzier) et 09 (seuil amont confluence Giffre), situées dans la partie médiane du cours de l'Arve. Ces 2 stations sont, par ailleurs, les seules à présenter des indices de fixation significatifs après correction (au seuil 0,05). En effet, les stations 10 et 09 affichent des F_{is} positifs, les plus élevés de tout l'échantillon, respectivement 0,187 et 0,162. Il semblerait que ce résultat révèle un « effet Wahlund » concernant ces 2 stations, c'est-à-dire un déficit en individus hétérozygotes par rapport à l'EHW, traduisant une subdivision des individus échantillonnés en plusieurs ensembles n'échangeant pas ou peu de gamètes (WAHLUND, 1928).

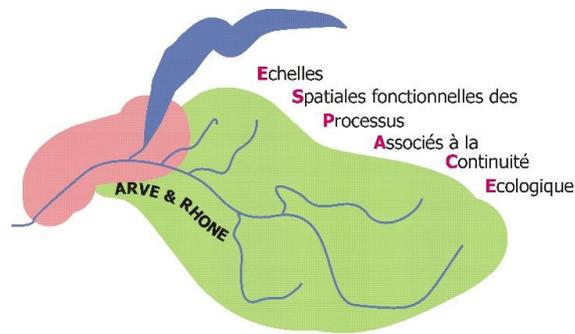
Tableau 32 : Statistiques descriptives concernant les 45 stations d'échantillonnage
(Voir détail des valeurs calculées sous le tableau)

station	nom	Cours d'eau / Localité	N	A	Ar	H_o	H_e	F_{is}	Fst moyen
61	61_Bialle1	Bialle	27	86	3,39	0,5	0,5	-0,011	0,193
62	62_Bialle2	Torrent d'Arbon	34	92	3,45	0,5	0,5	-0,014	0,19
17	17_Bialle3	Bialle	33	106	3,93	0,6	0,5	-0,033	0,169
18	18_Bialle4	Sallanche	34	92	3,58	0,5	0,5	0,011	0,211
32	32_Scionz1	Foron de Scionzier	34	56	2,32	0,3	0,3	-0,042	0,332
19	19_Scionz2	Foron de Scionzier	33	79	2,77	0,4	0,3	-0,041	0,325
58	58_Giffre.amont1	Giffre	24	57	2,41	0,4	0,3	-0,055	0,241
35	35_Giffre.amont2	Ruisseau de Verney	30	57	2,36	0,4	0,4	-0,054	0,224
33	33_Giffre.amont3	Valentine	30	64	2,54	0,4	0,4	0,043	0,217
57	57_Giffre.amont4	Rivière Enverse	27	51	2,13	0,3	0,3	0,029	0,309
55	55_Giffre.amont5	Giffre	27	57	2,37	0,4	0,4	-0,04	0,229
56	56_Giffre.amont6	Foron de Tanninges	29	46	1,92	0,3	0,3	0,015	0,327
31	31_Giffre.amont7	Giffre	29	61	2,32	0,4	0,4	-0,055	0,255
54	54_Risse	Risse	35	85	3,06	0,4	0,4	-0,031	0,245
53	53_Giffre.aval1	Giffre	33	92	3,26	0,5	0,5	0,028	0,192
25	25_Giffre.aval2	Giffre	27	97	3,41	0,5	0,5	0,009	0,186



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



station	nom	Cours d'eau / Localité	N	A	Ar	Ho	He	Fis	Fst moyen
60	60_Borne.amont1	Overan	33	96	3,67	0,5	0,5	-0,044	0,239
30	30_Borne.amont2	Borne	30	89	3,55	0,5	0,5	-0,005	0,229
49	49_Borne.aval1	Borne	34	93	3,57	0,5	0,5	-0,091	0,201
20	20_Borne.aval2	Borne	34	102	3,87	0,5	0,5	0,039	0,177
59	59_Reign.amont1	Foron de Reignier	35	43	1,87	0,3	0,3	0,004	0,376
29	29_Reign.amont2	Foron de Reignier	32	45	1,88	0,3	0,3	-0,018	0,376
22	22_Reign.aval1	Foron de Reignier	25	97	3,45	0,5	0,5	0,014	0,222
44	44_Reign.aval2	Foron de Reignier	24	93	3,44	0,4	0,5	0,057	0,205
52	52_Menoge1	Manant	33	42	1,77	0,2	0,2	-0,03	0,391
51	51_Menoge2	Brevon de Saxel	34	48	2	0,3	0,2	-0,023	0,367
28	28_Menoge3	Menoge	35	45	1,85	0,2	0,2	0,076	0,369
24	24_Menoge4	Menoge	35	46	1,81	0,2	0,2	0,031	0,378
48	48_Menoge5	Menoge	30	55	2,12	0,3	0,3	-0,037	0,35
50	50_Fillinges	Foron de Fillinges	33	43	1,74	0,3	0,3	-0,013	0,413
21	21_Arve.amont3	Ruisseau de Balme	35	89	3,51	0,5	0,5	0,009	0,2
27	27_Bronze	Bronze	35	101	3,61	0,5	0,5	-0,06	0,191
26	26_Brachouet	Brachouet	[17]	81	[2,78]	0,4	0,5	0,04	0,191
23	23_Bordes	Ruisseau des Bordes	31	52	2,17	0,3	0,3	-0,024	0,312
15	15_Arve.amont1	Arve	[8]	74	[2,70]	0,5	0,5	-0,083	0,227
14	14_Arve.amont2	Arve	23	111	4,09	0,6	0,6	-0,071	0,166
10	10_Arve.inter1	Arve	30	101	3,7	0,4	0,5	0,187 *	0,252
9	09_Arve.inter2	Arve	31	103	3,58	0,4	0,5	0,162 *	0,167
8	08_Arve.aval1	Arve	29	111	3,76	0,5	0,5	0,018	0,211
6	06_Arve.aval2	Arve	35	123	4,24	0,6	0,5	-0,016	0,149
5	05_Arve.aval3	Arve	[6]	78	[2,92]	0,5	0,5	-0,062	0,185
2	02_Arve.aval4	Arve	30	136	4,63	0,5	0,5	0,017	0,148
471	471_Versoix.Sauv	Versoix	35	104	3,87	0,5	0,5	-0,015	0,256
472	472_Versoix.Bossy	Versoix	34	114	3,83	0,5	0,5	0,038	0,256
380	380_Allondon	Allondon (eaux froides)	28	72	2,67	0,4	0,4	0,029	0,344

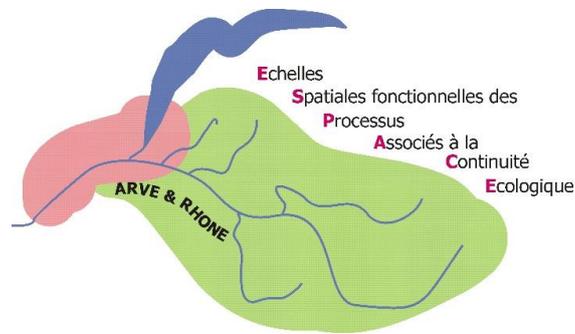
N : nombre de chabots étudiés ; **A** : nombre d'allèles observés sur 23 marqueurs ; **Ar** : richesse allélique estimée par raréfaction (pour un effectif minimum de 24 individus, sauf pour les valeurs entre crochets) ; **Ho** : taux d'hétérozygotie observée ; **He** : taux d'hétérozygotie attendue ; **Fis** : Déficit d'hétérozygotes (coefficient de consanguinité)(déviations significatives par rapport à l'équilibre d'Hardy-Weinberg en gras, marquées d'un astérisque*) ; **Fst moy** : indice moyen de différenciation génétique (cf. partie suivante p.13)

Chaque groupe de stations correspondant à un affluent donné est coloré avec une même couleur, les stations situées sur des affluents isolés ou sur le cours d'eau principal apparaissent en blanc.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



La carte représentant la richesse allélique (**Figure 102**) met en évidence une diversité importante au niveau du cours de l'Arve, de même qu'au niveau du Borne, de la partie aval du Giffre et de la Versoix. Cependant, cette carte pointe également l'existence de stations caractérisées par une faible richesse allélique. Il s'agit tout d'abord de la **Menoge** (st.51-52-28-24-48) et de la partie **amont du Foron de Reignier** (st.59-29), mais aussi (dans une moindre mesure) du **ruisseau des Bordes** (st.23) et des parties **amonts du Giffre** (st.58-35-33-57-55-56-31) et du **Foron de Scionzier** (st.32).

Il faut rappeler ici que les microsatellites sont des marqueurs neutres, c'est-à-dire non soumis à la sélection. Cependant, la faible richesse allélique des marqueurs microsatellites au niveau de ces stations dénote une diminution de la diversité génétique et laisse envisager une éventuelle diminution du potentiel adaptatif qui pourrait mettre en jeu leur viabilité à court terme.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

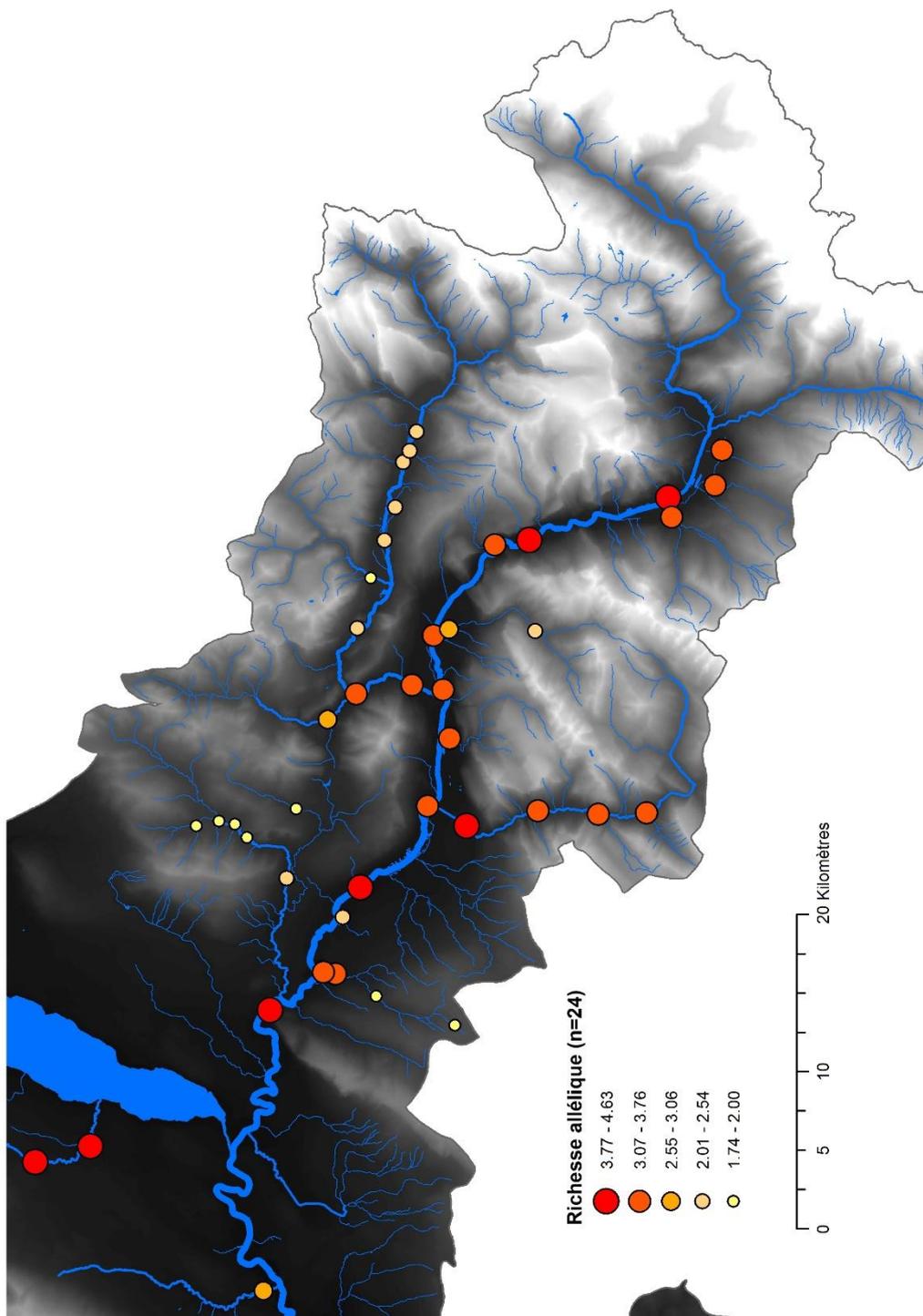
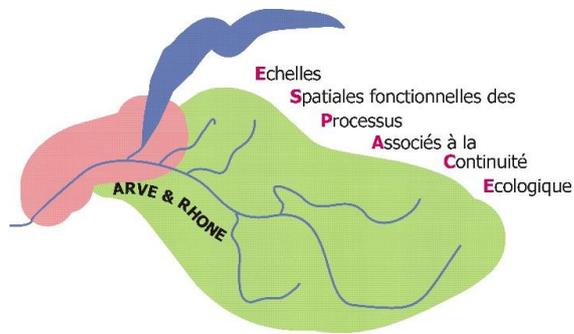
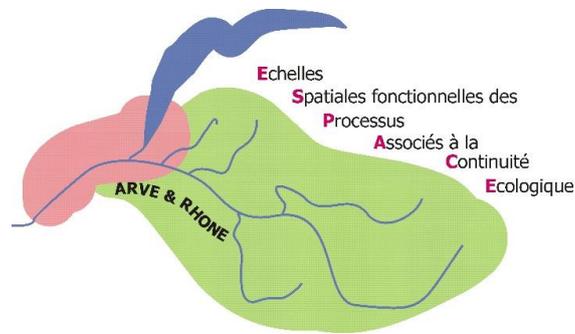


Figure 102 : Richesse allélique estimée par raréfaction pour un effectif minimum de 24 individus



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



2) Différenciation génétique :

- Fst vs. Distances hydrologiques / Fst vs. Nombre d'ouvrages -

L'indice Fst exprime la diminution de l'hétérozygotie liée à la divergence entre une station considérée et l'échantillon global (constitué ici par la paire de stations). Cet indice est ainsi utilisé pour estimer la différenciation génétique entre paires de stations (WRIGHT, 1969 ; WEIR & COCKERHAM, 1984). La première chose à noter ici concernant le chabot est la très forte différenciation génétique des stations échantillonnées considérées 2 à 2, avec un Fst moyen de 0,25 [± 0,13]. A titre de comparaison, WRIGHT (1969) considère les seuils suivants :

- un Fst compris entre 0 et 0,05 dénote une faible différenciation,
- un Fst compris entre 0,05 et 0,15 révèle une différenciation modérée,
- un Fst compris entre 0,15 et 0,25 traduit une différenciation forte,
- et une valeur de Fst supérieure à 0,25 illustre une différenciation génétique considérée comme très importante.

Le jeu de données reflète donc une très forte différenciation génétique entre stations à l'échelle globale (Annexe 22).

De façon générale, les valeurs de Fst obtenues pour les 990 paires de stations possibles s'échelonnent de 0,008 (indiquant une absence de différenciation) à 0,56 (soulignant une forte divergence entre stations). Concernant les valeurs de Fst les plus faibles (inférieures à 0,01), celles-ci s'observent, par exemple, pour la comparaison entre les stations 14 et 17 au niveau de l'amont de l'Arve, ou encore entre les stations 02 et 05 de l'aval de l'Arve, distantes respectivement de 9 et 7 km. Inversement, les valeurs de Fst les plus fortes (supérieures à 0,55) s'observent, comme attendu, pour des comparaisons entre stations éloignées en termes de distances kilométriques. Il s'agit par exemple des comparaisons entre les stations 52 (Menoge) et 32 (Foron de Scionzier), ou entre les stations 57 (Giffre amont) et 48 (Menoge), distantes respectivement de 60 et 70 km.

Nous avons donc cherché, dans un second temps, à évaluer la façon dont la distance kilométrique entre stations (mesurée le long du cours d'eau) pouvait influencer la distance génétique, mesurée à partir de l'indice Fst. De la même façon, nous avons aussi cherché à évaluer si le nombre d'ouvrages situés entre 2 stations pouvait jouer sur cette différenciation génétique. Pour cela, des tests de Mantel, simples et partiels, ont été réalisés (**Tableau 33**).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

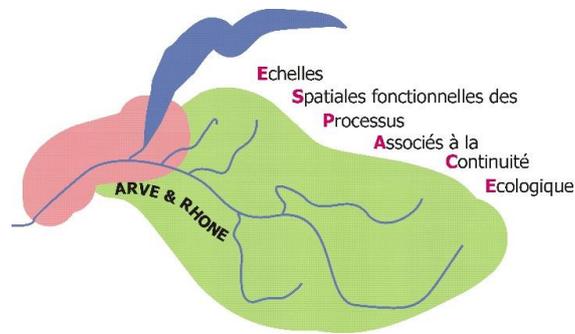


Tableau 33 : résultats des tests de Mantel (simples et partiels) comparant les effets de la distance hydrologique et du nombre d'ouvrages séparant les stations sur leur différenciation génétique (Fst)

R (mantel) : coefficient de corrélation ; **R²** : coefficient de détermination ajusté ; **P valeur** : probabilité d'observée une telle corrélation sous l'hypothèse d'une absence de corrélation (***p* < 0,001, **p* < 0,05, n.s. non significatif).

Comparaison	r	R ²	P
Tests simples :			
Fst vs. Distance hydrologique	0,47	0,22	0,001
Fst vs. Nombre d'ouvrages	0,34	0,12	0,001
Tests partiels :			
Fst vs. Distance hydrologique / ouvrages	0,35	-	0,003
Fst vs. Nombre d'ouvrages / dist. hydro.	-0,03	-	0,785

Ces tests révèlent tout d'abord un effet significatif de la distance hydrologique, de même que du nombre d'ouvrages séparant les stations, sur la différenciation génétique. Cependant, si l'influence de la distance hydrologique reste significative lorsque l'on contrôle l'impact du nombre d'ouvrages sur la corrélation, l'inverse n'est pas vérifié. En effet, l'influence du nombre d'ouvrages sur la différenciation génétique entre stations n'est plus significative lorsque l'on contrôle l'effet de la distance hydrologique sur cette corrélation. Ainsi, il apparaît que l'influence des ouvrages sur la différenciation génétique reste confondue avec celle des distances hydrologiques. Cette conclusion est, somme toute, logique puisque plus on accumule de distance entre les stations, plus on accumule potentiellement d'ouvrages.

On a donc réalisé le même traitement en ne prenant en compte, cette fois-ci, que les ouvrages évalués comme infranchissables pour les petites espèces benthiques (code 5 dans la base ouvrages de la FDPMA74 – CHASSERIEAU, 2010). Cependant, si l'on augmente le coefficient de corrélation concernant le test de Mantel simple ($r_{\text{ouvrages}} = 0,37^{***}$), le test de Mantel partiel reste non significatif ($r_{\text{partiel}} = 0,15$ n.s. lorsque l'on contrôle l'influence de la distance hydrologique sur la corrélation).

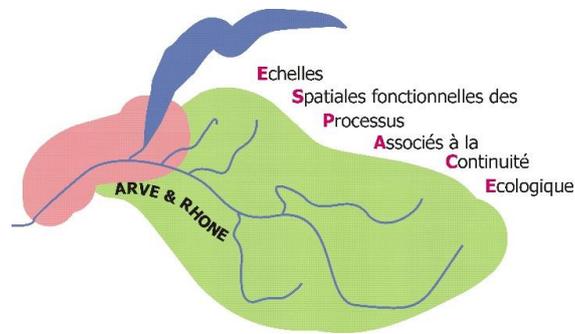
Il semblerait donc que, pour cette espèce peu mobile que représente le chabot, la forte différenciation génétique observée entre stations soit plus le reflet de la biogéographie que d'impacts anthropiques liés à la présence d'ouvrages ou de barrières physiques le long du cours d'eau. Ceci ne veut pas dire que les ouvrages n'ont pas d'impact, mais seulement que leur effet reste confondu, d'un point de vue statistique, avec celui des distances hydrologiques ; le test de Mantel ne permettant pas de démêler leurs influences respectives sur la différenciation génétique.

On observe ainsi un patron d'isolement par la distance qui met en évidence une influence prépondérante des flux de gènes à faible distance, augmentant la similarité entre stations quand celles-ci sont proches en termes de distance hydrologique. A l'inverse, quand les stations sont éloignées, l'influence de la dérive génétique se fait plus forte et tend à augmenter la différenciation entre stations, chacune acquérant des originalités génétiques de façon isolée (**Figure 103**). Cependant, la forme du nuage de points au niveau de la **Figure 104** nous permet de nuancer ce patron général et, surtout, nous renseigne sur l'influence relative des flux de gènes et de la dérive concernant la



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



différenciation génétique entre stations. En effet, une fois la forme théorique du patron d'isolement par la distance reportée sur le graphe (HUTCHINSON & TEMPLETON, 1999), apparaissent 2 séries de points représentant des écarts importants par rapport à ce patron théorique.

La première série de points, mise en lumière par une ellipse rouge, illustre des comparaisons entre stations proches en termes de distance hydrologique et pourtant particulièrement différenciées du point de vue génétique. On y observe ainsi des stations, distantes pour certaines de moins de 10km, et qui présentent pourtant des F_{st} proches de 0,50. Ce premier nuage de points concerne essentiellement des paires de stations impliquant l'amont du Foron de Reignier (stations 59 et 29) ou la Menoge (stations 51-52-28-24-48 et 50). Il est important de rappeler ici que ces stations sont les mêmes qui présentaient une faible richesse allélique (**Tableau 32** et **Figure 102**). Cette faible diversité génétique, associée à une très forte différenciation par rapport aux autres stations, est le signe d'un isolement important. Ces écarts mettent en évidence l'influence prépondérante de la dérive génétique sur la différenciation de ces stations qui apparaissent isolées par rapport au reste de l'échantillonnage. Cette différenciation importante se retrouve d'ailleurs traduite au niveau des F_{st} moyens (**Tableau 32**), avec une valeur de 0,38 pour les 2 stations situées à l'amont du Foron de Reignier et des valeurs s'étalant de 0,35 à plus de 0,40 pour les différentes stations situées sur la Menoge et ses affluents.

Inversement, on observe dans la partie inférieure du graphe une deuxième série de points, (mise en évidence par l'ellipse jaune) qui représentent des stations relativement éloignées en termes de distance hydrologique (20 à 60 km), tout en présentant des F_{st} inférieurs ou de l'ordre de 0,10, dénotant une différenciation génétique faible à modérée. C'est le cas par exemple des stations 08 et 02 à l'aval de l'Arve, distantes de plus de 25 km, et pour lesquelles on observe un F_{st} inférieur à 0,05, indiquant une absence de différenciation. Ainsi, les points correspondant à cette 2^{ème} série concernent des comparaisons impliquant à chaque fois au moins une des stations situées sur l'aval du cours de l'Arve (stations 08-06-05 ou 02).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

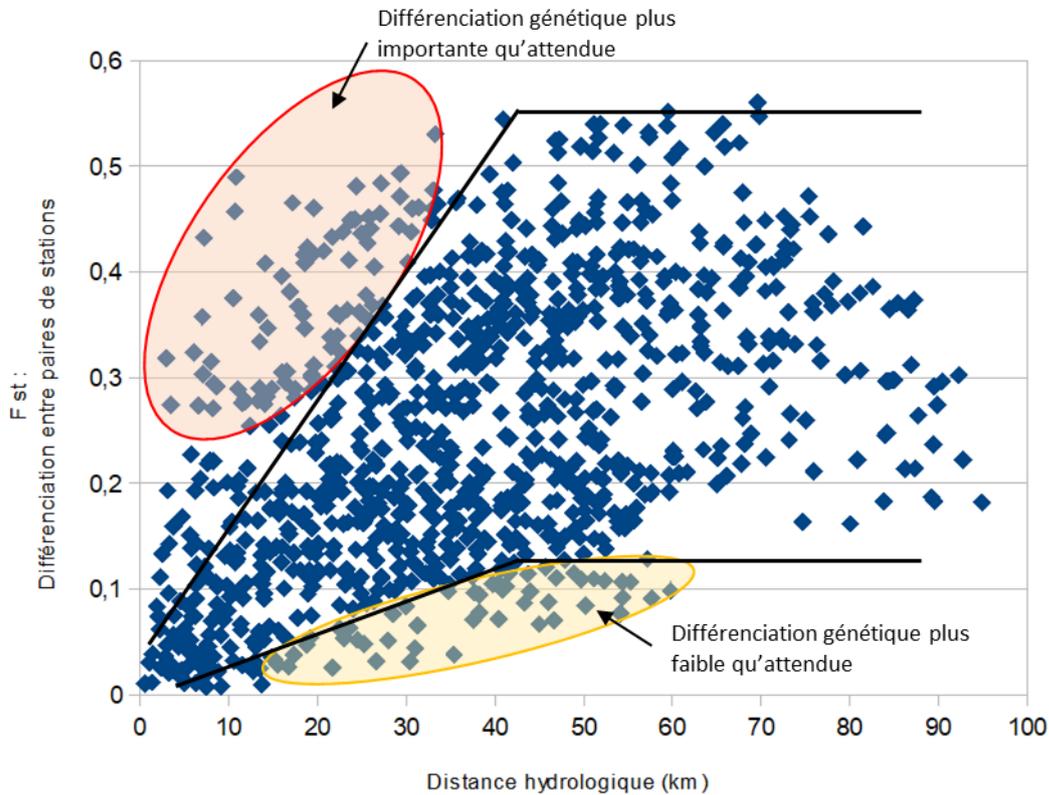
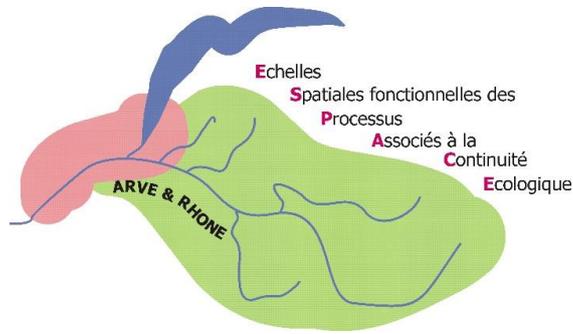


Figure 103 : Relation entre distance hydrologique (km) et distance génétique (Fst) pour les 990 paires de stations.

A ce sujet, le cas de la station 02, qui correspond au point d'échantillonnage le plus aval situé sur le cours de l'Arve, mérite d'être discuté. Cette station présente de façon générale, des Fst plus faibles que la moyenne. On y observe d'ailleurs le plus faible des Fst moyens ($F_{st\ 02} = 0,148$) qui reflète une certaine ressemblance globale avec les autres stations échantillonnées, ou tout du moins une différenciation moins marquée qu'ailleurs (Tableau 32). Nous y reviendrons plus tard, mais ceci illustre la tendance du chabot à la dévalaison. Ce mouvement naturel, dans le sens de l'écoulement, place la station 02 sous l'influence des différentes stations situées en amont en termes de composition génotypique et explique la plus faible différenciation de cette station située en aval.

3) Structuration génétique des 45 stations :

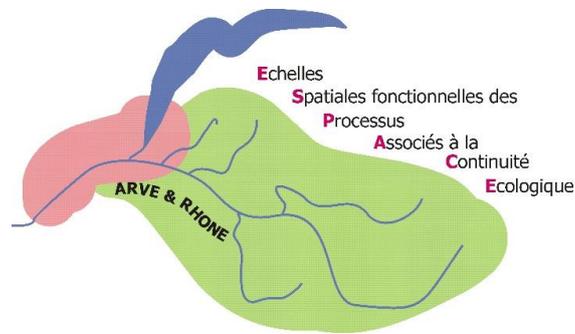
Nombre de groupes génétiques représentés par les 45 stations / Assignation des individus

Suite à ces premiers résultats quantitatifs visant à caractériser les 45 stations d'échantillonnage, nous allons maintenant nous intéresser à leur composition génétique d'un point de vue qualitatif. A l'aide du logiciel STRUCTURE, nous avons cherché à évaluer le nombre de groupes



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



génétiquement différenciés (clusters) représentés par les stations échantillonnées, et comment les 1340 individus génotypés étaient assignés à chacun de ces groupes.

Les analyses réalisées avec STRUCTURE soutiennent l'existence de 10 groupes génétiques différenciés dont la répartition spatiale révèle un patron d'organisation fortement lié à la biogéographie de la région (**Figure 104**). En effet, sur la carte apparaissent 10 groupes génétiques (K1 à K10), chacun mis en évidence par une couleur différente. Les diagrammes circulaires, quant à eux, représentent pour chaque station la proportion d'individus assignés à chacun de ces 10 clusters. On se rend compte au premier coup d'œil sur cette carte que chacun des affluents correspond à une couleur différente, c'est-à-dire à un groupe génétique différent :

- Bialle et partie amont de l'Arve : cluster beige '●'
- Foron de Scionzier : cluster marron '●'
- Giffre amont : cluster bleu foncé '●'
- Risse et Giffre aval : cluster orange '●'
- Borne : cluster bleu turquoise '●'
- Foron de Reignier : cluster jaune '●'
- Menoge : cluster rose '●'
- Ruisseau des Bordes : cluster gris vert '●'
- Versoix (Suisse) / Foron de Fillinges : cluster vert '●'
- Allondon (Suisse) : cluster rouge '●'

Ce résultat est d'autant plus fort, que le logiciel STRUCTURE ne prend pas en compte la localisation géographique des stations. Le programme ne se base que sur la probabilité *a posteriori* que le génotype d'un individu donné soit assigné aux différents groupes (ou clusters) génétiques inférés.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

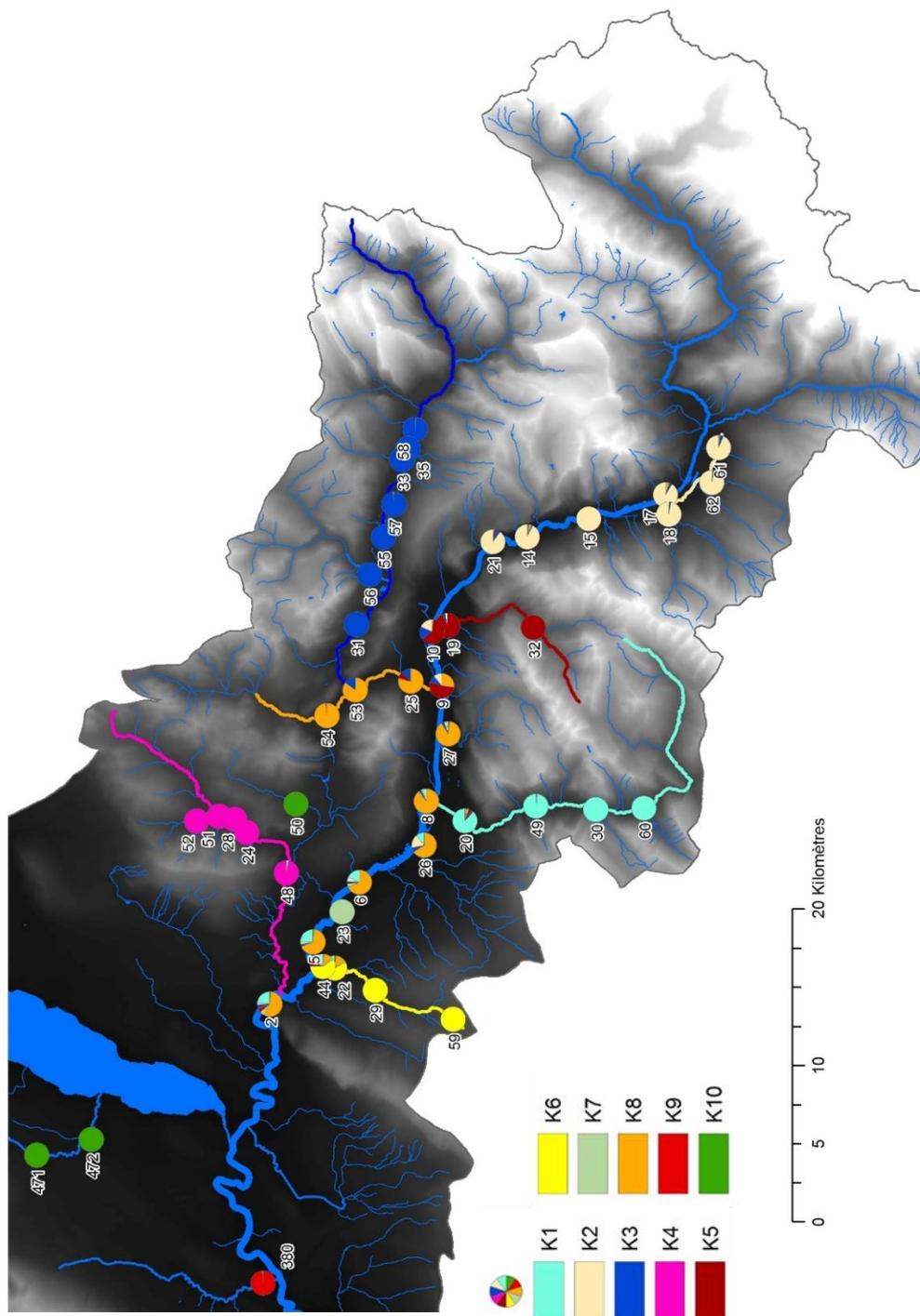
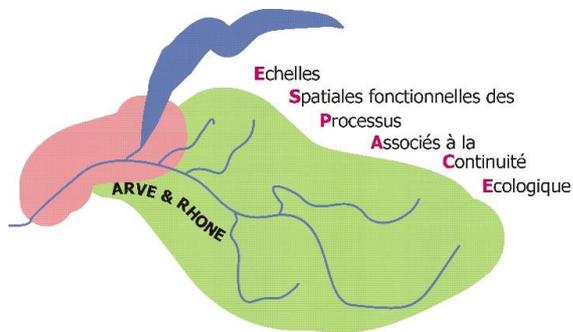


Figure 104 : Carte illustrant la structuration génétique des stations échantillonnées. Chaque couleur correspond à un cluster génétique différencié et les diagrammes circulaires schématisent la proportion d'individus de chaque station assignés à un cluster donné.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

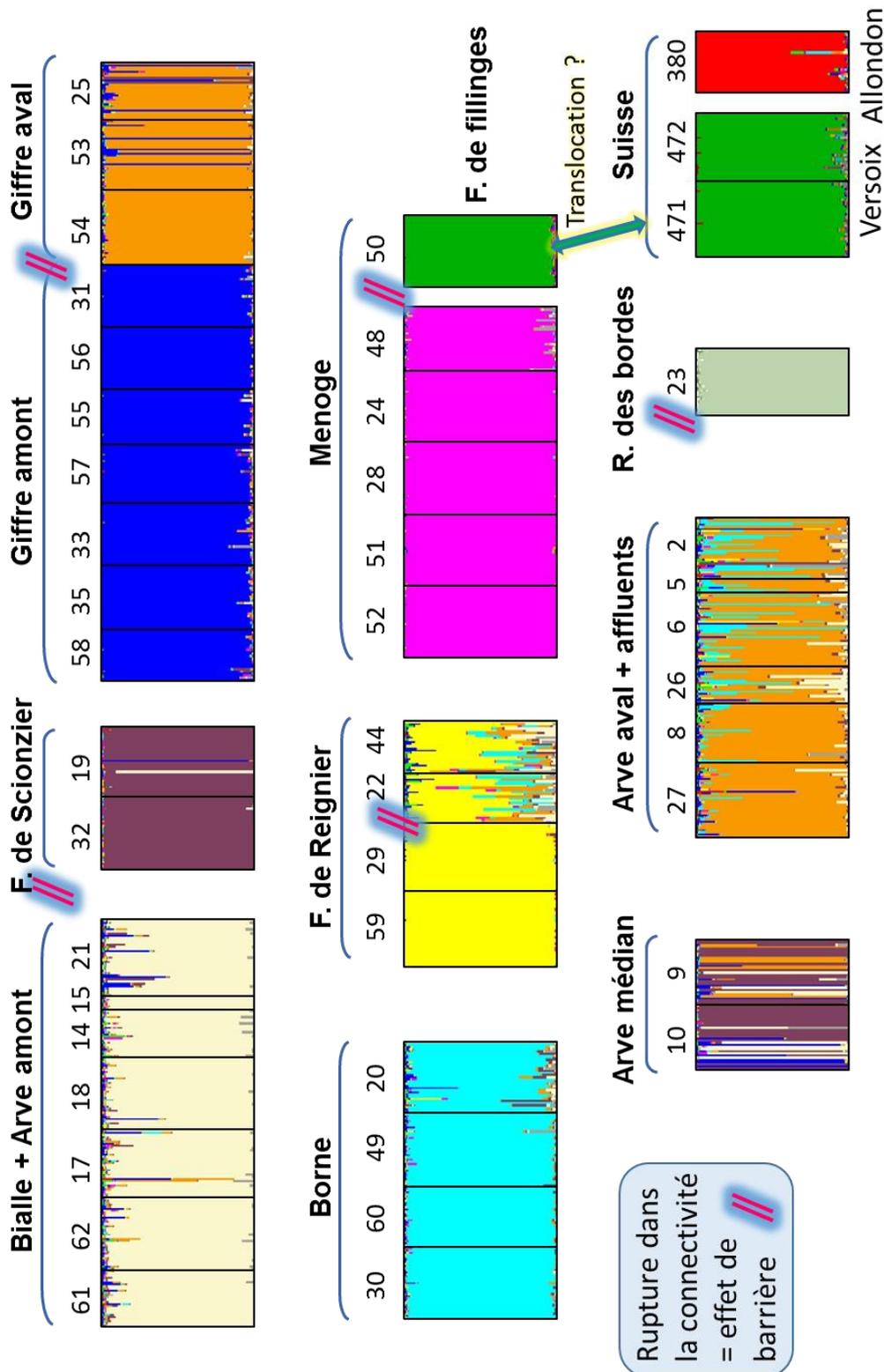
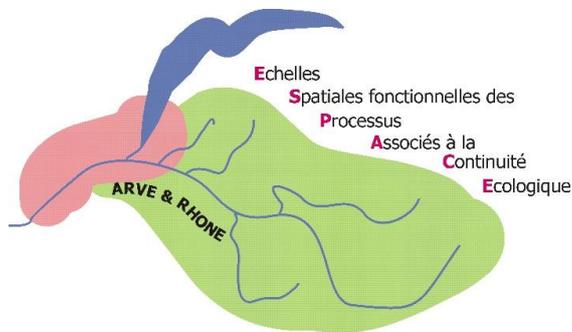


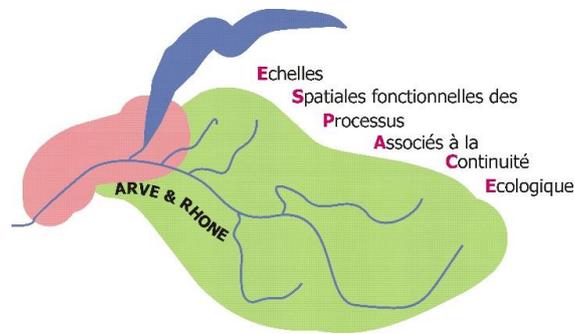
Figure 105 : Diagrammes représentant pour chacune des stations (cadres noirs) l'assignation des individus (1 barre verticale = 1 individu) aux différents clusters génétiques.

Les stations sont ordonnées d'amont en aval au sein de chaque affluent. Les différents affluents sont eux-mêmes ordonnés (de gauche à droite et de haut en bas) selon leur localisation d'amont en aval. La dernière ligne concerne les stations d'échantillonnage situées sur le cours d'eau principal (Arve), ainsi que les affluents isolés (1 seule station par affluent) et les 3 stations localisées en Suisse.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Cependant, la carte met aussi en évidence des ruptures franches dans l'assignation aux différents clusters génétiques. Ce type de ruptures s'observe ainsi, par exemple, entre la partie amont de l'Arve, comprenant la Bialle et la Sallanches (cluster **beige**), et la partie médiane de l'Arve. De même, un changement d'assignation brutal apparaît entre l'amont et l'aval du Giffre (respectivement, clusters **bleu foncé** et **orange**). Ces ruptures sont particulièrement visibles au niveau de la **Figure 105**.

Cette figure correspond au même résultat que celui de la carte, représenté cette fois-ci, non plus au niveau des stations (**Figure 104**), mais au niveau des individus (**Figure 105**). Chaque individu est représenté par une barre verticale dont les différentes couleurs correspondent aux proportions de son génotype assignées à chacun des 10 clusters génétiques. Les individus sont regroupés par stations, mises en évidence par les rectangles noirs. Cette représentation est intéressante car elle permet de distinguer les individus issus de brassages génétiques entre clusters, des individus assignés exclusivement à un seul groupe génétique. On voit apparaître ici une discrimination très marquée des différents affluents, avec de nombreuses stations dont les individus ne présentent que très peu de mélange entre clusters.

Ainsi, **la Bialle, la Sallanches et l'Arve amont** (st.61-32-17-18-14-15 et 21) constituent, ensemble, une unité assez homogène, avec une majorité d'individus assignés exclusivement au cluster **beige**. On observe cependant quelques chabots (une 10^{aine} d'individus sur 194) dont le génotype correspond à un mélange entre ce cluster **beige** et les clusters **orange**, **bleu foncé**, et/ou **marron**. Ceci met en évidence des possibilités sans doute restreintes, mais bien présentes, de montaisons permettant un brassage génétique entre individus issus du Giffre amont, du Giffre aval, voire du Foron de Scionzier, et individus issus de l'amont de l'Arve.

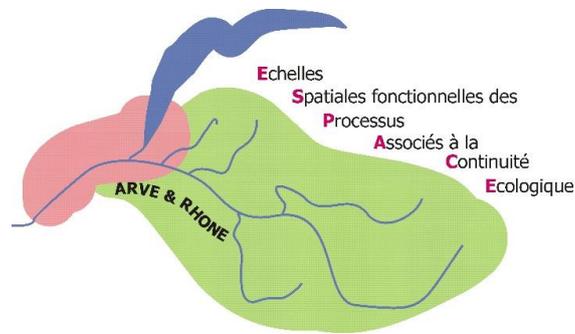
Le **Foron de Scionzier** (station 19 et 32), quant à lui, ressort encore plus homogène, avec la totalité de ses individus assignés au cluster **marron**, à l'exception de seulement 2 individus. Ces 2 individus semblent correspondre à 2 primo-migrants, l'un étant exclusivement assigné au cluster **bleu foncé** (Giffre amont), l'autre étant exclusivement assigné au cluster **orange** (Giffre aval).

Une rupture apparaît ensuite au niveau du **Giffre**, elle se situe au niveau du secteur de gorges en amont du barrage de Mieussy et de la confluence Giffre/Risse, située entre les stations 31 et 53. En effet, concernant les stations localisées en amont de ce secteur (st. 58-35-33-57-56 et 31), tous les individus (soit 196) sont assignés au cluster **bleu foncé**, sans qu'il n'y ait trace de brassage avec d'autres groupes génétiques. A l'inverse, les individus échantillonnés sur le Risse (station 54) sont tous assignés au cluster **orange**. Ici, la structure génétique des échantillons ne reflète pas la proximité géographique des stations. Enfin, en dessous de la confluence Giffre/Risse, le **Giffre aval** (stations 53 et 25) correspond à une majorité d'individus assignés au cluster **orange** et quelques primo-migrants assignés au cluster **bleu** (6 individus) ou au cluster **marron** (2 individus). Seuls 3 chabots, sur les 60 analysés pour les stations 53 et 25, représentent un mélange entre le cluster **bleu** et le cluster **orange**. Ce résultat démontre que la montaison est possible ici aussi, cependant le faible nombre d'individus issus d'un brassage entre clusters traduit une dispersion peu efficace, avec une faible participation des individus dispersants à la reproduction.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Ce patron se retrouve, par ailleurs, de façon très marquée au niveau des stations 09 et 10, situées sur **la partie médiane de l'Arve**. Seuls 5 individus au niveau de la station 09 et 3 individus au niveau de la station 10 (sur un total de 61 chabots analysés pour ces 2 échantillons), apparaissent issus d'un mélange entre clusters génétiques. Tous les autres chabots échantillonnés sont exclusivement assignés à l'un des 4 clusters évoqués précédemment (beige, bleu, orange ou marron). Ce résultat est cohérent avec les Fis, positifs et très significatifs, observés pour ces 2 stations (**Tableau 32**), et explique leur déviation marquée par rapport à l'EHW. Ces stations apparaissent au final peu fonctionnelles : on y observe de nombreux migrants issus de groupes génétiques différents, mais qui apparemment ne se reproduisent que très peu (ou pas) sur place. Il faut noter ici que la station 10 correspond à un prélèvement effectué dans une rivière de contournement récente (2010) compensant la présence de 2 seuils sur le cours d'eau principal. Ce dispositif semble ainsi jouer son rôle et permettre aux chabots migrants de se déplacer vers l'amont comme vers l'aval. En effet, au niveau de la partie amont de l'Arve, la présence de chabots issus de mélanges entre clusters atteste de possibilités de déplacement vers l'amont. De même, la présence d'individus assignés au cluster beige au niveau du Brachouet (st. 26) ou de l'aval du Foron de Reignier (st. 44) témoigne du passage d'individus vers l'aval. Cependant, la quasi-absence de reproduction sur place démontre que ces sites (st. 10 et 09) ne sont sans doute pas utilisés comme habitats à part entière, mais plutôt comme corridors (lieux de passage).

Cas particulier du canal de Pressy :

Au niveau de ces stations 09 et 10, le logiciel STRUCTURE révèle une petite particularité qui mérite d'être mentionnée ici (cf. diagrammes et carte ci-dessous). En effet, alors que très peu d'individus assignés au cluster **bleu foncé** (Giffre amont) ne semblent dépasser la station 25 sur le Giffre aval (**Figure 105**), la station 10, située à plus de 4 km en amont de la confluence, comptabilise 6 individus, soit près de 20%, rattachés au Giffre amont. Ceci est d'autant plus étonnant que la station 09, plus proche de la confluence avec le Giffre, ne compte que 2 individus assignés à ce cluster **bleu foncé**.

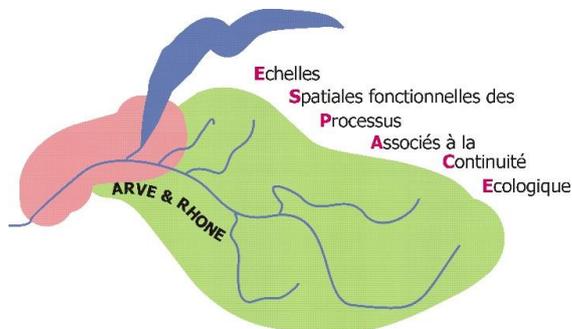


Il semblerait ainsi que des chabots puissent emprunter le canal EDF, aménagé entre le Giffre amont et le cours d'eau principal, dont la restitution débouche juste en amont de la station 10. Il est peu vraisemblable que ces déplacements concernent des individus adultes, mais peut être plutôt les stades juvéniles, étant donnée l'existence d'une conduite forcée et d'une chute conséquente. Quoi qu'il en soit, ces résultats attestent de déplacements. Cependant, l'hypothèse du canal comme voie de passage reste à éclaircir, en complétant l'échantillonnage au sein même de sa partie aval.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Le Borne, quant à lui, présente une structuration relativement commune et attendue pour une espèce peu mobile comme le chabot. Les stations situées en amont du barrage de Beffay (st. 60-30 et 49) correspondent à des individus exclusivement assignés à un nouveau groupe génétique (cluster **bleu turquoise**). Alors que la station la plus proche de la confluence avec l'Arve (st. 20) enregistre plusieurs individus issus de brassages entre groupes génétiques différents (mélanges entre les clusters **bleu turquoise**, **marron**, **bleu foncé** et même **jaune**).

Ce type de structuration, avec brassage génétique au niveau de la confluence, se retrouve de façon encore plus marquée en ce qui concerne les individus échantillonnés sur **le Foron de Reignier**. Les 2 stations les plus **en** amont (st. 59 et 29) sont constituées d'individus exclusivement assignés au cluster **jaune**. Alors que les 2 stations les plus **en** aval (st.22 et 44) ne présentent que des individus issus de brassages génétiques entre clusters. On peut noter, par ailleurs, la participation importante du cluster correspondant au Borne et de celui correspondant au Giffre aval dans ces mélanges (respectivement, cluster **bleu turquoise** et **orange**). Cet important brassage génétique semble être relié à la configuration quelque peu atypique de la confluence entre le Foron de Reignier et l'Arve (**Figure 106**). Cette confluence, qui s'ouvre dans le sens de l'écoulement par rapport au cours d'eau principal, facilite très probablement la remontée des chabots dans le Foron, ces derniers étant poussés par le flux hydrologique au niveau de l'embouchure. Il faut noter par ailleurs la présence d'une rupture en termes de continuité, puisqu'aucun individu issu de mélange n'est retrouvé au niveau des stations situées en amont (st.59 et 29). Ce résultat met évidence la présence de barrières au flux de gènes.



Figure 106 : Configuration atypique de la confluence entre le foron de Reignier et le cours d'eau principal (Arve).

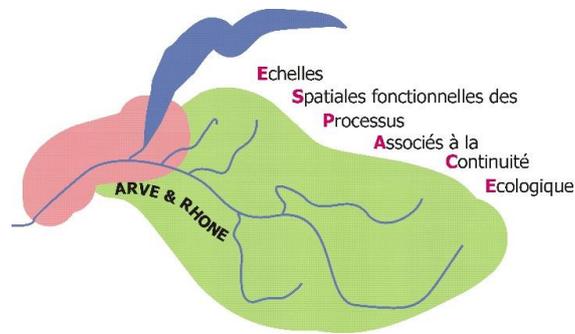
En ce qui concerne **la Menoge**, cet affluent ressort parmi les cours d'eau les plus différenciés du jeu de données. En effet, les différentes stations échantillonnées (st. 52-51-28-24 et 48) sont représentées par des individus tous assignés exclusivement au cluster **rose**. De plus, ce cluster **rose** ne ressort pratiquement pas chez les individus issus de mélange échantillonnés ailleurs, signant l'isolement génétique de cet affluent par rapport au reste du bassin versant.

Il reste ici une petite originalité à noter concernant le **Foron de Fillinges** (st. 50), lui-même affluent de la Menoge. Les individus échantillonnés au niveau de cette station ne sont pas rattachés au même groupe génétique que les stations de la Menoge, mais exclusivement assignés au cluster **vert**



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



foncé, groupe génétique correspondant à **la Versoix**, pourtant située sur la rive opposée du lac Léman (**Figure 104**). Cette assignation semble indiquer une potentielle translocation, ce qui apparaît relativement étonnant pour une espèce sans grand intérêt halieutique, mais qui ressort de façon consistante dans nos résultats...

Enfin, l'importante diversité génétique observée pour les stations situées dans **la partie aval du cours d'eau principal** (st. 08-06-05 et 02) semble s'expliquer par le fait qu'elles sont représentées par des individus migrants et/ou issus de brassage génétiques entre les différents affluents situés en amont. De la station 08, la plus en amont, à la station 02, la plus en aval, on observe de plus en plus de brassage, reflet de la tendance naturelle du chabot à la dévalaison. Il est important de noter ici les contributions importantes des clusters **orange** (Risse et Giffre aval) et **bleu turquoise** (Borne) à la diversité génétique de ces stations. Ces 2 affluents, **Borne** et **Giffre aval**, ressortent comme des ensembles sources d'individus et de diversité génétique.

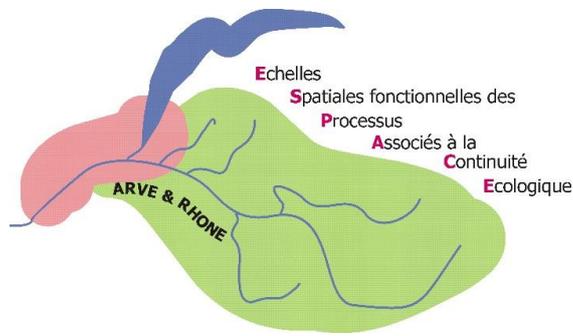
Il reste à noter la mise en évidence de ruptures dans la connectivité (**Figure 105**).

- Une première rupture apparaît entre l'**amont de l'Arve**, incluant la Bialle et la Sallanches (st. 61-62-17-18-14-15 et 21 / cluster **beige**), et les stations situées plus en aval. En effet, plusieurs seuils, localisés entre les stations 21 (Magland) et 10 (Scionzier) (cf. Annexe 19), semblent entraver en partie les possibilités de déplacements, avec relativement peu d'individus assignés à ce cluster **beige** en aval de la station 21.
- Une deuxième rupture, évoquée précédemment, apparaît entre le **Giffre amont** (st. 58-35-33-57-55-56 et 31 / cluster **bleu foncé**) et le **Giffre aval** (st. 54-53 et 25 / **cluster orange**). La zone où semble se situer la barrière (en aval de la station 31 et en amont de la confluence Giffre/Risse) correspond à l'emplacement d'un barrage hydroélectrique (barrage de Mieussy), couplé à une zone de gorges, particulièrement accidentée. Ici, les déplacements apparaissent fortement restreints, avec quelques individus qui semblent pouvoir dévaler, mais aucune montaison visible dans nos résultats.
- Un autre effet de barrière ressort entre les stations amont du **Foron de Reignier** (st. 59 et 29) et les 2 stations les plus proches de la confluence avec l'Arve (st. 22 et 44). Là aussi, des ouvrages sont présents entre les 2 paires de stations : un seuil (pont de Morlange) et une prise d'eau (ancienne pisciculture de Méran) semblent provoquer une rupture en termes de connectivité, les possibilités de montaison apparaissant quasi-inexistantes.
- Une rupture particulièrement marquée apparaît au niveau du **ruisseau des Bordes** (st. 23), correspondant au cluster **gris vert**. Si un ouvrage situé sur l'Arve en amont immédiat de la confluence du ruisseau des Bordes (seuil du pont de Bellecombe) peut en effet représenter un obstacle à la montaison, il est étonnant d'observer si peu d'individus assignés à ce groupe génétique dans les autres stations d'échantillonnage. Ce constat peut toutefois être lié à la faible taille de la population.
- Enfin, la dernière rupture particulièrement notable concerne la **Menoge**. On y observe un patron similaire à celui rapporté ci-dessus pour le ruisseau des Bordes. En effet, très peu d'individus assignés au cluster **rose** (correspondant à la Menoge) sont retrouvés au niveau du cours d'eau principal (notamment, la station 02). Il semblerait ainsi que la dévalaison soit particulièrement



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



ténue entre la Menoge et le cours d'eau principal. Comme pour le ruisseau des Bordes, l'extrême faiblesse des effectifs sur le dernier tiers du cours de la Menoge, en lien avec des conditions peu favorables au chabot (réchauffement des eaux, qualité des eaux médiocre, instabilité du lit), peut expliquer ce constat.

Pour terminer sur la structure génétique des stations échantillonnées, la forte différenciation mise en évidence par les Fst (**Tableau 32** et **Figure 104**) concernant les stations de la **Menoge** (cluster **rose**), de l'**amont du Foron de Reignier** (cluster **jaune**), du **ruisseau des Bordes** (cluster **gris vert**) et de l'**amont du Giffre** (cluster **bleu foncé**), se retrouve également dans cette analyse réalisée avec STRUCTURE. Ces originalités marquées au niveau génétique (**Figure 105**), couplées à leur faible richesse allélique (**Tableau 32**), attestent de l'isolement de ces stations et du rôle joué par le processus de dérive génétique dans leur différenciation.

4) Flux de gènes entre stations :

- Taux de migration par génération / flux génétiques récents -

L'estimation des taux de migration, réalisée à l'aide du logiciel BAYESASS, met en évidence de façon globale une asymétrie de flux au bénéfice de l'aval, correspondant à la tendance naturelle du chabot à la dévalaison (23). En effet, si l'on s'intéresse aux taux de migration supérieurs à 1%, on enregistre plus de déplacements dans le sens de l'écoulement (dévalaison : N=45) qu'en sens inverse (montaison : N=16).

Le deuxième résultat important, qui ressort ici, concerne les migrations réalisées au sein d'un même affluent. Les taux de migration les plus importants sont, effectivement, enregistrés entre stations localisées sur un même cours d'eau (mis en évidence dans l'Annexe 23 par des encadrés **gras**). Ces déplacements se déroulent, dans la plupart des cas, des stations les plus amont vers les stations situées en aval, comme cela s'observe au niveau de la **Bialle**, du **Borne** ou encore du **Foron de Reignier**.

Cette tendance générale du chabot à la dévalaison se retrouve par ailleurs à l'échelle du bassin versant considéré dans sa globalité, avec des taux de migration relativement importants alimentant les stations du cours d'eau principal. Ainsi, cette analyse sur les taux de migration confirme certains résultats obtenus avec STRUCTURE : le **Risse** (cluster **orange**), le **Borne**

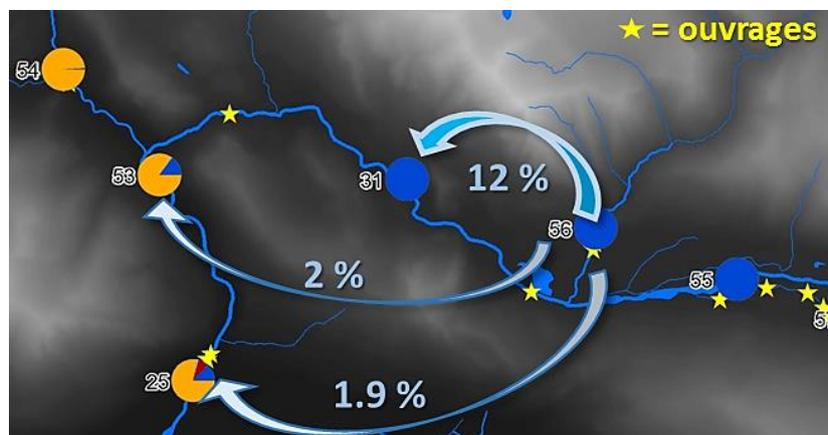
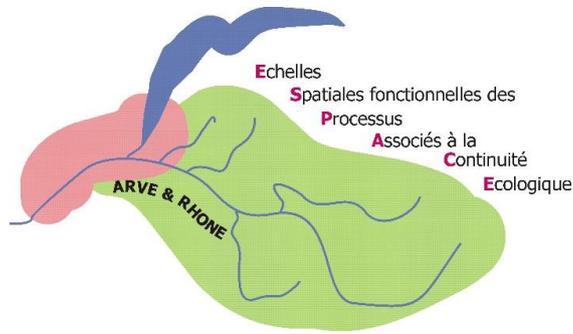


Figure 107 : Schéma représentant les taux de migration à l'amont et à l'aval de la rupture localisée sur le Giffre



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



(cluster **bleu turquoise**) et le **Bronze** (st. 27) alimentent les stations 08, 06, 05 et 02 de l'Arve. Il est à noter que ces populations, à l'inverse de celles de la Menoge aval ou du ruisseau des Bordes, présentent des effectifs importants, facteur susceptible d'expliquer leur plus forte influence sur les populations de l'Arve aval.

Par ailleurs, les taux de migration permettent de faire ressortir certaines barrières aux flux de gènes, déjà mises en évidence avec le logiciel STRUCTURE. C'est le cas par exemple de la rupture existant entre **Giffre amont** et le **Giffre aval**. Si les possibilités de dévalaison sont maintenues entre la station 56 (foron de Tanninges) et la station 31 (Pont de Boche), pourtant séparées par le Barrage de Tanninges, les flux vers l'aval de la confluence Giffre/Risse apparaissent particulièrement réduits (**Figure 107** et Annexe 23). Des échantillons complémentaires entre la station 31 (Pont de Boche) et la station 53 (Plan Séraphin) permettraient peut être de préciser les rôles respectifs du barrage de Mieussy, de la zone de gorge ou d'autres facteurs environnementaux (thermie, qualité des eaux, qualité des habitats) dans cette rupture e la continuité.

Ces différents résultats, issus de BAYESASS, sont cohérents par rapport aux analyses réalisées avec le logiciel STRUCTURE. Cette convergence est d'autant plus révélatrice du fonctionnement des populations de chabots à l'échelle du bassin versant que les 2 programmes utilisent des algorithmes d'inférence différents : STRUCTURE se basant sur le déséquilibre d'Hardy-Weinberg et BAYESASS se basant sur le déséquilibre de liaison.

En dehors de la tendance naturelle du chabot à la dévalaison, les taux de migration mettent également en évidence un cas particulier de montaison. En effet, malgré la présence d'ouvrages sur le Foron de Tanninges à l'aval de la station 56, les stations voisines enregistrent un pourcentage non négligeable de migrants issus du **Foron de Tanninges**. Ceci apparaît clairement dans le tableau de l'Annexe 23, dont les résultats sont schématisés ci-contre (**Figure 108**). Cette tendance à la montaison à partir du Foron est sans doute à relier au glissement de terrain qui a eu lieu en 2003 sur l'amont du bassin versant, ayant impacté fortement les tronçons situés à l'amont du barrage de Tanninges. Ce glissement de terrain, et les laves torrentielles qui l'ont accompagné, ont sans doute perturbé les populations de chabots résidant sur l'amont du Giffre, cette espèce étant particulièrement sensible à la charge sédimentaire et fortement impactée par le colmatage. Ces taux importants enregistrés dans le sens de la montaison correspondent peut-être à un processus de recolonisation en cours, suite à la perturbation.

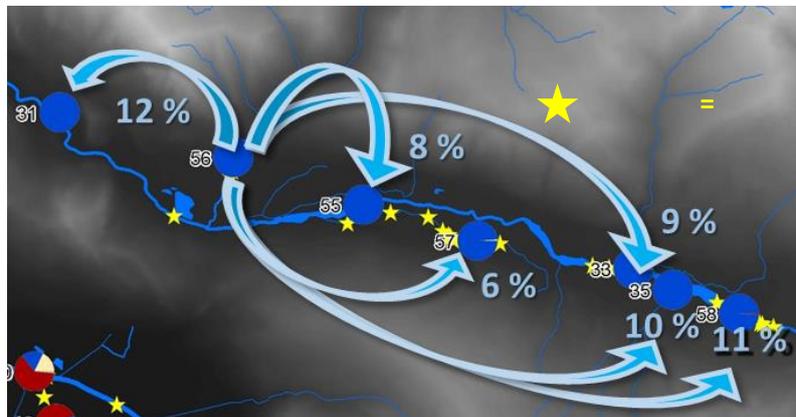


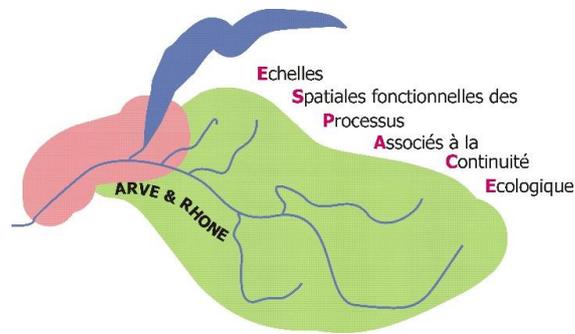
Figure 108 : Schéma représentant les taux de migration en provenance de la station 56 (foron de Tanninges)

Cette tendance à la montaison à partir du Foron est sans doute à relier au glissement de terrain qui a eu lieu en 2003 sur l'amont du bassin versant, ayant impacté fortement les tronçons situés à l'amont du barrage de Tanninges. Ce glissement de terrain, et les laves torrentielles qui l'ont accompagné, ont sans doute perturbé les populations de chabots résidant sur l'amont du Giffre, cette espèce étant particulièrement sensible à la charge sédimentaire et fortement impactée par le colmatage. Ces taux importants enregistrés dans le sens de la montaison correspondent peut-être à un processus de recolonisation en cours, suite à la perturbation.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

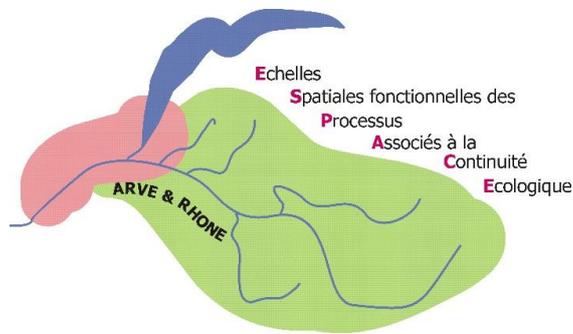


Cette hypothèse d'un processus de recolonisation est par ailleurs appuyée par les taux de migration enregistrés sur la **Menoge**. En effet, c'est le seul affluent, avec le Giffre amont, où l'on observe des taux de migration conséquents dans le sens de la montaison (Annexe 23). Et, ici encore, le cours d'eau concerné a subi de fortes perturbations : la Menoge a enregistré une crue proche de la cinquantennale en 2007, suivie d'une pollution au xylophène en 2010 ayant entraîné d'importantes mortalités piscicoles, notamment chez le chabot. Ainsi, ces résultats semblent correspondre, dans les 2 cas (**Giffre amont** et **Menoge**), à la mesure des flux de gènes accompagnant un processus de recolonisation en cours.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



IV. Mise en évidence de 14 unités en termes de gestion

Les analyses réalisées sur le chabot dans le cadre du projet ESPACE ont mis en évidence 10 clusters génétiquement différenciés, permettant de définir **14 unités fonctionnelles**, dont 12 correspondent à l'Arve et ses affluents. Ainsi, en fonction de leur assignation majoritaire à un cluster donné dans les résultats issus de STRUCTURE, les différentes stations échantillonnées peuvent être réparties comme suit parmi ces 14 unités de base :

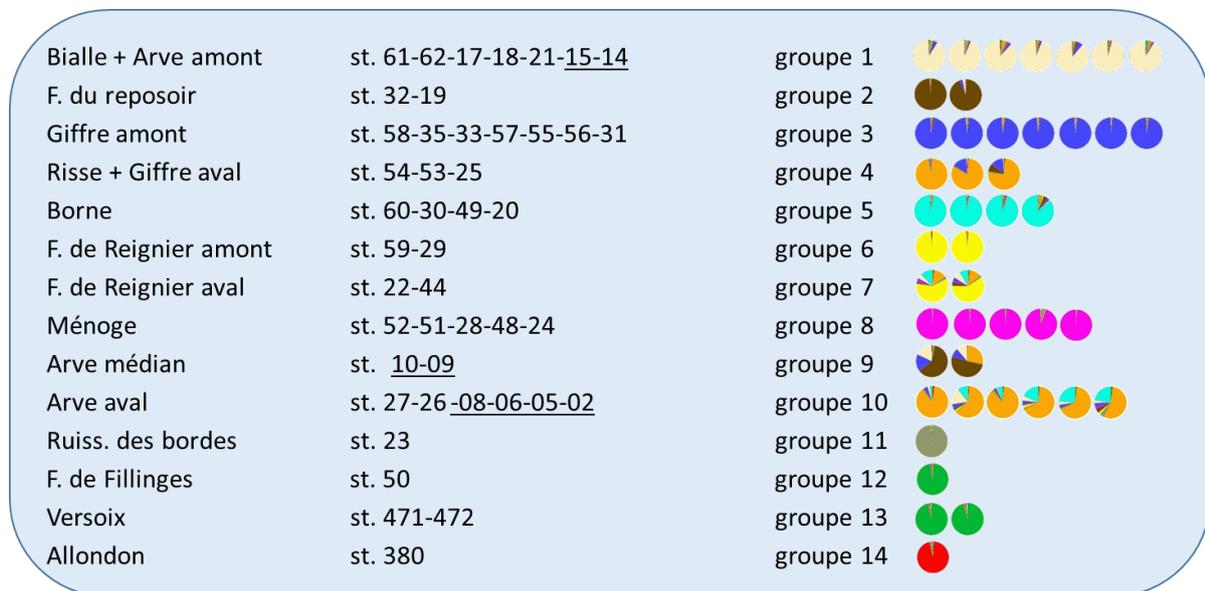


Figure 109 : Répartition des 45 stations échantillonnées parmi les 14 unités fonctionnelles définies dans cette étude (les identifiants des stations localisées sur le cours d'eau principal sont soulignés).

Les statistiques descriptives calculées pour ces 14 unités fonctionnelles confirment les résultats obtenus précédemment à l'échelle des 45 stations (**Tableau 34**). On retrouve les mêmes patrons de diversité, avec les plus fortes richesses alléliques au niveau du cours d'eau principal (gp10-01 et 09) et du Borne (gp05). Côté Suisse, la Versoix (gp13) présente une richesse équivalente.

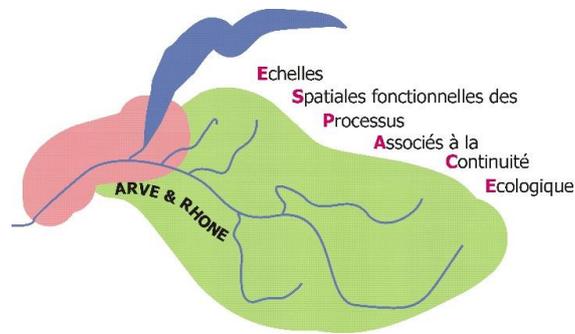
Concernant l'hétérozygotie observée (Ho), les taux les plus forts sont enregistrés pour la Bialle, la Sallanches et l'Arve amont (gp01), le Giffre aval (gp03), le Borne (gp05), l'aval du Foron de Reignier (gp07) et l'aval de l'Arve (gp10), suggérant une diversité génétique importante pour ces groupes. A l'inverse, la Menoge (gp08), l'amont du Foron de Reignier (gp06), le Foron de Fillinges (gp12), le ruisseau des Bordes (gp11) et le Giffre amont (gp03) ressortent comme les unités les moins diversifiées.

Ainsi, ces résultats à l'échelle des 14 unités fonctionnelles pointent les mêmes zones sensibles que les analyses précédentes. En effet, les unités les plus faiblement diversifiées, sont ici aussi les plus différenciées (**Tableau 35** et Fst moyen dans le **Tableau 34**), signe d'un isolement important. Ceci est,



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



par ailleurs confirmé par les taux de migration, non différents de zéro, observés concernant les flux alimentant ces unités (**Tableau 36**).

Cependant, le calcul de l'effectif efficace (N_e), de même que les tests de Wilcoxon concernant la survenue d'un éventuel goulot d'étranglement, permettent de nuancer cette vulnérabilité. Bien que les effectifs efficaces calculés ici ne doivent pas être interprétés comme des valeurs réelles, leur variation relative constitue un indice pertinent pour évaluer l'influence de la dérive génétique sur la différenciation des groupes correspondants (ROBERTS *et al.*, 2013). Ainsi, la Menoge apparaît moins « fragile » que ce qu'il ressortait au niveau des 45 stations. Cet affluent enregistre un N_e parmi les plus forts, et les résultats de BOTTLENECK ne permettent pas de mettre en évidence de baisse d'effectifs ayant engendré un goulot d'étranglement. Cette unité fonctionnelle, bien que faiblement diversifiée et isolée, semble donc moins vulnérable que les autres unités considérées comme sensibles. La crue de 2007 et la pollution au xylophène de 2010 ayant surtout touché les stations 24 et 28 (HUCHET, 2012), située dans la partie médiane du cours d'eau, on peut imaginer que la diversité génétique des secteurs situés plus en aval et sur les affluents était suffisante pour préserver la fitness de cette unité fonctionnelle.

Tableau 34 : Statistiques descriptive calculées pour les 14 unités fonctionnelles

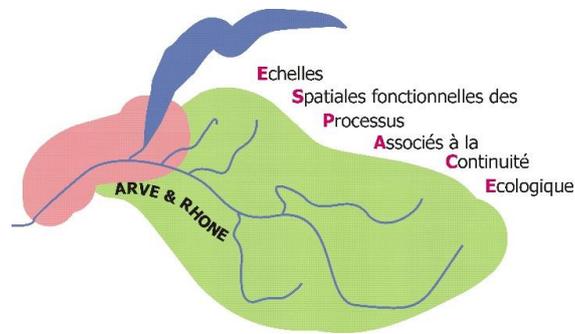
		N	A	Ar	Ho	He	Fis	Fst moy.	Ne_LD [0,02]	SMM	TPM
Bialle + Arve amont	gp01	194	119	4,26	0,50	0,53	0,05	0,16	65	0,99	0,19
Scionzier	gp02	67	80	2,88	0,35	0,34	-0,04	0,29	238	1,00	0,77
Giffre amont	gp03	196	69	2,56	0,34	0,38	0,12	0,25	32	0,12	0,01
Risse + Giffre aval	gp04	95	107	3,75	0,43	0,44	0,02	0,21	1089	1,00	0,91
Borne	gp05	131	113	4,29	0,51	0,52	0,02	0,19	93	0,87	0,11
Reignier amont	gp06	67	47	1,98	0,26	0,29	0,10	0,32	23	0,01	0,00
Reignier aval	gp07	49	103	3,81	0,46	0,44	-0,03	0,19	159	1,00	0,89
Menoge	gp08	167	58	2,16	0,22	0,23	0,04	0,37	149	0,96	0,62
Arve médian	gp09	61	111	4,06	0,37	0,47	0,21*	0,19	8	1,00	0,95
Arve aval	gp10	152	156	5,02	0,48	0,51	0,06	0,16	131	1,00	0,99
R. des Bordes	gp11	31	51	2,19	0,33	0,33	0,00	0,29	21	0,03	0,00
Fillinges	gp12	33	41	1,74	0,28	0,25	-0,13	0,35	57	0,04	0,00
Versoix	gp13	69	118	4,31	0,49	0,50	0,03	0,24	383	1,00	0,68
Allondon	gp14	28	71	2,99	0,42	0,42	-0,01	0,30	38	0,56	0,11

N : nombre de chabots étudiés inclus dans le groupe ; **A** : nombre d'allèles observés sur 23 marqueurs ; **Ar** : richesse allélique estimée par raréfaction (pour un effectif minimum de 28 individus) ; **Ho** : taux d'hétérozygotie observée ; **He** : taux d'hétérozygotie attendue ; **Fis** : Déficit d'hétérozygotes (coefficient de consanguinité)(déviations significatives par rapport à l'équilibre d'Hardy-Weinberg en gras, marquées d'un astérisque*) ; **Fst moy.** : indice moyen de différenciation génétique ; **Ne_LD[0,02]** : effectif efficace calculé avec NeEstimator en prenant en compte tous les allèles dont la fréquence est supérieure à 2% ; **SMM** et **TPM** : résultats obtenus avec BOTTLENECK ; significativité de l'excès d'hétérozygotes selon le test de Wilcoxon pour les modèles de mutation SMM et TPM. Les valeurs colorées indiquent (pour **A**, **Ar**, **Ho**, **Fst moy** et **Ne**) les 5 valeurs les plus fortes (surlignées en orange) et les 5 valeurs les plus faibles (surlignées en bleu)



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



En revanche, que ce soit au niveau du **Ne** ou concernant le test de Wilcoxon, l'amont du Giffre, l'amont du foron de Reignier, le ruisseau des Bordes et le foron de Fillings ressortent comme des unités à surveiller. Bien qu'un **Ne** relativement faible soit une caractéristique intrinsèque des espèces ayant un mode de reproduction polygyne comme le chabot (JUNKER *et al.*, 2012), il est aussi le signe d'un succès reproducteur variable, de dynamiques d'extinction/recolonisation et/ou d'isolement par rapport aux autres populations (WAPLES, 1990). Si l'on prend l'exemple du Giffre amont, la survenue d'un goulot d'étranglement, lié à un crash démographique, suite au glissement de terrain de 2003 apparaît tout à fait probable, d'autant plus que ce secteur est isolé de l'aval dans le sens de la montaison par le barrage de Tanninges. Mais si cette explication est satisfaisante pour le Giffre, elle sous-entend des baisses d'effectifs récentes pour les autres unités présentant le même patron, ainsi que d'éventuels problèmes en termes de qualité d'habitat et de connectivité.

Enfin, le calcul des taux de migration confirme que l'on a bien identifié des ensembles de stations qui constituent des groupes homogènes en termes de fonctionnement. Ainsi, en dehors des groupes 09 et 10 situées sur le cours médian de l'Arve, toutes les unités identifiées présentent un pourcentage d'individus sédentaires supérieur ou égale à 90% (**Tableau 36**). Ceci signifie que les stations qui ont été rassemblées au sein de ces unités constituent bel et bien des ensembles fonctionnels et confirme l'idée d'une structuration fortement influencée par la biogéographie.

Seule l'unité correspondant à la partie médiane de l'Arve (groupe 09) ressort, ici aussi, comme un ensemble hétérogène, avec des flux conséquents alimentant cette unité (**Tableau 36**) et un indice de fixation positif de 0,21 indiquant une déviation significative par rapport à EHW. Ces résultats confirment ainsi le caractère non fonctionnel de cette unité et son rôle de lieu de passage, mélangeant des individus issus de clusters différents, sans qu'il n'y ait pour autant de reproduction sur place.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

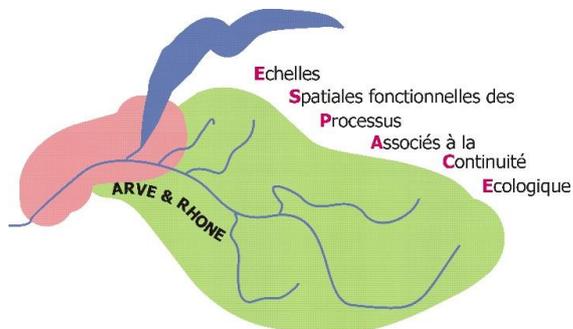


Tableau 35 : Différenciation génétique (Fst) entre paires d'unités fonctionnelles
Surligné en jaune clair : $0,05 > Fst > 0,15$; en jaune-orangé : $0,15 > Fst > 0,25$; en orange : $Fst > 0,25$

	Gp1	Gp2	Gp3	Gp4	Gp5	Gp6	Gp7	Gp8	Gp9	Gp10	Gp11	Gp12	Gp13	Gp14
Bialle + Arve amont	Gp1													
Scionzier	0,19													
Giffre amont	0,14	0,31												
Risse + Giffre aval	0,11	0,28	0,13											
Borne	0,10	0,21	0,21	0,17										
Reignier amont	0,26	0,45	0,39	0,35	0,28									
Reignier aval	0,11	0,28	0,24	0,18	0,14	0,12								
Menoge	0,30	0,52	0,40	0,42	0,33	0,44	0,31							
Arve médian	0,08	0,05	0,16	0,14	0,13	0,34	0,16	0,41						
Arve aval	0,07	0,20	0,11	0,02	0,10	0,28	0,12	0,33	0,08					
R. des Bordes	0,21	0,43	0,30	0,23	0,27	0,37	0,20	0,49	0,28	0,19				
Fillinges	0,30	0,51	0,42	0,38	0,31	0,46	0,30	0,42	0,38	0,31	0,46			
Versoix	0,18	0,32	0,32	0,23	0,20	0,32	0,17	0,38	0,22	0,18	0,24	0,27		
Allondon	0,22	0,37	0,35	0,31	0,19	0,44	0,28	0,48	0,27	0,24	0,39	0,41	0,27	



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

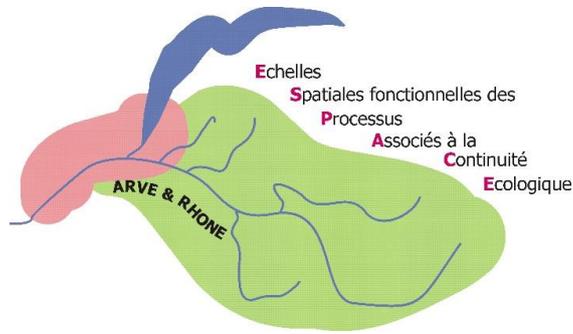


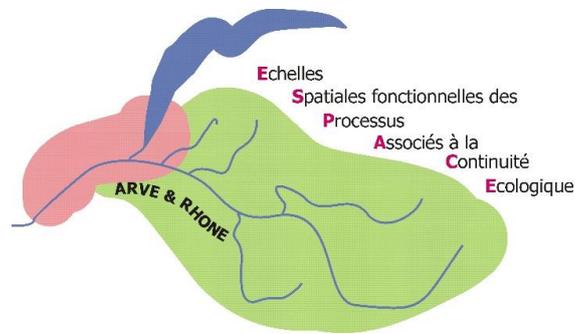
Tableau 36 : Taux de migration par génération estimés pour les 14 unités fonctionnelles
Chaque chiffre correspond au pourcentage d'individus du groupe en ligne qui proviennent du groupe en colonne par génération
Les taux significativement différents de zéro sont inscrits en noir ; surlignés en jaune-orangé : taux > 2% ; en orange : taux > 10%
Les taux surlignés en gris correspondent au pourcentage d'individus sédentaires par génération (ceux surlignés en gris clair correspondent aux
taux d'individus sédentaires inférieurs à 70% et recevant donc beaucoup de migrants)

	Gp1	Gp2	Gp3	Gp4	Gp5	Gp6	Gp7	Gp8	Gp9	Gp10	Gp11	Gp12	Gp13	Gp14
Bialle + Arve amont	97,69	0,15	0,24	0,24	0,17	0,16	0,16	0,16	0,14	0,19	0,21	0,17	0,18	0,14
Scionzier	0,78	93,76	0,85	0,40	0,43	0,42	0,44	0,41	0,44	0,40	0,44	0,38	0,46	0,38
Giffre amont	0,17	0,14	97,95	0,15	0,14	0,19	0,16	0,17	0,13	0,16	0,15	0,14	0,16	0,18
Risse + Giffre aval	0,36	0,93	3,59	91,96	0,29	0,29	0,33	0,29	0,27	0,42	0,35	0,29	0,31	0,32
Borne	0,26	0,26	0,29	0,26	96,60	0,22	0,30	0,23	0,23	0,43	0,25	0,22	0,26	0,18
Reignier amont	0,42	0,41	0,37	0,40	0,40	94,67	0,43	0,41	0,43	0,42	0,39	0,40	0,41	0,44
Reignier aval	0,72	0,52	0,52	1,14	0,99	8,90	81,40	0,52	0,59	2,43	0,75	0,49	0,53	0,50
Menoge	0,19	0,20	0,19	0,21	0,16	0,18	0,19	97,61	0,16	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Arve médian	5,51	15,53	3,70	3,31	0,45	0,44	0,46	0,44	67,15	1,23	0,44	0,45	0,44	0,45
Arve aval	0,24	0,40	0,33	12,58	2,30	0,35	0,54	0,20	0,22	81,98	0,28	0,18	0,22	0,18
R. des Bordes	0,75	0,80	0,74	0,75	0,77	0,75	0,76	0,72	0,72	0,74	90,36	0,76	0,67	0,71
Fillinges	0,71	0,66	0,72	0,70	0,70	0,69	0,70	0,72	0,70	0,73	0,72	90,83	0,70	0,73
Versoix	0,43	0,42	0,41	0,37	0,43	0,38	0,41	0,39	0,43	0,40	0,40	0,40	94,72	0,41
Allondon	0,75	0,80	0,79	0,82	0,83	0,81	0,85	0,75	0,78	0,89	0,79	0,86	0,78	89,50



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



V. Conclusion et perspectives

La plupart des études sur la connectivité en milieu aquatique se focalisent sur les salmonidés (e.g. WOFFORD *et al.*, 2005 ; MEEUWING *et al.*, 2010 ; KANNO *et al.*, 2011), et peu d'informations sont disponibles concernant l'impact des barrières au flux de gènes sur des espèces peu mobiles, comme le chabot. Cependant, les espèces sédentaires, potentiellement tout aussi vulnérables à la fragmentation, présentent souvent une forte spécialisation en termes d'habitat, ce qui en fait des modèles d'étude particulièrement pertinents dans le cadre d'un diagnostic sur la fonctionnalité biologique.

Les résultats obtenus ici confirment les faibles capacités de dispersion du chabot, tout comme sa sensibilité à la présence de barrières, avec une très forte différenciation génétique à l'échelle du bassin versant (JUNKER *et al.*, 2012 ; HÄNFLING & WEETMAN, 2006 ; VONLANTHEN *et al.*, 2007). Nous avons pu ainsi mettre en évidence un fort patron d'isolement par la distance, de même que l'impact de certains ouvrages ou d'altérations de la qualité du milieu. L'évaluation de la structuration génétique et des taux de migration ont également mis en avant une asymétrie de flux au bénéfice de l'aval illustrant la tendance naturelle du chabot à la dévalaison et se traduisant par une diminution de la diversité génétique au niveau des têtes de bassins. L'intérêt de l'outil moléculaire transparait également dans la mise en évidence et la quantification des flux vers l'amont des espèces peu mobiles telles que le chabot, et ce d'une manière plus intégratrice qu'un suivi de plus courte durée par marquage direct des individus.

De plus, les marqueurs microsatellites se sont montrés particulièrement informatifs concernant les flux de gènes récents, permettant de mettre en évidence différents résultats originaux :

- la détection d'une potentielle translocation (foron de Fillinge/Versoix) ;
- la présence de zones sources alimentant le cours d'eau principal (Borne et Giffre aval) ;
- la détection de processus de recolonisation suite à des perturbations (Menoge et Giffre amont) ;
- et l'existence d'une zone peu fonctionnelle (au niveau de l'Arve médian).

1) Une échelle de fonctionnement de l'ordre de l'affluent, voire du tronçon :

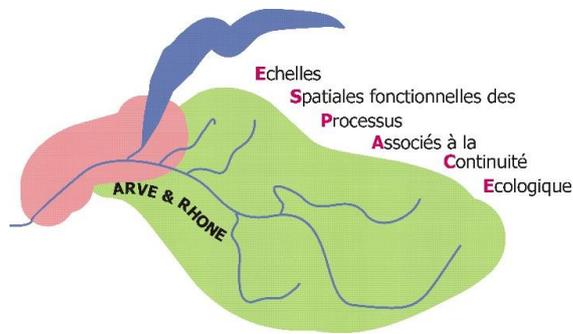
La différenciation observée ici entre stations souligne une structuration génétique fortement influencée par la biogéographie de la région. En effet, 10 groupes génétiquement bien différenciés ont été mis en évidence, indiquant une échelle de fonctionnement de l'ordre de l'affluent, voire du tronçon (en présence de barrières). Ces résultats, cohérents avec les études déjà réalisées sur le chabot (JUNKER *et al.*, 2012 ; HÄNFLING & WEETMAN, 2006), ont permis de définir 14 unités fonctionnelles pouvant servir de découpage de base pour la mise en place d'opérations de gestion.

Notre premier conseil en termes de gestion serait ainsi de considérer et préserver les unités biogéographiques identifiées ici, sans doute sources de diversité et d'adaptations locales. En effet, un des risques majeurs dans la mise en contact de populations très différenciées est la dépression d'hybridation (EDMANDS, 2007). De ce brassage entre unités génétiquement distinctes peut découler



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



un déclin en termes de fitness dû à la rupture de complexes géniques coadaptés et/ou à la dilution d'adaptations locales (TEMPLETON, 1997).

Cependant, d'autres résultats laissent penser que des efforts de gestion, en termes de conservation, pourraient être bénéfiques au maintien des certaines populations.

2) Des unités fonctionnelles vulnérables :

En effet, nos analyses mettent aussi en évidence des unités fonctionnelles de faible diversité et/ou isolées, correspondant pour certaines à des zones de rupture en termes de connectivité. Ainsi, la forte structuration observée ici pourrait être amplifiée dans certains cas par les activités anthropiques, telles que la présence de barrages ou de seuils (UTZINGER et al., 1998), ou encore l'influence de pollutions (BUCHER *et al.*, 1992 ; WATERSTRAAT, 1992). Les barrières ne sont pas obligatoirement physiques pour une espèce aussi peu mobile que le chabot. Elles peuvent tout aussi bien être de nature thermique ou chimique, ou correspondre à une distribution fragmentée des habitats favorables au maintien d'une population. Ainsi, il serait intéressant dans un premier temps de fouiller les différentes causes possibles de ces barrières au flux de gènes.

Quoi qu'il en soit, cette étude a permis de pointer certaines unités « vulnérables » sur lesquelles l'accent pourrait être mis en termes de gestion. Il s'agit de l'amont du Giffre, de l'amont du foron de Reignier, du ruisseau des Bordes, du foron de Fillinges et, dans une moindre, mesure de la Menoge. Améliorer la qualité du milieu et diminuer les causes de fragmentation, quand cela est possible, pourrait s'avérer bénéfique pour ces unités qui enregistrent de faibles effectifs efficaces, couplés à une faible diversité.

De même, des investigations concernant la qualité du milieu pourraient être menées au niveau du tronçon de l'Arve situé entre la confluence entre l'Arve et le Giffre (principalement stations 09 et 10) et l'aval de Cluses. Ces stations semblent constituer un ensemble peu fonctionnel avec peu (voire pas) de reproduction sur place, résultant en un effectif efficace très faible, le secteur jouant essentiellement un rôle de corridor. La détermination des causes de ce constat permettrait de statuer sur leur caractère naturel ou anthropique et, le cas échéant, de proposer des actions permettant de rendre fonctionnelles les unités concernées.

3) Perspectives :

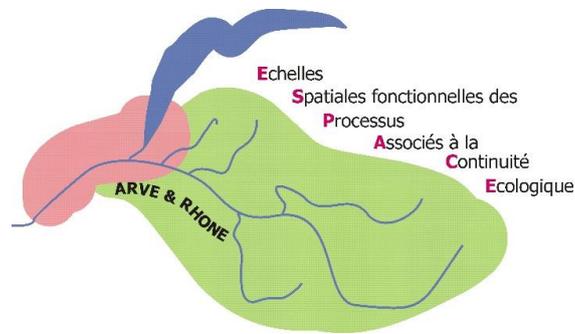
Suite à ces premiers résultats sur les chabots de l'Arve, il serait maintenant intéressant de confronter les données collectées à différentes variables environnementales, et notamment des mesures permettant de caractériser la physico-chimie de l'eau et la qualité des habitats au niveau des secteurs échantillonnés. Dans la même idée, une meilleure appréhension de la démographie et de la dynamique des populations inventoriées permettrait de préciser les zones « à risque » sur lesquelles concentrer les efforts de gestion.

Enfin, l'échantillonnage qui a été réalisé ici pour travailler sur les flux de gènes récents pourrait aussi servir à étudier des flux de gènes plus anciens, notamment via l'ADN mitochondrial, afin de mieux comprendre l'histoire biogéographique de l'espèce au sein du bassin versant de l'Arve et du Rhône.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



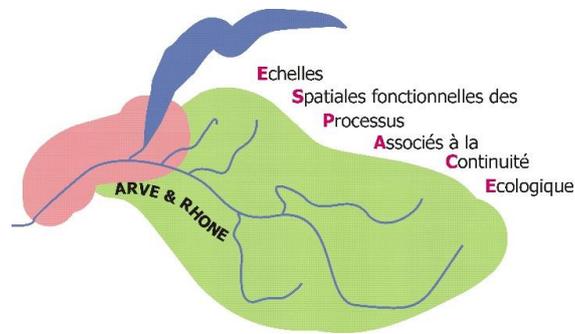
VI. Bibliographie

- BENJAMINI Y. & HOCHBERG Y., 1995. Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. Vol. 57, n°1, p. 289-300.
- BUCHER F., HOFER R. & SALVENMOSER W., 1992. Effects of treated paper mill effluents on hepatic morphology in male bullhead (*Cottus gobio* L.). *Arch Environ Contam Toxicol*. Vol. 23, p.410–419.
- CHASSERIEAU C., 2010. Recensement des ouvrages transversaux sur le réseau hydrographique de Haute-Savoie et continuité piscicole, Campagne 2010. *Rapport FDP74. 10/07*. 44p + annexes.
- CHATTERJEE S. & PACTER L., 2006. Reference based annotation with GeneMapper. *Genome Biology*, Vol. 7, R29.
- CORNUET J.M. & LUIKART G., 1997. Description and power analysis of two tests for detecting recent population bottlenecks from allele frequency data. *Genetics*. Vol. 144, p. 2001-2014.
- DE MEEUS T., 2012. Initiation à la génétique des populations naturelles : applications aux parasites et à leurs vecteurs. *Marseille, IRD*. 335 p.
- DO C., WAPLES R.S., PEEL D., MACBETH G.M., TILLET B.J. & OVENDEN J.R., 2014. NeEstimator V2: re-implementation of software for the estimation of contemporary effective population size (Ne) from genetic data. *Molecular Ecology Resources*. Vol. 14, p. 209-214.
- EARL D.A. & VONHOLDT B.M., 2012. STRUCTURE HARVESTER: a website and program for visualizing STRUCTURE output and implementing the Evanno method. *Conservation Genetics Resources*. Vol. 4, p. 359-361.
- EDMANDS S., 2007. Between a rock and a hard place: evaluating the relative risks of inbreeding and outbreeding for conservation and management. *Molecular Ecology*. Vol. 16, p. 463–475.
- EDWARDS A., CIVITELLO A., HAMMOND H.A. & CASKEY C.T., 1991. DNA typing and genetic mapping with trimeric and tetrameric tandem repeats. *American Journal of Human Genetics*. Vol. 49, n°4, p. 746-756.
- ENGBRECHT C.C., FREYHOF J., NOLTE A., RASSMANN K., SCHLIEWEN U. & TAUTZ D., 2000. Phylogeography of the bullhead *Cottus gobio* (Pisces: Teleostei: Cottidae) suggests a pre-pleistocene origin of the major central European populations. *Molecular Ecology*. Vol. 9, p. 709–722.
- ENGBRECHT C.C., LARGIADÈR C.R., HANFLING B. & TAUTZ D., 1999. Isolation and characterization of polymorphic microsatellite loci in the European bullhead *Cottus gobio* L. (Osteichthyes) and their applicability to related taxa. *Molecular Ecology*. Vol. 8, n°11, p. 1966-1969.
- ESTOUP A., TAILLIEZ C., CORNUET J.M. & SOLIGNAC M., 1995. Size homoplasy and mutational processes of interrupted microsatellites in two bee species, *Apis mellifera* and *Bombus terrestris* (Apidae). *Molecular Biology and Evolution*. Vol. 12, n°6, p. 1074-1084.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

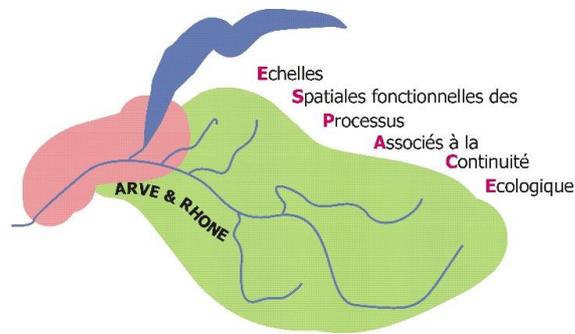


- FUJISHIN L.M., BARKER F.K., HUFF D.D. & MILLER L.M., 2009. Isolation of 13 polymorphic microsatellite loci for slimy sculpin (*Cottus cognatus*). *Conserv. Genet. Resour.* Vol. 1, n°1, p. 429–432.
- GAUDIN P. & CAILLERE L., 1990. Microdistribution of *Cottus gobio* L. and fry of *Salmo trutta* in a first order stream. *Pol Arch Hydrobiol.* Vol. 37, p. 81–93.
- GOSLEE S.C. & URBAN D.L., 2007. The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data. *Journal of Statistical Software.* Vol. 22, n°7, p. 1-19.
- HÄNFLING B. & WEETMAN D., 2006. Concordant genetic estimators of migration reveal anthropogenically enhanced source-sink population structure in the river sculpin *Cottus gobio*. *Genetics.* Vol. 173, p. 1487–1501.
- HILL W.G., 1981. Estimation of effective population size from data on linkage disequilibrium. *Genet. Res.* Vol. 38, p. 209–216.
- HUCHET. P., 2012. Diagnostic écologique des cours d'eau du bassin versant de la Menoge. *Rapport FDPPMA74 12/06.* 84p. + annexes.
- HUTCHISON D.W. & TEMPLETON A.R., 1999. Correlation of pairwise genetic and geographic measures: inferring the relative influences of gene flow and drift on the distribution of genetic diversity. *Evolution.* Vol. 53, p. 1898–1914.
- IGN, 2006. BD Carthage v.3.0. <http://www.sandre.eaufrance.fr/>
- JUNKER J., PETER A., WAGNER C.E., MWAIKO S., GERMANN B., SEEHAUSEN O. & KELLER I., 2012. River fragmentation increases localized population genetic structure and enhances asymmetry of dispersal in bullhead (*Cottus gobio*). *Conservation Genetics.* Vol. 13, n°2, p. 545-556.
- KANNO Y., VOKOUN J.C. & LETCHER B.H., 2011. Fine-scale population structure and riverscape genetics of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) distributed continuously along headwater channel networks. *Molecular Ecology.* Vol. 20, p. 3711-3729.
- KEENAN K., MCGINNITY P., CROSS T.F., CROZIE, W.W. & PRODÖHL P.A., 2013. DiveRsity: An R package for the estimation of population genetics parameters and their associated errors. *Methods in Ecology and Evolution.* Vol. 4, n°8, p. 782-788.
- KNAEPKENS G., BRUYNDONCX L. & EENS M., 2004. Assessment of residency and movement of the endangered bullhead (*Cottus gobio*) in two Flemish rivers. *Ecology of Freshwater Fish.* Vol. 13, p. 317-322.
- LELEK A., 1987. The Freshwater Fishes of Europe, vol. 9. Threatened Fishes of Europe. *Aula-Verlag, Wiesbaden.* 343 p.
- MANTEL N., 1967. The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research.* Vol. 27, p. 209-220.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

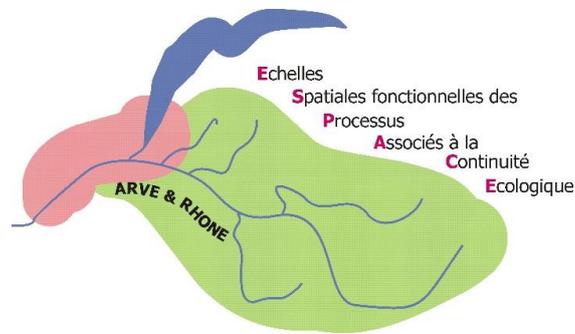


- MEEUWIG M.H., GUY C.S., KALINOWSKI S.T. & FREDENBERG W.A., 2010. Landscape influences on genetic differentiation among bull trout populations in a stream-lake network. *Molecular Ecology*. Vol. 19, p. 3620-3633.
- NOLTE A.W., STEMSHORN K.C. & TAUTZ D., 2005. Direct cloning of microsatellite loci from *Cottus gobio* through a simplified enrichment procedure. *Molecular Ecology Notes*. Vol. 5, p. 628-636.
- OVIDIO M., DETAILLE A., BONTINCK C., NEUS Y., RIMBAUD G. & PHILIPPART J.C., 2007. Élaboration de recommandations pratiques pour la préservation-restauration d'éléments de l'habitat hydraulique du chabot dans les cours d'eau non navigables de Wallonie. *Rapport pour le Ministère de la Région Wallonne, Division de l'Eau Direction des Cours d'Eau Non Navigables. Université de Liège, LDPH*. 116 p + annexes.
- PIRY S., LUIKART G. & CORNUET J.M., 1999. BOTTLENECK: a computer program for detecting recent reductions in the effective population size using allele frequency data. *Journal of Heredity*. Vol. 90, p. 502-503.
- PRITCHARD J.K., STEPHENS M. & DONNELLY P., 2000. Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*. Vol. 155, p. 945-959.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008. R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org>.
- RAYMOND M. & ROUSSET F., 1995. GENEPOP (version 1.2): population genetics software for exact tests and ecumenicism. *Heredity*. Vol. 86, p. 248-249.
- ROBERTS J.H., ANGERMEIER P.L. & HALLERMAN E.M., 2013. Distance, dams and drift: what structures populations of an endangered, benthic stream fish? *Freshwater Biology*. doi:10.1111/fwb.12190.
- ROUSSET F., 2008. Genepop'007: a complete reimplement of the Genepop software for Windows and Linux. *Mol. Ecol. Resources*. Vol. 8, p. 103-106.
- SUK H.Y. & NEFF B.D., 2009. Microsatellite genetic differentiation among populations of the Trinidadian guppy. *Heredity*. Vol. 102, p. 425-434.
- TEMPLETON A.R., 1997. Coadaptation, local adaptation and outbreeding depression. In: Meffe G.K. & Carroll C.R. (Eds.) *Principles of Conservation Biology*. Sinauer Associates, Sunderland. p. 152-153.
- TROCHET A., ETIENNE R., LE CHEVALIER H., JOUBIN T. & RIBERON A., 2014. Structuration génétique des populations de tritons palmés (*Lissotriton helveticus*) en Alsace. *Laboratoire Evolution & Diversité Biologique, Université de Toulouse*. 24p.
- UTZINGER J., ROTH C. & PETER A., 1998. Effects of environmental parameters on the distribution of bullhead *Cottus gobio* with particular consideration of the effects of obstructions. *J Appl Ecol*. Vol. 35, p. 882-892.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

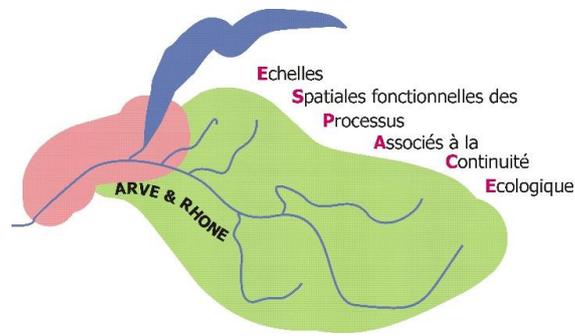


- VONLANTHEN P., EXCOFFIER L., BITTNER D., PERSAT H., NEUENSCHWANDER S. & LARGIADER C.R., 2007. Genetic analysis of potential postglacial watershed crossings in Central Europe by the bullhead (*Cottus gobio* L.). *Molecular Ecology*. Vol. 16, p. 4572-4584.
- WAHLUND S., 1928. Zusammensetzung von populationen und korrelationsers-chinungen von standpunkt der vererbungslehre aus betrachtet. *Hereditas*. Vol. 11, p. 65-108.
- WAPLES R.S., 1990. Definition and estimation of effective population size in the conservation of endangered species. In: Beissinger S.R. & McCullough D.R. (Eds) *Population Viability Analysis*. University of Chicago Press, Chicago. p. 147-168.
- WAPLES R.S., 2006. A bias correction for estimates of effective population size based on linkage disequilibrium at unlinked gene loci. *Conservation Genetics*. Vol. 7, p. 167-184.
- WAPLES R.S. & DO C., 2010. Linkage disequilibrium estimates of contemporary Ne using highly variable genetic markers: A largely untapped resource for applied conservation and evolution. *Evolutionary Applications*. Vol. 3, p. 244-262.
- WATERSTRAAT A., 1992. Investigations on the ecology of *Cottus gobio* L. and other fish species from two lowland streams of Northern Germany. *Limnologica*. Vol. 22, p. 137-149.
- WEIR B.S. & COCKERHAM C.C., 1984. Estimating F-statistics for the analysis of population structure. *Evolution*. Vol. 38, p. 1358-1370.
- WILSON G.A., & RANNALA B., 2003. Bayesian inference of recent migration rates using multilocus genotypes. *Genetics*. Vol. 163, n°3, p. 1177-1191.
- WOFFORD J.E.B., GRESSWELL R.E. & BANKS M.A., 2005. Influence of barriers to movement on within-watershed genetic variation of coastal cutthroat trout. *Ecological Applications*. Vol. 15, n°2, p. 628-637.
- WRIGHT S., 1950. Genetical structure of populations. *Nature*. Vol. 166, n°4215, p. 247-9.
- WRIGHT S., 1969. *The Theory of Gene Frequencies*. Evolution and the Genetics of Populations, Vol 2. University of Chicago Press, Chicago. 520 p.
- ZBINDEN S., PILOTTO J.D. & DUROUVENOZ V., 2004. Biologie, menaces et protection du chabot (*Cottus gobio*) en Suisse. *Informations concernant la pêche n° 77* Publié par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP Berne. 73 p.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Chapitre 4 : Projet de restauration de la partie aval du Borne

FROSSARD P.A. ^(a), BOVY V. ^(a), BEAUFILS M. ^(b), CHASSERIEAU C. ^(b)

(a) HEPIA Genève – Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

Institut Terre-Nature-Environnement

Route de Presinge

CH 1254 JUSSY, SUISSE

(b) FDPMA 74 – Fédération de pêche de Haute-Savoie



"Le Villaret"

2092, route des Diacquenods

74370 SAINT-MARTIN BELLEVUE

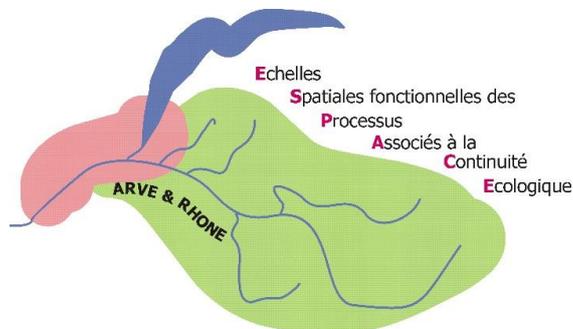
Résumé

En raison d'un endiguement sévère, le cours aval du Borne présente une structure hydromorphologique relativement uniforme, influençant négativement la qualité de l'habitat aquatique. Le contexte géographique et l'influence anthropique forte sur les rives de ce tronçon ne parlent pas en faveur de possibilités de restauration ambitieuses, agissant sur tous les compartiments de l'hydrosystème. En effet, compte tenu de l'occupation intensive du sol, seules des actions à l'intérieur des digues existantes sont envisageables, et sans péjorer la situation en matière de protection contre les crues. Des actions d'ambition modérée, visant essentiellement à améliorer l'habitat aquatique, sont ainsi proposées. Après un diagnostic simplifié de la qualité structurelle du Borne sur ce tronçon, une série de mesures d'aménagement à l'intérieur du lit mineur sont présentées et discutées sous l'angle de leurs effets, de leur mise en œuvre et de leurs coûts.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



I. Introduction/Contexte

Le Borne, affluent français situé en rive gauche de l'Arve, mesure 32 km de long et draine un bassin versant de 158 km². Sa partie aval, sur environ 3 km (de la confluence jusqu'à l'entrée des gorges) présente un tracé rectiligne (**Figure 110** et

Figure 111) qui réduit l'intérêt écologique de ce cours d'eau montagnard et limite le potentiel piscicole. Ce secteur contraste avec l'amont où les populations de truite fario de souche méditerranéenne sont bien installées et denses. Les zones de confluence sont des secteurs clé dans le continuum aquatique. En effet, lors d'évènements extrêmes (crue, pollution...), les affluents servent de zones de refuge pour la faune aquatique mais ces derniers sont également identifiés comme réservoirs pour la recolonisation du cours principal ou comme zones de reproduction de certaines espèces pour la survie de leurs populations.

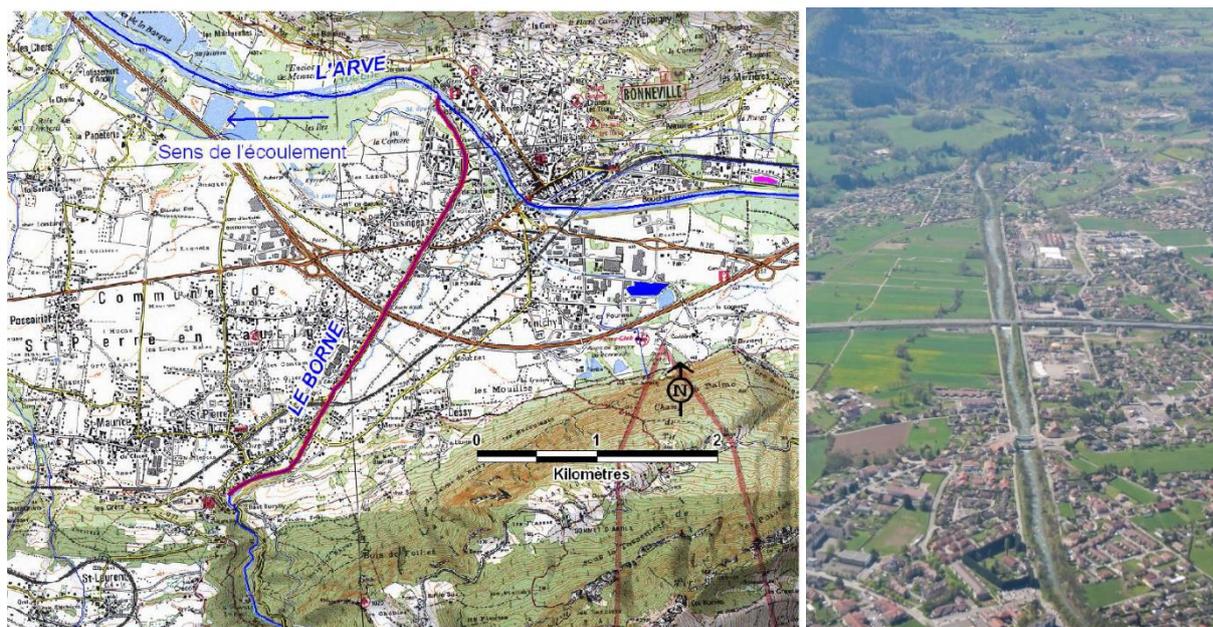


Figure 110 : Situation du Borne aval, affluent rive gauche de l'Arve, rectifié sur environ 3 km dans sa partie aval (linéaire rouge).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

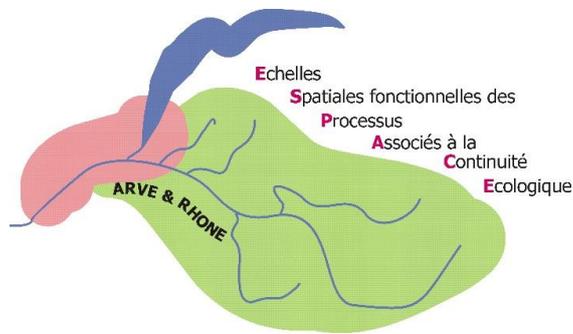


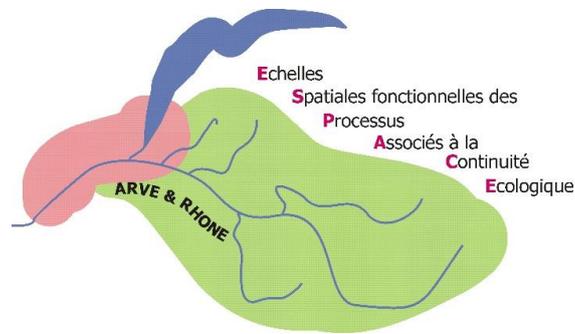
Figure 111 : Illustrations du Borne aval à St Pierre en Faucigny (a) VS Borne médian au Grand Bornand (b).

A l'heure actuelle, le Borne n'est plus fréquenté par l'ombre commun (RAYMOND, 1999) alors que les SDVP de 1985 et 1994 répertoriaient sa présence sur la partie aval. De plus, le Borne abrite sur sa partie médiane une population de truites autochtones de souche méditerranéenne qui a été mise en évidence en 2005 au moment du programme INTERREG IIIA « Identification, sauvegarde et réhabilitation des populations de truites autochtones » (CAUDRON *et al.*, 2006). Depuis lors, la gestion piscicole établie sur ce cours d'eau vise à préserver cette population patrimoniale et à étendre son aire de répartition. Pour l'instant, aucune action n'a été entreprise sur le secteur aval du Borne où il a été préconisé à plusieurs reprises (SDVP 1994, CSP 2001) des actions de restauration de la qualité physique. Mais localement, il y a une volonté d'entreprendre quelques actions d'amélioration de la qualité de ce cours d'eau, actions qui seraient portées par le SM3A, la structure gestionnaire du bassin de l'Arve et de ses affluents. Le but, sur ce secteur, est de favoriser la connectivité Arve-Borne et de rendre cette portion de cours d'eau plus attractive pour la faune piscicole en diversifiant l'habitat afin de conserver les populations sédentaires (dont celle de truites autochtones) dans un milieu de qualité et diversifié et d'assurer, à long terme, la pérennité et la diversité génétique de la population de truites autochtones encore persistante. Dans ce projet, l'objectif n'est pas de réaliser les aménagements de réhabilitation de l'habitat du Borne aval, mais d'étudier d'une part les différentes possibilités d'aménagements pouvant améliorer la qualité globale de la rivière sur ce tronçon avec un focus sur l'amélioration de l'habitat piscicole (en particulier sur le stade adulte) et d'autre part d'établir une méthodologie de suivi avant/après travaux dans l'optique d'évaluer et de quantifier leur efficacité sur le milieu et les populations piscicoles.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



L'étude se divise en trois phases :

1) Réalisation d'un diagnostic hydromorphologique qui déterminera les types d'aménagements à réaliser sur chacun des tronçons homogènes préalablement définis.

2) Proposition de plusieurs scénarii de restauration écologique et morphologique globale du lit du cours d'eau à l'échelle du linéaire rectifié. Ces scénarii, au stade d'Avant Projet Sommaire, présentent pour chacun les possibilités techniques, les coûts et les incidences hydrauliques.

Ces deux premières parties sont réalisées par FROSSARD P.A. & BOVY V. de HEPIA Genève.

3) Proposition d'une méthodologie « clé en main » pour la réalisation des diagnostics biologique et géomorphologique du suivi des travaux. Ce volet consiste à établir un état initial du secteur à partir de plusieurs indicateurs avant les modifications morphologiques apportées par les futurs aménagements, puis un état post-aménagements afin d'évaluer les gains attendus suite à la restauration de chaque tronçon.

Ce travail est réalisé par la FDDPMA74.

II. Diagnostic hydromorphologique

1) Découpage des tronçons à aménager

Un découpage du linéaire d'étude a été effectué à partir des caractéristiques morphologiques du cours d'eau afin d'obtenir des tronçons « homogènes » sur lesquels des aménagements-types seront proposés (Planche 1 : Carte des secteurs). Le tronçon homogène sera l'échelle de travail pour la suite des investigations.



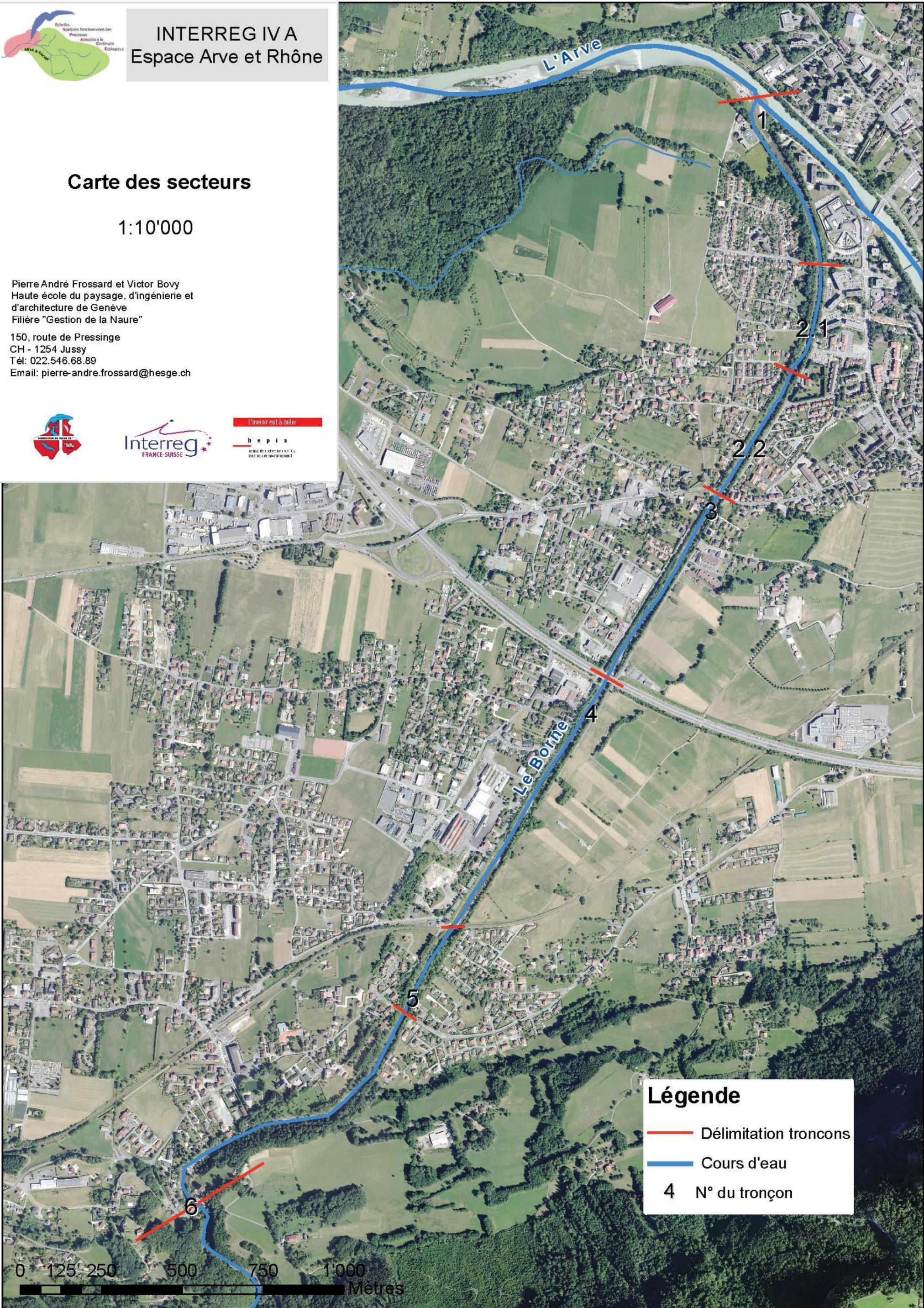
INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Carte des secteurs

1:10'000

Pierre André Frossard et Victor Bovy
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy
Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch



Légende

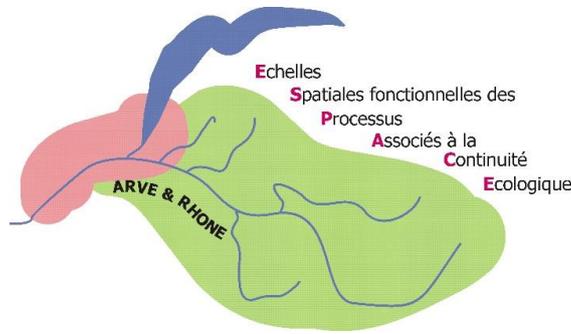
- Délimitation tronçons
- Cours d'eau
- 4 N° du tronçon

0 125 250 500 750 1'000
Metres



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



2) Etude hydromorphologique

■ Ecomorphologie – Niveau R

Dans le cadre de la présente étude, la méthode suisse « Ecomorphologie – Niveau R » a été utilisée pour apprécier l'hydromorphologie du Borne. Ci-dessous, le résumé de la méthode tiré du document officiel. Elle est également téléchargeable gratuitement sur le site du système modulaire gradué: http://www.modul-stufen-konzept.ch/fg/module/oekomor_f/flaechendeckend/index_FR.

■ Méthode

Les «Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse (concept modulaire)» sont des méthodes d'investigation à trois niveaux que l'on peut appliquer dans les domaines suivants: hydrodynamique/morphologie, biologie, effets chimiques et toxiques. Le présent rapport présente la méthodologie appliquée à la recherche régionale «Ecomorphologie – niveau R». Il s'agit ici d'obtenir une appréciation préliminaire de l'état naturel des cours d'eau d'une région (p. ex. cantons, régions, communes). Lors d'une inspection, on utilise un nombre restreint de critères pour relever des données concernant l'hydromorphologie, les mesures techniques entreprises dans le cours d'eau et sur ses berges, ainsi que les conditions environnantes. Ces informations concernant la largeur du cours d'eau et sa variabilité, l'aménagement du lit et l'enrochement du pied de berge, la nature et la largeur des rives, ainsi que les perturbations de la continuité (seuils, barrages, etc.) sont ensuite reportées sur des formulaires. Chaque critère correspond à un certain nombre de points. Le total obtenu permet de répartir les tronçons en quatre classes, représentées en bleu, vert, jaune et rouge sur les cartes synoptiques (**Tableau 37**).

Tableau 37 : Classification des résultats et représentation graphique.

Classes	Etat ou type d'atteinte	Représentation
I	Naturel/semi-naturel	
II	Peu atteint	
III	Très atteint	
IV	Non naturel/artificiel	
	Mis sous terre	

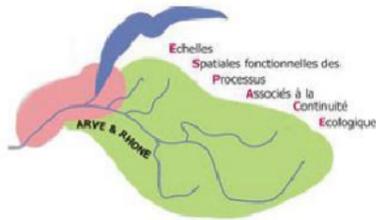
Sur le terrain, les paramètres suivants sont relevés :

- Variabilité de la largeur du lit mouillée
- Aménagement du fond du lit
- Renforcement du pied de la berge
- Largeur et la nature des rives

Les planches suivantes (Planches « Diagnostic » secteur 1 à 6) présentent le résultat du diagnostic hydromorphologique établi par tronçon homogène.

INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Diagnostic Secteur 1 1:1'000

Auteurs du projet:

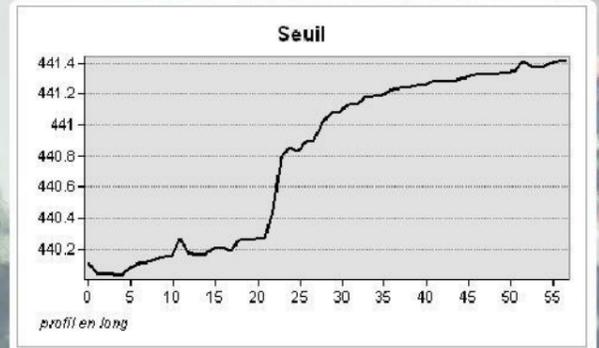
Pierre André Frossard et Victor Bovy
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

Mai 2015

N° du Projet : 37073

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tel: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch



Seuil-rampe proche de l'embouchure

Secteur 1
Linéaire: 563 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	563	m
Alt.aval:	438.7	m.s.m
Alt. Amont:	443.85	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	0.9	%

Occupation du sol

Rive droite	Industriel mi-dense
Rive gauche	2/3 Résidentiel dense 1/3 Agricole

Caractéristiques morphologiques

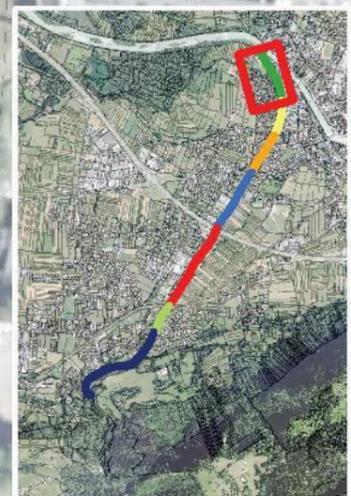
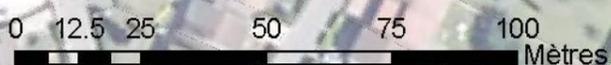
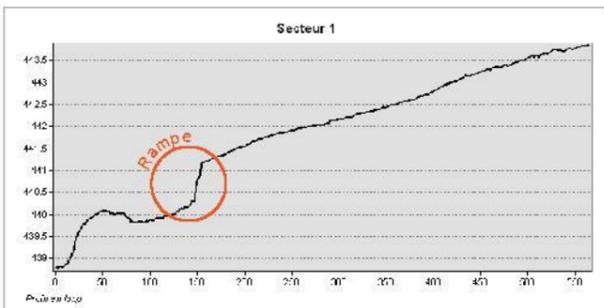
Largeur du lit (moy.) ; (σ)	21.9 ; 2.0 m
Variabilité du lit (min) ; (max)	20.3 ; 25.3 m
Structure du fond du lit	Uniforme, très peu structuré
Renforcement du pied de berge	Enrochement lâche partiellement végétalisé
Largeur des berges	Faible
Nature des berges	Fortement boisées RG et RD
Présence de terrasses alluviales	NON
Présence de digues:	100 % RD et RG

Perturbation de la libre circulation

Rampe pente de 10% sur longueur de 8 m
cf. profil en long

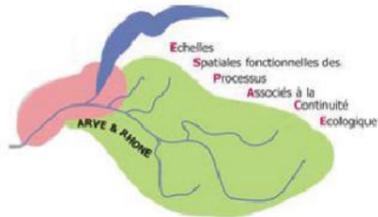


Le lit du Borne dans ce secteur est homogène peu structuré et sa largeur présente une faible variabilité.



INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Diagnostic Secteur 2 amont

1:1'000

Auteurs du projet:

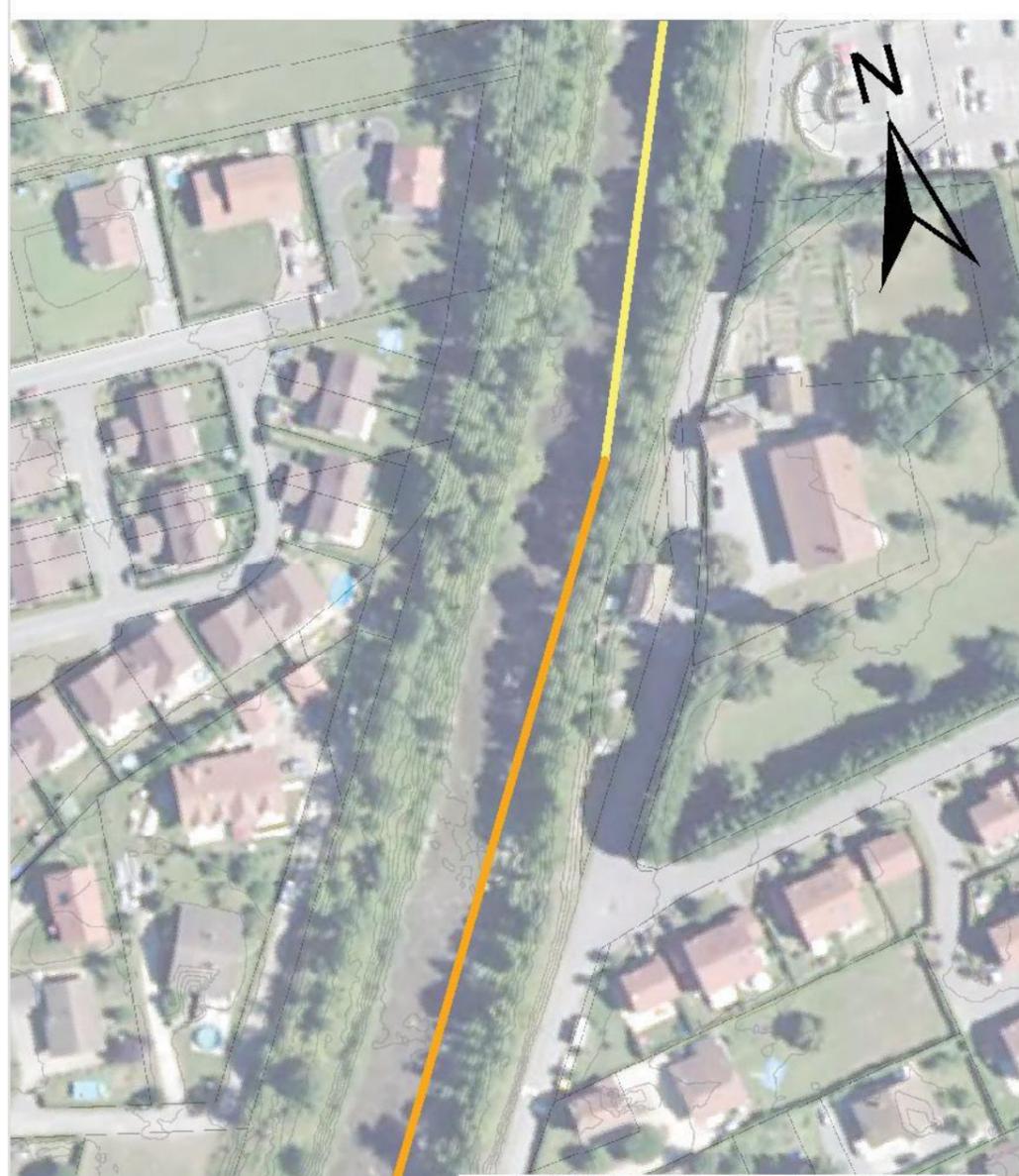
Pierre André Frossard et Victor Bovy
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Naure"

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

Mai 2015

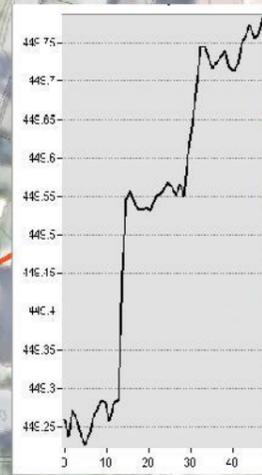
N° du Projet : 37073



Le fond du lit est faiblement diversifié, on remarque quelques petites variations de granulométrie. En RD on perçoit une accumulation de sédiments.



Seuil de la D1203



Secteur 2 amont
Linéaire: 423 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	423.7	m
Alt.aval:	446.07	m.s.m
Alt. Amont:	449.54	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	0.82	%

Occupation du sol

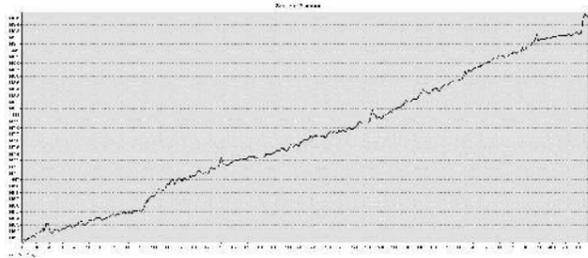
Rive droite	Résidentiel dense
Rive gauche	Résidentiel dense

Caractéristiques morphologiques

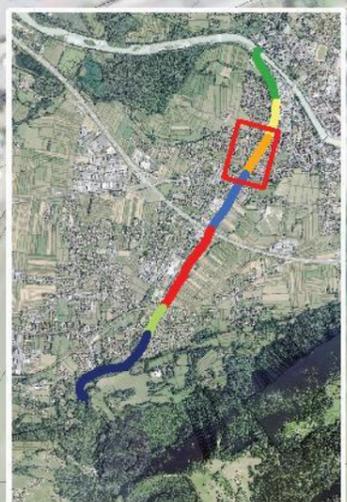
Largeur du lit (moy.) ; (σ)	19.4 ; 2.7 m
Variabilité du lit (min) ; (max)	15.5 ; 21.6 m
Structure du fond du lit	Uniforme, faiblement structuré
Renforcement du pied de berge	Enrochement lâche partiellement végétalisé
Largeur des berges	Faible à nulle
Nature des berges	Boisées RG et RD
Présence de terrasses alluviales	NON
Présence de digues:	100 % RD et RG

Perturbation de la libre circulation

Chute sous le pont de la route 0.5 m

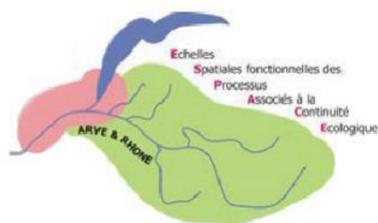


0 12.5 25 50 75 100 Mètres



INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Diagnostic Secteur 2 aval

1:1'000

Auteurs du projet:

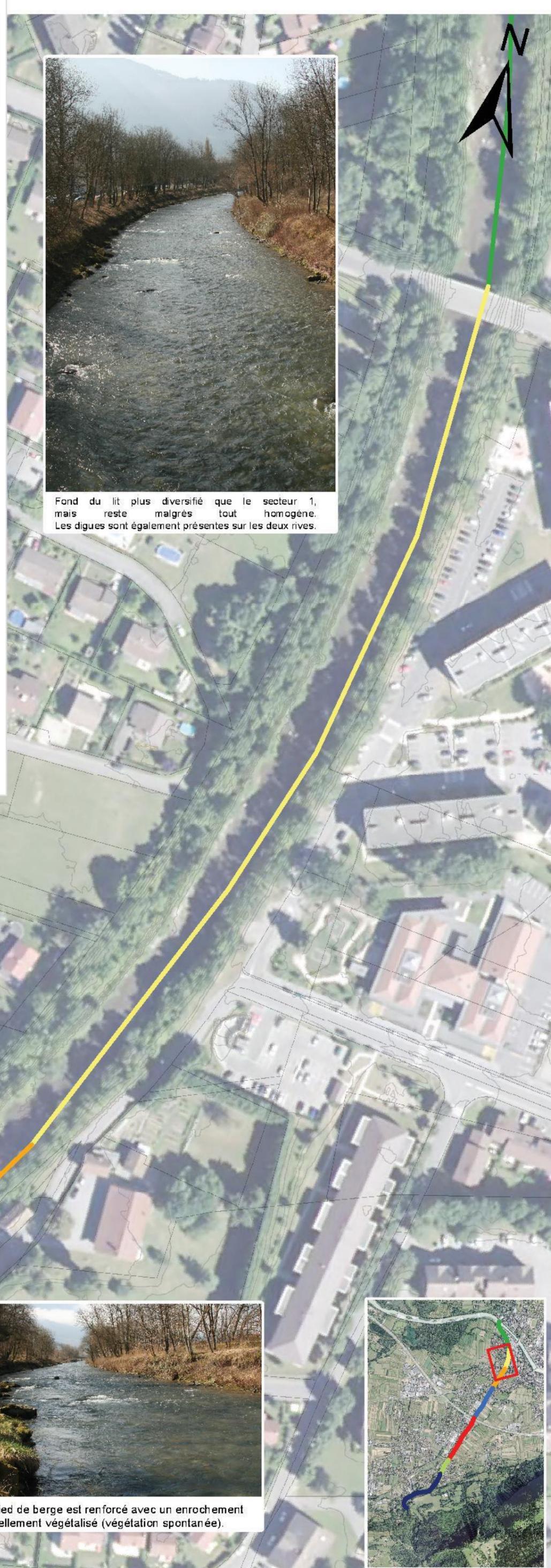
Pierre André Frossard et Victor Boyv
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Naure"

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

Mai 2015

N° du Projet : 37073



Fond du lit plus diversifié que le secteur 1, mais reste malgré tout homogène. Les digues sont également présentes sur les deux rives.

Secteur 2 aval
Linéaire: 366 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	366	m
Alt.aval:	443.85	m.s.m
Alt. Amont:	446.07	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	0.61	%

Occupation du sol

Rive droite	Résidentiel dense
Rive gauche	Résidentiel dense

Caractéristiques morphologiques

Largeur du lit (moy.); (σ)	18.5 ; 1.6 m
Variabilité du lit (min) ; (max)	16.4 ; 20.2 m
Structure du fond du lit	Uniforme, faible variabilité
Renforcement du pied de berge	Enrochement lâche partiellement végétalisé
Largeur des berges	Faible à nulle
Nature des berges	Boisées RG et RD
Présence de terrasses alluviales	NON
Présence de digues:	100 % RD et RG

Perturbation de la libre circulation

Non



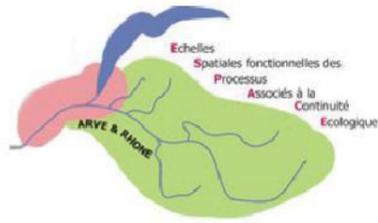
Le pied de berge est renforcé avec un enrochement partiellement végétalisé (végétation spontanée).



0 12.5 25 50 75 100 Mètres

INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Diagnostic Secteur 3

1:1'500

Auteurs du projet:

Pierre André Frossard et Victor Boyv
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Naure"

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

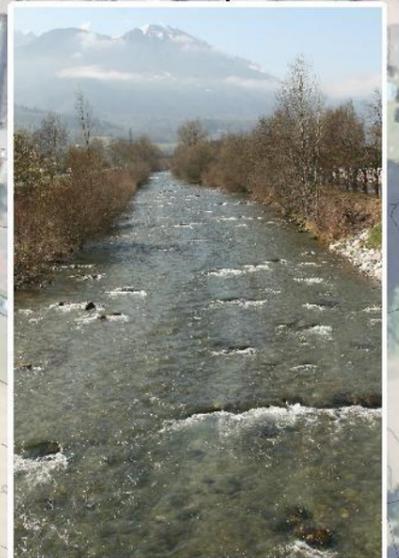
Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

Mai 2015

N° du Projet : 37073



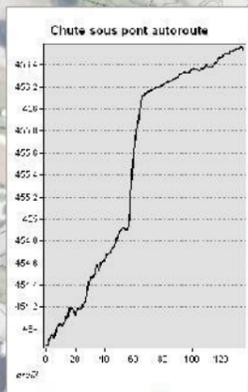
Pied de berge en enrochements libres et récents.



Le fond du lit dans ce secteur offre quelques variations.



Bancs de sédiments grossiers.



Secteur 3
Linéaire: 659 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	659.2	m
Alt.aval:	449.54	m.s.m
Alt. Amont:	454.9	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	0.81	%

Occupation du sol

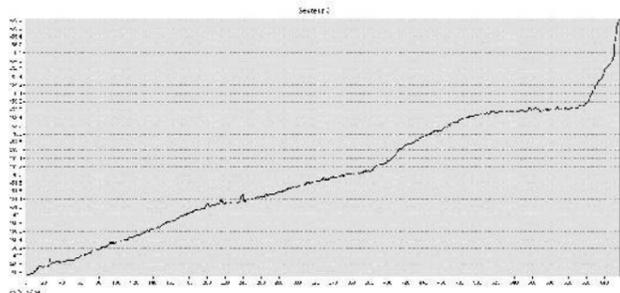
Rive	Occupation	Pourcentage
Rive droite	Résidentiel	37 %
	Agricole	63 %
Rive gauche	Résidentiel	50 %
	Industriel	50 %

Caractéristiques morphologiques

Largeur du lit (moy.) ; (σ)	20.7 ; 3.7	m
Variabilité du lit (min) ; (max)	17.3 ; 27.8	m
Structure du fond du lit	Uniforme, variabilité faible	
Renforcement du pied de berge	Enrochement lâche partiellement végétalisé	
Largeur des berges	Faible à nulle	
Nature des berges	Boisées RG et RD	
Présence de terrasses alluviales	Oui	2945 m ²
Présence de digues:	100 %	RD
	0 %	RG

Perturbation de la libre circulation

Chute sous le pont de l'autoroute



0 20 40 80 120 160 Mètres

INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Diagnostic Secteur 4

1:1'750

Auteurs du projet:

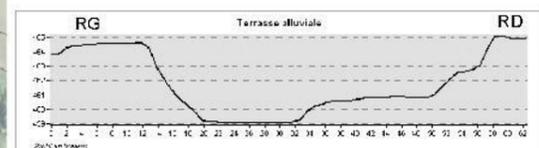
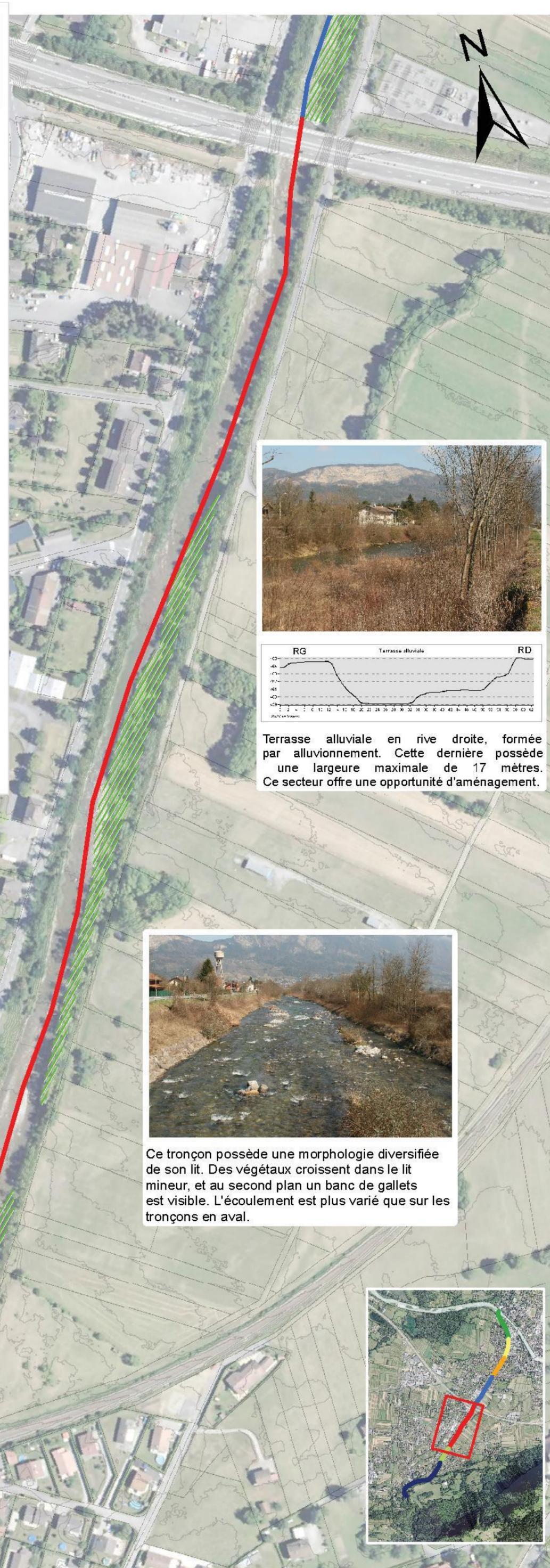
Pierre André Frossard et Victor Boyv
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

Mai 2015

N° du Projet : 37073

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch



Terrasse alluviale en rive droite, formée par alluvionnement. Cette dernière possède une largeur maximale de 17 mètres. Ce secteur offre une opportunité d'aménagement.



Ce tronçon possède une morphologie diversifiée de son lit. Des végétaux croissent dans le lit mineur, et au second plan un banc de galets est visible. L'écoulement est plus varié que sur les tronçons en aval.

Secteur 4
Linéaire: 915 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	915.2	m
Alt.aval:	454.9	m.s.m
Alt. Amont:	464.7	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	1.07	%

Occupation du sol

Rive droite	Agricole	100%
Rive gauche	Résidentiel	50%
	Industriel	50%

Caractéristiques morphologiques

Largeur du lit (moy.) ; (σ)	20.5 ; 5.5	m
Variabilité du lit (min) ; (max)	13.7 ; 29.6	m
Structure du fond du lit	Varié, présences de banquettes en galets. Ecoulements diversifiés, reste encore anthropique.	

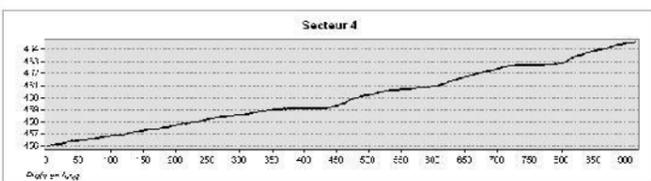
Renforcement du pied de berge: Enrochement lâche partiellement végétalisé

Largeur des berges: Faible à nulle
Boisées RD

Nature des berges: 2/3 boisées RG
Présence de terrasses alluviales: Oui 5828 m²
Présence de digues: 100 % RD
50 % RG

Perturbation de la libre circulation

-

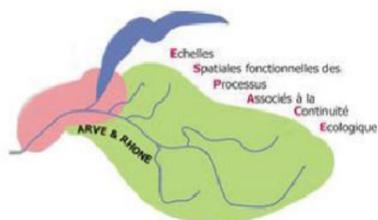


0 25 50 100 150 200 Mètres



INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Diagnostic Secteur 5 1:1'000

Auteurs du projet:

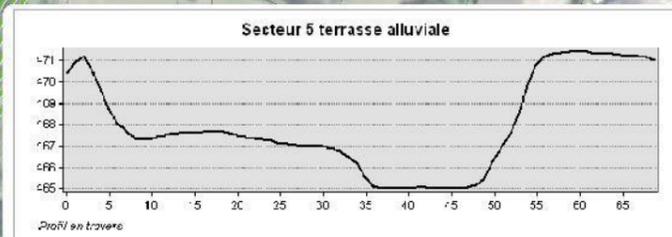
Pierre André Frossard
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

Mai 2015

N° du Projet : 37073

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch



La digue en RD est toujours présente, concernant la RG elle a disparu depuis le secteur 4. Présence d'une terrasse alluviale ancienne, couverte d'un boisement évolué du type forestier. Par contre dans ce secteur la largeur du lit est plus faible que sur les autres tronçons.

Secteur 5
Linéaire: 306 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	306.9	m
Alt.aval:	464.7	m.s.m
Alt. Amont:	466.9	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	0.72	%

Occupation du sol

Rive droite	Résidentiel	100%
Rive gauche	Résidentiel	100%

Caractéristiques morphologiques

Largeur du lit (moy.) ; (σ)	16.8 ; 1.4	m
Variabilité du lit (min) ; (max)	15.8 ; 18.5	m
Structure du fond du lit	Peu varié, mais présence d'un secteur aux écoulements diversifiés, reste encore anthropique.	

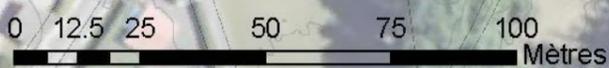
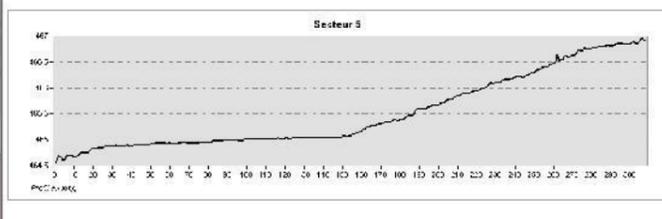
Renforcement du pied de berge Enrochement lâche partiellement végétalisé

Largeur des berges Faible à nulle
Nature des berges Boisées RD
2/3 boisées RG

Présence de terrasses alluviales Oui 5150 m²

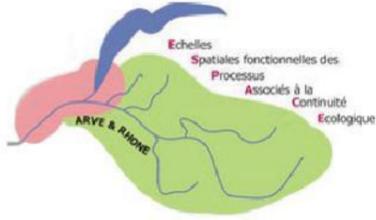
Présence de digues: 100 % RD
0 % RG

Perturbation de la libre circulation



INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Etat initial
Secteur 6
1:2'000

Auteurs du projet:

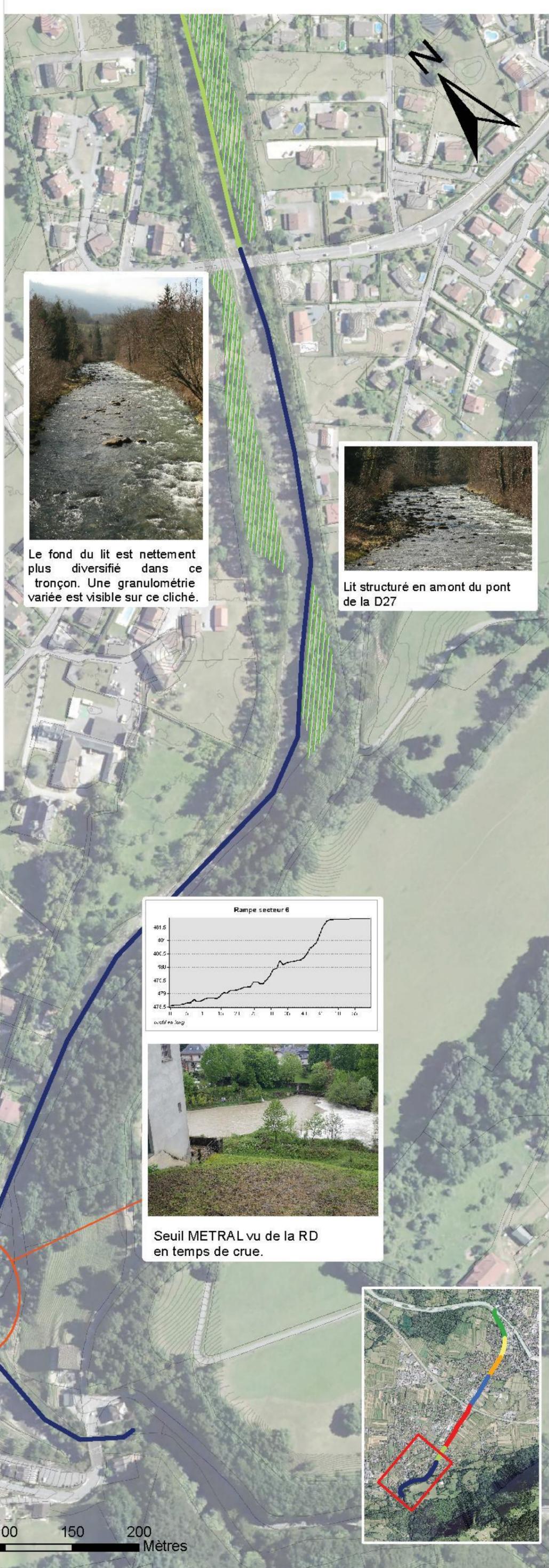
Pierre André Frossard
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Naure"

Mai 2015

N° du Projet : 37073

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tél: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch



Le fond du lit est nettement plus diversifié dans ce tronçon. Une granulométrie variée est visible sur ce cliché.



Lit structuré en amont du pont de la D27

Secteur 6
Linéaire: 1049 m

Morphométrie du secteur

Linéaire:	1049.3	m
Alt.aval:	466.9	m.s.m
Alt. Amont:	482.19	m.s.m
Pente générale (ligne d'eau):	1.46	%

Occupation du sol

Rive droite	Residentiel	20%
Rive gauche	Residentiel	50%

Caractéristiques morphologiques

Largeur du lit (moy.) ; (σ)	23.2 ; 6.7	m
Variabilité du lit (min) ; (max)	17.5 ; 39.9	m
Structure du fond du lit	Peu d'accès vers le lit. Les parties visibles témoignent d'une structure variée	

Renforcement du pied de berge Surtout dans l'extrado dans le village, en sortie des gorges. Enrochement partiellement végétalisé

Largeur des berges Faible à nulle
Nature des berges Boisées RD
2/3 boisées RG

Présence de terrasses alluviales Oui 5150 m²
Présence de digues: 20 % RD
0 % RG

Perturbation de la libre circulation

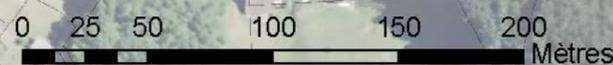
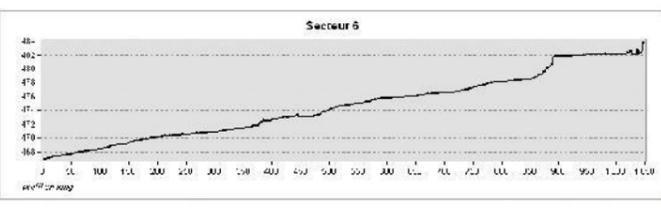
Enrochement massif dans le secteur du village. Servait probablement à l'approvisionnement du moulin an aval. La hauteur de chute est conséquente, h: 1,55 sur une distance de 5m soit une pente de 31%.



Amont du seuil METRAL



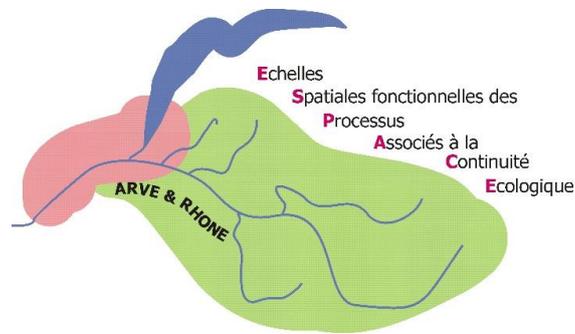
Seuil METRAL vu de la RD en temps de crue.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



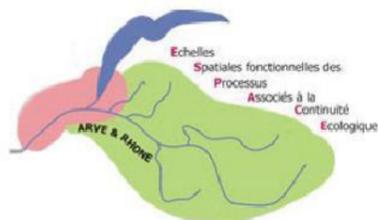
Dans un second temps, les critères relevés sur le terrain ont été pondérés. Le nombre total de points permet d'obtenir une évaluation de l'état hydromorphologique de chaque tronçon homogène. L'état hydromorphologique est défini par la qualité de son habitat ainsi que son degré de dégradation.

Concernant les possibilités de restauration, elles ont été évaluées selon une appréciation personnelle reposant sur des observations de terrain. L'occupation des terres riveraines et la présence de bancs alluviaux ont notamment influencé cette appréciation. Les niveaux de restauration (R1, R2, R3) ont été empruntés à la typologie de ADAM *et al.* (2007).

La planche « Potentiels et hydromorphologie » puis les fiches bilan suivantes font état de ces deux dernières étapes de l'étude hydromorphologique : évaluation hydromorphologique et potentialité de restauration définies pour chaque tronçon.

INTERREG IV A Espace Arve et Rhône

Concept d'aménagement du Borne aval



Potentiels et hydromorphologie

1:6'000

Auteurs du projet:

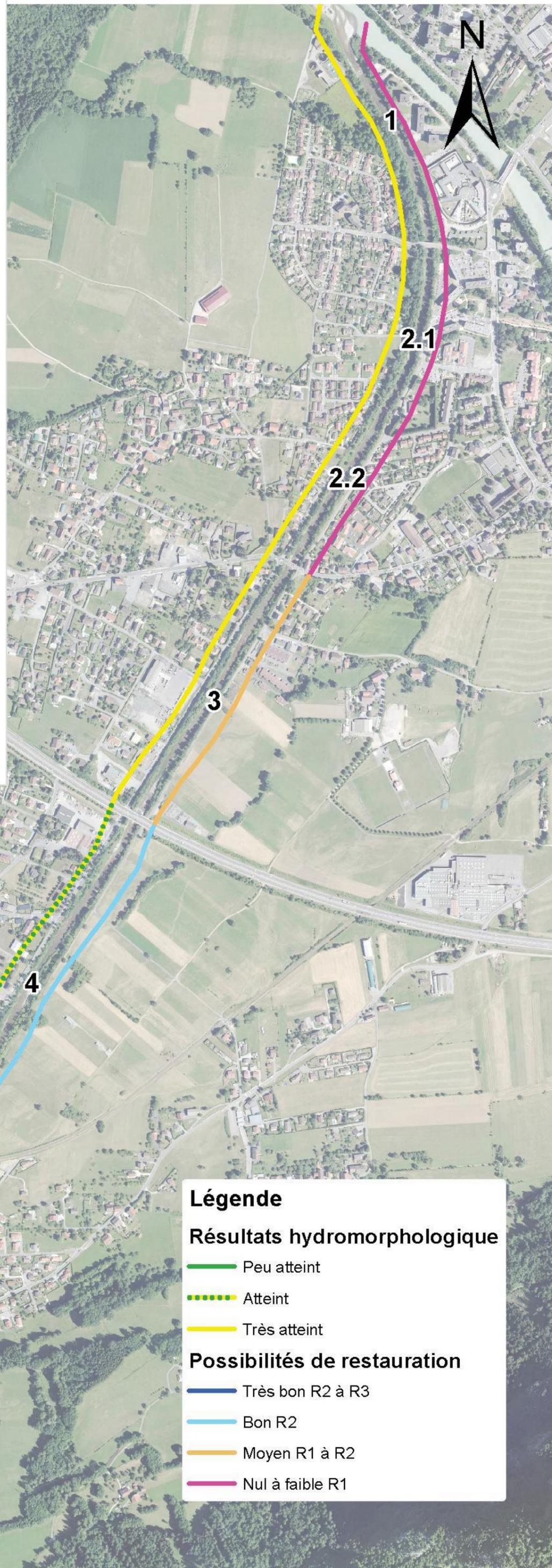
Pierre André Frossard et Victor Bovy
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

Mai 2015

N° du Projet : 37073

150, route de Pressinge
CH - 1254 Jussy

Tel: 022.546.68.89
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch



Légende

Résultats hydromorphologique

- Peu atteint
- - - Atteint
- Très atteint

Possibilités de restauration

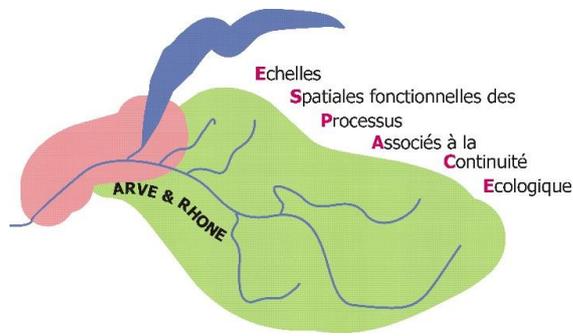
- Très bon R2 à R3
- Bon R2
- Moyen R1 à R2
- Nul à faible R1





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Tronçon 1

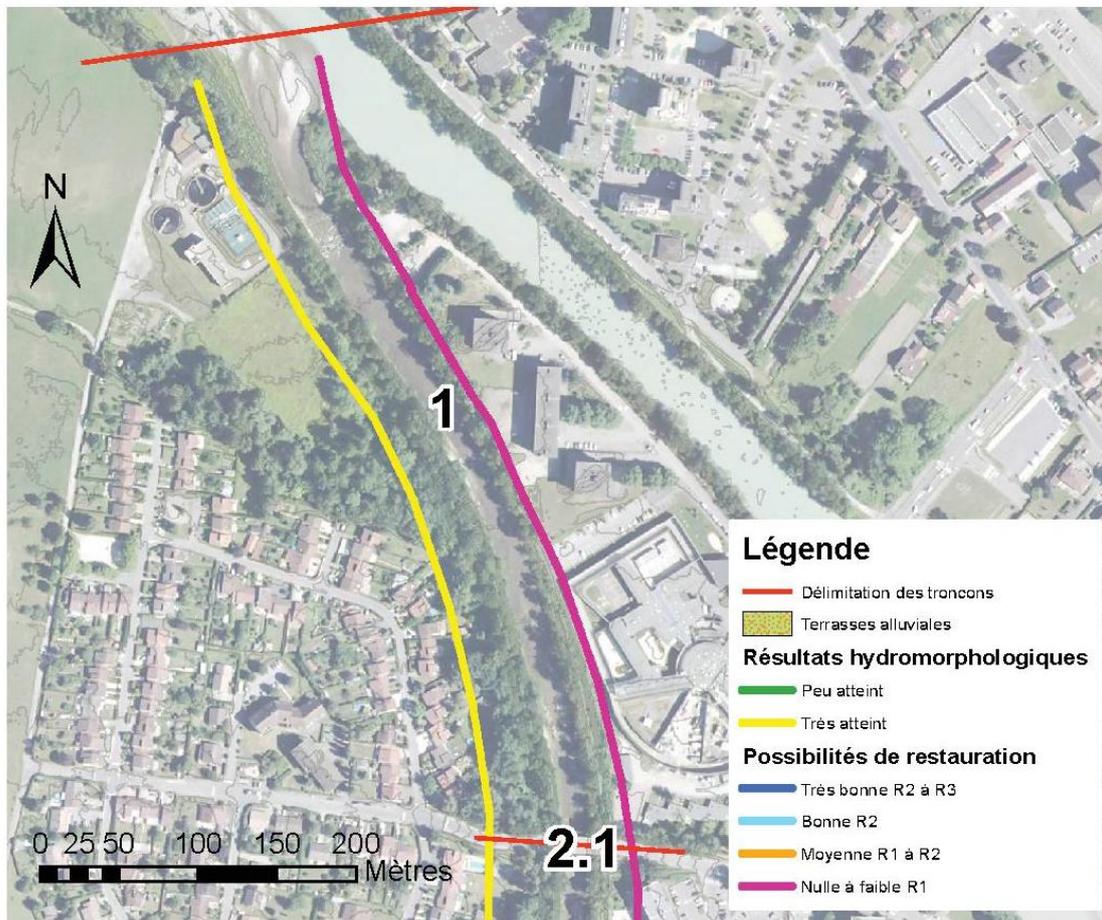
Etude hydromorphologique

Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	Nulle	3
Degré d'aménagement du fond du lit	<10%	1
Renforcement du pied de berge	10-30 % Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ; Typique	2
Perturbation de la libre circulation	1x rampe Δh 1m	
Total:		6.5 => 7 /12

Etat du cours d'eau: Très atteint

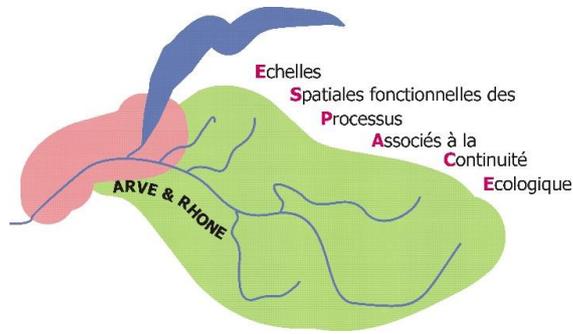
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Tronçon 2 aval

Etude hydromorphologique

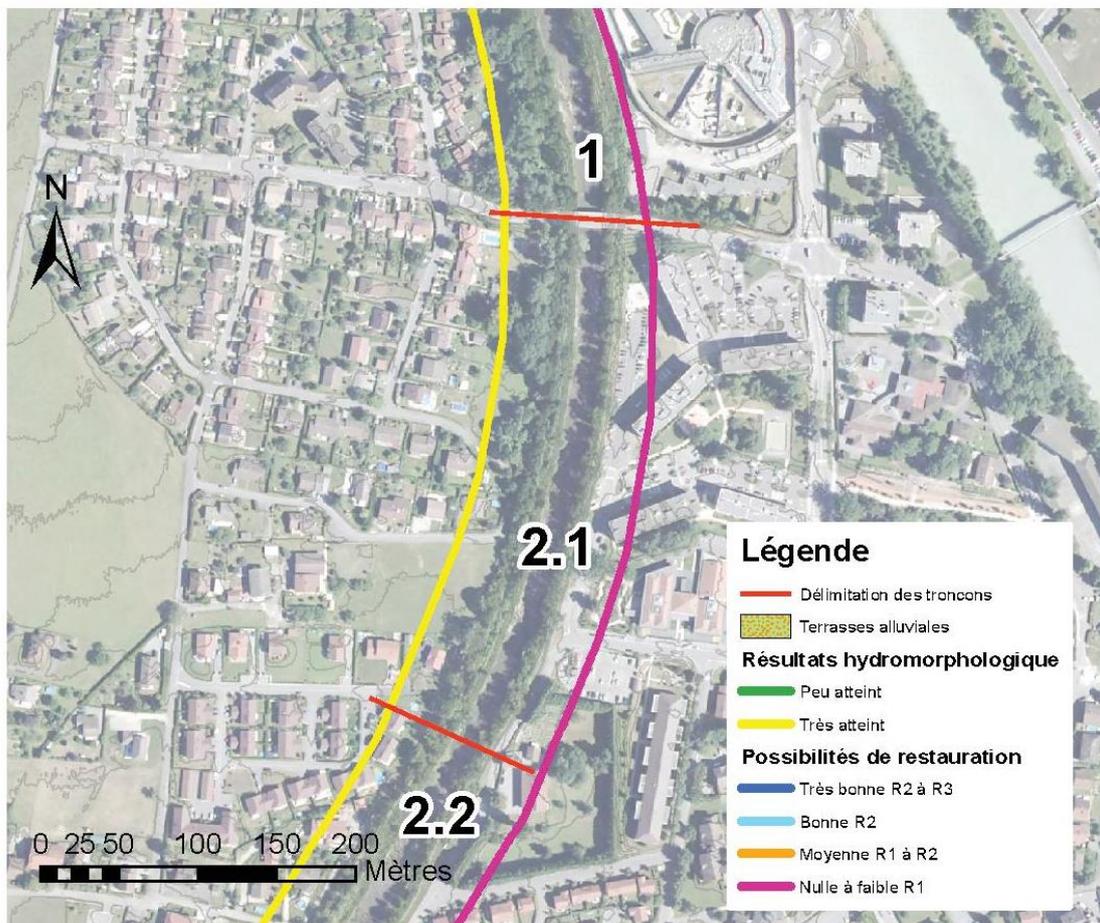
Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	Nulle	3
Degré d'aménagement du fond du lit	<10%	1
Renforcement du pied de berge	10-30 % Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ; Typique	2
Perturbation de la libre circulation		

Total: 6.5 => 7 /12

Etat du cours d'eau: **Très atteint**

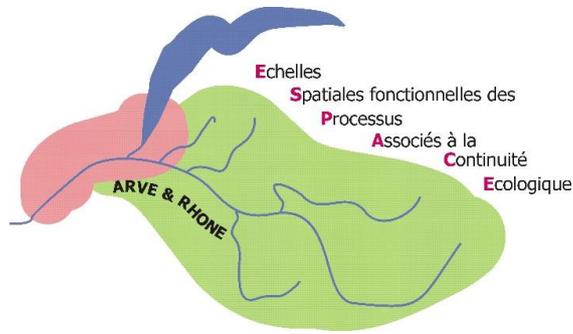
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Tronçon 2 amont **Etude hydromorphologique**

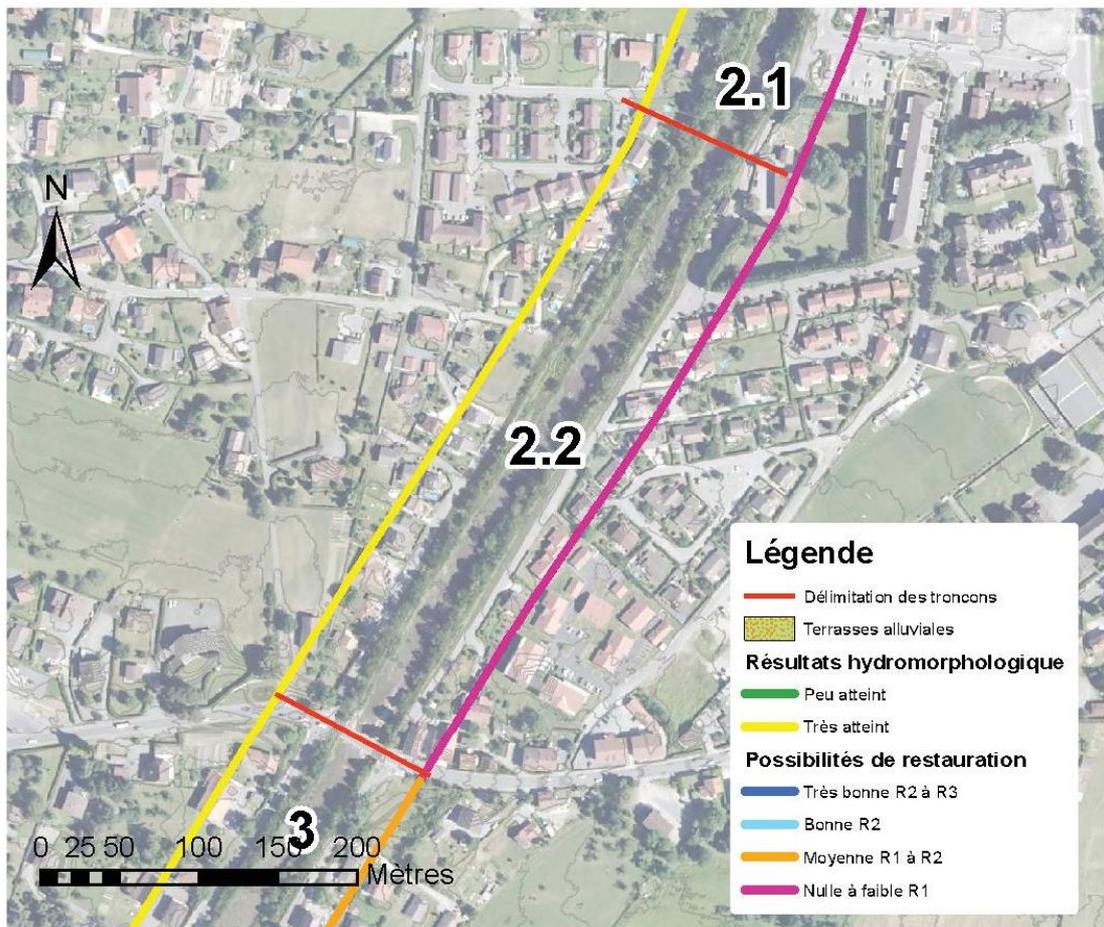
Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	limitée	2
Degré d'aménagement du fond du lit	<10%	1
Renforcement du pied de berge	10-30 % Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ; Typique	2
Perturbation de la libre circulation		

Total: 5.5 => 6 /12

Etat du cours d'eau: **Très atteint**

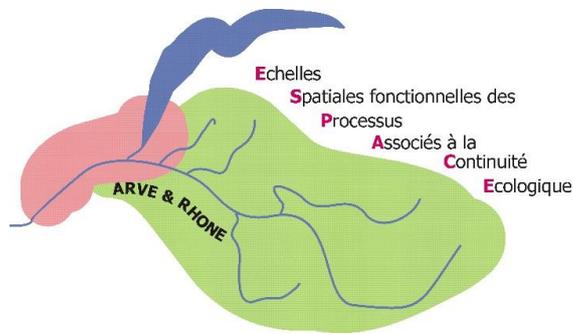
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Tronçon 3

Etude hydromorphologique

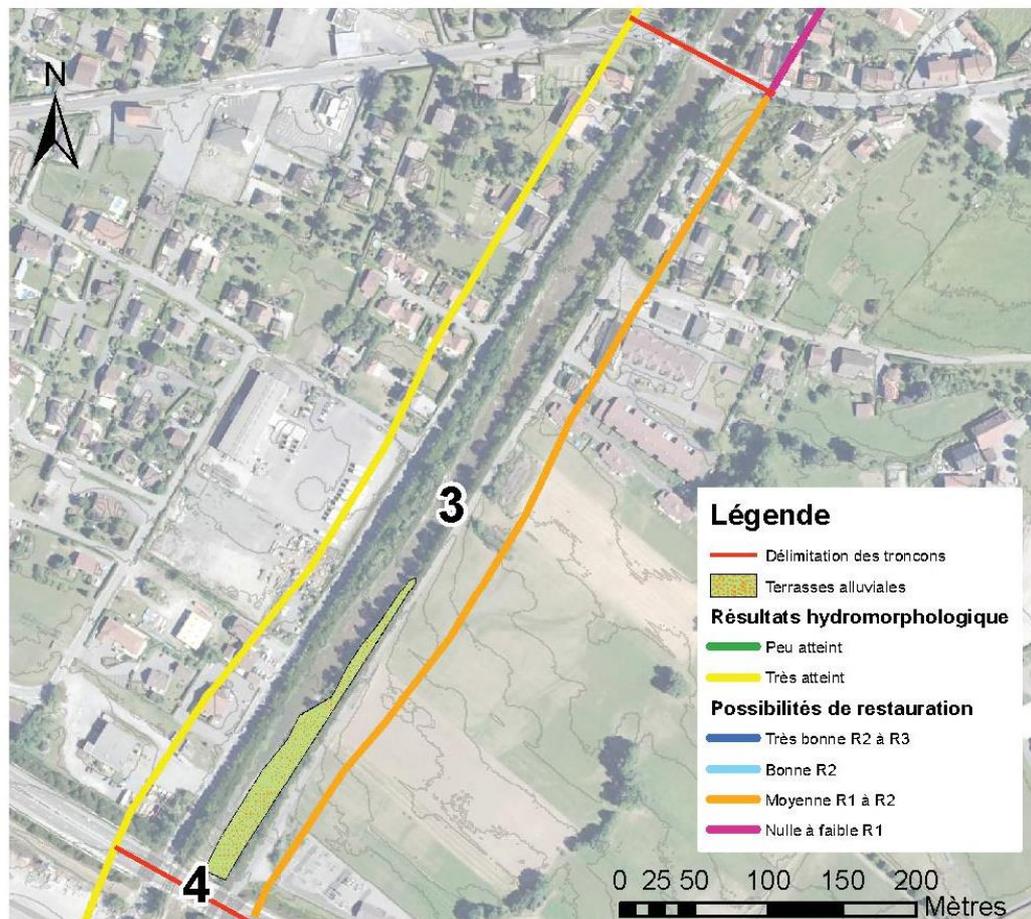
Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	limitée		2
Degré d' aménagement du fond du lit	10 - 30 %		2
Renforcement du pied de berge	10-30 %	Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ;	Typique	2
Perturbation de la libre circulation			

Total: 6.5 => 7 /12

Etat du cours d'eau: **Très atteint**

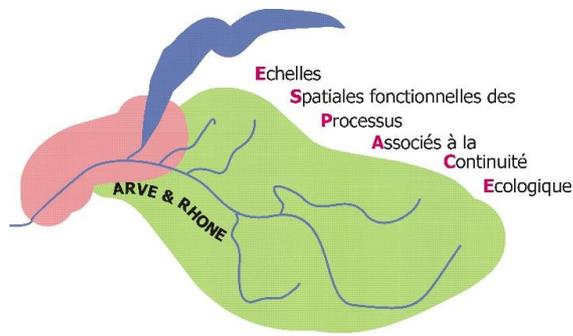
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Tronçon 4

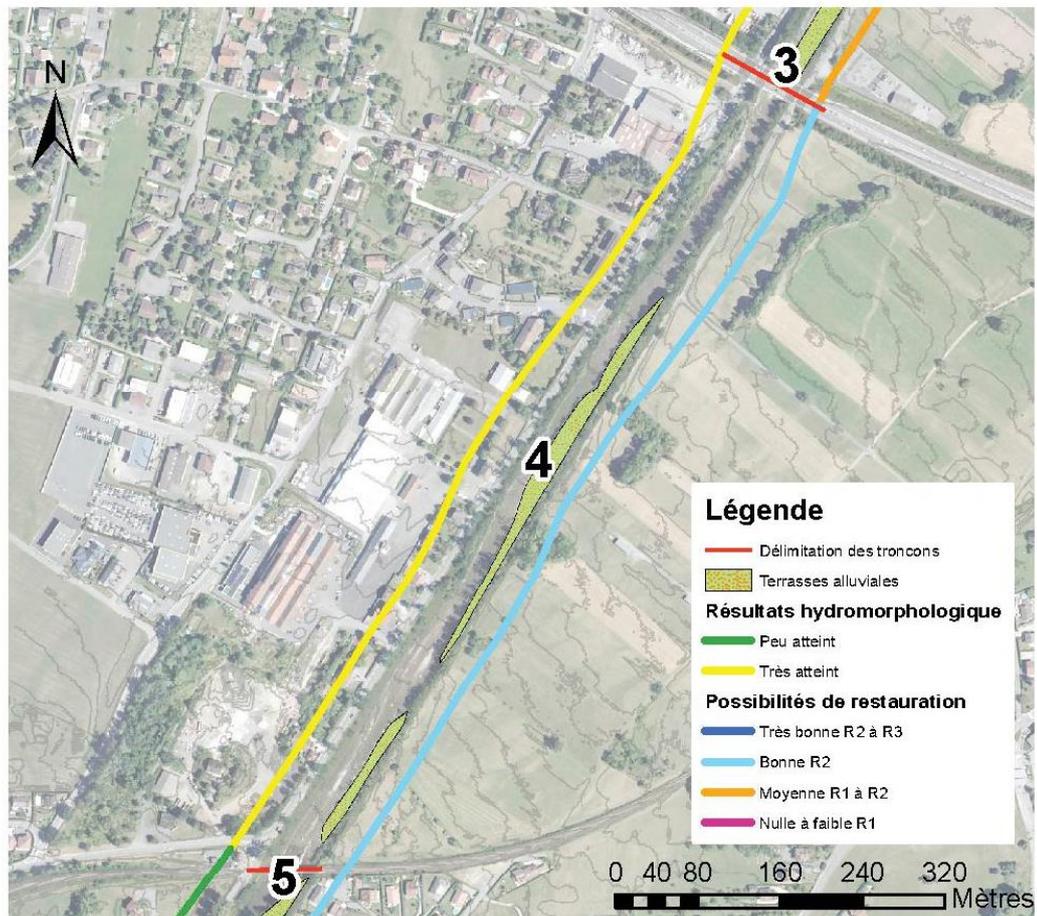
Etude hydromorphologique

Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	limitée	2
Degré d'aménagement du fond du lit	<10%	1
Renforcement du pied de berge	10-30% Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ; Typique	2
Perturbation de la libre circulation		
Total:		5.5 => 6 /12

Etat du cours d'eau: **Très atteint**

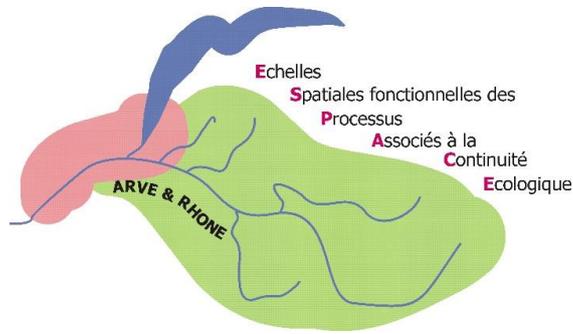
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Tronçon 5

Etude hydromorphologique

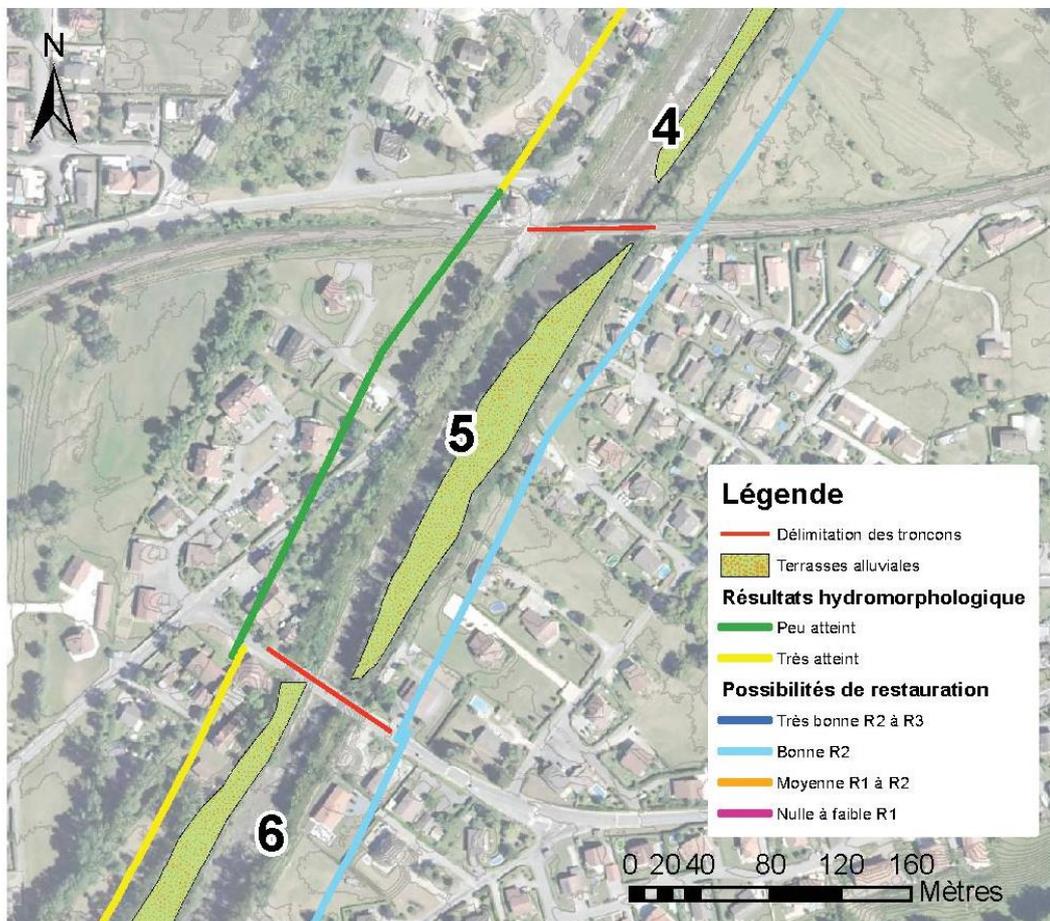
Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	limitée	2
Degré d'aménagement du fond du lit	nul	0
Renforcement du pied de berge	10-30% Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ; Typique	2
Perturbation de la libre circulation		

Total: 4.5 => 5 /12

Etat du cours d'eau: **peu atteint**

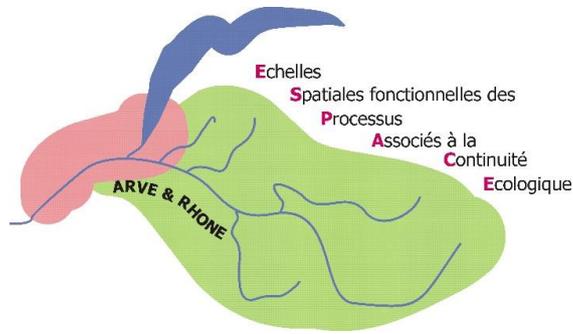
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Tronçon 6

Etude hydromorphologique

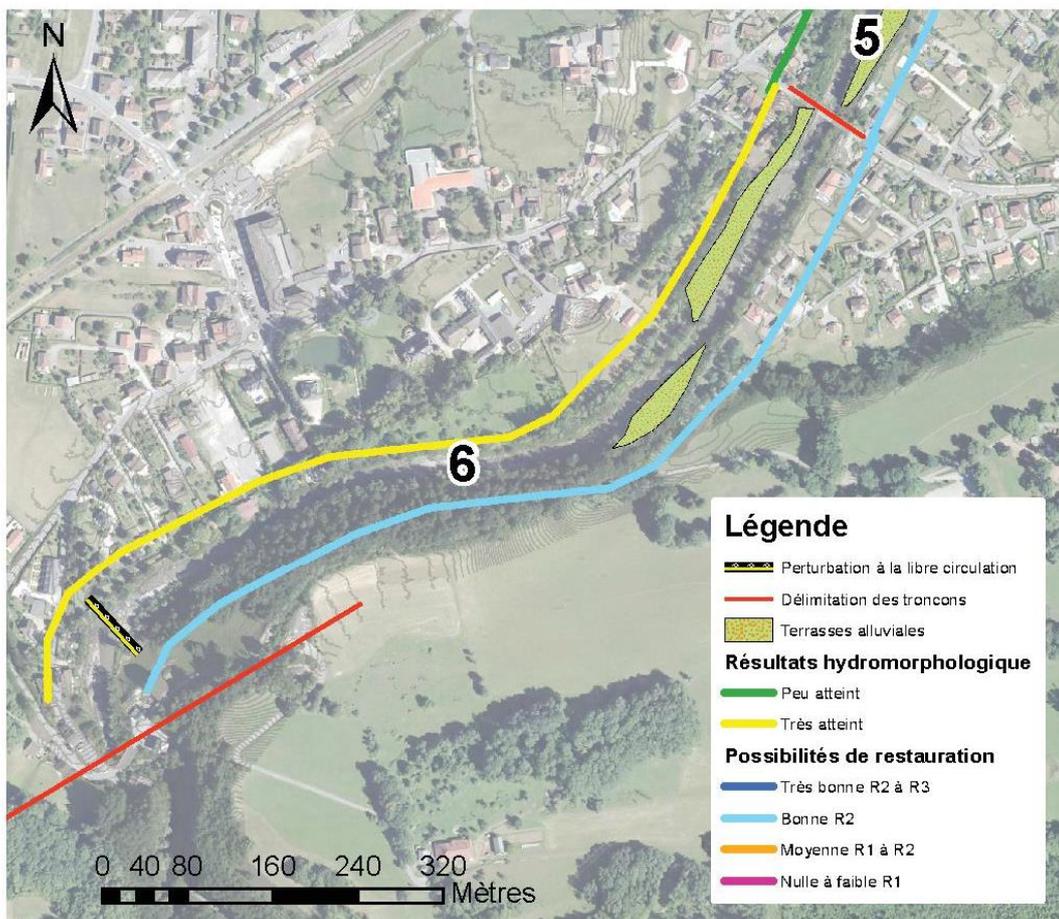
Évaluation:

Variabilité de la largeur du lit	limitée		2
Degré d' aménagement du fond du lit	<10%		1
Renforcement du pied de berge	10-30%	Perméable	0.5
Largeur et nature des rives	Insuffisante ; Typique		2
Perturbation de la libre circulation			

Total: 5.5 => 6 /12

Etat du cours d'eau: **Très atteint**

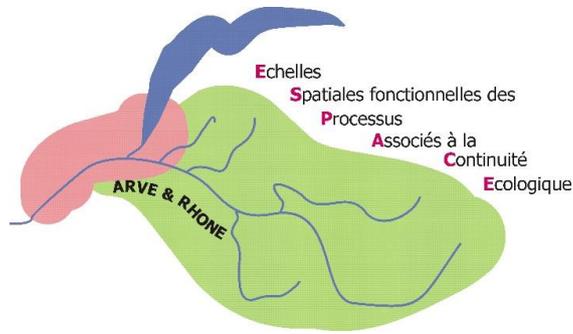
Carte:





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Récapitulatif

Etude hydromorphologique

Secteur 1	6.5 => 7		Très atteint
Secteur 2 aval	6.5 => 7		Très atteint
Secteur 2 amont	5.5 => 6		Très atteint
Secteur 3	6.5 => 7		Très atteint
Secteur 4	5.5 => 6		Très atteint
Secteur 5	4.5 => 5		Peu atteint
Secteur 6	5.5 => 6		Très atteint

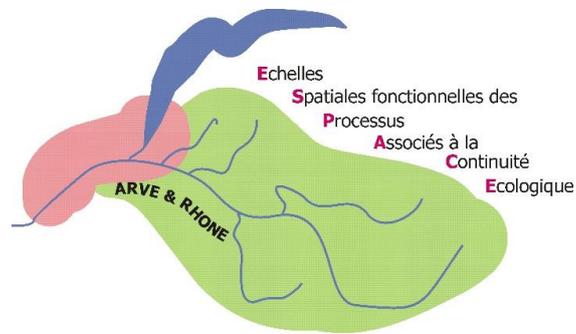
Remarques

Les notes au demi-points sont arrondie au nombre entier supérieur.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



III. Scénarii de restauration

1) Fiches mesures

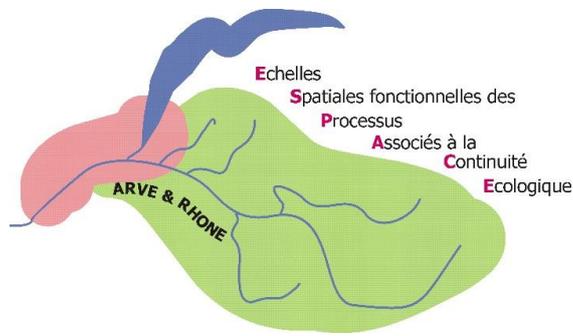
Les fiches ci-après présentent les différents types d'aménagements réalisables dans le cadre d'une restauration d'habitat piscicole. Elles spécifient les tronçons sur lesquels elles pourraient être mises en oeuvre :

- 1) Pose de blocs dans le lit mineur
- 2) Aménagement d'épis en blocs
- 3) Aménagement de bancs et risbermes alternées
- 4) Abaissement et rajeunissement de terrasses alluviales
- 5) Aménagement de sous-berges
- 6) Rivière de contournement



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Mesure 1

Concept d'aménagement du Borne aval

Pose de blocs dans le lit mineur

Tronçons concernés:

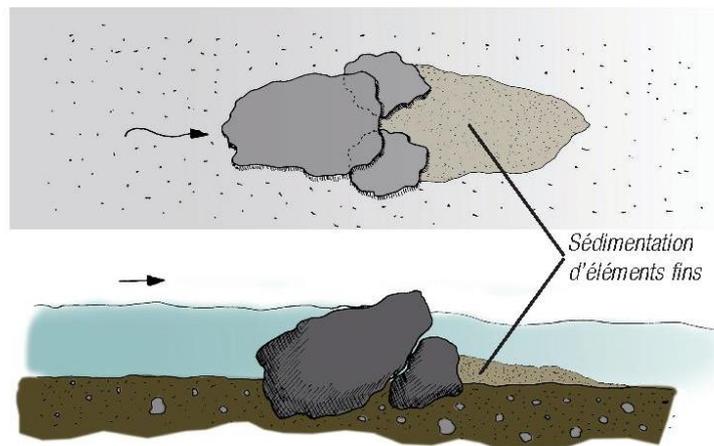
1	2av	2am	3	4	5	6
---	-----	-----	---	---	---	---

Principe:

De par la rugosité produite, les blocs freinent le courant et des dépôts de sédiments plus fins se forment à l'aval immédiat des blocs.

Objectifs:

- Création d'abris hydrauliques.
- Zone de frais dans les dépôts de graviers qui se forment à l'aval des blocs



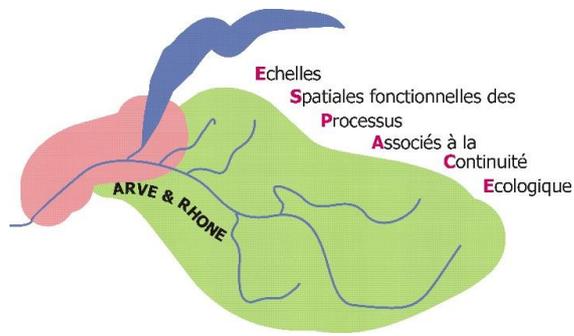
Précautions:

- Ne jamais poser de blocs dans les remous hydraulique d'un seuil, l'absence de vitesse se traduisant par une perte d'efficacité.
- Bien dimensionner les blocs utilisés pour qu'ils aient une efficacité hydraulique suffisante.
- L'augmentation de la rugosité ne doit pas aggraver les phénomènes d'inondation.

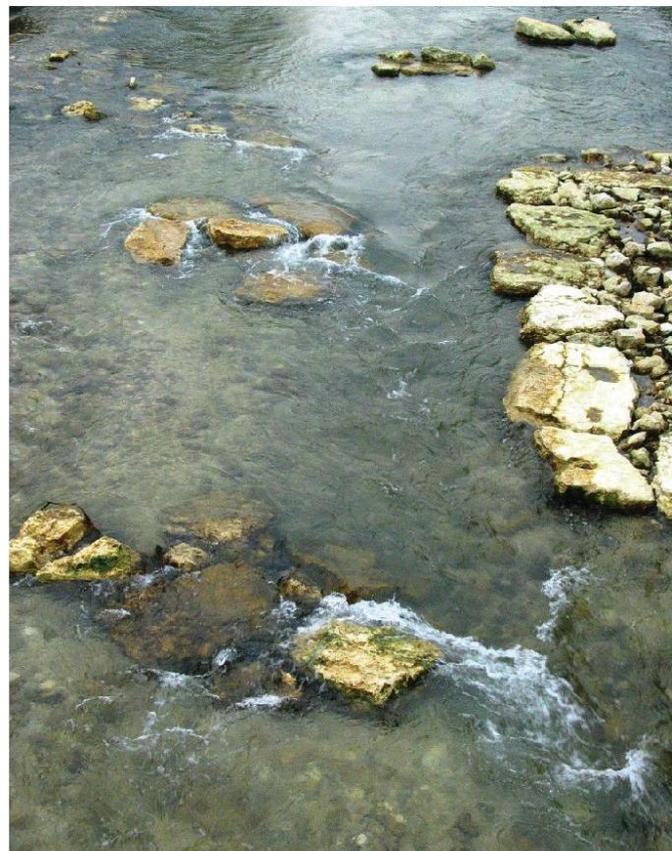


h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Blocs posés en marge du centre du cours d'eau .

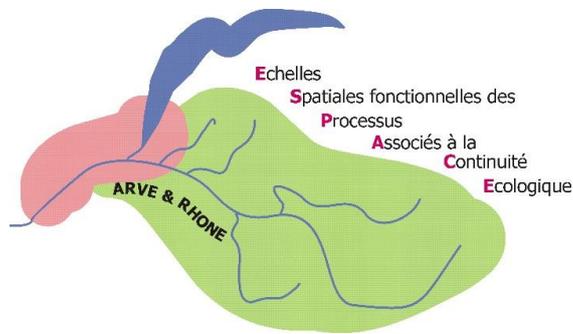


*A l'aval des blocs, les dépôts
de sédiments fins sont visibles
(zones plus claires).*



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Mesure 2

Concept d'aménagement du Borne aval

Aménagement d'épis en blocs

Tronçons concernés:

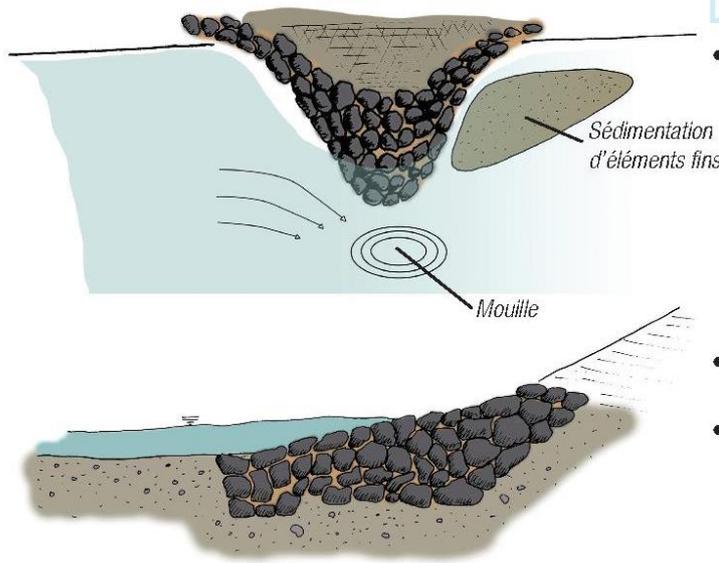
1	2av	2am	3	4	5	6
---	-----	-----	---	---	---	---

Principe:

Le rétrécissement localisé de la largeur du lit d'étiage crée des micro-turbulences des écoulements hydrauliques favorables à la diversification des substrats (alternance et mosaïque de granulométrie différenciée des matériaux du fond du lit).

Objectifs:

- Recentrage et dynamisation des écoulements.
- Diversification des substrats.
- Diversification des hauteurs d'eau.
- Création de caches et abris pour la faune piscicole.



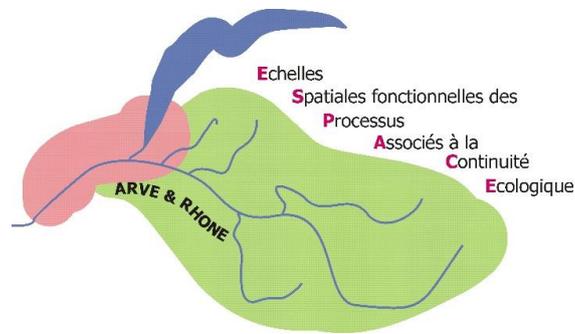
Remarques:

- La diversification des substrats remaniés lors de chaque montée des eaux est source de support de vie pour la faune aquatique (reproduction et développement de la macrofaune benthique, frais des poissons, etc.).
- Création de caches entre les blocs agencés.
- Varier la forme des ouvrages, leurs orientations, leurs dimensions, de manière à diversifier au mieux la structure du lit.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Précautions:

- Forme générale plongeante pour optimiser les effets sur les courants hydrauliques.
- Forme bombée et relativement plate pour limiter les effets de seuil.
- Bon ancrage de la tête des épis qui est la partie la plus sollicitée.
- Bon ancrage de la base des épis dans la berge, pour limiter le risque de contournement lors de crues.
- Du fait des turbulences et remous hydraulique provoqués par les épis, il faut veiller à ce que les ouvrages réalisés ne soient pas eux-mêmes sources de dégradation des berges proches.
- Du fait de l'augmentation de la rugosité du fond du lit, il est possible (dépend notamment de leurs dimension et de leur nombre) que les épis aient un impact sur les hauteurs d'eau en crues.



Forme générale plongeante.

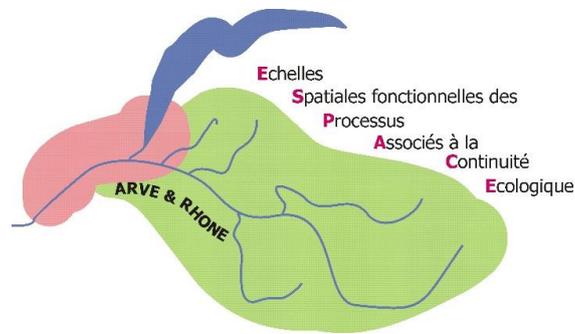


Profil bombé tout en restant assez plat.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Précautions:

- Forme générale plongeante pour optimiser les effets sur les courants hydrauliques.
- Forme bombée et relativement plate pour limiter les effets de seuil.
- Bon ancrage de la tête des épis qui est la partie la plus sollicitée.
- Bon ancrage de la base des épis dans la berge, pour limiter le risque de contournement lors de crues.
- Du fait des turbulences et remous hydraulique provoqués par les épis, il faut veiller à ce que les ouvrages réalisés ne soient pas eux-mêmes sources de dégradation des berges proches.
- Du fait de l'augmentation de la rugosité du fond du lit, il est possible (dépend notamment de leurs dimension et de leur nombre) que les épis aient un impact sur les hauteurs d'eau en crues.



Forme générale plongeante.

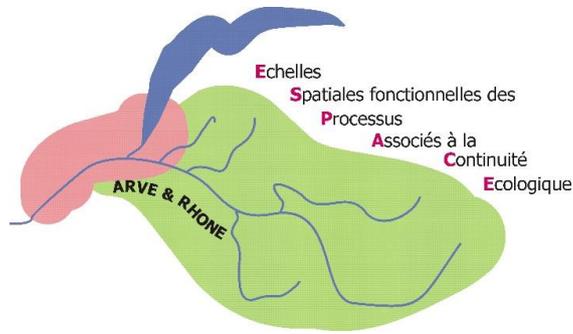


Profil bombé tout en restant assez plat.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Mesure 3

Concept d'aménagement du Borne aval

Aménagement de bancs et risbermes alternés

Tronçons concernés:

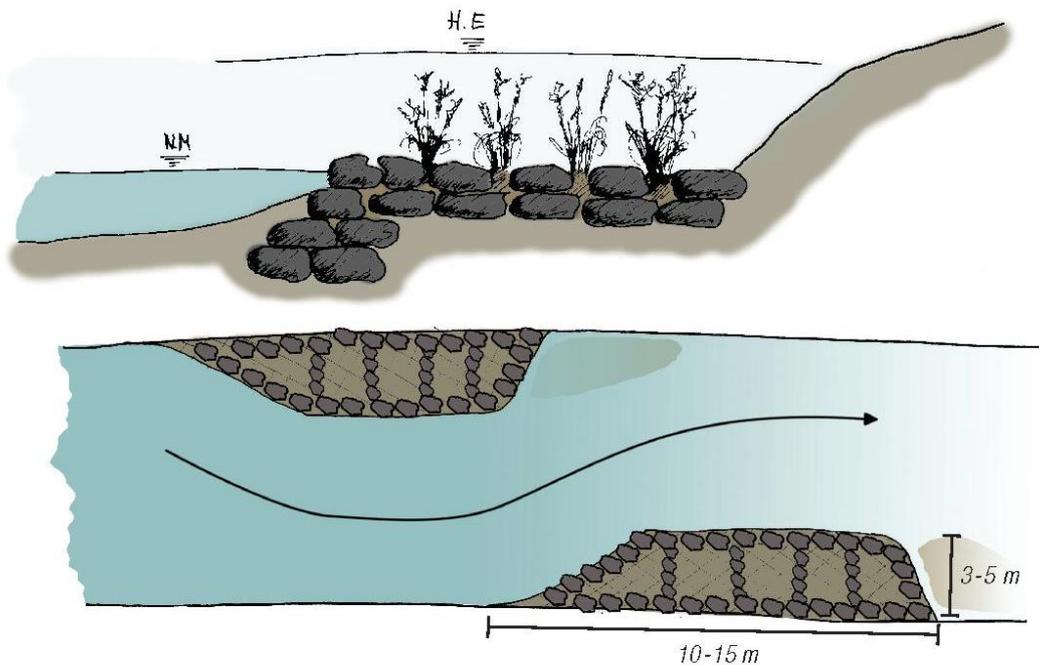
1	2av	2am	3	4	5	6
---	-----	-----	---	---	---	---

Principe:

Aménager des bancs latéraux afin d'initier le développement d'une relative sinuosité et concentrer le débit en temps d'étiage (problème d'étalement de la lame d'eau et d'une trop faible profondeur à l'étiage).

Objectifs:

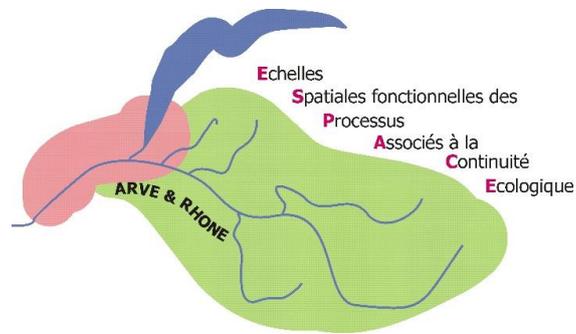
- Améliorer la diversité des écoulements.
- Recréer des habitats rivulaires se rapprochant de ceux que l'on trouve sur les bancs alluviaux naturels.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Précautions:

- Compte tenu de la puissance du cours d'eau ces aménagements doivent être constitués de blocs.
- La végétation qui s'y développe ne doit pas réduire la section d'écoulement. Caler le sommet de l'aménagement à peine au dessus du niveau moyen des eaux, de manière à permettre uniquement le développement d'herbacées (p.ex. *Phalaris arundinacea* L.).
- L'augmentation de la rugosité ne doit pas aggraver les phénomènes d'inondation.
- Les blocs constituant le pourtour doivent être solidement ancrés en profondeur.



Exemple de bancs latéraux.

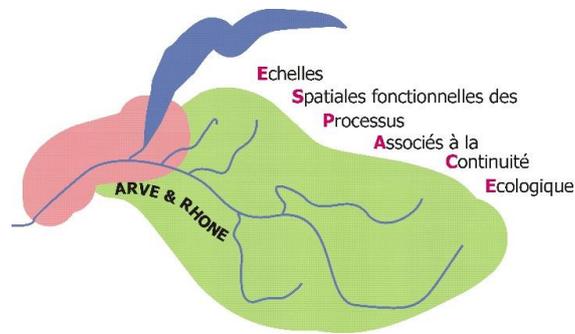


La lame d'eau est rétrécie et la sinuosité augmentée.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Mesure 4

Concept d'aménagement du Borne aval

Abaissement et rajeunissement de terrasses alluviales

Tronçons concernés:

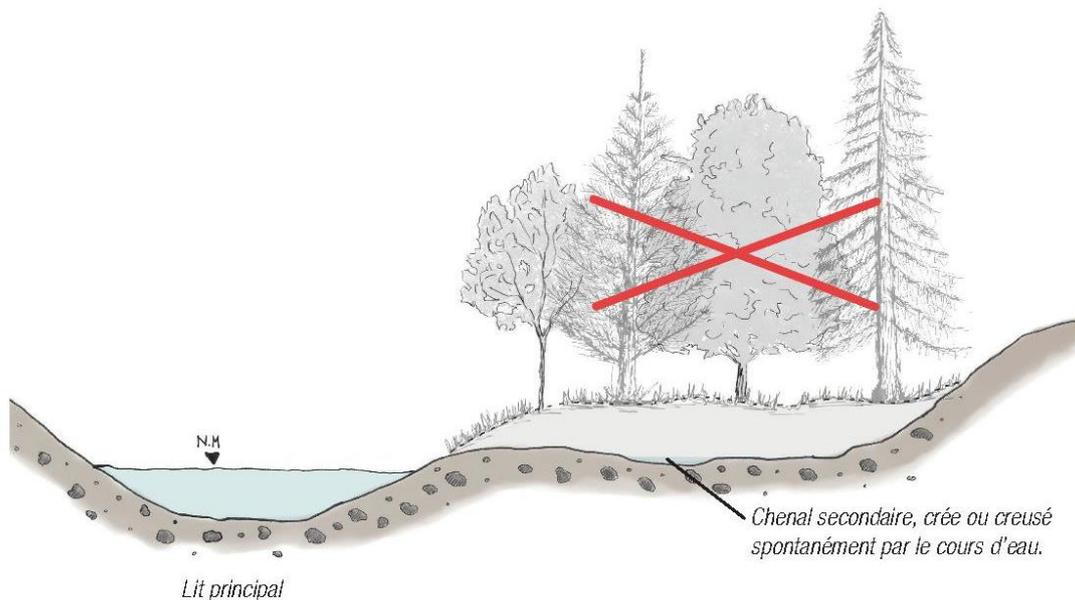
1	2av	2am	3	4	5	6
---	-----	-----	---	---	---	---

Principe:

Abattage et/ou défrichage de boisements plus ou moins évolués, qui se sont développés sur des atterrissement latéraux et les ont totalement fixés. Ensuite, le décapage de matériaux alluvionnaires sur une certaine épaisseur, permettent de retrouver des surfaces à caractères pionnier, de favoriser la dynamique des sédiments et de créer des chenaux secondaires, diversifiant les écoulements.

Objectifs:

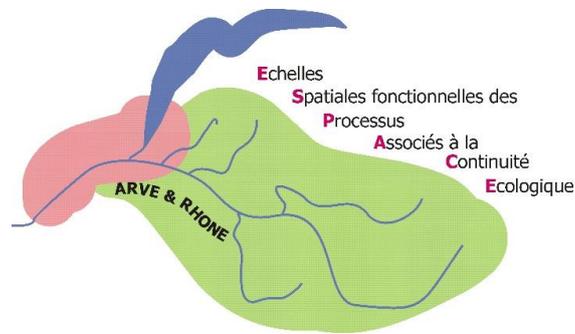
- Renforcer le caractère alluvial.
- Diversifier les écoulements (chenaux secondaires).
- Diversifier les substrats et la structure du lit.
- Augmenter le gabarit hydraulique.
- Favoriser le transport solide.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Remarques:

- Un chenal secondaire peut être terrassé en déblais sur la terrasse un fois celle-ci abaissée, de manière à diversifier les écoulements. On peut aussi laisser le cours d'eau le faire spontanément.
- Les substrats constituant la terrasse abaissée sont à nouveau érodables et mobilisables par les crues, participant ainsi à favoriser la dynamique des sédiments.
- Quelques arbres, ou du moins des souches, peuvent être maintenus pour augmenter les éléments structurant dans le lit.

Précautions:

- Les terrasses abaissées et rajeunies, retrouvant un état pionnier, ne doivent pas constituer un terrain d'élection pour les implantations de néophytes invasives. Un contrôle doit accompagner les mesures d'aménagements.



Exemple d'abaissement d'une terrasse.



Les souches laissées en places participent à la diversification du lit et procurent des caches supplémentaires à la faune piscicole.

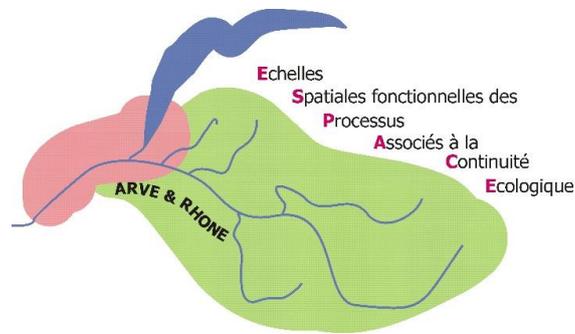


Exemple de chenal secondaire sur la terrasse nouvellement créée, par terrassement en déblais.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Mesure 5

Concept d'aménagement du Borne aval

Aménagement de sous-berges

Tronçons concernés:

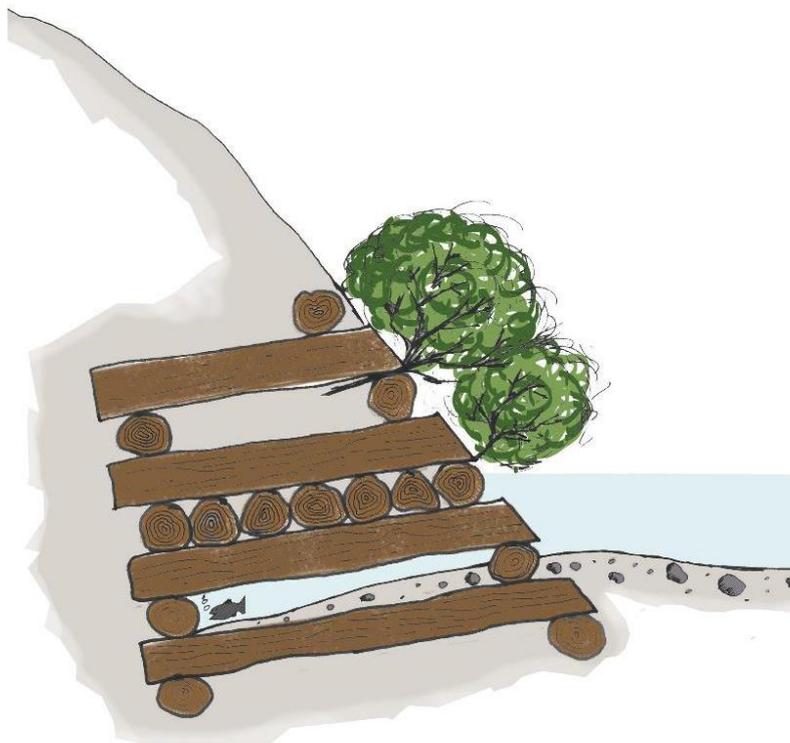
1	2av	2am	3	4	5	6
---	-----	-----	---	---	---	---

Principe:

Les tronçons fortement endigués marquent singulièrement de caches et d'abris pour la faune piscicole, notamment en pied de berge, ces derniers étant souvent banalisés et dépourvus de végétation. Des aménagements peuvent fournir de telles structures.

Objectifs:

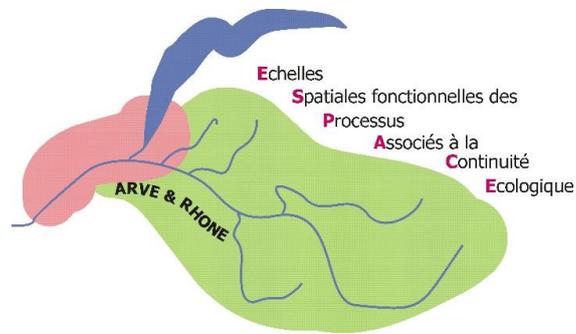
- Créer des caches du type sous-berges et sur les tronçons présentant des pieds de berge peu structuré, de manière à permettre à la faune piscicole de se protéger (prédateurs, crues, ...).





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Précautions:

- L'aménagement ne doit pas empiéter dans le gabarit hydraulique mais être complètement intégré dans la berge.
- Pour résister aux forces tractrices, l'aménagement doit être fortement ancré en berge (aménagement type caisson).
- De la végétation buissonnante doit être intégrée dans l'ouvrage pour mieux l'intégrer au milieu, pour fournir de l'ombrage et pour renforcer l'effet de cache.



Exemple d'un ouvrage complètement intégré à la berge.

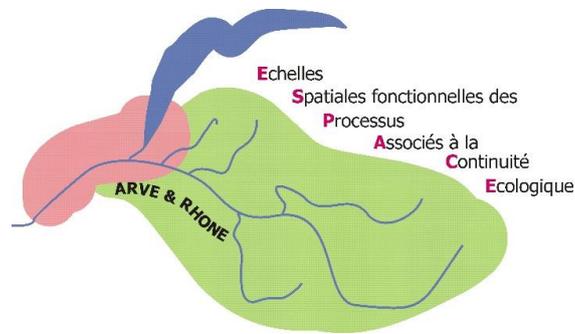
Une végétation buissonnante au-dessus de la cache renforce son efficacité.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Mesure 6

Concept d'aménagement du Borne aval

Rivière de contournement

Tronçons concernés:

1	2av	2am	3	4	5	6
---	-----	-----	---	---	---	---

Principe:

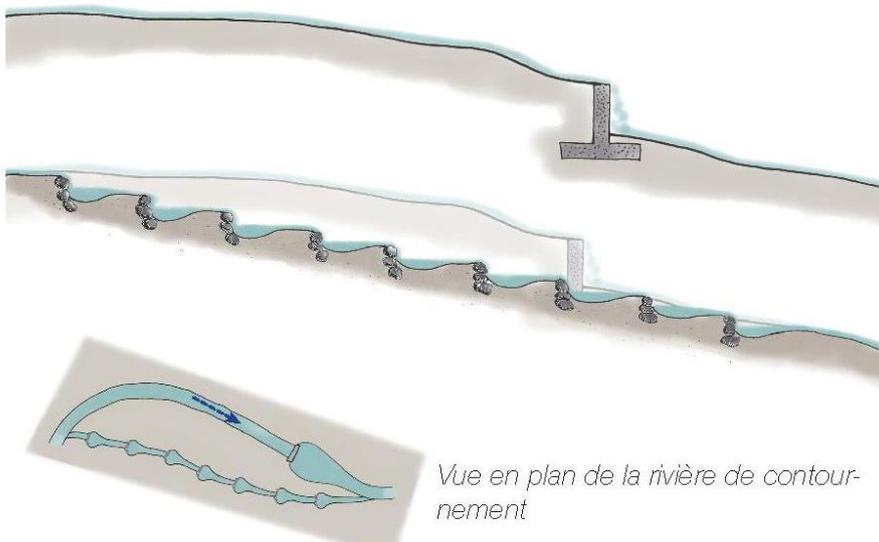
Dans le cas d'un ouvrage identifié comme obstacle à la libre circulation piscicole, plusieurs solutions sont envisageables pour rétablir une continuité aval/amont. La rivière de contournement offre une solution dans certains cas de figure, notamment économique ou d'impossibilité de modification de l'ouvrage. Elle offre un accès au milieu amont par un chenal de faible pente constitué d'une succession de seuils franchissables. Elle apporte par ailleurs une diversification de l'écoulement et un habitat temporaire.

Objectifs:

- Rétablir une circulation piscicole de l'aval vers l'amont en contournant un obstacle infranchissable.
- Rétablir un profil en long plus proche de l'état naturel.
- Favoriser l'intégration d'un ouvrage technique dans un milieu naturel.

Remarques:

- Le nombre de seuils est calculé selon la hauteur de chute à rattraper. Rallonger la longueur de la rivière de contournement si besoin, si la topographie le permet.

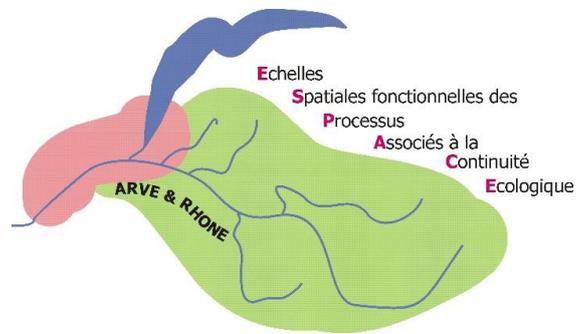


Vue en plan de la rivière de contournement



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Précautions:

- La hauteur de chute des seuils ne doit pas dépasser 20 cm.
- Une fosse de dissipation d'énergie présentant une surlargeur doit être aménagée à l'aval de chaque seuil.
- Au besoin, les berges des fosses de dissipation doivent être protégées avec des techniques de génie végétal (tressage de saule et/ou fascines d'hélophytes).
- Les blocs constituant les seuils doivent être suffisamment ancrés latéralement en berge et en profondeur dans le lit.



Exemple d'un ouvrage de contournement. La chute contournée est visible à droite au fond.

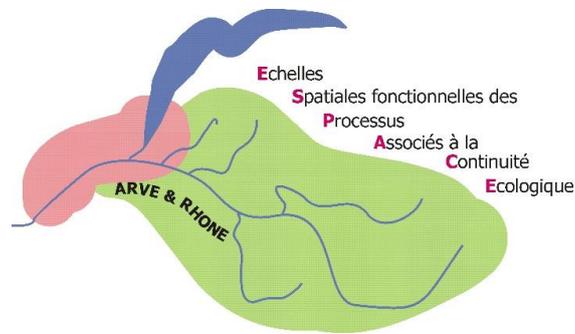


Rivière de contournement constituée d'une succession de seuils et de fosses de dissipation. Le caractère «naturel» est ici plus affirmé que sur le cliché du haut.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



2) Coûts estimés

Ci-dessous sont présentées des fiches-tableaux de coûts estimatifs pour chacun des tronçons en fonction des aménagements envisagés d'après les fiches-mesures présentées précédemment.

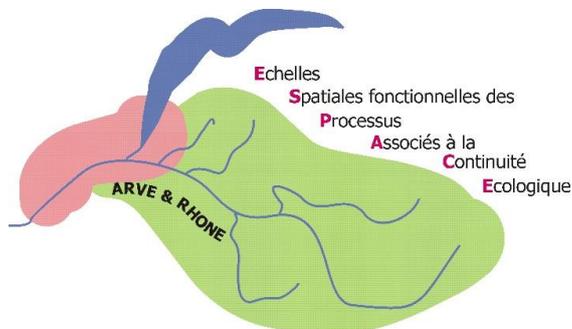
Tronçon 1

T1 - Aménagements structurels dans le lit mineur	Unité	Quantité	Prix € HT unitaire	Montant € HT
TRAVAUX PRELIMINAIRES	gl	1	2'525.00	2'525.00
TOTAL 1 : TRAVAUX PRELIMINAIRES				2'525.00
FOURNITURE DES MATERIAUX ET VEGETAUX				
Géotextile biodégradable type "Sifor RZ5, 740 g/m ²	m ²	60	3.50	210.00
Rondins de résineux (y.c matériel de fixation).	m ³	13	80.00	1'040.00
Plants et plançons	m'	20	25.00	500.00
Fourniture de blocs	t	220	25.00	5'500.00
TOTAL 2 : FOURNITURE				7'250.00
REALISATION DES TRAVAUX				
Réalisation des caissons du tronçons (pose de toute les fournitures, y.c remblais et compactage)	m ³	13	250.00	3'250.00
Réalisation des risbermes	t	180	20.00	3'600.00
Pose des blocs	t	40	20.00	800.00
TOTAL 3 : TRAVAUX				7'650.00
DIVERS ET IMPREVUS (10%)				1'742.50
TOTAL 4 : DIVERS ET IMPREVUS (10%)				1'742.50
RECAPITULATIF				
1. TRAVAUX PRELIMINAIRES				2'525.00
2. FOURNITURES				7'250.00
3. TRAVAUX				7'650.00
4. DIVERS ET IMPREVUS				1'742.50
TOTAL GENERAL HT				19'167.50
TVA 20%				3'833.50
TOTAL GENERAL TTC				23'001.00



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



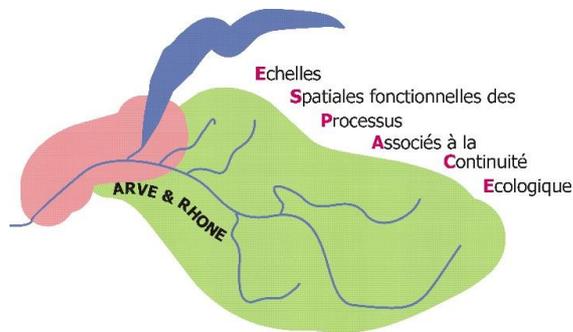
Tronçon 2

T2 - Aménagements structurels dans le lit mineur	Unité	Quantité	Prix € HT unitaire	Montant € HT
TRAVAUX PRELIMINAIRES	gl	1	2'525.00	2'525.00
TOTAL 1 : TRAVAUX PRELIMINAIRES				2'525.00
FOURNITURE DES MATERIAUX ET VEGETAUX				
Géotextile biodégradable type Sifor RZ5, 740 g/m ²	m ²	180	3.50	630.00
Rondins de résineux (y.c matériel de fixation).	m ³	85	80.00	6'800.00
Plants et plançons	m'	60	25.00	1'500.00
Fourniture de blocs	t	452	25.00	11'300.00
TOTAL 2 : FOURNITURE				20'230.00
REALISATION DES TRAVAUX				
Réalisation des caissons du tronçon (pose de toute les fournitures, y.c. remblais et compactage)	m ³	85	250.00	21'250.00
Réalisation des risbermes	t	372	20.00	7'440.00
Pose des blocs	t	80	20.00	1'600.00
TOTAL 3 : TRAVAUX				30'290.00
DIVERS ET IMPREVUS (10%)				5'304.50
TOTAL 4 : DIVERS ET IMPREVUS (10%)				5'304.50
RECAPITULATIF				
1. TRAVAUX PRELIMINAIRES				2'525.00
2. FOURNITURES				20'230.00
3. TRAVAUX				30'290.00
4. DIVERS ET IMPREVUS				5'304.50
TOTAL GENERAL HT				58'349.50
TVA 20%				11'669.90
TOTAL GENERAL TTC				70'019.40



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



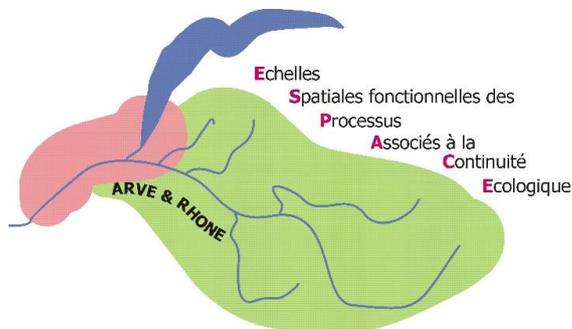
Tronçon 3

T3 - Abaissement et rajeunissement de terrasses alluviales	Unité	Quantité	Prix € HT unitaire	Montant € HT
TRAVAUX PRELIMINAIRES	gl	1	1'600.00	1'600.00
TRAVAUX FORESTIERS				
Debroussaillage	m ²	1300	3.00	3'900.00
TOTAL 1+ 2 : TRAVAUX PRELIMINAIRES et TRAVAUX FORESTIER				5'500.00
FOURNITURE DES MATERIAUX ET VEGETAUX				
Fourniture de blocs pour épis	t	60	25.00	1'500.00
TOTAL 3 : FOURNITURES				1'500.00
REALISATION DES TRAVAUX				
Réalisation des épis	t	60	20.00	1'200.00
Déblais RD (abaissement+ chenal secondaire)	m ³	1000	10.00	10'000.00
Evacuation des matériaux excédentaires	m ³	350	12.00	4'200.00
TOTAL 4 : TRAVAUX				15'400.00
DIVERS ET IMPREVUS (10%)				2'240.00
TOTAL 5 : DIVERS ET IMPREVUS (10%)				2'240.00
RECAPITULATIF				
1. TRAVAUX PRELIMINAIRES				1'600.00
2. TRAVAUX FORESTIERS				3'900.00
3. FOURNITURES				1'500.00
4. TRAVAUX				15'400.00
5. DIVERS ET IMPREVUS				2'240.00
TOTAL GENERAL HT				24'640.00
TVA 20%				4'928.00
TOTAL GENERAL TTC				29'568.00



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



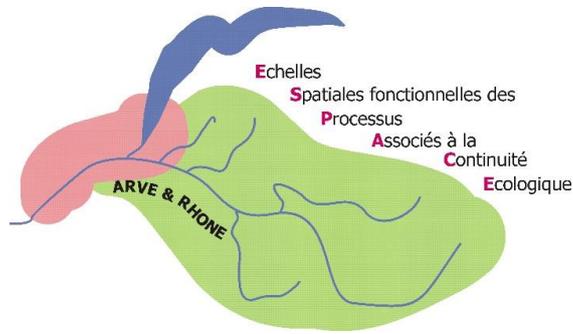
Tronçon 4

T4 - Abaissement et rajeunissement de terrasses alluviales	Unité	Quantité	Prix € HT unitaire	Montant € HT
TRAVAUX PRELIMINAIRES	gl	1	4'200.00	4'200.00
TRAVAUX FORESTIERS				
Debroussaillage	m ²	3000	3.00	9'000.00
TOTAL 1+ 2 : TRAVAUX PRELIMINAIRES et TRAVAUX FORESTIER				13'200.00
FOURNITURE DES MATERIAUX ET VEGETAUX				
Fourniture de blocs pour épis	t	70	25.00	1'750.00
TOTAL 3 : FOURNITURES				1'750.00
REALISATION DES TRAVAUX				
Réalisation des épis	t	70	20.00	1'400.00
Déblais RD (abaissement+ chenal secondaire)	m ³	2650	10.00	26'500.00
Evacuation des matériaux excédentaires	m ³	1350	12.00	16'200.00
TOTAL 4 : TRAVAUX				44'100.00
DIVERS ET IMPREVUS				5'905.00
TOTAL 4 : DIVERS ET IMPREVUS				5'905.00
RECAPITULATIF				
1. TRAVAUX PRELIMINAIRES				4'200.00
2. TRAVAUX FORESTIERS				9'000.00
2. FOURNITURES				1'750.00
4. TRAVAUX				44'100.00
5. DIVERS ET IMPREVUS				5'905.00
TOTAL GENERAL HT				64'955.00
TVA 20%				12'991.00
TOTAL GENERAL TTC				77'946.00



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



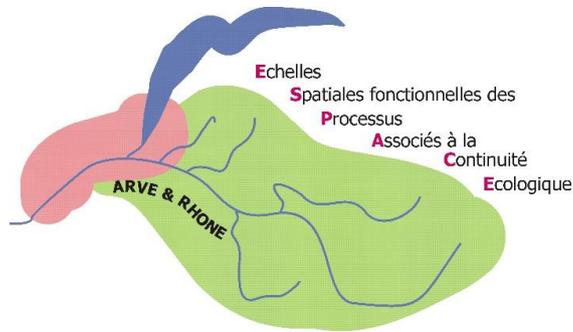
Tronçon 5

T5 - Abaissement et rajeunissement de terrasses alluviales	Unité	Quantité	Prix € HT unitaire	Montant € HT
TRAVAUX PRELIMINAIRES	gl	1	22'000.00	22'000.00
TRAVAUX FORESTIERS				
Abattage	pce	500	80.00	40'000.00
Dessouchages	pce	500	60.00	30'000.00
TOTAL 1+ 2 : TRAVAUX PRELIMINAIRES et TRAVAUX FORESTIER				92'000.00
FOURNITURE DES MATERIAUX ET VEGETAUX				
Fourniture de blocs pour épis	t	2000	25.00	50'000.00
TOTAL 3 : FOURNITURES				50'000.00
REALISATION DES TRAVAUX				
Réalisation des épis	t	2000	20.00	40'000.00
Déblais RD (abaissement+ chenal secondaire)	m ³	5600	10.00	56'000.00
Evacuation des matériaux excédentaires	m ³	2800	12.00	33'600.00
TOTAL 4 : TRAVAUX				129'600.00
DIVERS ET IMPREVUS (10%)				27'160.00
TOTAL 5 : DIVERS ET IMPREVUS				27'160.00
RECAPITULATIF				
1. TRAVAUX PRELIMINAIRES				22'000.00
2. TRAVAUX FORESTIERS				70'000.00
3. FOURNITURES				50'000.00
4. TRAVAUX				129'600.00
5. DIVERS ET IMPREVUS				27'160.00
TOTAL GENERAL HT				298'760.00
TVA 20%				59'752.00
TOTAL GENERAL TTC				358'512.00



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



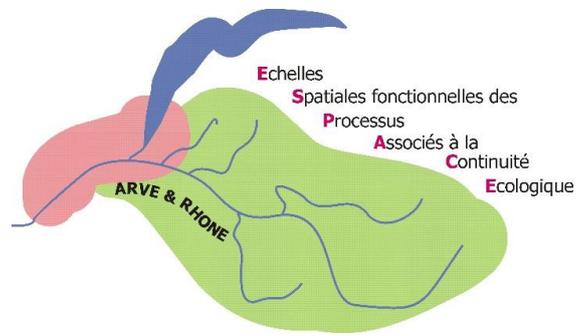
Tronçon 6

T6 - Rivière de contournement	Unité	Quantité	Prix € HT unitaire	Montant € HT
TRAVAUX PRELIMINAIRES	gl	1	4000	4'000.00
TRAVAUX FORESTIERS				
Debroussaillage	m ²	1000	3.00	3'000.00
TOTAL 1+2 : TRAVAUX PRELIMINAIRES et TRAVAUX FORESTIER				7'000.00
FOURNITURE DES MATERIAUX ET VEGETAUX				
Géotextile biodégradable type "Sifor RZ5, 740 g/m ² , larg. > 3m" pour berges	m ²	400	3.50	1'400.00
Géotextile synthétique type "Bidim, 250 g/m ² , larg. 4m" pour seuils	m ²	150	2.50	375.00
Fourniture de blocs pour seuils	t	120	25.00	3'000.00
Fourniture de blocs pour renforcement du lit	t	50	25.00	1'250.00
Fourniture de blocs pour ouvrage d'entrée	t	15	25.00	375.00
Fourniture de matériaux pour fascines d'hélophyte	ml	70	30.00	2'100.00
Fourniture de bouture de saules	p	500	1.00	500.00
Fourniture des semencements	m ²	1500	1.00	1'500.00
Fourniture matériaux ouvrage d'entrée	gl	1	5'000.00	5'000.00
TOTAL 3 : FOURNITURES				15'500.00
TRAVAUX				
Terrassement du chenal	m ²	200	10.00	2'000.00
Talutage de la butte	m ²	500	8.00	4'000.00
Talutage des berges	m ²	350	8.00	2'800.00
Réalisation des seuils	t	120	20.00	2'400.00
Réalisation des enrochements	t	65	20.00	1'300.00
Pose du géotextile synthétique	m ²	150	1.50	225.00
Pose du géotextile biodégradable	m ²	400	3.00	1'200.00
Bouturage de saule	pce	500	0.50	250.00
Ensemencement	m ²	1500	0.50	750.00
Réalisation de l'ouvrage d'entrée	gl	1	10'000.00	10'000.00
TOTAL 4 : TRAVAUX				24'925.00
DIVERS ET IMPREVUS (10%)				4'742.50
TOTAL 5 : DIVERS ET IMPREVUS				4'742.50
RECAPITULATIF				
1. TRAVAUX PRELIMINAIRES				4'000.00
2. TRAVAUX FORESTIERS				3'000.00
3. FOURNITURES				15'500.00
4. TRAVAUX				24'925.00
5. DIVERS ET IMPREVUS				4'742.50
TOTAL GENERAL HT				52'167.50
TVA 20%				10'433.50
TOTAL GENERAL TTC				62'601.00



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



3) Plans détaillés de l'avant-projet

Enfin, pour clore cette partie concernant le projet d'aménagement, les planches suivantes font état des plans d'avant projet des structures d'aménagement envisagées sur chaque tronçon homogène.

Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 1 Aménagements structurels dans le lit mineur

Echelle : 1:750

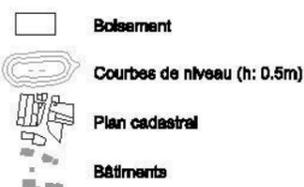
AUTEURS DU PROJET:
Haute école de paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, Rte de Prévost
CH - 1254 Jussy
Tel : 022 546 68 86
Fax : 022 546 68 01
Email : pierre-andre.frossard@hesge.ch

CONTROLE - PAF		FORMAT : A1	
RELEVES	DESSINE	MODIFIE	
	VB	29.07.2015	
N° DU PROJET : 37073			



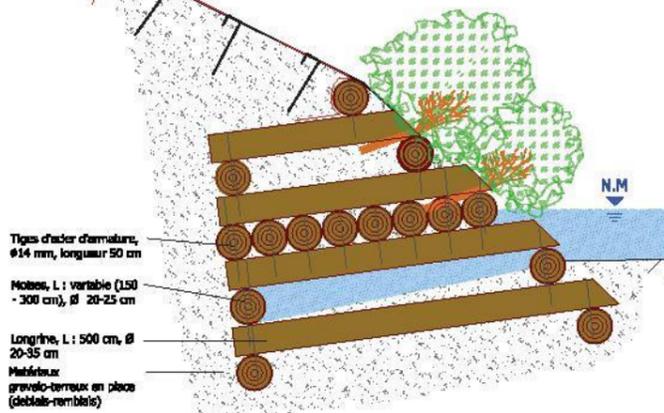
Légende état initial



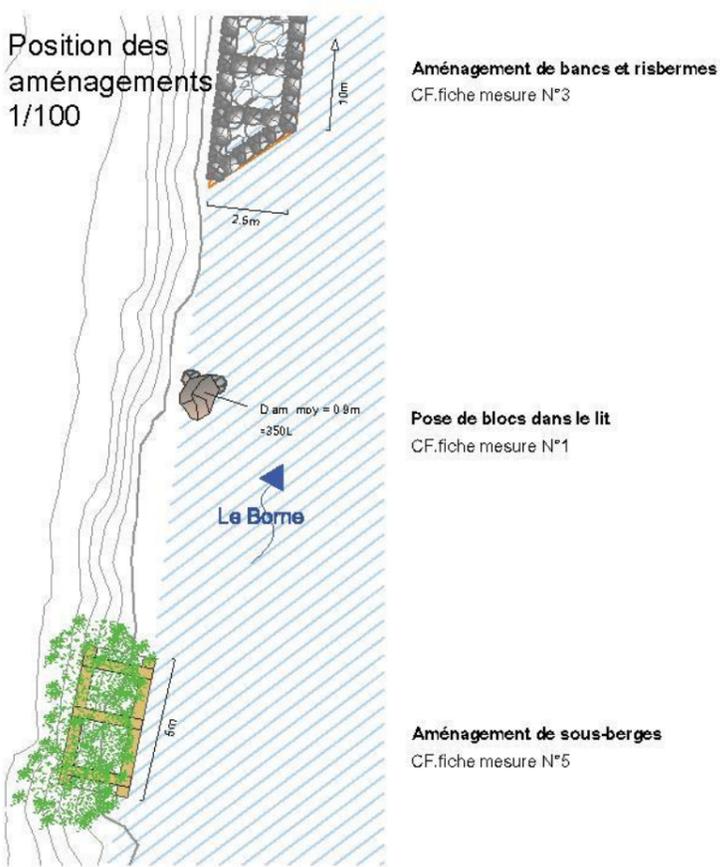
Légende état projeté



Profil type sous-berge 1/25



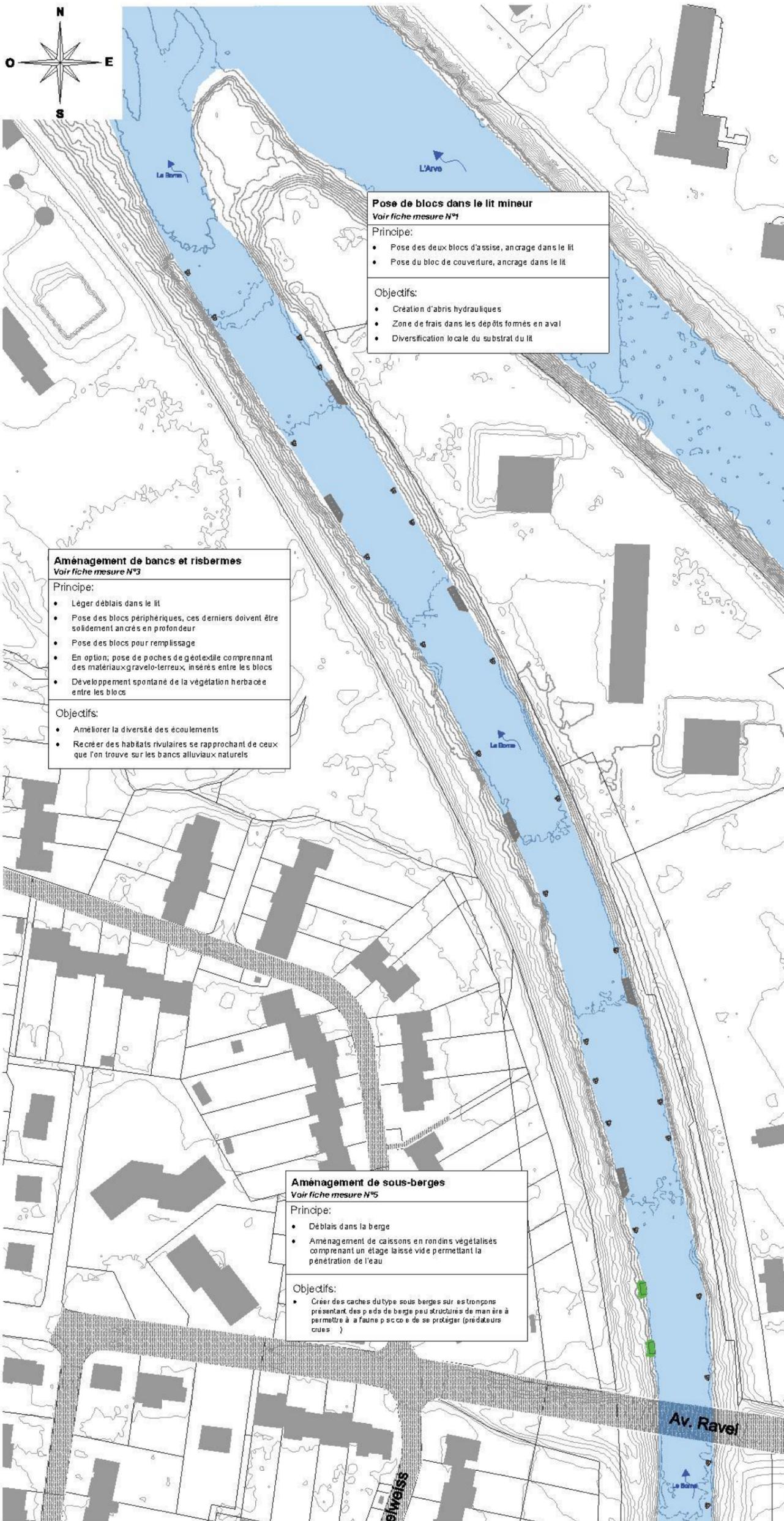
Position des aménagements 1/100



Aménagement de bancs et risbermes
CF. fiche mesure N°3

Pose de blocs dans le lit
CF. fiche mesure N°1

Aménagement de sous-berges
CF. fiche mesure N°5



Pose de blocs dans le lit mineur
Voir fiche mesure N°1

Principe:

- Pose des deux blocs d'assise, ancrage dans le lit
- Pose du bloc de couverture, ancrage dans le lit

Objectifs:

- Création d'abris hydrauliques
- Zone de frais dans les dépôts formés en aval
- Diversification locale du substrat du lit

Aménagement de bancs et risbermes
Voir fiche mesure N°3

Principe:

- Léger déblais dans le lit
- Pose des blocs périphériques, ces derniers doivent être solidement ancrés en profondeur
- Pose des blocs pour remplissage
- En option, pose de poches de géotextile comprenant des matériaux gravelo-terreux, insérés entre les blocs
- Développement spontané de la végétation herbacée entre les blocs

Objectifs:

- Améliorer la diversité des écoulements
- Recréer des habitats rivulaires se rapprochant de ceux que l'on trouve sur les bancs alluviaux naturels

Aménagement de sous-berges
Voir fiche mesure N°5

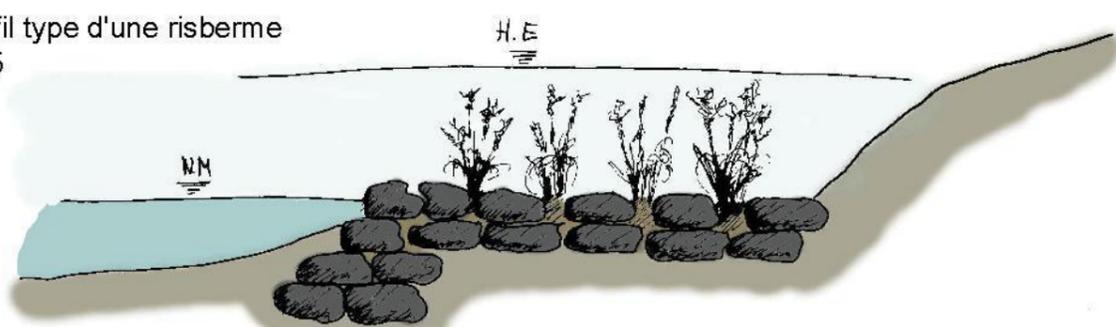
Principe:

- Déblais dans la berge
- Aménagement de caissons en rondins végétalisés comprenant un étage laissé vide permettant la pénétration de l'eau

Objectifs:

- Créer des caches du type sous-berges sur des tronçons présentant des peds de berge peu structurés de manière à permettre à la faune piscicole de se protéger (prédateurs creux)

Profil type d'une risberme 1/25



Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 2 aval Aménagements structurels dans le lit mineur

Echelle : 1/750

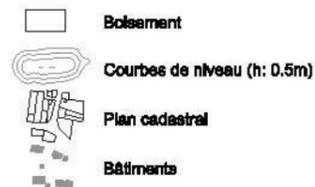
AUTEURS DU PROJET:
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, Rte de Presinge
CH - 1254 Jussy
Tel: 022 546 68 86
Fax: 022 546 68 01
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

CONTROLE : PAF		FORMAT : A1	
RELEVÉS	DESSINÉ	MODIFIÉ	
	VB	29.07.2015	

N° DU PROJET : 37073

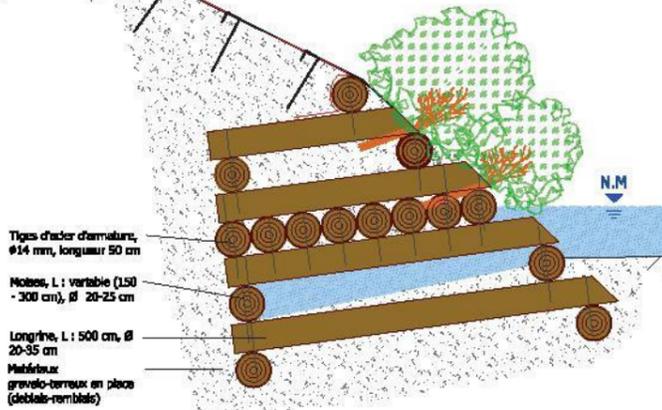
Légende état initial



Légende état projeté



Profil type sous-berge 1/25



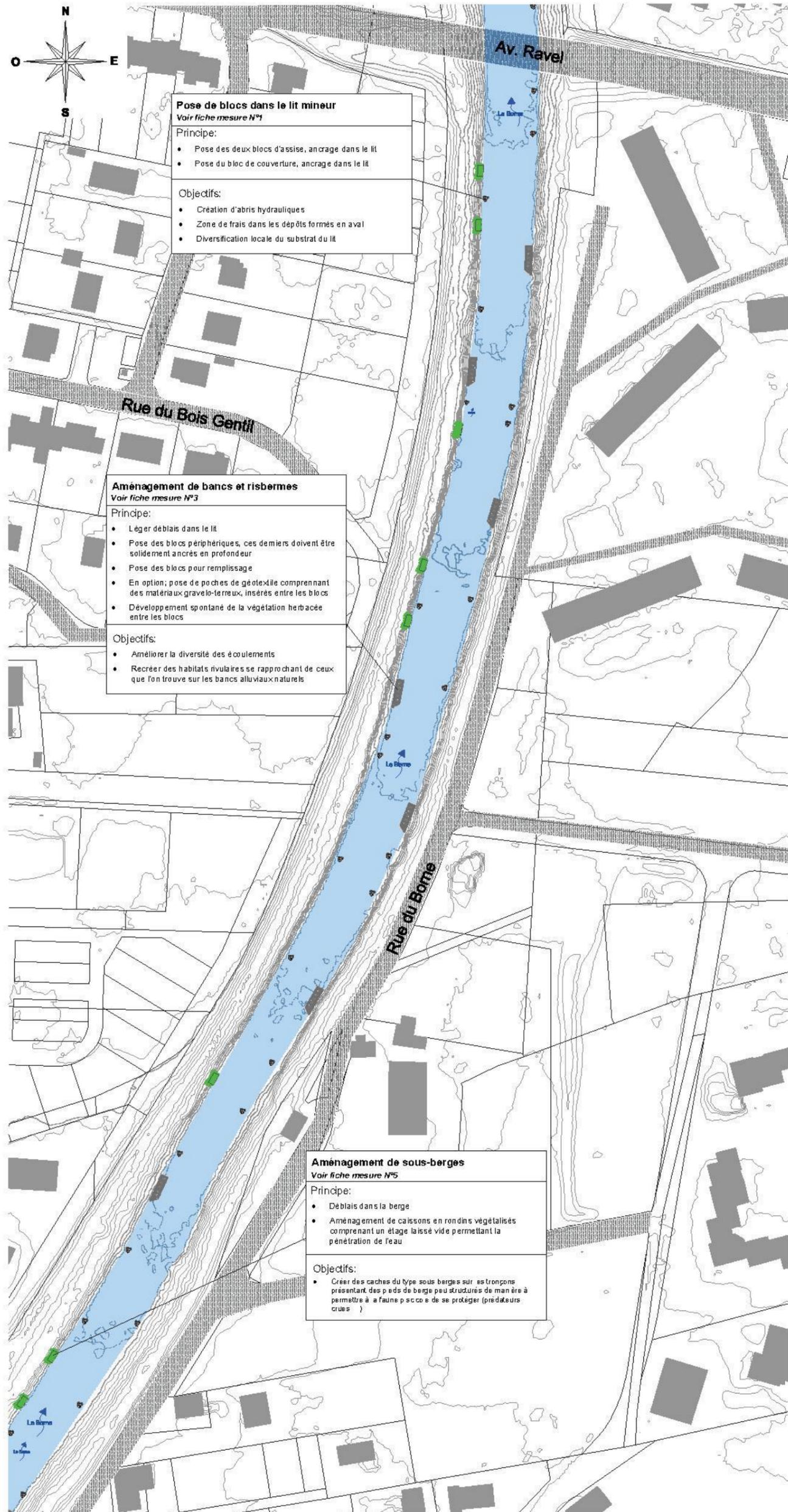
Position des aménagements 1/100



Aménagement de bancs et risbermes
CF. fiche mesure N°3

Pose de blocs dans le lit
CF. fiche mesure N°1

Aménagement de sous-berges
CF. fiche mesure N°5



Pose de blocs dans le lit mineur

Voir fiche mesure N°1

Principe:

- Pose des deux blocs d'assise, ancrage dans le lit
- Pose du bloc de couverture, ancrage dans le lit

Objectifs:

- Création d'abris hydrauliques
- Zone de frais dans les dépôts formés en aval
- Diversification locale du substrat du lit

Aménagement de bancs et risbermes

Voir fiche mesure N°3

Principe:

- Léger déblais dans le lit
- Pose des blocs périphériques, ces derniers doivent être solidement ancrés en profondeur
- Pose des blocs pour remplissage
- En option; pose de poches de géotextile comprenant des matériaux gravo-terreux, insérés entre les blocs
- Développement spontané de la végétation herbacée entre les blocs

Objectifs:

- Améliorer la diversité des écoulements
- Recréer des habitats rivulaires se rapprochant de ceux que l'on trouve sur les bancs alluviaux naturels

Aménagement de sous-berges

Voir fiche mesure N°5

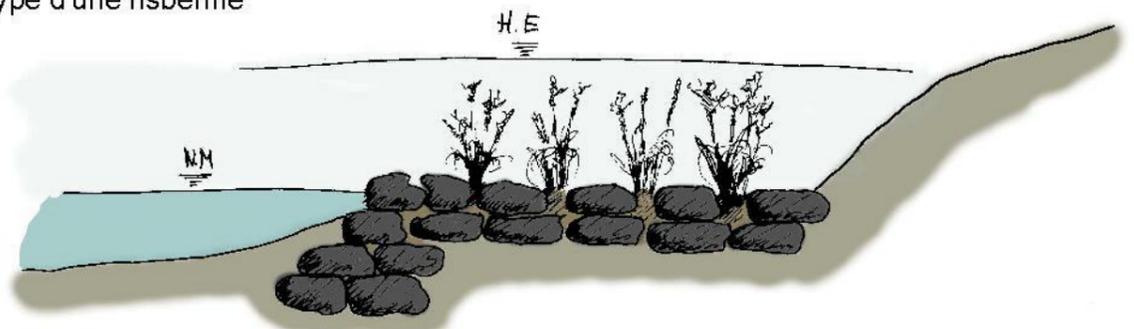
Principe:

- Déblais dans la berge
- Aménagement de caissons en rondins végétalisés comprenant un étage laissé vide permettant la pénétration de l'eau

Objectifs:

- Créer des caches du type sous-berges sur les tronçons présentant des pieds de berge peu structurés de manière à permettre à la faune piscicole de se protéger (prédateurs crus)

Profil type d'une risberme 1/25



Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 2 amont Aménagements structuraux dans le lit mineur

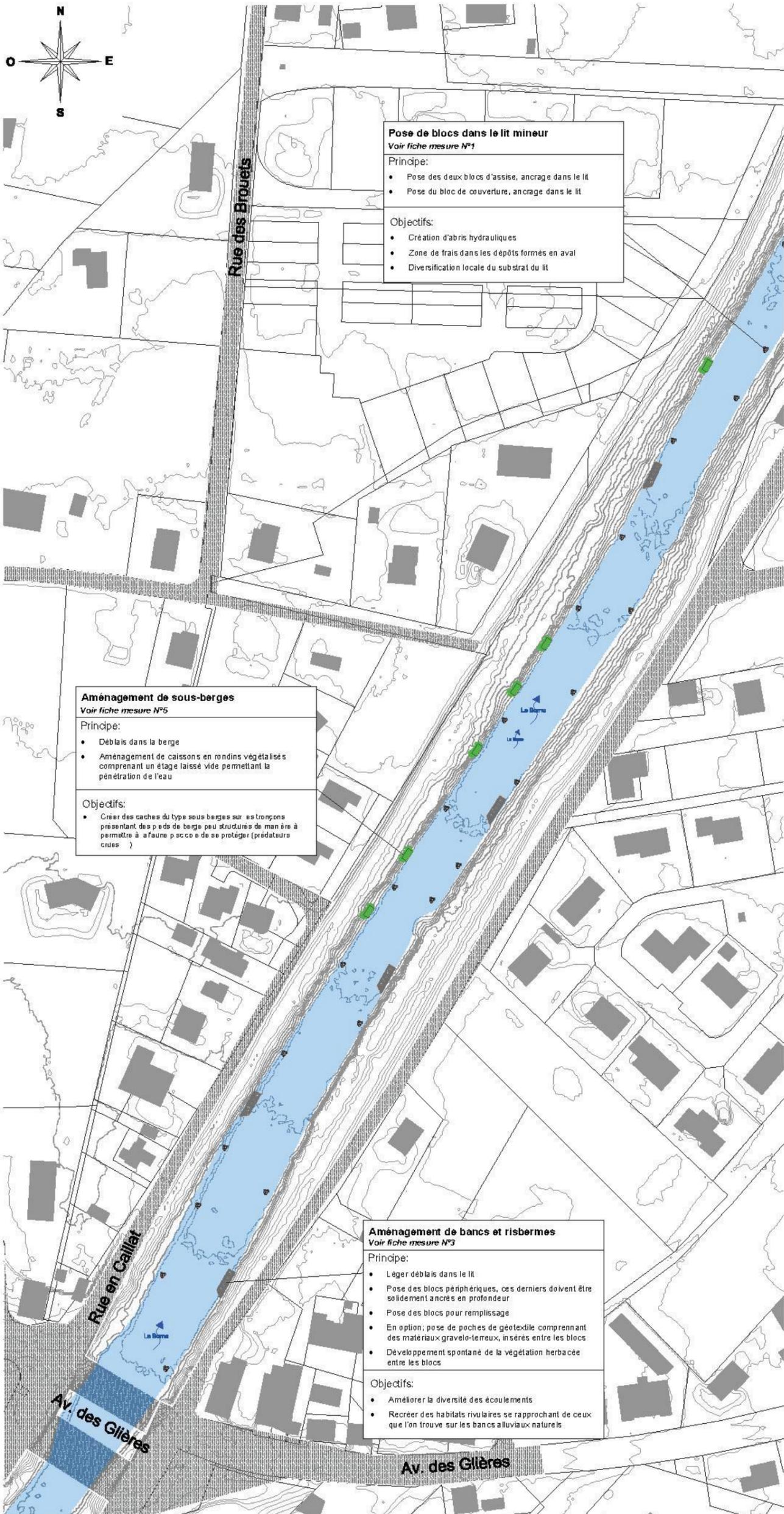
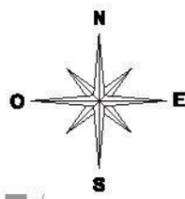
Echelle : 1:750

AUTEURS DU PROJET:
Haute école de paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, Rte de Prestige
CH - 1254 Jussy
Tel: 022 546 68 86
Fax: 022 546 68 01
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

CONTROLE : PAF		FORMAT : A1	
RELEVES	DESSINE	MODIFIE	
	VB	29.07.2015	

N° DU PROJET : 37073



Pose de blocs dans le lit mineur
Voir fiche mesure N°1

Principe:

- Pose des deux blocs d'assise, ancrage dans le lit
- Pose du bloc de couverture, ancrage dans le lit

Objectifs:

- Création d'abris hydrauliques
- Zone de frais dans les dépôts formés en aval
- Diversification locale du substrat du lit

Aménagement de sous-berges
Voir fiche mesure N°5

Principe:

- Déblais dans la berge
- Aménagement de caissons en rondins végétalisés comprenant un étage laissé vide permettant la pénétration de l'eau

Objectifs:

- Créer des caches du type sous berges sur les tronçons présentant des pieds de berge peu structurés de manière à permettre à l'aune piscicole de se protéger (prédateurs crués)

Aménagement de bancs et risbermes
Voir fiche mesure N°3

Principe:

- Léger déblais dans le lit
- Pose des blocs périphériques, ces derniers doivent être solidement ancrés en profondeur
- Pose des blocs pour remplissage
- En option; pose de poches de géotextile comprenant des matériaux gravo-terreux, insérés entre les blocs
- Développement spontané de la végétation herbacée entre les blocs

Objectifs:

- Améliorer la diversité des écoulements
- Recréer des habitats rivulaires se rapprochant de ceux que l'on trouve sur les bancs alluviaux naturels

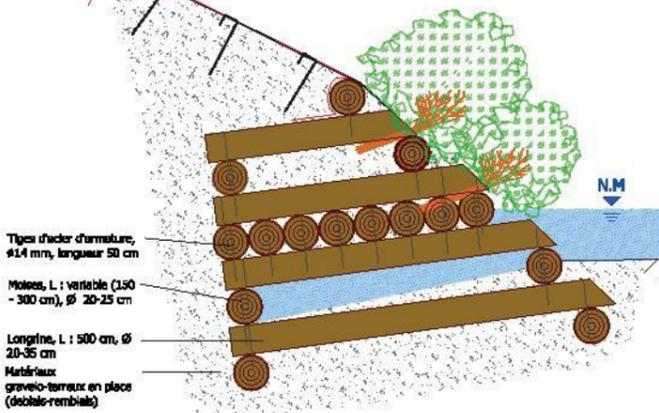
Légende état initial

- Boisement
- Courbes de niveau (h: 0.5m)
- Plan cadastral
- Bâtiments

Légende état projeté

- Pose de blocs dans le lit
- Sous-berges
- Risbermes

Profil type sous-berge 1/25



Position des aménagements 1/100

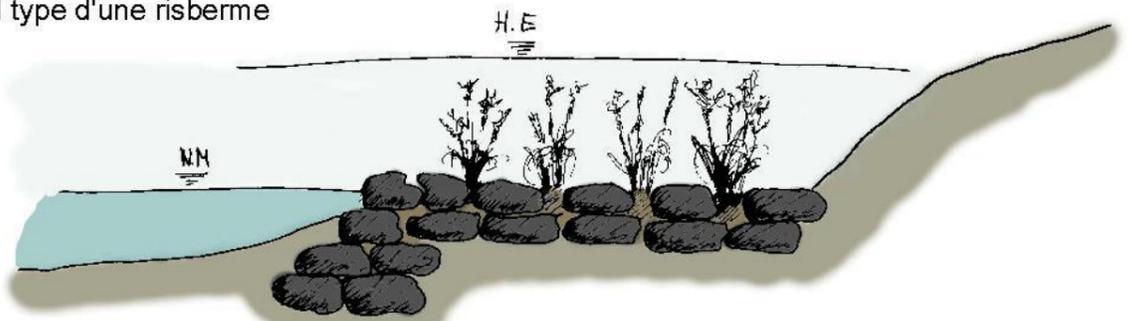


Aménagement de bancs et risbermes
CF. fiche mesure N°3

Pose de blocs dans le lit
CF. fiche mesure N°1

Aménagement de sous-berges
CF. fiche mesure N°5

Profil type d'une risberme 1/25



Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 3 Aménagements structurels dans le lit mineur

Echelle : 1:500

AUTEURS DU PROJET:
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, rue de Prestinge
CH - 1254 Jussy
Tél: 022 546 68 86
Fax: 022 546 68 91
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

CONTROLE : PAF		FORMAT : A1	
RELEVÉS	DESSINÉ	MODIFIÉ	
	VB	29.07.2015	

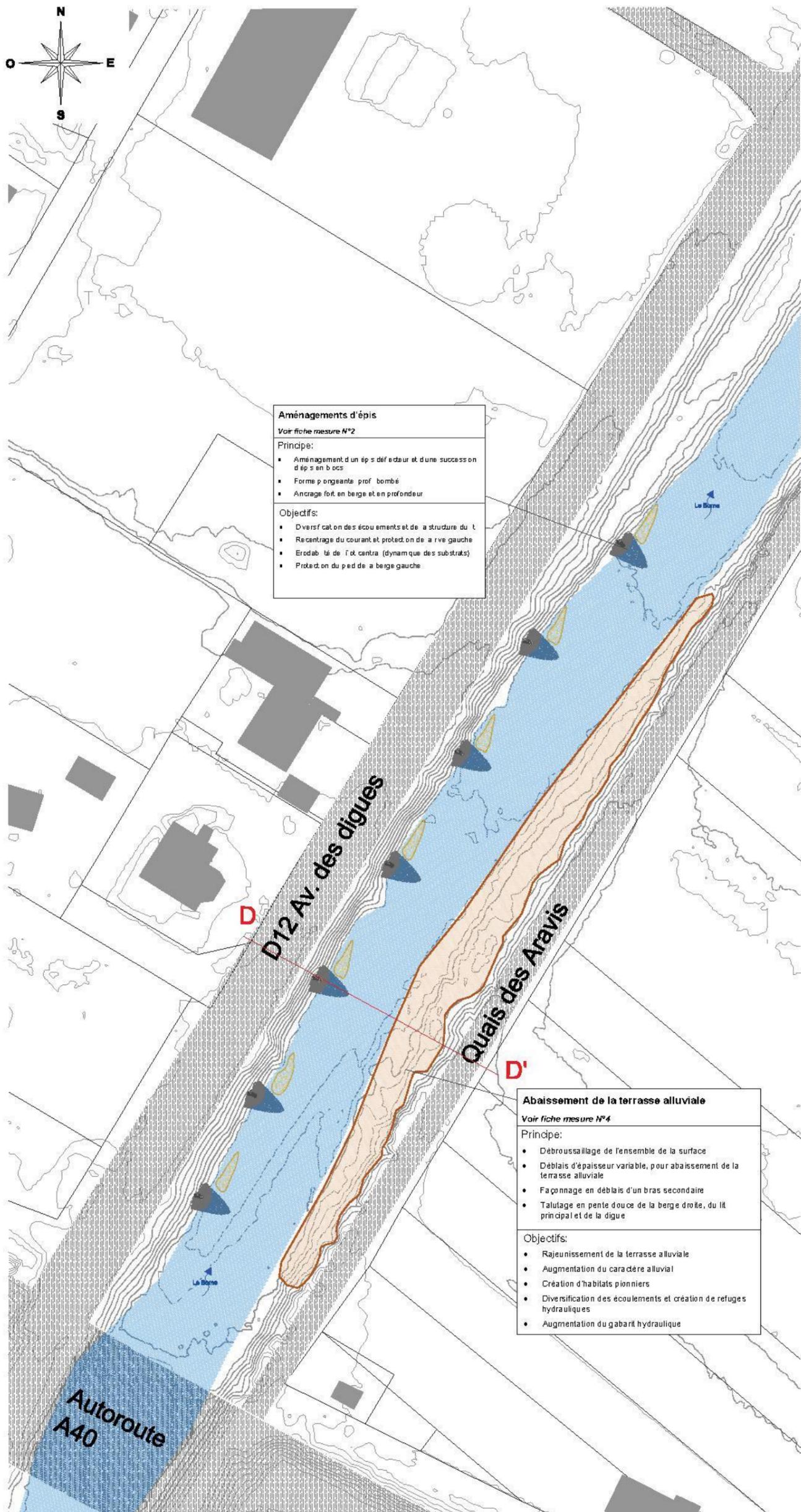
N° DU PROJET : 37073

Légende état initial

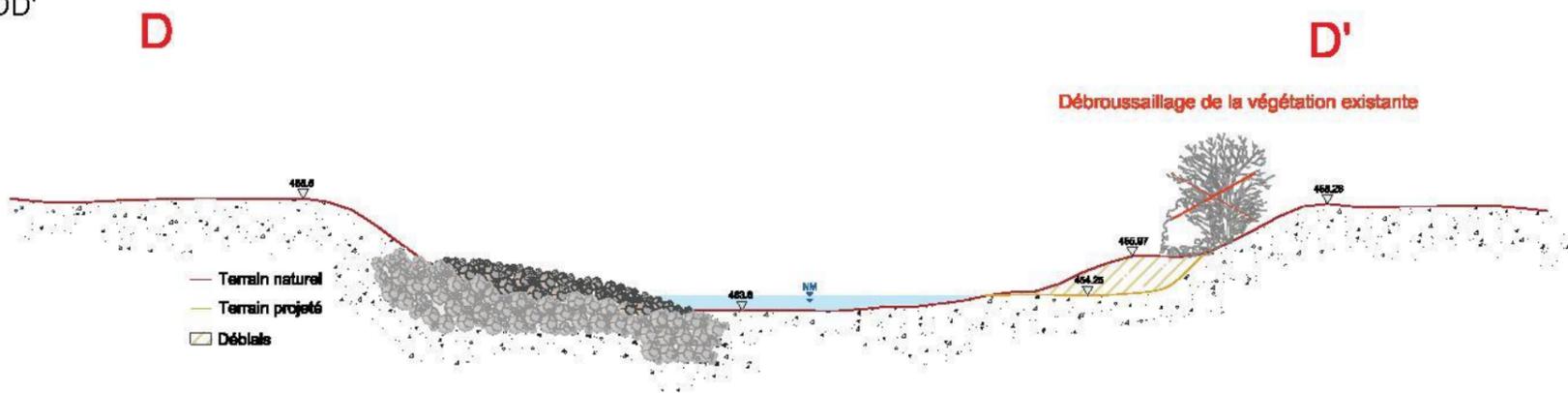
- Boisement
- Courbes de niveau (h: 0.5m)
- Plan cadastral
- Bâtiments

Légende état projeté

- Epis
- Dépôts de sédiments
- Surface terrassée



Profils en travers DD'
1/150



Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 4 Abaissement d'une terrasse alluviale

Echelle : 1:750

AUTEURS DU PROJET:
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, Rte de Presinge
CH - 1254 Jussy
Tél: 022.546.68.86
Fax: 022.546.68.01
Email: pierre-andre.frossard@hesge.ch

CONTROLE : PAF		FORMAT : A1	
RELEVES	DESSINE	MODIFIE	
	VB	29.07.2015	

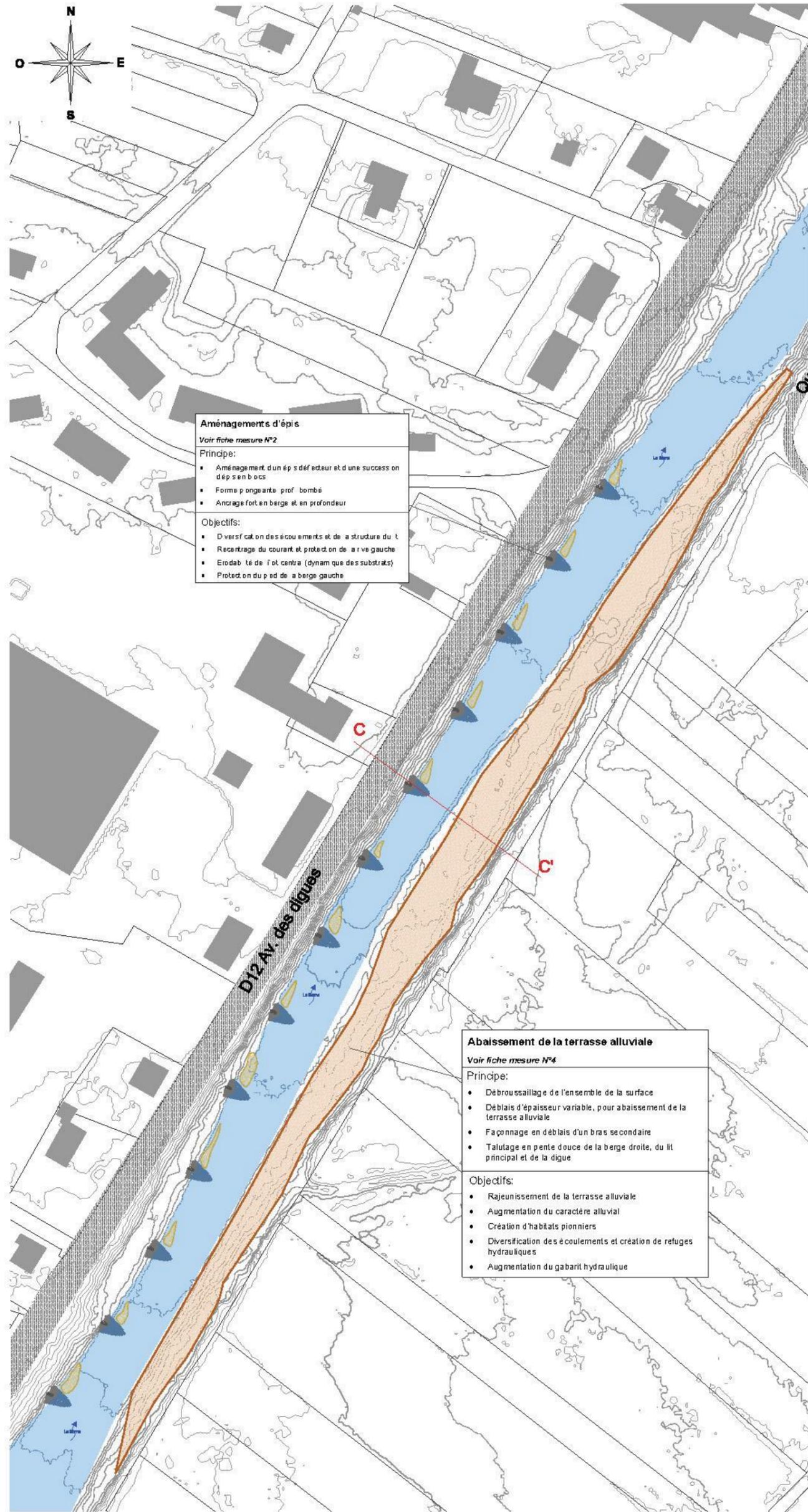
N° DU PROJET : 37073

Légende état initial

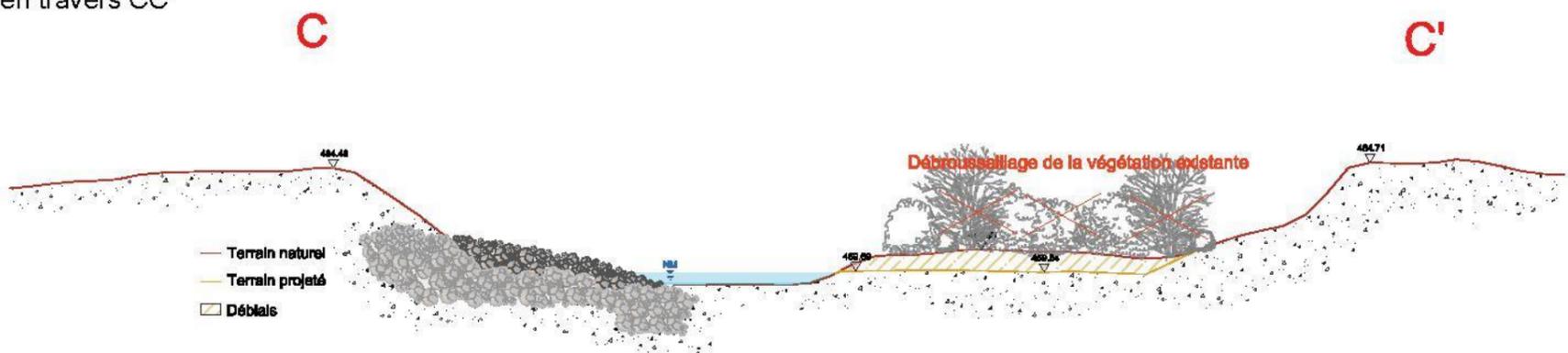
- Boisement
- Courbes de niveau (In: 0.5m)
- Plan cadastral
- Bâtiments

Légende état projeté

- Epie
- Dépôts de sédiments
- Surface terrassée



Profils en travers CC'
1/150



Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 5
Abaissement d'une terrasse alluviale

Echelle : 1:500

AUTEURS DU PROJET:
Haute école de paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, Rue de Preissac
CH - 1214 Jussy
Tél. : 022 346 68 86
Fax : 022 346 68 01
Email : pierre-andre.frossard@hepa.ch

CONTROLE	PAF	FORMAT	A1
RELEVÉS		DESSINÉ	MODIFIÉ
		VB	29.07.2015

N° DU PROJET : 37073

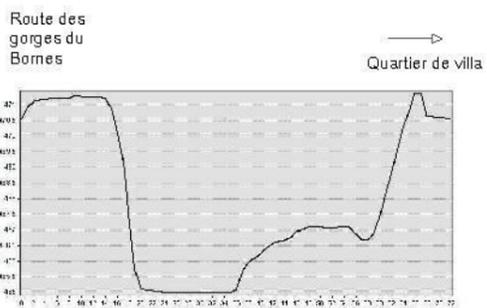
Légende état Initial

- Boisement
- Courbes de niveau (fr: 0.5m)
- Plan cadastral
- Bâtiments

Légende état projeté

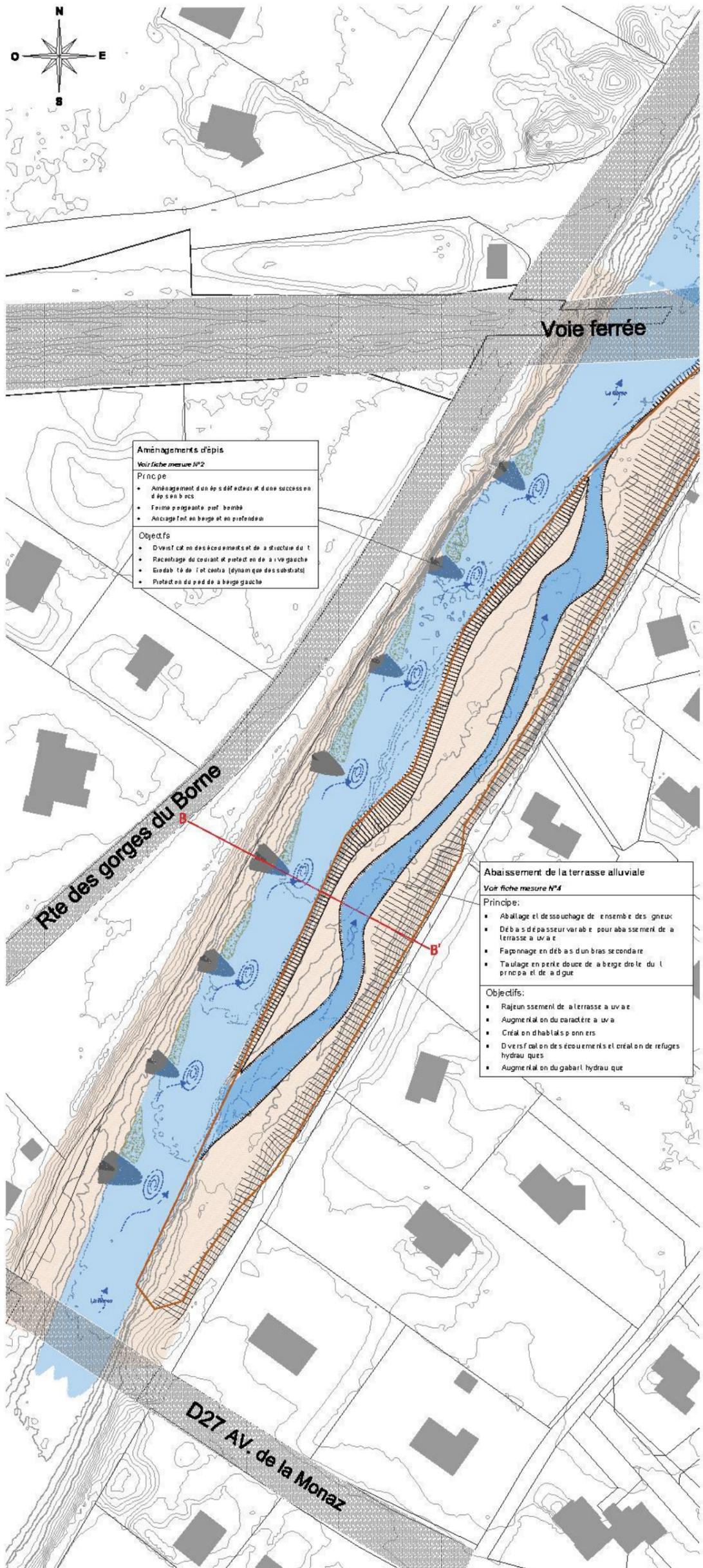
- Epais
- Dépôts de sédiments
- Surface terrassée

Profil en travers type du secteur 5 (Terrain naturel)



Détail d'un épis.

La forme plongeante et un profil bombé et plat sont nécessaire pour garantir la robustesse de l'ouvrage.



Aménagements d'épis

Voir fiche mesure N°2

Principe

- Aménagement d'un épis déflecteur et d'une succession d'épis en blocs
- Forme plongeante profil bombé
- Ancrage fait en berge et en profondeur

Objectifs

- Diversification des écoulements et de la structure du lit
- Rectification du cours et protection de la rive gauche
- Gardabâti de lit central (dynamique des substrats)
- Protection du pied de la berge gauche

Abaissement de la terrasse alluviale

Voir fiche mesure N°4

Principe:

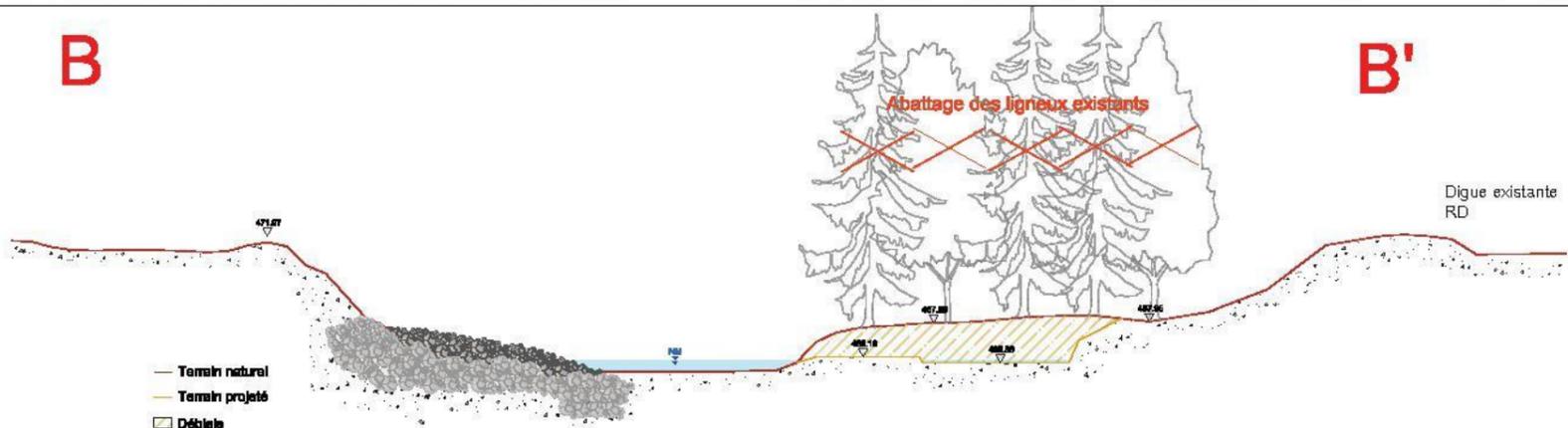
- Abâtissage et dessouchage de l'ensemble des gneux
- Déblais de épaisseur variable pour abaissement de la terrasse alluviale
- Fagonnage en débâis d'un bras secondaire
- Taulage en pente douce de la berge droite du lit principal et de la digue

Objectifs:

- Rajustement de la terrasse alluviale
- Augmentation du caractère alluvial
- Création d'habitats ponctuels
- Diversification des écoulements et création de refuges hydrauliques
- Augmentation du gabarit hydraulique

B

B'



Projet INTERREG IV A Espace Arve et Rhône



Concept d'aménagement du Borne aval

Secteur 6

Aménagement d'une rivière de contournement

Echelle : 1:150

AUTEURS DU PROJET:
Haute école du paysage, d'ingénierie et
d'architecture de Genève
Filière "Gestion de la Nature"

150, Rte de Presinge
CH - 1254 Jussy
Tel: 022.546.68.86
Fax: 022.546.68.01
Email: pierre-andre.frossard@hepg.ch

CONTROLE - PAF		FORMAT: A1	
RELEVES	DESSINE	MODIFIE	
	VB		1.0.08.2015

N° DU PROJET : 37073



Légende état Initial

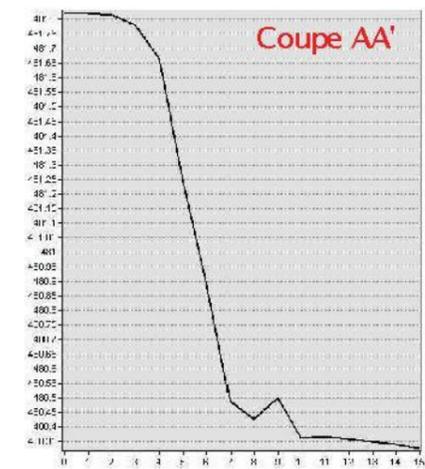
- Boisement rivulaire
- Courbes de niveau (h: 0.5m)
- Plan cadastral
- Bâtiments

Légende état projeté

- Fascine d'hélophytes
- Lit enroché
- Surfaces travaillées et ensencées
- Seuils en blocs

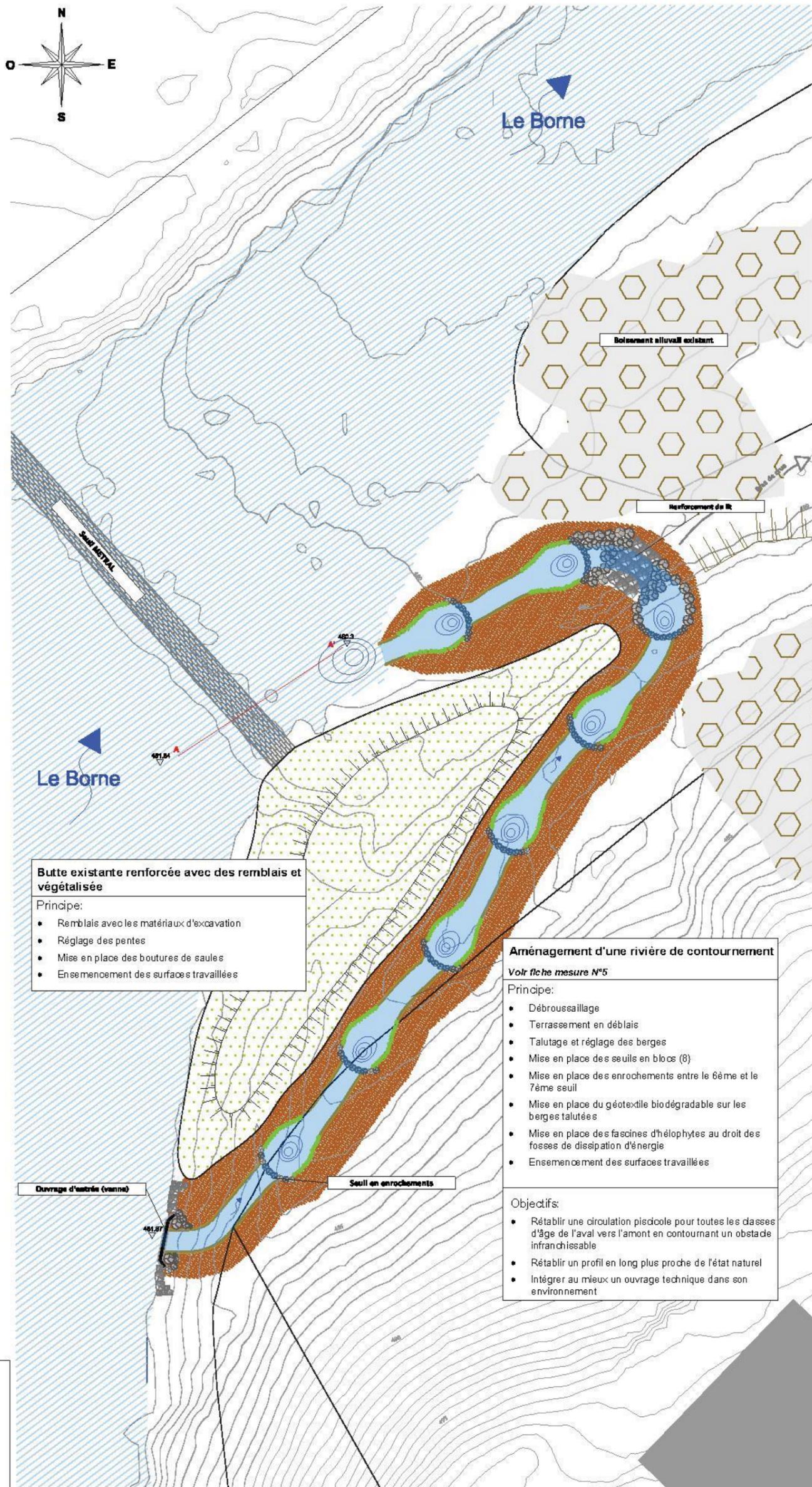
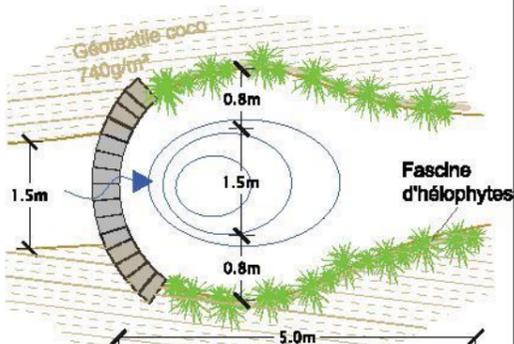
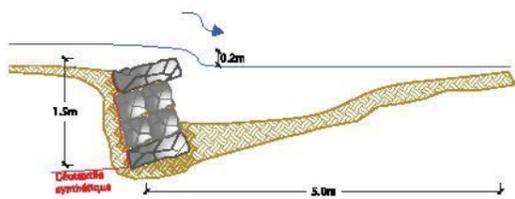
Profil du seuil Métral

X: 1/150
Y: 1/12



Détail d'un seuil

1/50



Butte existante renforcée avec des remblais et végétalisée
Principe:

- Remblais avec les matériaux d'excavation
- Réglage des pentes
- Mise en place des boutures de saules
- Ensencement des surfaces travaillées

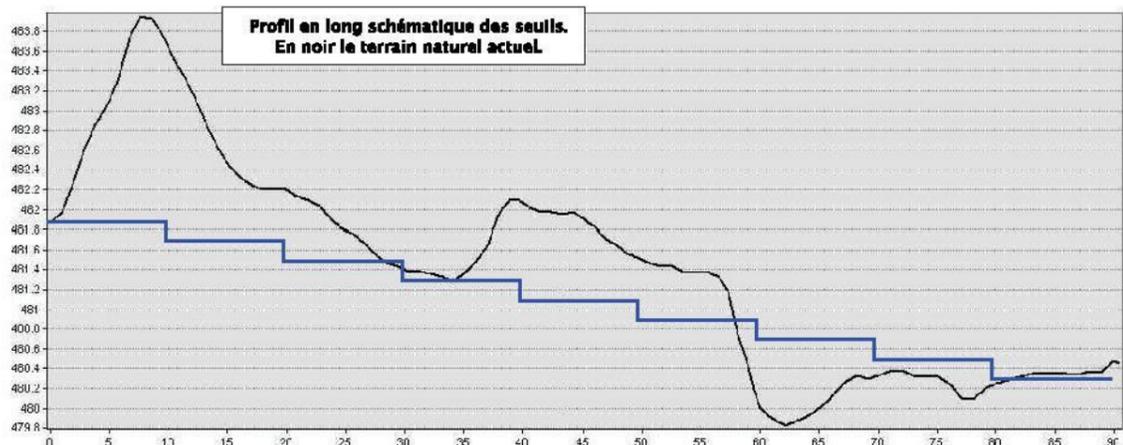
Aménagement d'une rivière de contournement

Voir fiche mesure N°5

- Principe:
- Débroussaillage
 - Terrassement en déblais
 - Talutage et réglage des berges
 - Mise en place de seuils en blocs (8)
 - Mise en place des enrochements entre le 6ème et le 7ème seuil
 - Mise en place du géotextile biodégradable sur les berges talutées
 - Mise en place des fascines d'hélophytes au droit des fosses de dissipation d'énergie
 - Ensencement des surfaces travaillées

- Objectifs:
- Rétablir une circulation piscicole pour toutes les classes d'âge de l'aval vers l'amont en contournant un obstacle infranchissable
 - Rétablir un profil en long plus proche de l'état naturel
 - Intégrer au mieux un ouvrage technique dans son environnement

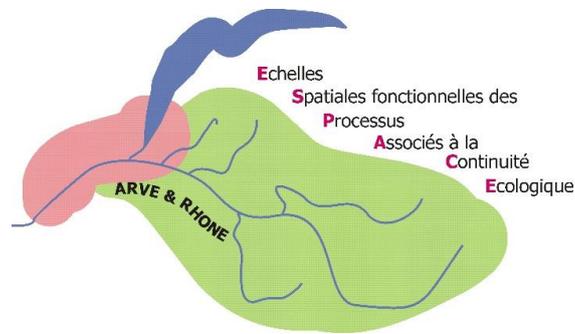
X: 1/130
Y: 1/40





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



IV. Méthodologie de suivi de travaux après restauration

Le projet de restauration Borne-aval vise en la mise en place d'une série d'aménagements afin d'améliorer la qualité globale de la rivière et plus particulièrement celle de l'habitat piscicole. Il s'agit de restaurer ici un habitat piscicole diversifié notamment pour la truite adulte. L'ambition de la restauration est modeste, de type R1/R2 (structures de diversification des écoulements et habitats, emprise : lit mineur, contraintes foncières élevées du fait d'un contexte urbain, compartiment visé : piscicole) selon la nomenclature de MALAVOI & ADAM (ADAM *et al.*, 2007).

Afin d'évaluer l'efficacité et le gain de ces travaux de restauration, la mise en place d'un diagnostic écologique de suivi est nécessaire. La méthodologie qui va suivre propose de mesurer 3 compartiments : l'habitat, les communautés macrobenthiques et les communautés piscicoles ; en fonction d'un calendrier bien défini conformément à ce qui est préconisé dans la littérature (synthèse bibliographique de VIGIER & CAUDRON, 2008). En effet, le suivi nécessite des campagnes pré-restauration et post-restauration afin d'être en mesure de comparer les éventuelles modifications du milieu et l'impact des aménagements. Cette approche est dite BACI (Before-After, Control-Impact – *trad* : avant-après, témoin-restauré). Elle permet de différencier les réponses liées aux efforts de restauration (avant-après) des variations naturelles inter-annuelles (témoin-restauré) (BALDIGO *et al.*, 2010).

1) *Choix des stations et temporalité du suivi*

NAVARRO *et al.* (ONEMA, 2012) préconisent de réaliser un état initial pendant les 3 ans précédant les travaux (dans la mesure du possible) pour les compartiments biologiques, mais un an avant seulement pour l'hydromorphologie. Plusieurs auteurs (BALDIGO & WARREN, 2008 ; VIGIER & CHASSERIEAU, 2013) ont mis en évidence que 2 ans de suivi pré travaux était un minimum pour réaliser une analyse soit site par site, soit type d'aménagement par type d'aménagement. Après les travaux, il est conseillé d'effectuer les échantillonnages sur le compartiment « habitat » à l'année N et N+3 et entre N+3 et N+6 lorsqu'il y a eu une crue morphogène (NAVARRO *et al.*, 2012). Pour la biologie, il faut respecter un temps de recolonisation et de cycle biologique, comme le montre la **Figure 112** et le relate la littérature (VIGIER & CHASSERIEAU, 2013 ; FRIBERG *et al.*, 1998). Un diagnostic de N+3 à N+5 s'impose.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

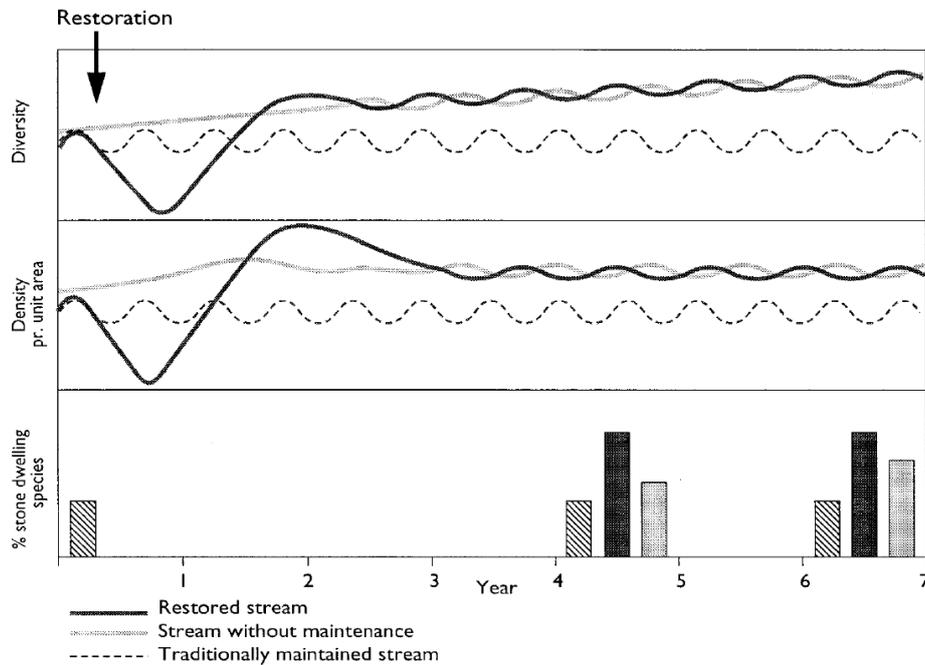
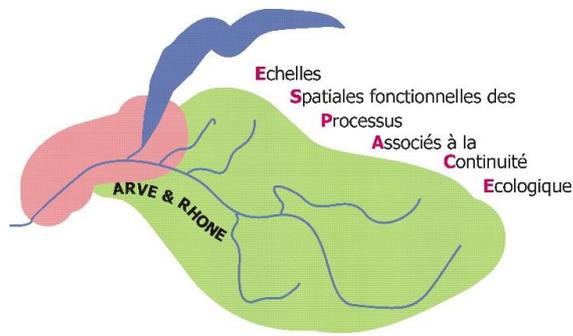


Figure 112 : Schéma d'évolution théorique d'une communauté de macroinvertébrés benthiques après restauration.

Trois variables sont représentées, la diversité, la densité et le pourcentage de taxons ayant une affinité pour les substrats grossiers et trois trajectoires, celle des cours d'eau restaurés (trait noir), celle des cours d'eau témoin (pointillés), et celle des cours d'eau sans restauration (trait gris). Extrait de FRIBERG et al., (1998).

Chacun des prélèvements/échantillonnages et mesures doit être effectué à l'étiage, soit pour le Borne, 2 possibilités de période d'intervention : en janvier-février ou en juillet-août. D'après le graphique ci-dessous (**Figure 113**), dont les données sont issues de la Banque Hydro³⁰ (débits de 2010 à 2014), il semble que les années soient très variables mais généralement, ces deux périodes contiennent plusieurs plages de jours consécutifs d'étiage (exemple en **Figure 114**). Toutefois, pour le suivi biologique, il est préférable de réaliser les prélèvements en étiage estival (respect du cycle biologique) ; les mesures hydromorphologiques pouvant être faites en étiage hivernal.

³⁰ Station Borne à Saint-Jean-de-Sixt ; <http://www.hydro.eaufrance.fr/>



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

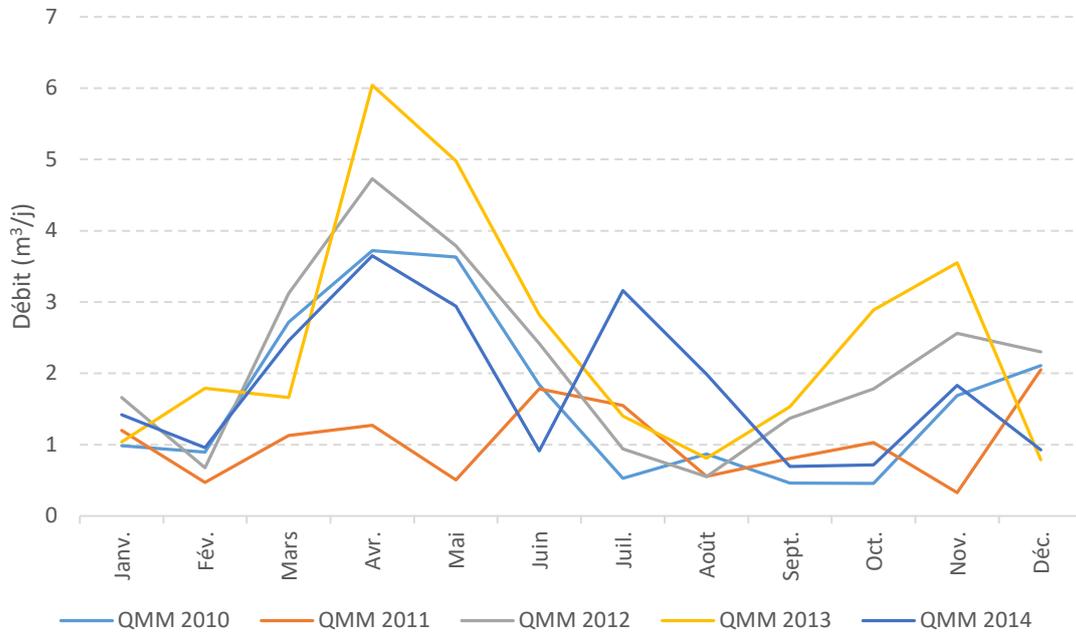
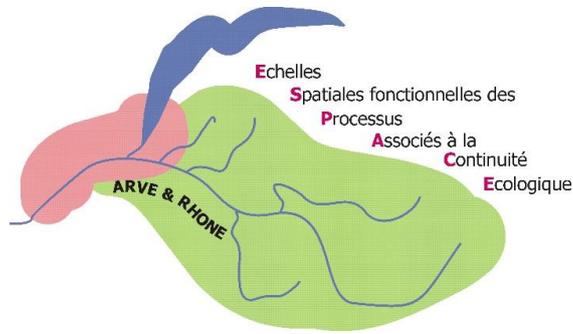


Figure 113 : Graphique des débits moyens mensuels (QMM) pour les années 2010 ; 2011 ; 2012 ; 2013 et 2014.

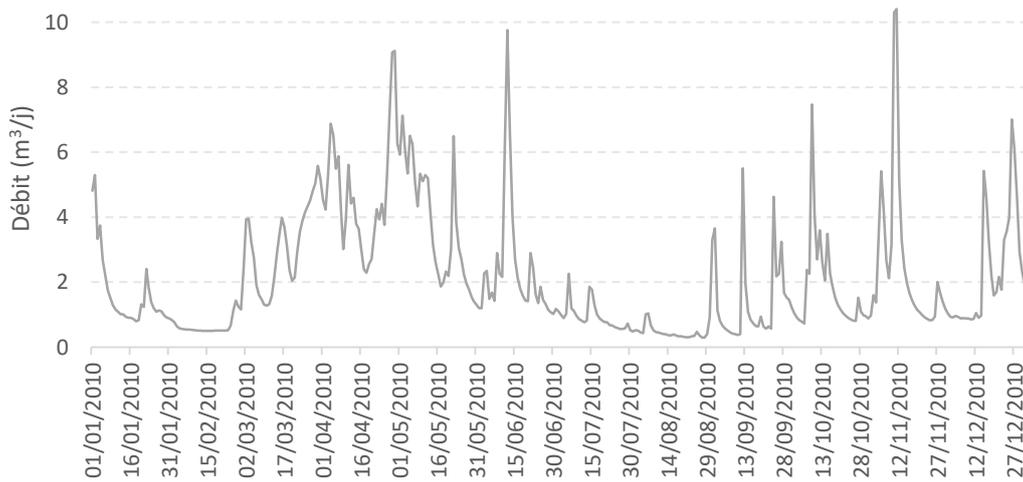
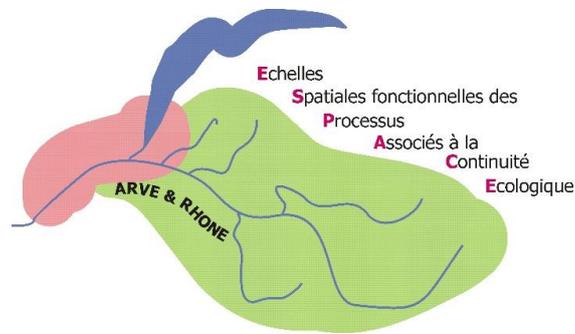


Figure 114 : Exemple de débits moyens journaliers du Borne sur une année (2012).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Pour ce suivi, il est préconisé la mise en œuvre d'une station témoin qui correspondra à la situation « dégradée » (non restaurée) et de stations aménagées (une à 2 par tronçon restauré). De plus, une « station de référence » sera comparée à ces dernières. Elle correspond à une station non restaurée, mais non dégradée. Celle-ci sera située bien en amont du linéaire, à l'Essert, sur la commune d'Entremont, car c'est une station de pêche historique (Bor03) et suivie annuellement par la FDPPMA 74 depuis 2011. La **Figure 115** présente le linéaire du Borne aval avec les tronçons définis dans la partie « 1) Découpage des tronçons à aménager », ainsi que le positionnement prévisionnel des stations d'échantillonnage pour le suivi des travaux d'aménagements. En Annexe 25 sont présentées les cartes des tronçons à aménager et des stations de pêche électrique historiques.

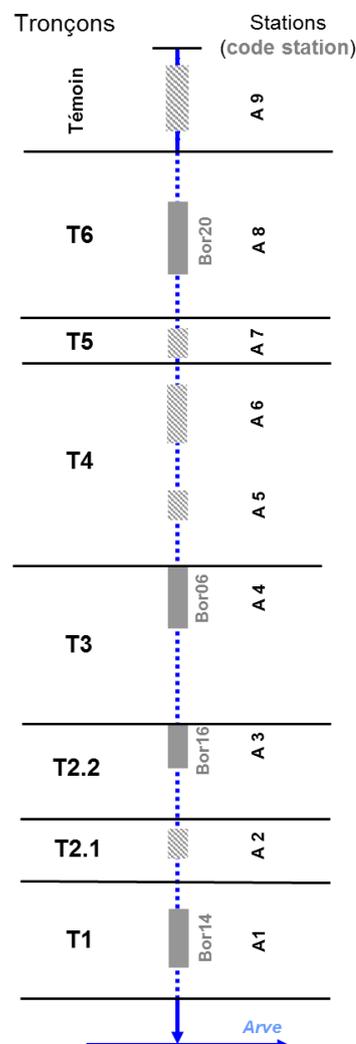


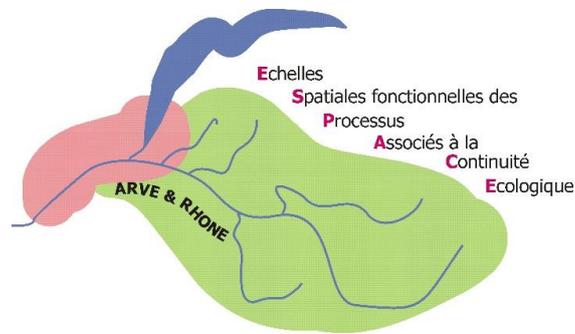
Figure 115: Schéma des tronçons à aménager et positionnement des stations d'échantillonnage pour le suivi des travaux.

En gris, les stations de pêches électriques existantes ainsi que leur code station et en lignes grisées, les nouvelles stations pour le suivi.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Les méthodologies mises en œuvre pour le suivi de l'évolution de chaque compartiment ont pour objectif de s'appuyer sur des mesures directes, reproductibles, quantitatives, recouvrant plusieurs échelles de résolution (la communauté, la population et les processus écologiques) décrites par plusieurs variables comme préconisé dans la littérature (RUIZ & AIDE, 2005). Cependant aucune préconisation n'existe à l'heure actuelle sur les méthodes à mettre en œuvre en fonction du type de milieu et des types de travaux. Aussi il convient d'adopter des protocoles standardisés et/ou maîtrisés.

2) Diagnostic écologique

A. Etude de la qualité du milieu

a. Hydromorphologie

Il n'existe actuellement aucun protocole standardisé de description de l'habitat à une méso-échelle permettant d'effectuer une analyse quantitative de l'évolution de l'habitat.

La méthode de l'IAM (Indice d'Attractivité Morphodynamique) (DEGIORGI *et al.*, 2002) repose sur 3 composantes fondamentales de l'habitat aquatique : la hauteur d'eau, la vitesse et le couple substrat/support. Les mesures métriques de ces 3 composantes sont transformées en classes de valeur biologique (DEGIORGI *et al.*, 2002). Une analyse cartographique (superposition des 3 composantes) est alors réalisée afin de visualiser les pôles d'attraction, expliquant la répartition spatiale de la faune piscicole à l'échelle de l'habitat. A partir de cette cartographie, le calcul de l'Indice d'Attractivité Morphodynamique peut donc être calculé.

Cette méthode prend donc en considération l'habitat piscicole et les variétés d'écoulements, ce qui n'est pas le cas de la méthode EVHA (GINOT *et al.*, 1998), déjà utilisée lors de suivis de travaux de restauration (VIGIER & CHASSERIEAU, 2013). Cette dernière privilégie la modélisation hydraulique et ne tient pas compte de l'habitat piscicole complet : caches, présence de matière organique. En effet, pour une espèce telle que la truite, ces composantes sont essentielles pour le maintien des individus. Cela est moins vrai pour les espèces de pleine eau. La méthode EVHA n'est donc pas assez précise et pas adéquate pour juger de l'amélioration de cette composante de l'attractivité de l'habitat pour le poisson. De plus, la mise en œuvre du protocole EVHA sur le terrain demande un nombre d'opérateurs plus important que celle de l'IAM. Le temps de traitement des données pour EVHA est également plus conséquent.

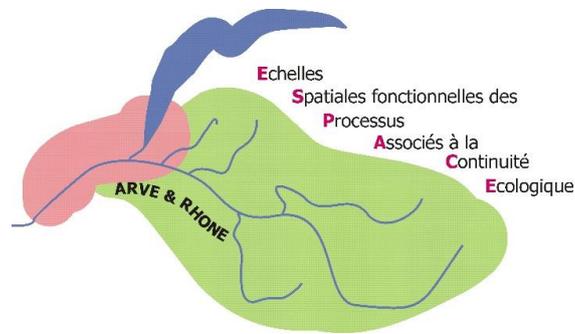
Toutefois, il est préconisé ici dans le cadre de ce suivi écologique de s'arrêter à la description et cartographie des composantes de l'IAM sans le calcul de l'indice, car l'évolution de ce dernier ne permet pas de statuer sur le gain apporté par l'aménagement.

Les modalités pratiques pour la mise en œuvre de la méthode, tirées de DEGIORGI *et al.*, (2002) sont détaillées en Annexe 26.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



b. Thermie

Un observatoire du paramètre thermique est mis en oeuvre sur le territoire de la Haute-Savoie par la FDPPMA 74. Concernant le suivi du Borne, il existe une station de suivi thermique à l'Essert (la station ciblée comme étant la référence). De plus, un enregistreur a été mis en place sur la partie aval du Borne dans le cadre de ce projet INTERREG Espace Arve & Rhône (pour le suivi des déplacements des poissons). Il serait donc envisageable de conserver cet enregistreur thermique (au niveau du pont de l'autoroute A40 : secteur ciblé par la restauration), ainsi que celle de la station de référence, puis d'en ajouter une sur la station témoin non restauré. Il sera également préconisé de placer d'autres enregistreurs dans l'Arve notamment : un entre la confluence du Borne et celle du Giffre et un en aval de la confluence avec le Borne, un au niveau du Pont de l'Europe à Bonneville (station utilisée lors du programme INTERREG Espace Arve & Rhône). Ceci pourra permettre de montrer l'influence des températures sur les mouvements piscicoles entre l'Arve et le Borne.

Ces enregistreurs thermiques (*Onset HOBO®*) sont fixés dans le cours d'eau durant toute la durée du suivi. Ils enregistrent les températures sur un pas de temps horaire. Une fois les données récupérées, elles sont traitées sur la macro Excel MACMASalmo³¹ (Macro d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles, DUMOUTIER *et al.*, 2010). Les données brutes de ces enregistreurs permettent de caractériser sur chaque station, 30 variables thermiques différentes réparties en 4 grandes catégories à l'aide de la macro Excel (**Tableau 38**) (VIGIER *et al.*, 2010) :

- Variables thermiques générales du milieu ;
- Variables thermiques relatives aux exigences écologiques de la truite commune :
 - Préfendum thermique de la truite commune
 - Conditions de développement de la PKD (*Proliferative Kidney Disease* ou MRP en français *Maladie Rénale Proliférative*)
 - Conditions thermiques relatives à la phase de développement embryonnaire.

³¹Procédure téléchargeable sur http://www.pechehautesavoie.com/telechargement1_bis.php?categ=5



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

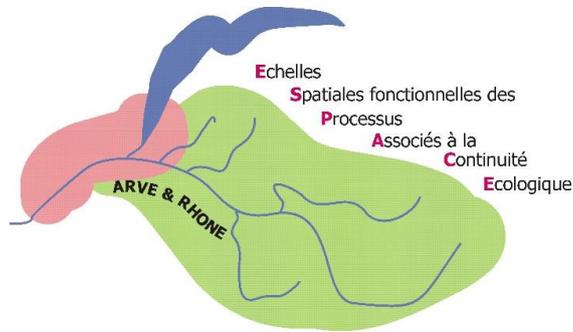


Tableau 38 : Présentation et description des 30 variables thermiques calculées à partir des données de température (DUMOUTIER et al., 2010).

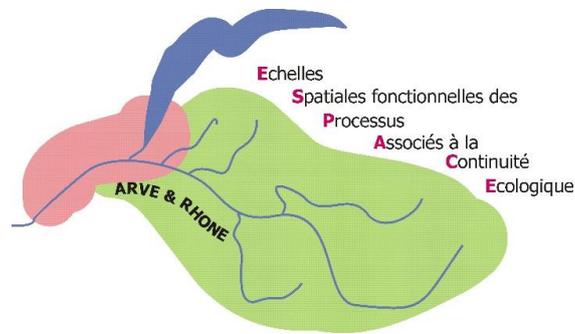
Catégorie	Code variable	Désignation succincte
Rappel	Dd Période	Date de début de la période étudiée
	Df Période	Date de fin de la période étudiée
	Durée	Durée de la période en jours
Thermie générale	Ti min	Température instantanée minimale
	Ti max	Température instantanée maximale
	ATi	Amplitude thermique sur la période étudiée
	Ajmax Ti	Amplitude thermique journalière maximale
	D Ajmax Ti	Date à laquelle l'amplitude thermique journalière maximale a été observée
	Tmj min	T° moyenne journalière minimale
	Tmj max	T° moyenne journalière maximale
	ATmj	Amplitude thermique des moyennes journalières
	D Tmj max	Date à laquelle la T° moyenne journalière maximale a été observée
	Tmp	T° moyenne de la période
	Tm30j max	T° moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds
	Dd Tm30j max	Date de début de la période correspondante aux 30 jours consécutifs les plus chauds
	Df Tm30j max	Date de fin de la période correspondante aux 30 jours consécutifs les plus chauds
Preferendum thermique	Nbj Tmj 4-19	Nombre total de jours durant lesquels la T° est comprise entre 4 et 19°C
	%j Tmj 4-19	Pourcentage de jours où la T° moyenne journalière est comprise entre 4 et 19°C
	Dd Tmj <4	Date à laquelle la T° moy journalière est pour la première fois < 4°C
	Df Tmj <4	Date à laquelle la T° moy journalière est pour la dernière fois < 4°C
	%j Tmj<4	Pourcentage de jours où la T° moy journalière est < 4°C
	%j Tmj>19	Pourcentage de jours où la T° moy journalière est > 19°C
	Nb Ti > 19	Nombre d'heures totales où la T° instantanée est > 19°C
	Nb sq Ti > 19	Nombre de séquences durant lesquelles la T° instantanée reste > 19°C
	Nbmax Ti csf > 19	Nombre d'heures max consécutives durant lesquelles la T° instantanée reste > 19°C
	Nb Ti >= 25	Nombre d'heures totales où la T° instantanée est ≥ 25°C
	Nb sq Ti >= 25	Nombre de séquences durant lesquelles la T° instantanée reste ≥ 25°C
Nbmax Ti csf >= 25	Nombre d'heures max consécutives durant lesquelles la T° instantanée reste ≥ 25°C	
Développement potentiel PKD	Nb Ti >= 15	Nombre d'heures totales où la T° instantanée est ≥ 15°C
	Nb sq Ti >=15	Nombre de séquences durant lesquelles la T° instantanée reste ≥ 15°C
	Nbmax Ti csf >=15	Nombre d'heures max consécutives durant lesquelles la T° instantanée reste ≥ 15°C
Phase de vie embryo-larvaire (PEL)	D50 ponte	Date médiane de ponte rentrée par l'utilisateur
	Nbj Inc	Nombre de jours d'incubation
	D50 Ecl	Date médiane d'éclosion
	Nbj Rsp	Nombre de jours de résorption
	Nbj PEL	Nombre total de jours de la Phase de vie Embryo-Larvaire
	D50 Emg	Date médiane d'émergence
	Nb Ti > 15 (PEL)	Nombre d'heures totales où la T° instantanée est > 15°C pendant la PEL
	Nb sq Ti > 15 (PEL)	Nombre de séquences pendant la PEL durant lesquelles la T° instantanée reste > 15°C
	Nbmax Ti csf > 15 (PEL)	Nombre d'heures max consécutives pendant la PEL durant lesquelles la T° instantanée reste > 15°C
	Nb Ti < 1.5 (PEL)	Nombre d'heures totales où la T° instantanée est < 1,5°C pendant la PEL
	DNb sq Ti < 1.5 (PEL)	Nombre de séquences pendant la PEL durant lesquelles la T° instantanée reste < 1,5°C
	Nbmax Ti csf < 1.5 (PEL)	Nombre d'heures max consécutives pendant la PEL durant lesquelles la T° instantanée reste < 1,5°C

Ces données permettront de savoir si le milieu est favorable à l'habitabilité de la truite fario d'un point de vue thermique et de comparer les changements éventuels avant et après travaux.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



c. Paramètres physico-chimiques

Pour l'analyse de la physico-chimie, il sera nécessaire de réaliser des prélèvements d'eau sur chacune des stations de suivi selon la méthodologie de l'Agence de l'Eau, puis de les transmettre à un laboratoire accrédité COFRAC, qui réalisera les analyses suivantes :

- Matières azotées (Ammonium, Nitrites, Nitrates) ;
- Matières phosphorées (Orthophosphates).

De plus, lors des campagnes de prélèvements, les paramètres tels que : la concentration et la saturation en oxygène dissous, le pH et la conductivité, seront mesurés à l'aide d'une sonde multiparamètre.

Plusieurs campagnes par année sont à prévoir, soit une par saison : à l'étiage hivernal (février) ; en période de hautes eaux printanières (avril-mai) ; à l'étiage de fin d'été (août) et à l'arrivée des truites migrantes dans le Borne, c'est-à-dire fin octobre d'après les résultats du Chapitre 2.

B. Etude du compartiment macrobenthique

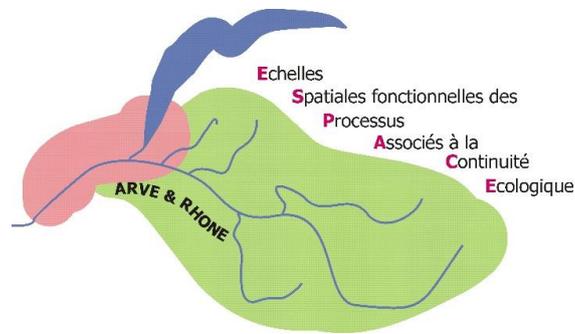
L'IBGN est le seul indice normalisé en France. C'est la méthode la plus connue et la plus répandue, bien que remplacée par la méthode IBG-RCS compatible avec la DCE (Directive Cadre européenne sur l'Eau). Toutefois, l'IBGN ne sanctionne pas assez fidèlement les altérations de la qualité physique à l'échelle de la station (DECOURCIERE ET DEGIORGI, 2000).

Par conséquent, 8 placettes seront prélevées selon la norme AFNOR (NF.T.90.350) permettant le calcul de l'Indice Biologique Global Normalisé, mais il est également possible d'ajouter 12 placettes de plus, afin d'obtenir un prélèvement par couple substrat/vitesse dans la classe de hauteur où il est le plus représenté (VIGIER & CHASSERIEAU, 2013). C'est ce qu'on appelle la méthode du MAG20 (DECOURCIERE ET DEGIORGI, 2000), fondée sur une prospection bien plus complète de l'espace fluvial, et s'appuyant sur une description fine de l'habitat aquatique ainsi qu'une détermination plus poussée des taxons (DECOURCIERE ET DEGIORGI, 2000). Comme son nom l'indique, elle est habituellement effectuée avec 12 prélèvements en plus des 8 pour l'IBGN (soit un total de 20), mais nous la transformerons ici en MAG12 avec 4 placettes seulement en plus des 8 de l'IBGN (soit 12 en tout). En effet, d'après VIGIER & CHASSERIEAU (2013), l'effort d'échantillonnage du MAG20 réalisé dans leur suivi a semblé trop important au regard des informations fournies par le compartiment macrobenthique : « Le type de travaux mis en œuvre (R1) n'ayant pas d'ambition de modification de la fonctionnalité de l'écosystème, il semble qu'une méthode plus légère ayant pour simple objectif de suivre la qualité de l'écosystème pour s'assurer qu'il n'y a pas d'évolution notable pouvant impacter les autres indicateurs semble suffisante » (extrait du rapport sur le Chéran VIGIER & CHASSERIEAU, 2013). Ici, compte tenu du contexte urbain de ce secteur à restaurer, l'ambition des d'aménagements est plutôt de type R1/R2.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



L'échantillonnage consiste à prélever différents substrats au filet Surber de maille de 500 μ m et de les conserver séparément dans une solution de formol (10%) ou d'alcool (consulter la norme IBGN et le protocole MAG20 pour le choix des placettes de substrat sur le terrain). Un exemple type d'une fiche de prélèvement de terrain est présenté en Annexe 27.

En laboratoire, les Plécoptères, Ephéméroptères, Trichoptères, Coléoptères, Hétéroptères, Odonates, Mollusques, Achètes et Turbellariés sont déterminés au genre. Les Diptères sont déterminés jusqu'au plus petit niveau disponible à partir de la clé TACHET *et al.*, (2003). Pour les autres taxons, la famille est la limite taxonomique adoptée.

Les variables étudiées englobent l'évaluation de la qualité du milieu (IBGN, robustesse) ainsi que des métriques choisies a priori comme étant les plus susceptibles de répondre aux efforts d'aménagement (ERNST *et al.*, 2012) telles que la composition de la communauté (variété, densité, diversité de Shannon H' , équitabilité E du peuplement et abondance relative des différents ordres représentés) ; les taxons sensibles (variété $GI > 7$, densité $GI > 7$, abondance relative EPT) et certains traits biologiques, écologiques et physiologiques (TBEP) (la taille maximale, la durée du cycle vital, le mode d'alimentation, la distribution transversale par rapport au chenal, le préférendum de microhabitat et le préférendum de vitesse de courant).

C. Etude de la faune piscicole

Il existe quatre approches générales pour estimer la taille d'une population : abondance totale (comptages), comptages incomplets, comptages indirects, et CMR (Capture-Marquage-Recapture) (LANCIA *et al.*, 2005).

Le comptage incomplet, basé sur l'extrapolation permet un bon suivi qualitatif de la communauté piscicole et quantitatif des populations en particulier celles de truites et ce, à ses différents stades de développement. Elle semble donc la plus adaptée dans notre cas de suivi de restauration d'un cours d'eau. Ce comptage est effectué par pêche électrique d'inventaire par enlèvements successifs décrite par DELURY en 1951. Chaque station de pêche électrique fait l'objet de 2 ou 3 passages successifs afin d'atteindre la meilleure estimation possible du peuplement piscicole. Lorsque les conditions d'application sont remplies, on peut estimer la densité et la biomasse selon les calculs de CARLE & STRUB (1978). Le cas échéant, seules les densités et biomasses brutes sont calculées. C'est une méthode très utilisée dans le domaine de l'hydrobiologie, bien documentée et ayant fait ses preuves.

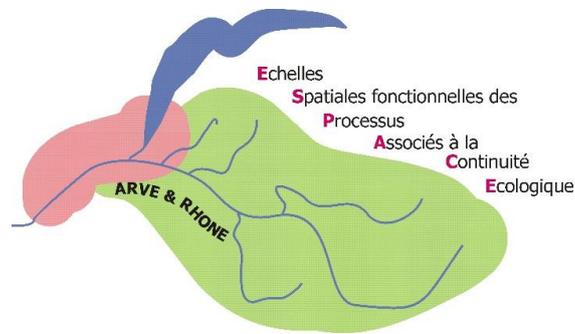
Les variables retenues, pour évaluer l'évolution du peuplement piscicole et plus précisément celle de la population de truite faïro (espèce cible sur le Borne aval), seront celles utilisées dans le cadre du suivi de restauration sur le Chéran (VIGIER & CHASSERIEAU, 2013), à savoir :

- Pour le peuplement :
 - La variété ;
 - La densité totale (ind/1000m²) ;



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- La biomasse totale (kg/ha) ;
- La densité par espèce (ind/1000 m²) ;
- La biomasse par espèce (kg/ha).

- Pour la population de truite fario :
 - La densité (ind/1000 m²) totale, des juvéniles, des sub-adultes, des adultes ;
 - La biomasse (kg/ha) totale des juvéniles, des sub-adultes, des adultes.

En complément de ces inventaires piscicoles, des CMR (Captures-Marquages-Recaptures) pourraient être mises en oeuvre pour appréhender notamment les mouvements entre l'Arve et le Borne. En effet, il a été montré que la moitié des truites fario suivies dans l'Arve remontait dans le Borne au moment de la reproduction et qu'elles étaient majoritairement de souche méditerranéenne (sans pouvoir identifier spécifiquement la souche du Borne³²). Une amélioration de l'habitat sur le secteur aval du Borne serait susceptible d'attirer un nombre plus important de géniteurs. Pour quantifier ce flux, des marquages RFID (implantation de transpondeurs ou PIT-tags) peuvent être prévus sur l'Arve et le Borne à tous les stades³³ pour évaluer les échanges entre ces 2 cours d'eau (voir la méthode de marquage PIT-tag dans le Chapitre 2). Ces marquages concerneraient :

- pour le Borne tous les individus supérieurs à 5.5 cm capturés au moment de chaque pêche d'inventaire ;
- et pour l'Arve un minimum de 350 individus (de toutes classes de taille) pourrait être échantillonné par des pêches de sondage sur plusieurs secteurs déjà ciblés lors des marquages du programme ESPACE (secteurs amont et aval par rapport au Borne).

En parallèle à la restauration de l'habitat piscicole sur ce secteur rectifié du Borne aval, un aménagement du seuil du pont du Diable à l'entrée des gorges, soit l'amont du secteur ciblé par les aménagements, est prévu depuis de longue date. Une étude est en cours pour définir le scénario de restauration possible pour améliorer le franchissement des individus de truites. Les travaux devraient être réalisés prochainement. Un suivi de l'efficacité de cet aménagement est envisageable par la méthode RFID afin d'avoir une pression de marquage importante et espérer un nombre de franchissements conséquent. Ce site constituerait une barrière amont et permettrait d'évaluer le flux d'individus sortant vers l'amont.

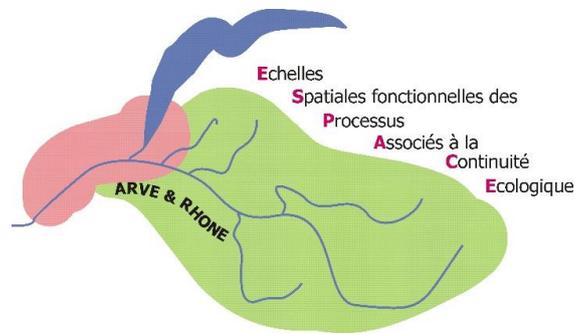
³² L'AAPPMA du Faucigny déverse dans l'Arve des alevins de la souche méditerranéenne issue de la pisciculture de Chazey-Bon depuis 2014 tandis que celle du Chablais Genevois déverse des alevins de la souche du Borne depuis 2013.

³³ En fixant tout de même une classe de taille minimum en dessous de laquelle il n'y aura pas de marquage puisque le tagging d'alevins peu occasionné de la perte et surtout que l'objectif initial de la restauration du Borne aval cible le stade adulte de la truite. Toutefois, le marquage de juvénile peut apporter une information importante sur la provenance des individus migrants (homing).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



3) Analyse des résultats

La finalité du suivi de travaux réside en une comparaison des résultats de chaque compartiment étudié, avant et après travaux, mais aussi entre stations restaurées et station témoin et de référence, d'après la technique dite « BACI » (BALDIGO *et al.*, 2010). Il s'agit donc de calculer la réponse « nette » pour une année (n) pour chacune des variables étudiées, en soustrayant la valeur obtenue à l'année n sur une station restaurée à la valeur de la station témoin de la même année. L'analyse de la variance à deux facteurs (ANOVA) permet ensuite de tester les différences statistiques de ces réponses nettes : avant et après travaux et entre les stations aménagées. Ce type d'analyse peut être réalisé sur un logiciel de statistique comme R ou XLSTAT (Addinsoft).

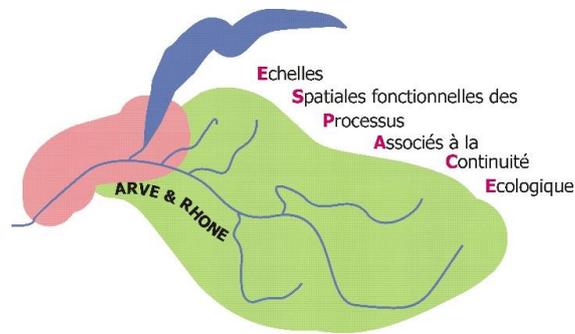
V. Bibliographie

- ADAM P., DEBIAIS N. & J.-R. MALAVOI, 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. *Agence de l'eau Seine Normandie*, 60 p.
- BALDIGO B.P., ERNST A.G., WARREN D.R. & MILLER S.J., 2010. Variable responses of fish assemblages, habitat, and stability to natural-channel-design restoration in Catskill mountain streams. *Transactions of the American Fisheries Society* 139(2) : 449-467.
- BALDIGO B.P. & WARREN D.R., 2008. Detecting response of fish assemblages to stream restoration : effects of different sampling designs. *North American journal of fisheries management*, 28(3) : 919-934.
- CARLE, F. L. & STRUB, M. R. (1978) A new method for estimating population size from removal data. *Biometrics*, 34, 621-830.
- CAUDRON A., CHAMPIGNEULLE A. & LARGE A., 2006. Etats et caractéristiques des populations autochtones de truite commune identifiées en Haute-Savoie et qualité globale du milieu. p. 55-118 in programme INTERREG III A- Identification, sauvegarde et réhabilitation des populations de truites autochtones en vallée d'Aoste et en Haute-Savoie. *Rapport final.06/02*. 153 p + annexes.
- DECOURCIERE H., DEGIORGI F., 2000. Protocole d'analyse semi-quantitative des communautés benthiques : le MAG 20. *TELEOS – LBE Uni. F. Comte*, 4 p.
- DEGIORGI F., GRANDMOTTET J. P., MORILLAS N. 2002. Méthode standard d'analyse de la qualité de l'habitat aquatique à l'échelle de la station : l'IAM. *TELEOS*.
- DE LURY D.B., 1951. On the planning of experiments for the estimation of fish population. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 18 : 281-282.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



DUMOUTIER Q., VIGIER L. ET CAUDRON A., 2010. Macro d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles, MACMASalmo1.0. , 21 p. + annexes. Disponible sur http://www.pechehautesavoie.com/telechargement1_bis.php?categ=5

ERNST A.G., WARREN D.R. & BALDIGO B.P., 2012. Natural-channel-design restorations that changed geomorphology have little effect on macroinvertebrate communities in headwater streams. *Restoration Ecology*, 20(4) : 532-540.

FRIBERG N., KRONVANG B., HANSER H., SVENDSEN L., 1998. Long-term, habitat-specific response of a macroinvertebrate community to river restoration. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems* (8). P 87-99.

GINOT V., SOUCHON Y., CAPRA H., BREIL P., VALENTIN S., 1998. EVHA 2.0, Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière, *Guide Méthodologique*.

LANCIA, R. A., KENDALL, W. L., POLLOCK, K. H., & NICHOLS, J. D., 2005. Estimating the number of animals in wildlife populations. *Wildlife Society*. P 106-153.

NAVARRO L., PERESS J., MALAVOI J.R., 2012. Aide à la définition d'une étude de suivi – Recommandations pour des opérations de restauration de l'hydromorphologie des cours d'eau. *Guide ONEMA*. 48 pages.

RAYMOND J.C. 1999. Synthèse des connaissances sur le peuplement piscicole du Borne (74). Rapport CSP, DR Franche-Comté, Bourgogne, Rhône-Alpes, 11p. + annexes.

RUIZ M., AIDE T., 2005. Restoration Success: How Is It Being Measured? *The journal of the society for ecological restoration*. Volume 13, issue 3. Pages 569-577.

TACHET H., RICHOUX P., BOURNAUD M. & USSEGLIO-POLATERA P., 2003. Invertébrés d'eau douce, systématique, biologie, écologie. *CNRS Eds*, 587p.

VIGIER L. & CAUDRON A., 2008. Bibliographie annotée : évaluation de l'efficacité des travaux de restauration des habitats physiques des cours d'eau. *Rapport FDP74.08/01*, 137p.

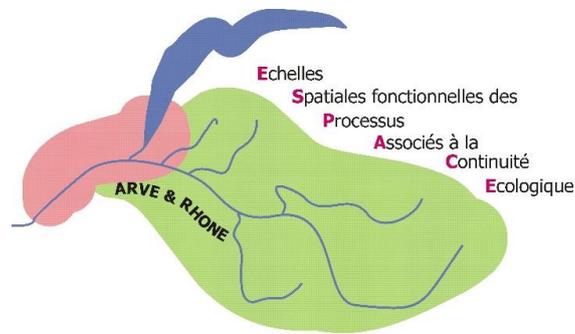
VIGIER L., HUCHET P. ET CAUDRON A., 2010. Diagnose écologique et plan de gestion piscicole appliqués au cours d'eau – approche méthodologique à l'échelle du bassin versant. *Rapport SHL 295.2010*, 38 p. + annexes.

VIGIER L. & CHASSERIEAU C., 2013. Evaluation des travaux de diversification de l'habitat physique réalisés sur le bas Chéran : Comparaison des états des lieux effectués avant travaux (2008), 1 an après travaux (2010) et 3 ans après travaux (2012), Rapport Final. *Rapport PDF74.13/07*. 18p + annexes.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Chapitre 5 Transfert vers une gestion transfrontalière

DUMOUTIER Q. ^(a), CHASSERIEAU C. ^(b), HUCHET P. ^(b)

(a) *SAGE Environnement – Bureau d'études prestataire*



12, Avenue du Pré de Challes
Parc des Glaisins – Annecy-le-Vieux
74940 ANNECY

(b) *FDPPMA 74 – Fédération de pêche de Haute-Savoie*



"Le Villaret"
2092, route des Diacquenods
74370 SAINT-MARTIN BELLEVUE

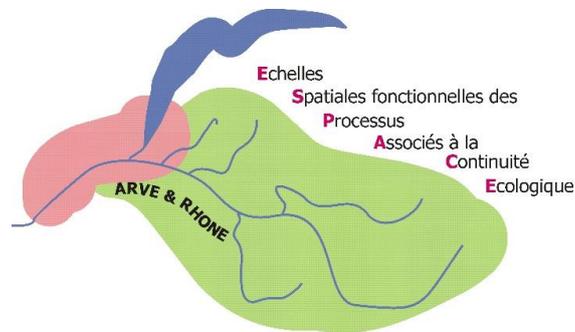
Résumé

Face à la multitude d'obstacles entravant les déplacements et désormais recensés, prioriser les actions de restauration de la continuité piscicole sur un bassin versant revêt un enjeu important. Le programme ESPACE Arve et Rhône s'est inspiré dans ce cas de travaux de modélisation nord-américains et anglais pour adapter un outil informatique simple, permettant de prioriser à l'échelle d'un bassin versant des travaux de restauration à mener pour atteindre le meilleur ratio coût/bénéfices, pour un budget donné. Le modèle est implémenté sous Excel et prend en compte les paramètres structurants tels que l'habitabilité des cours d'eau modélisés, les caractéristiques des obstacles, les spécificités des espèces considérées ou encore les caractéristiques des projets de restauration. Le modèle a été appliqué sur le Borne, un des principaux affluents de l'Arve et est présenté en exemple.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



I. Contexte et objectifs

Au cours des XIX^{ème} et XX^{ème}, le développement des activités humaines a conduit à une forte artificialisation des milieux aquatiques, engendrant entre autre l'altération et la fragmentation des habitats pour les poissons par des obstacles artificiels. Ces obstacles sont recensés pour une partie ou en cours de recensement par divers acteurs : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), fédérations de pêche, collectivités territoriales en charge de la compétence « eau superficielle » ou encore structures privées exploitant ou interférant avec les milieux aquatiques. Le travail le plus abouti, et le plus homogène en terme de nature et d'échelle d'information est actuellement mise en œuvre par l'ONEMA pour alimenter la base de données ROE : Référentiel des Obstacles à l'Écoulement. Ce référentiel recense les obstacles à l'écoulement en France métropolitaine en leur associant des informations communes à l'ensemble des acteurs de l'eau et de l'aménagement du territoire. Ces données sont accessibles au public.

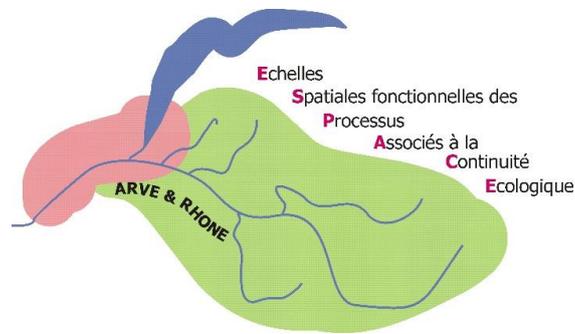
Le nombre d'obstacles artificiels actuellement recensé dans le ROE est très important. Au 1^{er} mars 2010, il comprenait 44 454 ouvrages en France métropolitaine (LEONARD *et al.* 2010) dont plus de 700 sur le seul bassin versant de l'Arve. Ces obstacles sont de nature très variable, du simple passage busé routier au grand barrage hydroélectrique. Aussi, standardiser une approche visant à prioriser les travaux de restauration de la continuité piscicole est devenu un enjeu majeur des années à venir.

Le présent travail a pour objet de contribuer à cette réflexion en proposant une démarche basée sur l'utilisation d'un algorithme d'optimisation appliqué à un modèle mathématique de bassin versant. Il fournit *in fine* un outil informatique développé sous Excel[®] dont la vocation est d'être utilisable par un non spécialiste informatique – mais néanmoins compétant dans la problématique du franchissement piscicole – sur n'importe quel bassin versant à condition de disposer des données d'alimentation indispensables à l'analyse.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



II. Méthodologies existantes et méthodologie retenue dans le cadre du programme INTERREG ESPACE

La problématique de priorisation de la restauration de la continuité piscicole est complexe, du fait de la diversité des projets, des coûts associés, et de la variabilité des échelles de travail. De nombreux travaux existent, sur des bases méthodologiques diverses. KEMPS & O'HANLEY (2010) proposent une synthèse critique, qui peut être reprise ici, des principales méthodes mises en œuvre.

La méthode la plus fréquemment utilisée est basée sur une simple analyse du rapport « coût/bénéfice » associé à l'effacement de chaque barrière ou de ses effets. Dans cette démarche, chaque projet est évalué indépendamment des autres, au travers d'un jeu de critères qui permet de les classer par ordre de priorité. Cette méthode présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre, sur la base de critères d'évaluation prédéfinis. Elle peut de plus être appliquée rapidement, dans une large gamme de conditions. Cette simplicité apparente reflète toutefois le côté partiel de l'analyse car cette méthode présente l'énorme désavantage d'ignorer les gains cumulés d'effacement multiples d'obstacles ce qui en réduit grandement la pertinence. Elle n'assure donc pas de cohérence géographique dans les projets.

Cette recherche de cohérence géographique a conduit à l'émergence d'une seconde échelle d'analyse, basée sur l'utilisation de Système d'Information Géographique. Elle consiste à évaluer en détails, les gains obtenus dans le cas de scénarii d'effacement d'un ou de plusieurs problèmes de franchissement. Les résultats obtenus sur les scénarii prédéfinis sont complets, souvent associés à des cartes de restauration. Toutefois l'analyse est nécessairement non exhaustive car le nombre de scénarii analysés est limité. Elle ne peut par conséquent pas être mise en œuvre sur une aire géographique trop vaste, ou sur un nombre d'ouvrages trop conséquent.

La dernière catégorie de méthode de priorisation des projets de restauration de la continuité piscicole fait intervenir un algorithme d'optimisation, sur un modèle de bassin versant. Le principe consiste à modéliser l'effet individuel et combiné de projets afin de déterminer le scénario qui présente le meilleur gain pour un budget donné. C'est cette méthode qui est retenue ici. Elle présente les avantages suivants :

- Elle est utilisable sur de vastes aires géographiques, et sur un nombre important d'ouvrages et de projets de restauration,
- Elle recherche l'utilisation optimale de ressources financières,
- Elle garantit une prise de décision objective, sur la base d'objectifs clairement définis.

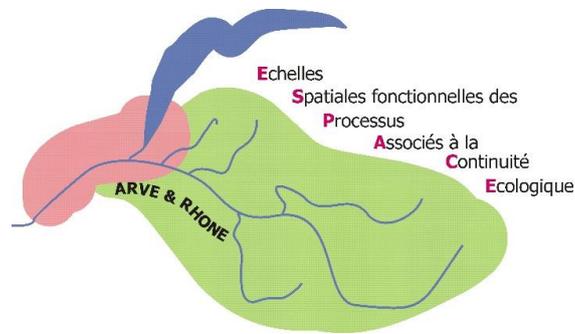
En revanche elle fait appel à un processus de modélisation qui nécessite, en l'absence d'outils, l'intervention de programmeurs et de modélisateurs.

L'objectif est donc ici le développement d'un tel outil dont la vocation est d'être utilisable par un non spécialiste informatique – mais néanmoins compétant dans la problématique du franchissement piscicole – sur n'importe quel bassin versant.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



III. Présentation du modèle mathématique

La plupart des travaux existants pour la recherche de solutions optimisées à la problématique de la restauration de la continuité écologique, sont orientés sur la thématique des poissons migrateurs anadromes pour laquelle seule l'accessibilité à la montaison est prise en compte, dans une logique de permettre l'accès aux sites de reproduction (PAULSEN & WERNSTEDT 1995, KUBY *et al.* 2005, O'HANLEY & TOMBERLIN 2005). Les gains de connectivité attendus dans ce contexte sont donc uniquement polarisés vers l'amont du bassin versant.

Une première exception dans ce domaine est le travail de O'HANLEY (2011) qui propose un modèle d'optimisation ayant pour objectif de maximiser la longueur de tronçons de rivières contigus dénués de barrières. Il conduit à restaurer des conditions de libre circulation piscicole non polarisées – à la montaison comme à la dévalaison – sur des portions de bassin versant les plus vastes possibles.

La métrique principale utilisée est la métrique « C », développée par DIEBEL *et al.* (2010). Elle calcule, pour les exigences d'une espèce donnée - incluant la qualité de l'habitat et l'espace vital - le niveau de connectivité de différentes portions de cours d'eau.

Les travaux récents de O'HANLEY (2013) prennent en compte cette approche pour proposer une méthode de priorisation de projets de restauration de la continuité vis-à-vis d'espèces migratrices holobiotiques, incluant la prise en compte d'obstacles artificiels mais aussi naturels. Cette démarche qui apparaît actuellement comme la plus aboutie, et la mieux adaptée à la problématique des réseaux hydrographiques français, comme au contexte plus particulier du programme INTERREG ESPACE, a été retenue dans le travail présenté ici.

1) Principe général

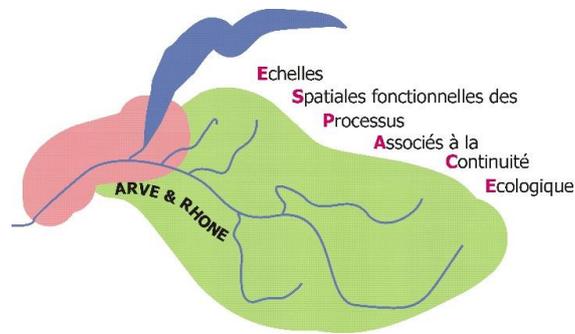
Les données nécessaires au fonctionnement du modèle sont schématiquement de trois ordres. Dans le cadre de la retranscription des travaux de O'HANLEY (2013), ces données ont été structurées autour de trois tables de données distinctes:

- Les données relatives aux caractéristiques des tronçons de cours d'eau composant le bassin versant. Au-delà des caractéristiques géométriques de ceux-ci (longueur, largeur notamment) le principal élément structurant est la disponibilité en habitats pour l'espèce cible, et pour chaque tronçon défini.
- Les données relatives aux obstacles, naturels ou artificiels. L'information structurante pour la prise en compte des obstacles est le niveau de franchissabilité à la montaison, comme à la dévalaison.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Ces deux catégories de données correspondent aux informations biologiques. La troisième correspond aux projections :

- Les données relatives aux projets de restauration. Les projets sont affectés à un obstacle déterminé et sont définis par un coût et des espérances de gain sur le niveau de franchissabilité à la montaison et à la dévalaison. Plusieurs projets – plus ou moins ambitieux et donc plus ou moins coûteux – peuvent être pris en compte pour un même obstacle.

La **Figure 116** présente schématiquement l'articulation des données et leur prise en compte dans le modèle.

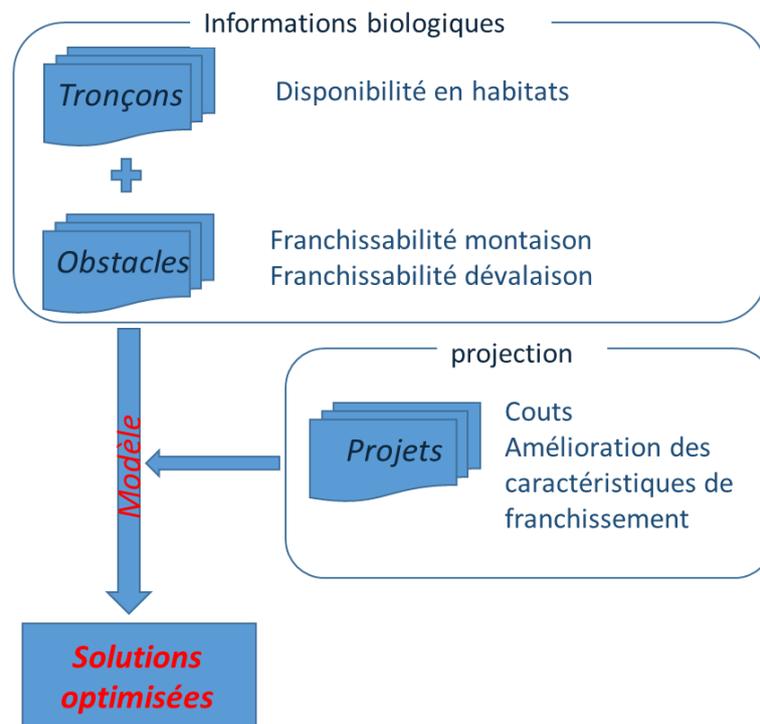


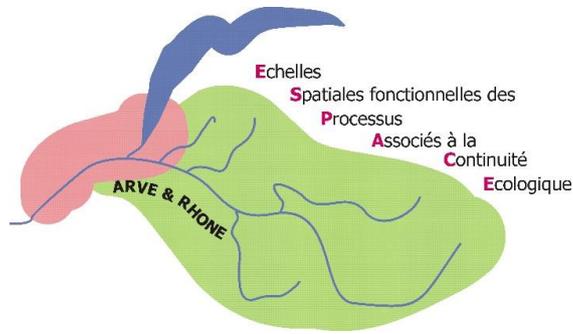
Figure 116 : Structure schématique des données et de leur utilisation par le modèle.

L'articulation des ces trois tables de données permet l'alimentation du modèle mathématique et donc l'obtention d'une solution optimisée, c'est-à-dire présentant le meilleur gain de connectivité piscicole pour un budget de restauration donné.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



2) Calcul des indices de connectivité

*Note préalable : Le présent paragraphe reprend les principaux éléments explicatifs de la publication de O'HANLEY (2013). Pour disposer de l'ensemble des éléments, se reporter à la publication originale. Pour les notations, se reporter au **Tableau 39** ci-après.*

Le bassin versant est représenté informatiquement sous forme d'un arbre dichotomique :

- Les cours d'eau sont composés d'une succession de tronçons simples, représentant chacun une portion non ramifiée de cours d'eau dont les caractéristiques ont été moyennées. Chaque tronçon a une taille propre. La finesse du découpage dépend avant tout de la variabilité des caractéristiques morphologiques du cours d'eau et du niveau de détail retenu pour la modélisation.
- Les obstacles naturels et artificiels ponctuent ce bassin versant.

A noter qu'un obstacle ou une confluence marque nécessairement la limite d'un tronçon. La représentation schématique d'un bassin versant virtuel est présentée ci-dessous (**Figure 117**).

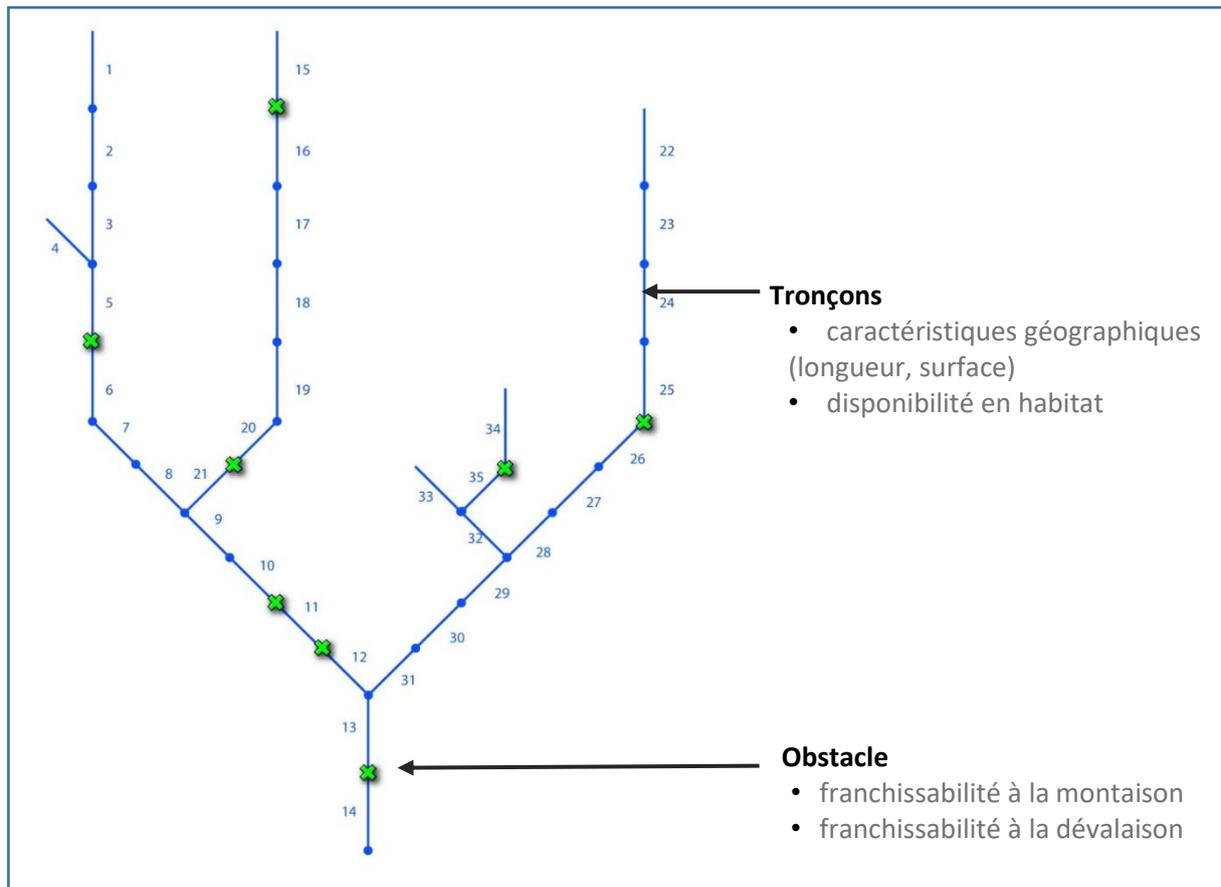
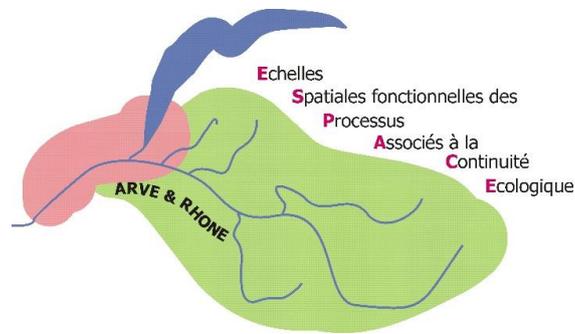


Figure 117 : Représentation schématique d'un bassin versant virtuel composé de 31 tronçons et de 8 obstacles ainsi que les informations associées à chaque type d'entité.

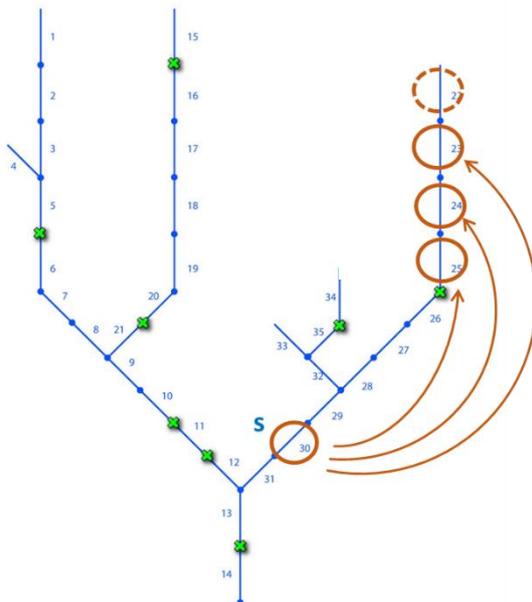


h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



La métrique centrale calculée est la **métrique de connectivité** de chaque tronçon Y_{rsh} . Pour un tronçon donné, elle correspond à la disponibilité en habitats accessibles depuis ce segment de cours d'eau, en prenant en compte les effets des obstacles artificiels et naturels qui sont présents sur le bassin versant.



$$y_{rsh} = \sum_{t \in N_r} \underbrace{\theta_{rth}}_{(1)} \underbrace{W_{rth} L_{rt}}_{(2)} \underbrace{D_{rst} \varphi_{rst}}_{(3)}$$

Cette métrique s'obtient en sommant pour chaque tronçon t , de l'ensemble des segments de cours d'eau du jeu de données, l'habitat disponible depuis s , soit le produit de la quantité d'habitat en t **(1)**, une pondération inverse de la distance entre s et t **(2)** et la franchissabilité bidirectionnelle entre s et t **(3)**.

Ainsi l'habitat disponible en t , depuis s augmente avec la quantité d'habitat en t mais est modulé par la distance et la présence d'obstacles.

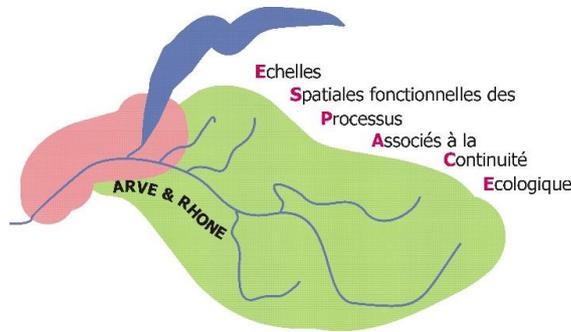
La formule présentée ici, issue de la publication originale, développe la quantité d'habitat **(1)** en trois termes : la proportion de l'habitat dans le tronçon, l'intérêt de cet habitat et la surface du tronçon. Les modalités d'évaluation de la quantité d'habitat dans le cadre de ce travail sont précisées par la suite.

Les termes **(2)** et **(3)** peuvent être interprétés comme la probabilité qu'un poisson soit capable de se déplacer de s à t puis d'en revenir. Le terme **(2)** traduit en probabilité l'espace vital de l'espèce concernée (d_0). Il combine capacité et besoins de déplacements. Le terme **(3)** peut être interprété comme la probabilité qu'un poisson soit capable de franchir avec succès l'ensemble des obstacles présents entre s et t , à la montée puis à la descente.

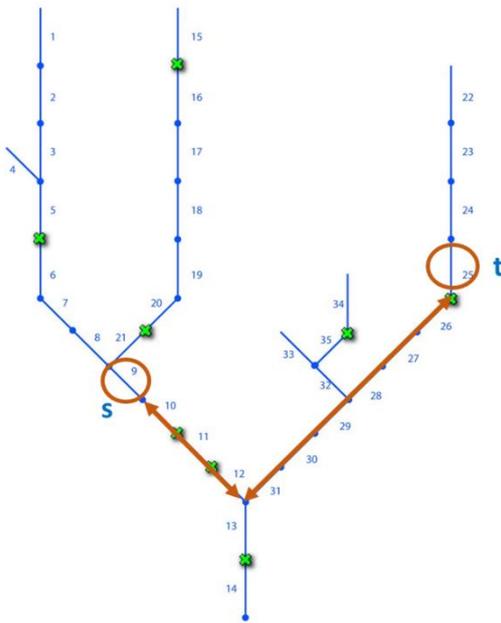


h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Ces termes sont définis comme suit :



Le terme (2) est une pondération inverse liée à la distance. Il prend en compte le rapport entre la distance entre les deux tronçons concernés et la distance de dispersion spécifique de l'espèce (d_0).

$$D_{rst} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{rst}}{d_0}\right)^2}$$

Ce terme, compris entre 0 et 1, diminue en fonction de la distance.

Le terme (3) de franchissabilité bidirectionnelle évalue la probabilité qu'un poisson se déplace entre s et t puis revienne, en multipliant la probabilité de montaison et de dévalaison de chacun des obstacles présents sur le parcours. Il prend pour hypothèse que la probabilité de franchissement de chaque barrière est indépendante de la suivante.

$$\varphi_{rst} = \underbrace{\prod_{j \in B_{rst}^*} (p_j q_j)}_{(2i)} \underbrace{\prod_{j \in B_{rst}} (p_j q_j)}_{(2ii)}$$

Ce terme est également compris entre 0 et 1.

Ainsi le calcul de connectivité de chaque tronçon est effectué en prenant en compte l'accessibilité et l'intérêt des tronçons environnants. Ces indices de connectivité unitaires sont agrégés en un **indice global de connectivité du bassin versant** qui se décompose comme suit :

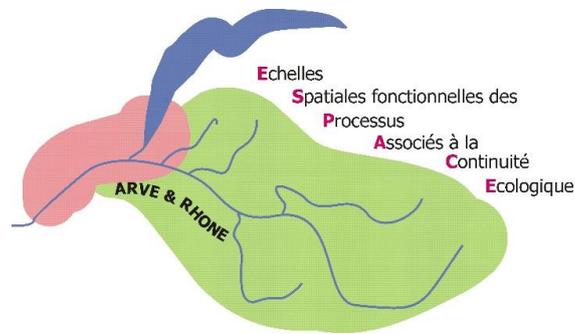
$$H_r = \sum_{s \in N^r} L_{rs} \frac{Y_{rsh}}{Y'_{rsh}}$$

Cette formule reprend l'indice de connectivité (Cmetric) de DIEBEL (2009) et est légèrement simplifiée par rapport à celle présente dans les travaux de O'HANLEY (2013) qui prévoit l'utilisation parallèle de plusieurs variables d'habitat. Pour permettre une meilleure flexibilité du modèle à la nature des données d'habitats disponibles, le présent travail n'utilise qu'une variable d'habitat qui se veut synthétique.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Pour un scénario donné, cet indice global de connectivité correspond à la somme des rapports entre la connectivité théorique et la connectivité évaluée de chaque tronçon, en calculant la connectivité théorique comme celle obtenue en l'absence d'obstacle naturel et artificiel. Cette valeur, comprise dans la gamme [0-1] pour chaque tronçon est pondérée par la surface de celui-ci.

Cette variable globale est centrale dans le calcul. Elle peut être interprétée comme une note de connectivité du bassin versant. Plus des habitats favorables à l'espèce concernée sont présents et connectés, plus cette note est élevée. Inversement, plus les habitats favorables sont rares et fragmentés, plus cette note sera basse. Si aucun obstacle n'est présent sur le bassin versant, le rapport « connectivité théorique sur connectivité réelle » sera égale à 1 pour tous les tronçons, si bien que la valeur de Hr correspondra à la surface globale du bassin versant. La valeur de Hr est donc pondérée négativement par la présence d'obstacles.

Hr peut s'interpréter comme la surface du bassin versant pondérée négativement par le niveau de fragmentation des habitats. Nous proposons de l'appeler dans la suite du document SPF pour Surface du bassin versant Pondérée par la Fragmentation des habitats.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

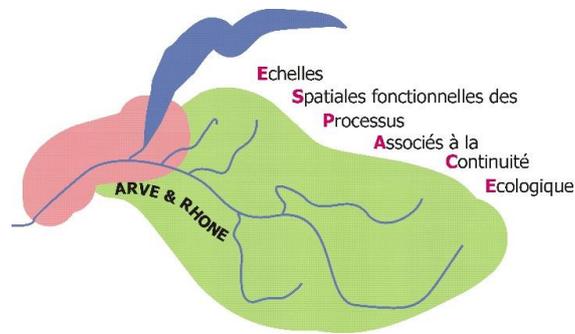


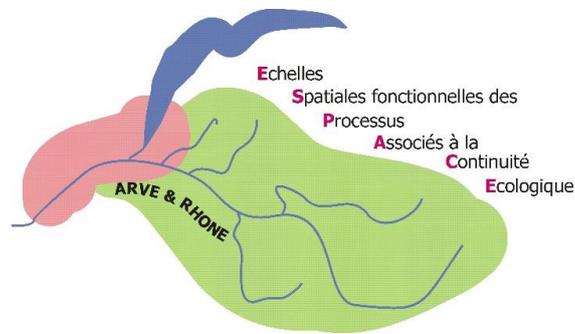
Tableau 39 : Notations utilisées dans les équations de calcul de la connectivité (d'après O'HANLEY 2013).

Variable	Définition
R	Ensemble de bassins indépendants ou sous-bassins au sein de la zone d'étude, indexé par r
N_r	Ensemble de segments de cours d'eau dans le bassin versant r , indexé par s et t
L_{rs}	Longueur (m) ou surface (m^2) du segment de rivière s , du bassin versant r
Θ_{rsh}	Proportion de l'habitat de type h dans le segment de rivière s , du bassin versant r
W_{rsh}	Intérêt, noté dans la gamme $[0, 1]$, du type d'habitat h dans le segment de rivière s , du bassin versant r
d_{rst}	Distance, mesurée en suivant le réseau hydrographique, entre les centroïdes des segments de rivières s et t , du bassin versant r
d_0	Distance de dispersion « typique » d'une espèce cible de poissons holobiotiques.
D_{rst}	Terme de pondération inverse de la distance entre les segments s et t du bassin versant r
φ_{rst}	Franchissabilité bidirectionnelle cumulative de tous les obstacles artificiels et naturels situés entre les segments de rivière s et t , du bassin versant r
B^*_{rst}	Ensemble d'obstacles naturels localisés entre les segments de cours d'eau s et t du bassin versant r , indexé par j
B_{rst}	Ensemble d'obstacles artificiels localisés entre les segments de cours d'eau s et t du bassin versant r , indexé par j
p_j	Franchissabilité à la montaison de la barrière j notée dans la gamme $[0, 1]$
q_j	Franchissabilité à la dévalaison de la barrière j notée dans la gamme $[0, 1]$
Y_{rsh}	Disponibilité de l'habitat de type h accessible depuis le segment de cours d'eau s du bassin versant r , en tenant compte des effets des obstacles artificiels et naturels présents
Y'_{rsh}	Disponibilité optimale de l'habitat de type h accessible depuis le segment de cours d'eau s du bassin versant r , en ne prenant en compte aucun effet des obstacles artificiels et naturels présents



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



3) *Algorithme de recherche de la solution : Greedy Algorithme*

La question posée est de déterminer, pour un budget donné, la combinaison de projets de restauration de la continuité piscicole qui présente le plus fort gain de connectivité. Une méthode pertinente pour répondre à cette problématique est l'utilisation d'un « Greedy algorithm » ou « Algorithme glouton » (DIEBEL *et al.* 2010, O'HANLEY *et al.* 2013). Cet algorithme permet d'obtenir une solution très proche de la solution optimale de restauration pour un budget donné, avec un temps de calcul minimal. En somme, le budget investi sera optimisé à l'échelle du bassin versant de travail par rapport au gain de continuité piscicole. Les travaux de O'HANLEY (2013) concluent que cet algorithme génère dans le cas du « Pine-Popple Watershed », une solution optimale avec une incertitude inférieure à 2%.

L'algorithme appliqué à la recherche de la combinaison de projets qui présente le meilleur gain pour un budget donné est présenté dans la

Figure 118. Le principe de cet algorithme est de retenir à chaque étape de calcul le projet qui présente le meilleur gain de connectivité par euro investi. Le premier projet retenu est ainsi le plus performant individuellement. L'évaluation des suivants prend en compte les projets déjà retenus.

L'utilisation du calcul de connectivité, cumulée à l'algorithme de recherche de solutions, permet d'obtenir pour chaque budget la combinaison de projets qui va maximiser les espaces de circulation dans le bassin versant en prenant en compte les spécificités de l'espèce cible, que ce soit en termes de capacité de déplacement, de franchissement ou d'exigence écologique.

Il est également possible, en multipliant les simulations, de réaliser une évaluation du gain de SPF³⁴ en fonction du budget et de fournir ainsi une aide à la définition d'un budget de restauration.

³⁴ Surface de bassin versant Pondéré par la Fragmentation de l'habitat.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

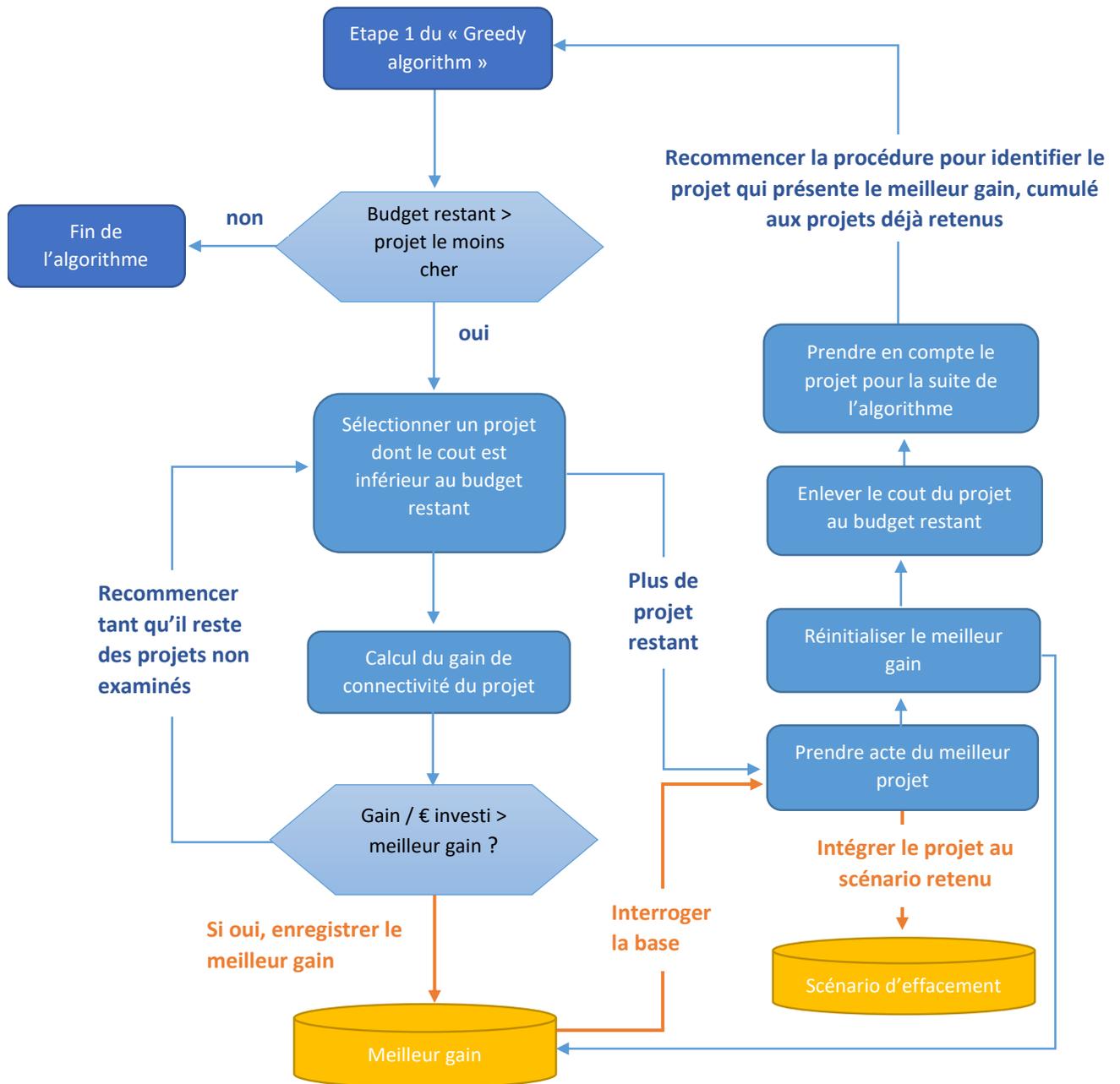
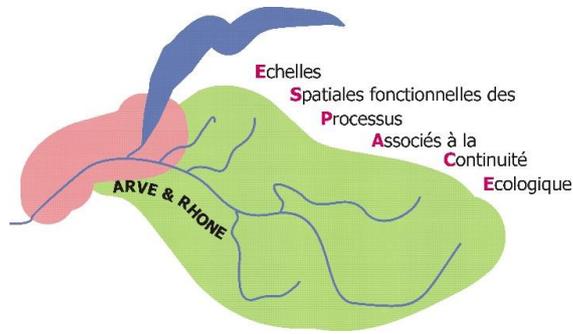


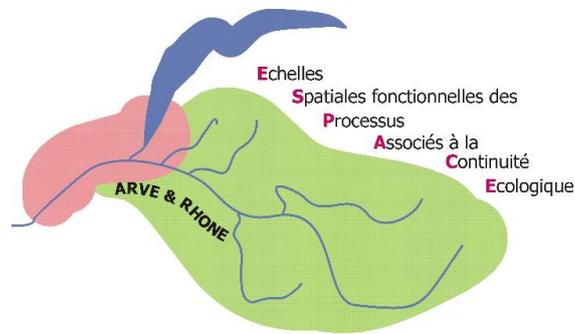
Figure 118 : Algorithme simplifié de recherche de la combinaison de projets qui obtient le meilleur gain pour un budget donné (Budget restant).

A la fin de l'algorithme, les projets retenus sont enregistrés dans la base de données « scénario d'effacement ».



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



4) *Données structurantes* :

Au-delà de quelques variables purement géométriques ou descriptives, facilement appréhendables tels que la longueur des tronçons, leur largeur moyenne ou encore l'évaluation du coût d'un projet de restauration, le modèle s'appuie sur trois catégories d'information dont il convient de connaître l'utilisation qui en est faite afin de comprendre la façon de les renseigner et les incidences sur les résultats.

A. La valeur d'habitat

Comme indiqué précédemment, la valeur d'habitat est une donnée associée à chaque tronçon de cours d'eau. Cette valeur, comprise entre 0 et 1, intervient pour pondérer le gain à connecter un tronçon de cours d'eau, en relation avec les exigences écologiques de l'espèce cible. Dans les travaux de O'HANLEY (2013) cette valeur d'habitat s'obtient en multipliant pour chaque tronçon :

- la proportion de l'habitat dans le tronçon,
- l'intérêt de cet habitat pour l'espèce cible,

avec la possibilité de prendre en compte un ou plusieurs habitats. Peu d'éléments sont fournis en revanche sur la façon d'alimenter ces données. Ce formalisme génère une certaine rigidité sur la nature des données d'habitat à acquérir qui semble peu compatible avec l'hétérogénéité des données disponibles en France, d'autant que l'impact de la qualité des données source semble complexe à évaluer pour ce cas.

Dans les travaux originels de DIEBEL (2010), l'adéquation d'un tronçon de cours d'eau, pour une espèce donnée, est pris en compte au travers d'un indice de qualité (*Quality Index*), qui remplace la notion d'habitat dans les équations. Cet indice de qualité correspond à un niveau de dégradation de l'habitat. La valeur 1 correspond à l'absence de dégradation, correspondant à la pleine prise en compte des surfaces disponibles dans le tronçon, tandis que la valeur 0 correspond à un milieu totalement inhospitalier.

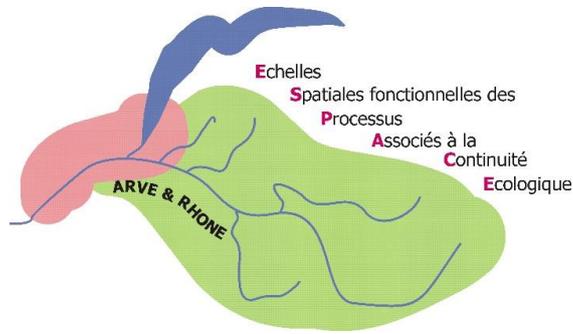
Dans les deux cas, l'enjeu est de construire un indice, variant de 0 à 1, dont le rôle est de qualifier l'adéquation du milieu avec les exigences écologiques de l'espèce ciblée. Il est en effet fondamental que le fait de connecter un tronçon qui ne convient pas à l'espèce cible n'apporte pas de gain (valeur d'habitat nul ou presque). Inversement, le gain lié à la connexion de tronçons dont la typologie, la qualité d'eau et l'habitat est adapté à l'espèce cible doit pleinement être pris en compte (valeur d'habitat proche ou égale à 1).

En résumé, la valeur d'habitat est une variable qui fluctue entre 0 à 1 dont le rôle est de qualifier l'adéquation d'un tronçon à l'espèce cible. Il a été choisi de la définir dans notre cas de la même manière que DIEBEL (2010). Ainsi par défaut un tronçon adapté à l'espèce cible présente une valeur d'habitat de 1. Les facteurs venant limiter les potentialités du milieu à être exploité par l'espèce cible vont venir dégrader cette valeur, jusqu'à la note de 0 si le tronçon n'est pas du tout adapté. Ces facteurs peuvent être naturels (biotypologie) ou d'origine anthropique (dégradation de la qualité d'eau, artificialisation du milieu, etc.). Le principal enjeu est donc de dégrader l'intérêt des tronçons non adaptés à l'espèce cible, et donc l'effort doit prioritairement porter sur l'identification de ceux-ci.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



B. La constante de dispersion de l'espèce piscicole (d_0)

La constante de dispersion spécifique intervient dans le terme de pondération inverse de la distance entre deux tronçons. Celui-ci fournit un indice inversement corrélé à la distance et quantifie l'accessibilité de deux tronçons de cours d'eau distants, en fonction des capacités de déplacement et de l'espace vital de l'espèce cible. Cette valeur est comprise entre 0 et 1 et vient moduler la probabilité qu'un poisson se déplace entre deux points d'un bassin versant.

L'ajustement de cette valeur de pondération inverse se fait à l'aide de la variable d_0 appelée : constante de dispersion de l'espèce. C'est cette valeur qu'il convient de fixer dans le cadre d'une simulation.

Dans ses travaux de 2010, DIEBEL préconise que d_0 doit être retenue de façon à ce que la fonction de pondération de la distance (**Figure 119**) ressemble à la fréquence de distribution des déplacements saisonniers de l'espèce sur un bassin non fragmenté. Le calcul du terme de pondération entre deux tronçons dont les centroïdes sont distants d'une valeur correspondant à d_0 fournit une valeur de $0.5 d_0$ s'apparente donc à la valeur médiane des espaces vitaux. Du point de vue des effets sur les résultats, plus la valeur de d_0 est élevée, plus les projets visant à reconstituer de longs linéaires non fragmentés seront valorisés. Un exemple de détermination de d_0 pour la truite fario est fourni dans l'exemple du Borne (Cf. § V).

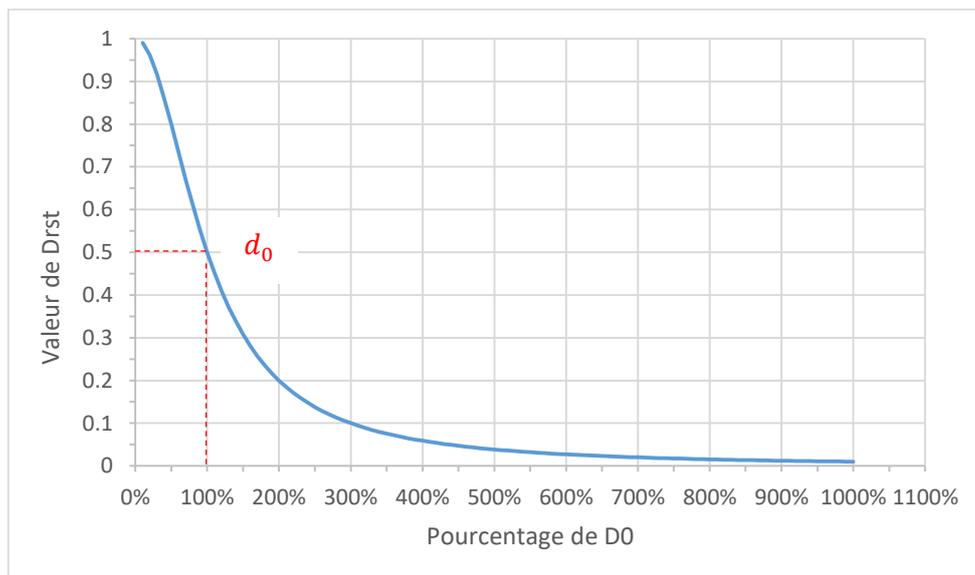
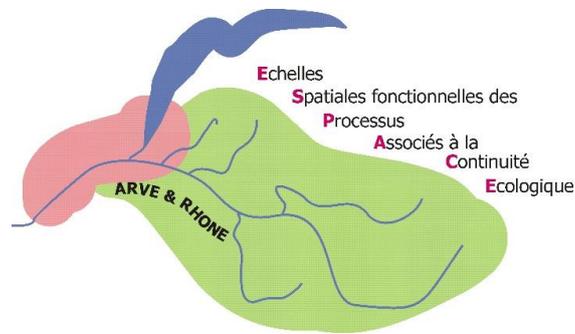


Figure 119 : Evolution du terme de pondération inverse de la distance en fonction de d_0 .



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



C. La probabilité de montaison et de dévalaison d'un obstacle

La franchissabilité de chaque barrière, à la montaison comme à la dévalaison, est quantifiée dans le cadre de ce modèle par la probabilité qu'un poisson migrant parvienne à franchir l'obstacle. Par conséquent, tout facteur venant limiter la franchissabilité d'un obstacle, que ce soit dans un sens ou dans l'autre va venir abaisser cette probabilité.

Cette convention est utilisée pour quantifier le niveau de franchissabilité d'un obstacle existant comme pour évaluer le niveau de franchissabilité d'un projet de restauration.

Dans le cadre d'un obstacle existant, les outils d'évaluation de la franchissabilité sont généralement abordés sous formes de classes, au nombre de 3 à 5 (BAUDOIN *et al.* 2014). Pour les obstacles artificiels, le ROE³⁵ fait actuellement figure en France de la plus vaste base de données homogènes de recensement d'ouvrages. L'évaluation de la franchissabilité est faite par l'application de 5 classes variant de totalement franchissable (0) à totalement infranchissable (5) (LEONARD *et al.* 2010). Une proposition de conversion de ces classes en probabilités est présentée dans l'exemple du Borne, ci-après. Plus récemment, la méthodologie ICE, d'évaluation du franchissement d'obstacles par les poissons (BAUDOIN *et al.* 2014) propose une grille en quatre classes, variant de 0 à 1 (0 - 0.33 - 0.66 - 1). Ce formalisme est plus proche de ce qui est recherché ici, même si les auteurs précisent que cet indice ne doit pas être considéré comme un taux de franchissement mais comme un degré de dégradation et de besoins d'interventions opérationnelles. *In fine*, cette approche n'est pas incompatible avec les objectifs poursuivis par le modèle et l'utilisation non modifiée des classes ICE pourrait être essayée.

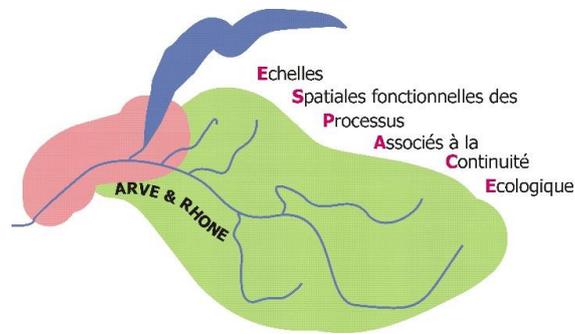
Pour les obstacles naturels, l'exercice est similaire mais la donnée est moins disponible puisqu'ils sont rarement recensés. Cette donnée est pourtant fondamentale dans l'exercice de priorisation de projets de restauration de la continuité piscicole, quelle que soit la méthode retenue. En Haute-Savoie, la situation est optimale car même si elle n'est pas exhaustive, la démarche de recensement des obstacles naturels a été menée parallèlement à celle des obstacles artificiels, et selon les mêmes modalités. En l'absence de ces données, des relevés complémentaires doivent nécessairement avoir lieu. Une problématique spécifique aux obstacles naturels se rencontre sur les tronçons de cours d'eau relativement pentus et présentant de nombreuses difficultés plus ou moins aigües de franchissement. En complément de la nécessité de dégrader l'habitat de ces tronçons, - ils sont peu favorables au développement harmonieux des populations de poissons - le niveau de dégradation des possibilités de franchissement peut être abordé en plaçant un ou plusieurs obstacles « virtuels » régulièrement répartis sur le tronçon et agrégeant le niveau de dégradation des possibilités de franchissement de l'ensemble du linéaire. Le modélisateur doit ainsi garder en tête que l'enjeu principal est que les projets visant à connecter des tronçons peu favorables n'aient pas un poids trop important dans la simulation.

³⁵ Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (CF. LEONARD *et al.* 2010)



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Dans le cadre de l'alimentation de la table de projets, il convient de rester prudent sur les performances des solutions de restauration de la franchissabilité. Il est notamment constaté dans de nombreux cas qu'une passe à poissons même correctement dimensionnée ne permet pas une restauration complète de la continuité piscicole. Il est donc nécessaire de rester critique lors du renseignement de la probabilité de franchissement à la montée d'un tel projet. D'une manière générale, la méthodologie ou les critères qui ont prévalu à fixer les probabilités de franchissement des ouvrages existants doivent être homogènes avec ceux qui ont conduit à fixer les probabilités de franchissement projetées des scénarios de restauration.

A noter que les probabilités de franchissement sont prises en compte à la montée comme à la descente mais étant donné que le modèle simule des déplacements bidirectionnels sur les obstacles, un obstacle totalement infranchissable dans un des deux sens aura le même effet qu'un obstacle totalement infranchissable. De la même manière le gain d'un projet de restauration de la dévalaison sur un barrage infranchissable à la montaison - ou inversement - n'est pas pris en compte, même si des bénéfices indéniables peuvent en découler. C'est une limite du concept adopté par le modèle de déplacement bidirectionnel des espèces holobiotiques.

D. Prise en compte de l'espèce cible

Plusieurs paramètres, déjà abordés précédemment permettent d'adapter les données d'entrée du modèle à une espèce cible. Ce paragraphe n'apporte pas d'éléments qui n'aient déjà été abordés précédemment mais il en résume les points clés :

- La distance de dispersion de l'espèce est la plus évidente. Elle adapte les besoins en espaces vitaux à la mobilité de l'espèce.
- La valeur d'habitat est sans doute le paramètre le plus important pour la prise en compte de l'espèce cible. L'adéquation de la biotypologie des tronçons du bassin versant modélisé à l'espèce piscicole doit être vérifiée, avant de s'intéresser aux éventuels paramètres de dégradation de l'habitat. Dans le cadre d'une problématique salmonicole, l'utilisation de paramètres thermiques seuls, tels que fournis par l'application MACMA (DUMOUTIER *et al.*, 2010) suffit à identifier et à quantifier l'adéquation du régime thermique.

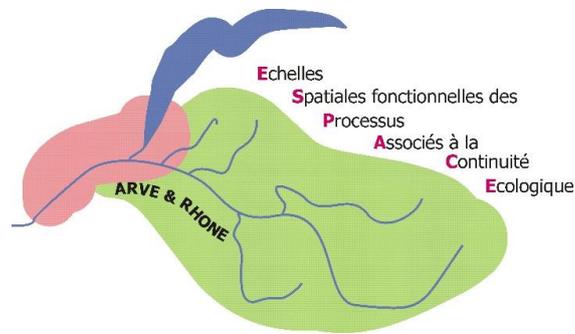
Dans tout autre cadre, sauf si l'ensemble du secteur modélisé est homogène en termes de conditions pour l'espèce cible, le recours à des calculs de biotypologie (VERNAUX 1977), ou à l'utilisation des probabilités de présence par espèce de l'outil IPR (NF T90-344, 2006) apparaît nécessaire.

Une fois la biotypologie vérifiée, la définition des paramètres de dégradation doit également être focalisée sur la biologie de l'espèce cible. En effet, les besoins et les capacités de résistance à certaines contraintes du milieu sont propres à chaque espèce. Aussi l'utilisation d'indices généralistes sur la qualité globale du milieu ne serait pas adaptée. Ainsi, pour l'espèce cible considérée, une recherche bibliographique des seuils de tolérance pour chaque paramètre de dégradation intégré au calcul de la valeur d'habitat est nécessaire.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- Les probabilités de franchissement des ouvrages doivent évidemment être également adaptées aux capacités de l'espèce faisant l'objet de la modélisation. Les classes ICE, par exemples, sont calculées pour une espèce donnée. Tous les éléments concernant les capacités de franchissement des principales espèces présentes en France sont fournis dans la synthèse bibliographique du document (BAUDOIN *et al.* 2014).

Ainsi il convient de noter que la modification de l'espèce cible d'un modèle existant nécessite l'adaptation de la plupart des données d'entrée.

5) Stratégie d'utilisation

L'utilisation opérationnelle d'un modèle est une démarche délicate qui doit se faire dans une démarche critique. De plus, pour que le résultat obtenu puisse obtenir l'adhésion des gestionnaires, celui-ci doit être crédible et compréhensible. Cela n'est possible que s'il est alimenté dans le cadre d'une concertation, permettant la bonne prise en compte des enjeux locaux et des possibilités.

Le présent paragraphe tente de décrire le comportement que le modélisateur doit adopter pour :

- Définir le niveau de précision des données sources,
- Interpréter correctement le résultat,
- Tester leur robustesse.

A. Niveau de précision des données sources

Comme pour tout modèle, la précision du résultat obtenu est étroitement liée à la précision des données qui l'alimentent.

Ce constat ne doit pas pour autant conduire à maximiser, par précaution, l'effort de collecte de données qui peut s'avérer conséquent et contreproductif lorsque l'on s'intéresse à de vastes secteurs géographiques. La précision des données doit rester proportionnelle à l'échelle de travail. Si elle est vaste, le travail consiste à identifier les grands enjeux, pertinents à l'échelle du bassin versant, sans faire trop de cas des petites variations locales.

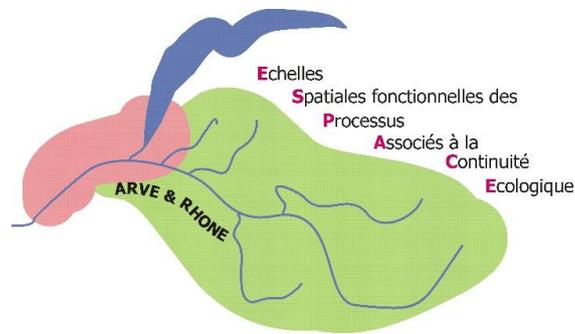
Le second élément qui rejoint partiellement le premier, est que l'alimentation du modèle doit se faire à partir de données homogènes, que ce soit en termes de niveau de complétude, comme de celui des méthodes qui ont conduit à leur établissement. Ainsi, agglomérer des données de sources diverses doit dans la mesure du possible être évité ou tout du moins se faire avec une grande prudence faute d'être capable ensuite de défendre le résultat.

Vouloir intégrer des données trop fines parce qu'elles sont disponibles localement - issues de modélisations d'habitats par exemple - c'est prendre le risque de créer un jeu de données hétérogènes qui fournisse des résultats peu compréhensibles et au final difficiles à interpréter.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Inversement, l'utilisation du modèle sur une aire géographique réduite, et sur laquelle de nombreuses données sont disponibles, rend pertinent l'intégration de données très fines tels que des analyses ICE sur des seuils non aménagés, des données de dynamisme de populations de poissons sur les tronçons de cours d'eau ou encore de cartographies d'habitats.

La stratégie optimale d'utilisation du modèle est sans doute une démarche hybride, séquentielle, visant à affiner les données source, localement, en fonction des résultats obtenus à large échelle. Elle se base sur des simulations multiples qui vont permettre dans un premier temps, d'identifier les secteurs qui présentent le plus d'enjeux, et sur lesquels agit prioritairement le modèle, et de préciser les données de façon ciblée. Cela signifie par exemple, expertiser localement les valeurs d'habitats initialement retenues (via des méthodes d'analyse complète telles que l'IAM (TELEOS, 2004) par exemple), effectuer des évaluations affinées du coût des projets centraux, vérifier que les hypothèses de probabilité de franchissement sont justes. Cela induit un travail complémentaire - qui peut comprendre des visites de terrain - limitées aux secteurs et ouvrages pertinents.

B. Analyse des résultats

Tous les éléments qui ont conduit à la sélection d'une combinaison de projets doivent être vérifiés, et affinés s'il s'avère que certaines estimations de départ s'avèrent trop approximatives. Cela concerne en particulier les valeurs d'habitat des tronçons périphériques aux ouvrages concernés par les projets, le coût et les performances des projets, les probabilités initiales de franchissement et de dévalaison de ces obstacles.

Les biais suivants vont par exemple augmenter artificiellement l'intérêt de sélectionner un obstacle :

- Une surestimation de la valeur d'habitat des tronçons périphériques,
- Une surestimation des performances d'un projet,
- Une sous-estimation de son coût.

De la même façon, si certains projets attendus ne sont pas sélectionnés, les causes doivent être recherchées, et analysées de la même façon.

L'objectif du modèle est d'apporter un angle de réflexion globale à une échelle que l'expertise peine à envisager. Les scénarii proposés, s'ils sont complexes à identifier au point de nécessiter le déploiement d'un modèle doivent en revanche être compréhensibles puisqu'ils s'inscrivent dans un cadre relativement simple : favoriser la connexion entre les habitats.

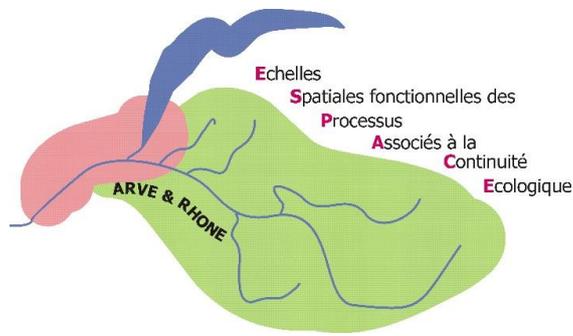
Dans tous les cas, le résultat du modèle doit être mis en parallèle avec les travaux similaires disponibles sur le secteur d'étude, y compris les simples expertises dont l'emprise géographique est limitée. De façon schématique :

- soit le résultat obtenu confirme tout ou partie des expertises parallèles et cette convergence le renforce,



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- soit il diverge auquel cas il est important d'en analyser les causes. Celles-ci peuvent être liées à la différence d'échelle d'analyse, et c'est la force du modèle que de proposer un résultat alternatif, ou à des approches conceptuelles différentes auquel cas les analyses se complètent.

Il est important de noter que la vocation du modèle n'est pas d'être utilisée en tant que contre-expertise d'une démarche menée en parallèle ou sur des aires géographiques chevauchantes. Celui-ci ne prend, par exemple, en compte qu'un aspect de la restauration de la continuité écologique : maximiser des linéaires contigus et circulants de cours d'eau dont l'habitat est favorable. Les problématiques de sauvegarde de souches génétiquement préservées, de dissémination au départ de réservoirs biologiques, de contrôle d'espèces envahissantes ou encore les aspects sociologiques et réglementaires ne sont pas pris en compte. De même, la composante sédimentaire n'est pas du tout intégrée dans la démarche du modèle.

Il fournit en revanche une analyse inédite à large échelle, qui doit s'agréger aux résultats déjà acquis localement.

C. Test de robustesse

Les essais effectués, sur un bassin versant virtuel, ont mis en évidence que le premier facteur influençant les résultats est la géométrie du bassin versant. En effet, ce modèle est conçu pour favoriser la libre circulation piscicole via les tronçons du réseau, il est donc logique que le lien entre tronçons soit la base de son fonctionnement. Les tronçons centraux d'un secteur fortement ramifié, sont géométriquement des secteurs clés pour le déplacement des poissons. En absence de pondération contraire, liée à l'adéquation de l'habitat de ces tronçons, ces secteurs sont ceux qui contribuent le plus au calcul de connectivité.

L'exemple simplifié présenté dans la **Figure 120** illustre ce mécanisme. Pour les deux exemples, la connectivité théorique (sans aucun obstacle) met en évidence la plus grande contribution des tronçons centraux. Ce sont ceux qui ont le plus grand nombre de connexions avec des tronçons périphériques proches (au regard la distance de dispersion spécifique appliquée, ici 10).

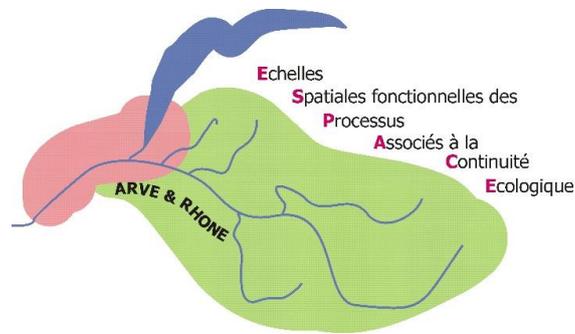
En (a) un obstacle partiellement infranchissable est placé en périphérie du bassin versant. Il isole un court tronçon dont la longueur (4) est bien inférieure à l'espace vital de l'espèce prise en compte. Il en résulte un recentrage des tronçons à forte contribution sur le bassin versant, et une très nette dégradation de la note de connectivité des tronçons isolés. La note globale, calculée comme la somme du rapport entre la connectivité théorique et la connectivité avec l'obstacle, est modérément dégradée. La principale dégradation concerne le tronçon de cours d'eau partiellement isolé.

En (b), l'obstacle est placé au centre du bassin versant, dans le secteur de plus forte contribution à la note de connectivité théorique. L'effet se fait ressentir sur la note de connectivité de l'ensemble des tronçons, qui sont distants au maximum d'une valeur proche de la constante de dispersion de l'espèce. Concrètement les poissons présents sur l'ensemble



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



du bassin versant voient leur espace vital nettement diminué, même si celui-ci reste relativement important. L'effet sur la note globale concerne également l'ensemble des tronçons, même si les tronçons les plus proches de l'obstacle sont les plus impactés.

A noter que dans un scénario réel, la plus grande contribution des cours principaux est également renforcée par la plus grande taille de ces milieux. Géométrie du bassin versant et largeur de cours d'eau sont donc des paramètres clés dans l'évaluation. Parmi les données d'alimentation du modèle ce sont également les plus robustes car ces données sont objectives.

Sur cette base, les valeurs d'habitat des tronçons vont venir moduler plus ou moins fortement cette géométrie. La **Figure 121** illustre l'effet de l'application d'une valeur d'habitat calculée sur la base des variables thermiques, de qualité d'eau, et hydromorphologiques, sur le bassin versant du Borne, sans prise en compte à ce stade des obstacles. L'effet constaté est un resserrement des tronçons à forte contribution sur le secteur central qui présente la plus forte habitabilité. En dernier ressort, les données de franchissabilité des obstacles vont fragmenter cette mosaïque. Données d'habitat et données de franchissabilité sont finalement les données les plus sensibles puisque les plus subjectives. Dans le cadre d'un travail de sélection opérationnelle de travaux prioritaires (non effectués à ce jour), l'obtention d'un scénario robuste passe sans doute par le test de différentes modalités d'évaluation de ces deux paramètres afin d'évaluer la variabilité des résultats issue de l'incertitude sur les hypothèses.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

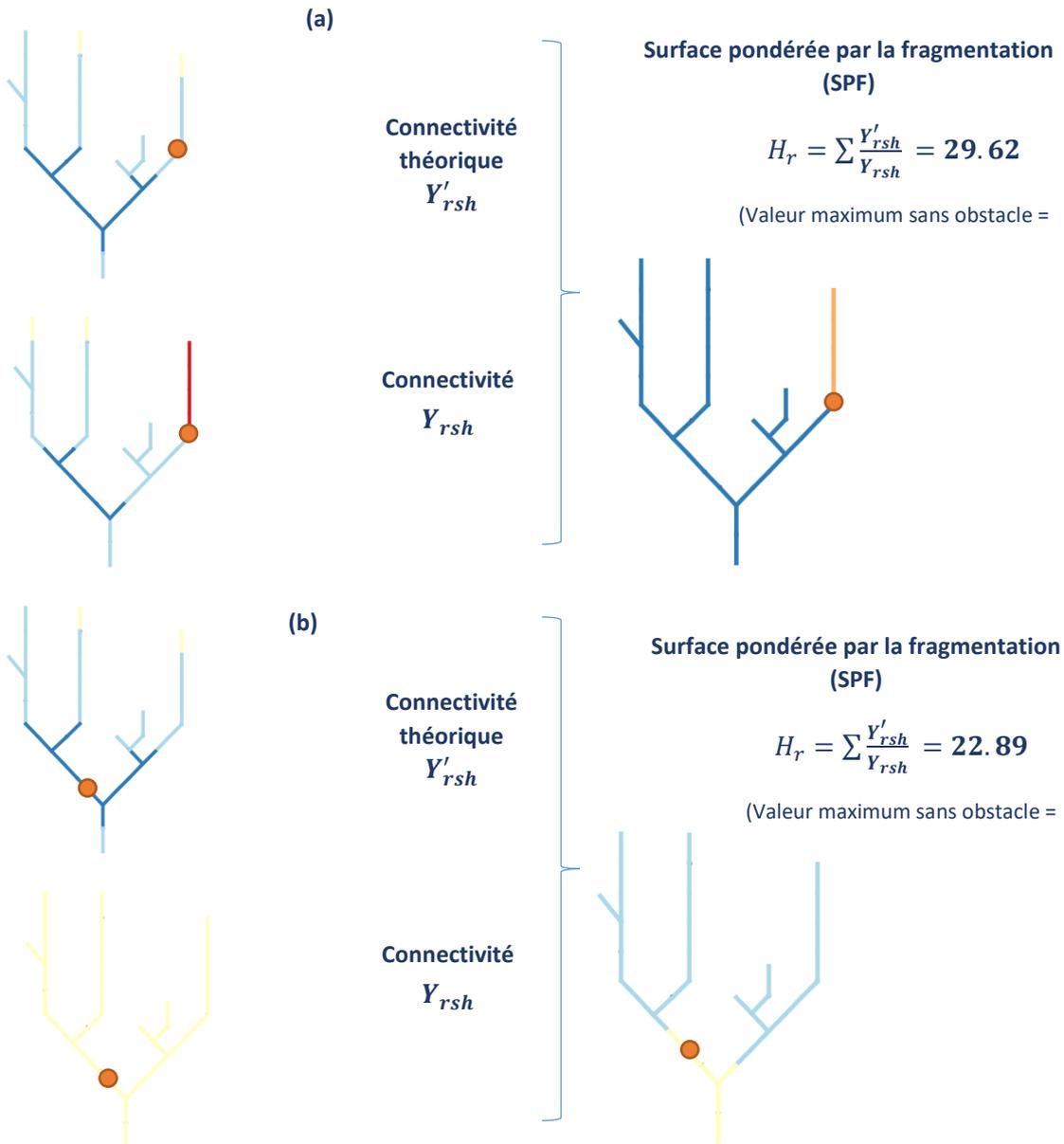
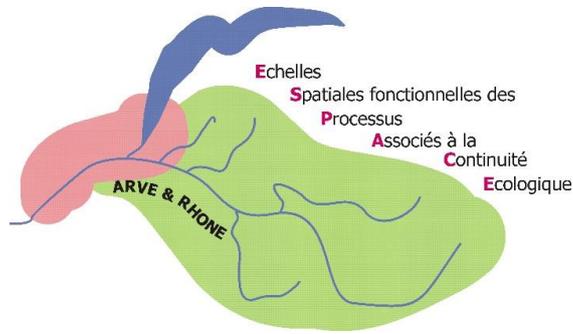
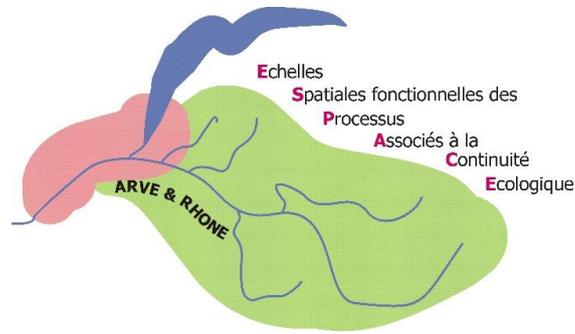


Figure 120: Effet de la position d'un obstacle sur un bassin virtuel simple et homogène. Le bassin versant virtuel est constitué de 35 tronçons. Chaque tronçon se voit attribuer une valeur d'habitat de 0.5, une longueur de 1 et une largeur identique. La constante de dispersion d_0 est de 10 et la distance maximum entre les tronçons les plus éloignés est de 21. L'obstacle positionné est caractérisé par des probabilités de montaison et de dévalaison de 0.25. Les couleurs sont issues d'une analyse thématique sur les valeurs concernées. Les valeurs fortes sont en couleurs froides et les valeurs faibles en couleurs chaudes. (a) incidence d'un obstacle périphérique ; (b) incidence d'un obstacle central.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



(a) avant prise en compte de la valeur d'habitat



(b) après prise en compte de la valeur d'habitat

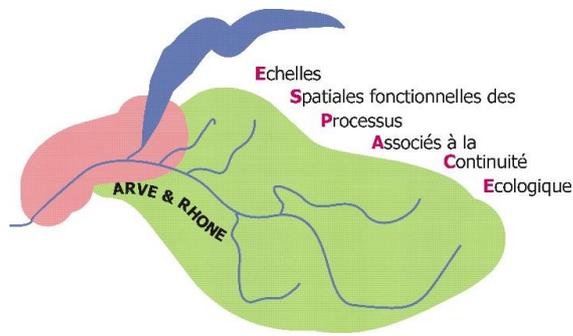


Figure 121 : Effet de l'intégration de la valeur d'habitat sur une modélisation du Borne (74).
La valeur d'habitat testée ici agrège des données de qualité d'eau, de qualité hydrobiologique, des paramètres thermiques et le niveau d'artificialisation du cours d'eau. Le code couleur correspond à une analyse thématique sur le paramètre Y'_{rsh} , sans prise en compte des obstacles naturels et artificiels. Les couleurs froides (bleu) sont les tronçons à plus forte contribution au calcul.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



IV. Présentation et fonctionnement de l'outil informatique

L'outil informatique se présente sous la forme d'une macro associée à un classeur sous le logiciel Excel®. Ce formalisme, déjà expérimenté par DUMOUTIER (2010) pour développer un outil de calcul de variable thermique (MACMA) a été retenu pour des raisons de rapidité de développement et d'ergonomie vis-à-vis des utilisateurs. En effet, s'appuyer sur un logiciel complet de gestion de données permet de disposer immédiatement d'une interface pour alimenter le modèle et pour proposer des exports. Le logiciel Excel® en particulier est largement répandu parmi les utilisateurs potentiels et comprend un outil de développement simple et complet fonctionnant en langage VBA (Visual Basic for Application).

La contrepartie de ce choix est que l'exécution de cet outil nécessite de disposer du logiciel Excel® et que le langage VBA, à des performances limitées en terme de vitesse de calcul.

1) Articulation du classeur Excel®

L'outil se présente sous forme d'un classeur Excel® associé à une macro (extension « .xlm »). A l'ouverture, le classeur est composé de trois onglets pour les données d'alimentation du modèle : « Tronçons », « Obstacles » et « Projets », et de quatre onglets suggérés pour les exportations (**Figure 122**).

- Pour les données d'alimentation (en jaune), chaque onglet comprend un tableau vierge à alimenter avec les données nécessaires à la modélisation. La structure des données permet l'utilisation des tables sous SIG.
- Les onglets d'export de résultats sont des onglets suggérés, vides.

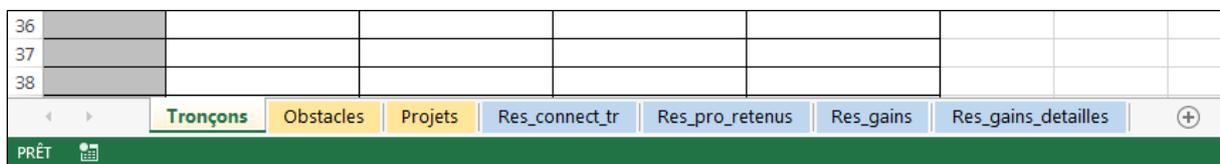


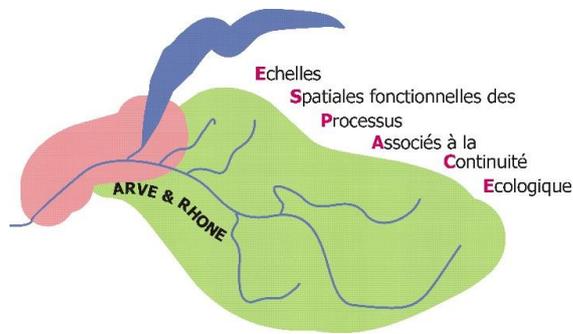
Figure 122 : Capture d'écran des intitulés des feuilles du classeur de l'outil informatique.

A noter que le programme de modélisation permet le libre choix des onglets « sources » et « d'exportation des résultats ». Le nom de ceux-ci et leur ordre dans le classeur n'est donc pas important. En particulier, un utilisateur expérimenté peut dupliquer certains onglets pour tester des variantes différentes. Il est toutefois conseillé de conserver ce formalisme et d'utiliser un fichier différent pour chaque modélisation afin de limiter les risques d'erreur.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



A. Table tronçons

La table « Tronçon » est destinée à recevoir toutes les informations caractérisant les unités de cours d'eau composant le réseau hydrographique. Cette table peut être créée et alimentée sous SIG puis exportée sous Excel ou dans le cas de réseaux simples être directement renseignée dans le modèle.

Concernant le formalisme, les cinq premières colonnes de la feuille type (colonnes A à E) doivent être conservées dans cet ordre. Si l'utilisateur souhaite ajouter dans la table des données complémentaires, elles peuvent l'être sur la droite (Colonnes >= F).

	A	B	C	D	E
1	ID_TR	longueur_troncon	Largeur_troncon	valeur_habitat	ID_TRav
2	67	112.952	2	1	68
3	82	467.751	0.5	0.25	83
4	91	1657.652	0.5	1	72
5	98	999.272	3	1	31
6	92	531.01	0.5	1	93
7	60	282.201	5	0.75	62

Figure 123 : Capture d'écran des intitulés des colonnes et des premières données renseignées dans un exemple d'utilisation de la table « Tronçons » du classeur de l'outil informatique.

Deux identifiants doivent être renseignés : un identifiant unique, permettant notamment de faire le lien avec la base de données SIG, et l'identifiant du tronçon aval, permettant au modèle de replacer les tronçons dans l'espace (Figure 123 et Tableau 40).

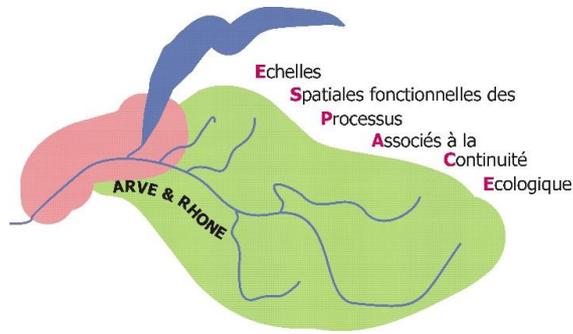
Tableau 40 : Descriptif du contenu et du format des données nécessaires à l'alimentation de la table des tronçons.

	Nom du champ	Description	Format	Indication
Table "Tronçons"	ID_TR	code d'identification du tronçon	libre	code unique dans la base de données des tronçons
	longueur_tronçon	longueur du tronçon	numérique avec décimale	unité libre mais identique à d0 et largeur_tronçon
	largeur_tronçon	largeur moyenne du lit mouillé du cours d'eau	numérique avec décimale	unité libre mais identique à d0 et longueur_tronçon
	valeur_habitat	valeur de l'habitat pour l'espèce concernée	numérique avec décimale	valeur dans la gamme [0-1]
	ID_TRav	code d'identification du tronçon présent à l'aval immédiat	identique à ID_TR	code existant dans le champ ID_TR; «0 » pour le tronçon le plus aval du bassin versant



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Pour faciliter l'alimentation des champs ID_TR et ID_TRAV, il est conseillé de numéroté le premier d'amont vers l'aval, par affluent. Le second peut ainsi être obtenu en incrémentant le code d'identification (**Figure 124**). Seul le tronçon le plus aval de chaque cours d'eau doit être renseigné manuellement avec l'identifiant du premier tronçon en aval de la confluence.

A noter que le tronçon le plus aval du bassin versant doit être identifié en renseignant la valeur « 0 » dans le champ ID_TRAV.

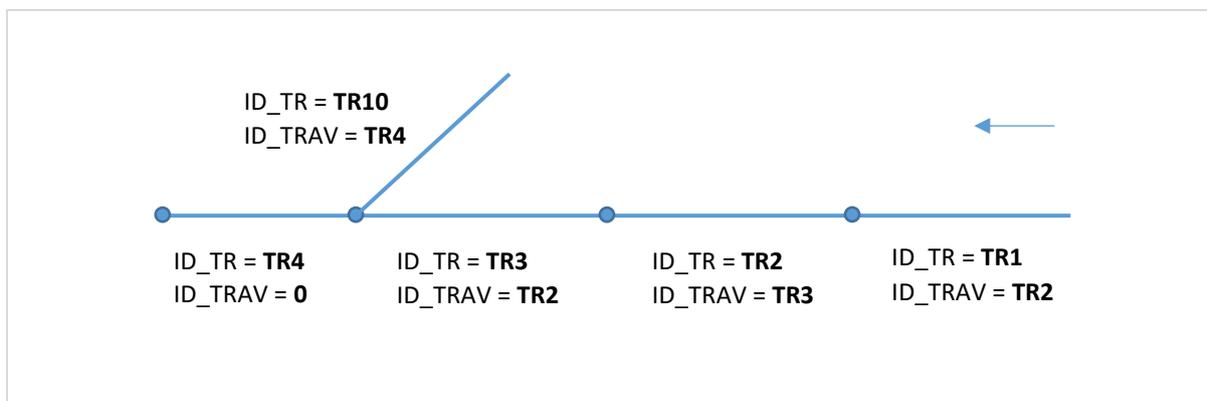


Figure 124 : Exemple de d'identification correcte des tronçons sur un bassin versant virtuel simple.

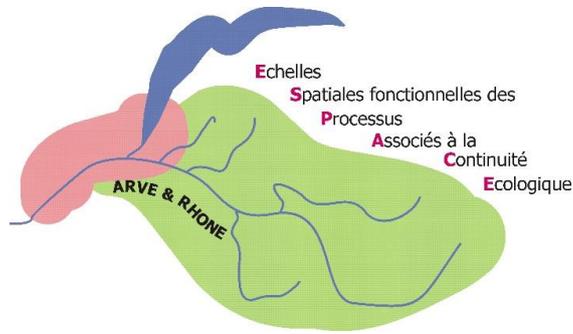
La valeur d'habitat est une valeur numérique décimale qui vient pondérer l'intérêt des tronçons pour l'espèce ciblée. Pour plus d'information sur les enjeux liés à cette variable se reporter à la partie précédente (§III).

La longueur des tronçons peut être extraite automatiquement d'une base de données géographique sous SIG. La largeur ne peut qu'être issue d'un recueil de données voir extrapolée à partir de visites de sites en des points clés.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



B. Table obstacles

La table « Obstacles » est destinée à recevoir toutes les informations caractérisant les obstacles aux déplacements des poissons, naturels et artificiels, sur le réseau hydrographique. Comme pour la table précédente, cette table peut être créée et alimentée sous SIG puis exportée sous Excel® ou dans le cas de réseaux simples être directement renseignée dans le modèle.

Concernant le formalisme, les cinq premières colonnes de la feuille type (colonnes A à E) doivent être conservées dans cet ordre. Si l'utilisateur souhaite ajouter dans la table des données complémentaires, elles peuvent l'être sur la droite (Colonnes >= F, **Figure 125**).

	A	B	C	D	E	F	G
1	ID_OB	Naturel	ID_Tram	P_montaison	P_devalaison	Classe Onema mont	Classe Onema dev
2	74_1657	0	56	0	1	5	0
3	74_1656	0	60	0.3	1	3	0
4	74_1655	0	62	0	1	5	0
5	74_1720	0	82	0	1	5	0
6	74_1665	0	84	0	1	5	0
7	74_1664	0	89	0.3	1	3	0

Figure 125 : Capture d'écran des intitulés des colonnes et des premières données renseignées dans un exemple d'utilisation de la table « Obstacles » du classeur de l'outil informatique. Dans l'exemple donné, deux colonnes, correspondant aux notes de franchissement ONEMA, ont été conservées même si elles ne sont pas utilisées par le modèle.

Le descriptif des formats des champs de la table obstacle est détaillé dans le **Tableau 41**.

L'identifiant de l'obstacle (ID_OB) est de format libre. Il doit être unique et il peut être utilisé pour les échanges de données avec le SIG.

L'identifiant du tronçon amont (ID_TRAM) permet de positionner l'obstacle sur le tronçon hydrographique (**Figure 126**). A noter qu'un obstacle marquant la limite amont du réseau hydrographique ne peut figurer dans cette base de données qui ne supporte pas les références « vides ». Un tel obstacle, qui n'isole aucun habitat pertinent n'a de toute façon aucun intérêt dans la démarche.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

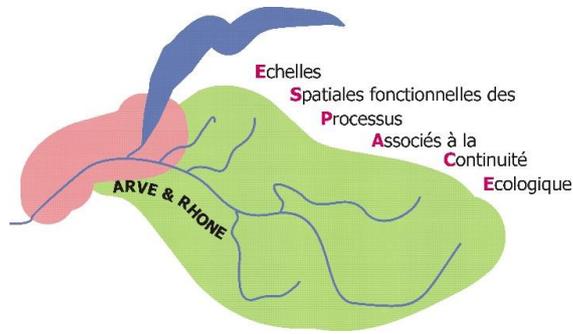


Tableau 41 : Descriptif du contenu et du format des données nécessaires à l'alimentation de la table des obstacles.

	Nom du champ	Description	Format	Indication
Table "Obstacles"	ID_OB	code d'identification de l'obstacle	libre	code unique dans la base de données des obstacles
	naturel	obstacle naturel ou artificiel	entier (0 ou 1)	obstacle naturel = 1, artificiel = 0
	ID_TR_am	code d'identification du tronçon à l'amont immédiat de l'obstacle	identique à ID_TR de la table "Tronçons"	code existant dans le champ ID_TR
	P_montaison	probabilité de franchissement à la montée de l'obstacle	numérique avec décimale	valeur dans la gamme [0-1]
	P_devalaison	probabilité de franchissement à la dévalaison de l'obstacle	numérique avec décimale	valeur dans la gamme [0-1]

La nature de chaque obstacle, naturel ou artificiel, n'est pas réellement utilisée dans le modèle. C'est à l'utilisateur d'en tenir compte pour définir ou non des projets de restauration de la circulation piscicole. Elle est néanmoins renseignée ici par un indicateur 0 (=artificiel) ou 1 (=naturel), ne serait-ce que pour l'intégration sous SIG.

Les probabilités de franchissement à la montaison et à la dévalaison (P_montaison et P_devalaison) sont des valeurs numériques qui viennent pondérer les possibilités de déplacements. Pour plus d'information sur les enjeux liés à ces variables se reporter à la partie précédente (§III).

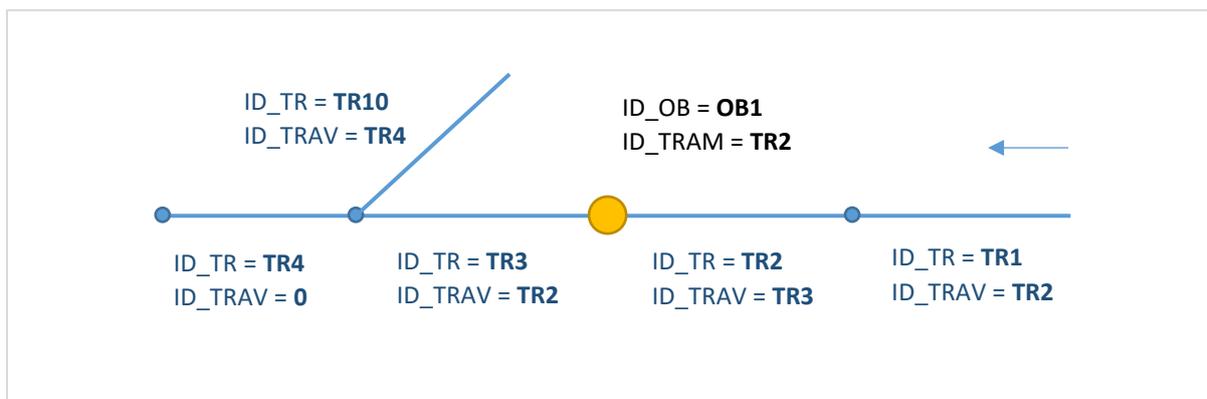
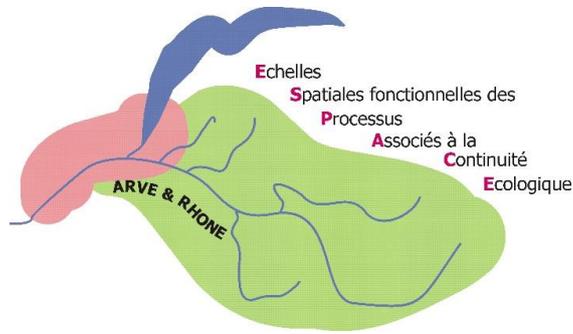


Figure 126 : Exemple d'identification correcte d'un obstacle (jaune) sur un bassin versant virtuel simple



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



C. Table projets

La table « Projets » est destinée à recevoir toutes les informations caractérisant les projets de restauration de la circulation piscicole sur les obstacles identifiés précédemment.

Les 5 premières colonnes de la feuille type (colonnes A à E) doivent être conservées dans cet ordre. Si l'utilisateur souhaite ajouter dans la table des données complémentaires, elles peuvent l'être sur la droite (Colonnes >= F)

	A	B	C	D	E
1	ID_PRO	ID_OB	P_new_montaison	P_new_devalaison	Cout
2	Pro1	74_1657	0.9	1	18
3	Pro2	74_1656	0.9	1	42.84
4	Pro3	74_1655	0.9	1	25.92
5	Pro4	74_1720	0.9	1	18
6	Pro5	74_1665	0.9	1	60.48

Figure 127 : Capture d'écran des intitulés des colonnes et des premières données renseignées dans un exemple d'utilisation de la table « Projets ».

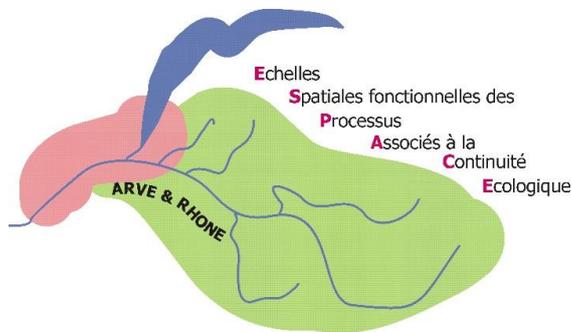
Tableau 42 : Descriptif du contenu et du format des données nécessaires à l'alimentation de la table des projets.

	Nom du champ	Description	Format	Indication
Table "Projets"	ID_PRO	code d'identifiant du scénario de restauration (projet)	libre	code unique dans la base de données des projets
	ID_OB	code d'identification de l'obstacle concerné	identique ID_OB de la table "Obstacles"	code existant dans la table "Obstacles"
	P_new_montaison	probabilité de franchissement à la montée corrigée par le scénario	numérique avec décimale	valeur dans la gamme [0-1]
	P_new_devalaison	probabilité de franchissement à la dévalaison corrigée par le scénario	numérique avec décimale	valeur dans la gamme [0-1]
	Coût	évaluation du coût du scénario	numérique avec décimale	unité libre mais identique à celle utilisée pour définir les simulations du modèle



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



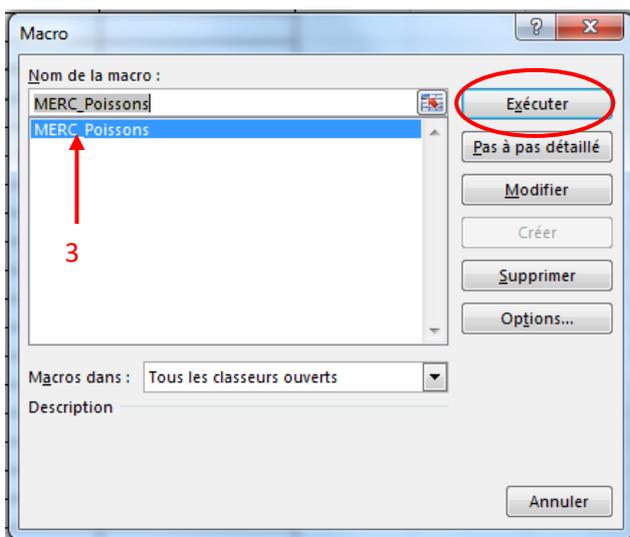
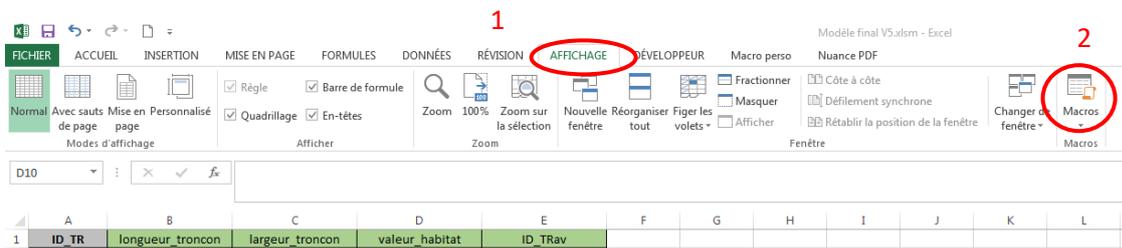
ID_PRO identifie le projet par un code unique. ID_OB renvoie à l'obstacle concerné. A noter que plusieurs projets peuvent être définis pour un obstacle donné mais, qu'inversement, il n'est pas nécessaire que tous les obstacles fassent l'objet d'un projet.

Les performances améliorées de l'obstacle par le projet, en termes de franchissement, sont à renseigner dans P_new_montaison et P_new_devalaison. Ces champs doivent être compris entre 0 et 1, sur les mêmes bases que celles pour l'évaluation de la franchissabilité initiale.

Le coût peut être renseigné dans n'importe quelle unité. La même unité doit être utilisée pour la détermination des budgets dans l'interface de lancement de la modélisation.

2) Lancement du module de modélisation

Lorsque les données sources ont été intégrées dans le classeur Excel®, le paramétrage et le lancement du modèle s'effectue en lançant la macro incluse dans celui-ci. La **Figure 128** rappelle la procédure pour lancer une macro.



1 et 2 : Dans le bandeau, sélectionner l'onglet [Affichage], puis cliquer sur l'icône [macro] à droite

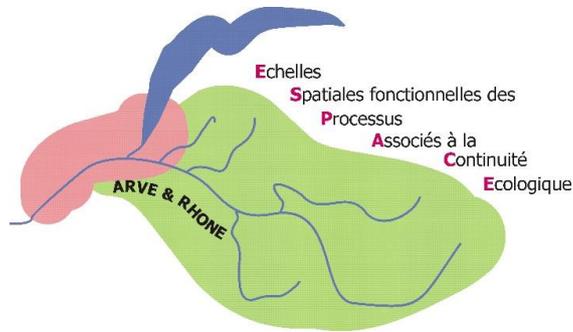
3 et 4 : Sélectionner la macro [MERC_Poissons], puis cliquer sur [Executer].

Figure 128 : Procédure de lancement d'une macro sous Excel®



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Le lancement de la macro conduit à l'ouverture de la fenêtre de paramétrage, présentée à la Figure 129.

M.E.R.C. Poissons - paramétrage du modèle

Sélection du type d'exécution du modèle :

- Calcul simple de connectivité
- Recherche du meilleur scénario d'effacement d'obstacle pour un budget donné
- Etablissement de la courbe du gain de connectivité en fonction du budget

Chargement des tables de données

Table de donnée des caractéristiques des tronçons	Importer
Table de donnée des caractéristiques des obstacles	Importer
Table de donnée des caractéristiques des projets	Importer

Paramétrage lié à l'espèce piscicole

Distance de dispersion de l'espèce modélisée

à exprimer dans l'unité de distance utilisée dans les tables de données importées.

Budgets

Budget pour la recherche du meilleur scénario <input type="text"/>	Budget minimum de modélisation <input type="text"/>
	Budget maximum de modélisation <input type="text"/>
	Nombre de mesures <input type="text"/>

Le budget doit être exprimé dans l'unité monétaire utilisée dans la table de donnée des scénarios

Exports

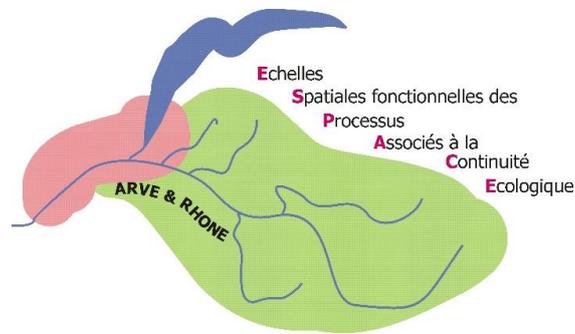
- exporter les notes de connectivité par tronçon
- exporter la table des projets retenus
- exporter les résultats gains/budgets seuls
- exporter le détail de chaque scénario calculé

Figure 129: Présentation de la fenêtre de paramétrage du module M.E.R.C. Poissons.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Le premier choix à effectuer concerne le type d'exécution du modèle. Ce qui est retenu va conditionner le type de données sources nécessaires, ainsi que le type d'export disponible.

Les étapes suivantes sont :

- le chargement des tables de données (selon le type d'exécution),
- le paramétrage de la valeur d_0 , selon l'espèce de poisson prise en compte,
- la détermination d'un budget ou d'une gamme de budget (selon le type d'exécution),
- et le choix des exports.

Le paramétrage étant effectué, le calcul est lancé lors du clic sur le bouton [Lancer le calcul].

A. Calcul simple de connectivité

Le calcul simple de connectivité permet d'obtenir pour un scénario donné, défini à partir des tables « Tronçons » et « Obstacles », la note globale de connectivité ou SPF (Surface Pondérée par la Fragmentation). Cette valeur est peu interprétable individuellement mais elle peut être comparée pour plusieurs scénarii. Il est aussi possible de tester l'effet d'hypothèses de valeurs d'habitat ou de caractéristiques d'obstacle sur la SPF.

Ce type d'exécution du modèle permet d'obtenir les notes de connectivité théorique (Y'_{rsh}), de connectivité réelle (Y_{rsh}) et la note résultante (H_r) de chacun des tronçons en sélectionnant l'export correspondant.

B. Recherche du meilleur scénario d'effacement pour un budget donné

Ce type d'exécution est complet. Il fait intervenir l'algorithme de recherche de la meilleure solution pour un budget donné. Les données nécessaires en entrée sont :

- les trois tables de données (tronçons, obstacles et projets),
- la constante de dispersion de l'espèce d_0 ,
- et le budget.

Les résultats figurent dans la table des projets retenus, à condition de sélectionner cet export.

C. Etablissement de la courbe du gain de connectivité en fonction du budget

Cette dernière exécution permet de réaliser d'une seule traite une série de recherche de scénarii optimisés afin d'obtenir la courbe « d'évolution du gain en fonction du budget ». Un exemple est présenté ci-après sur le Borne.

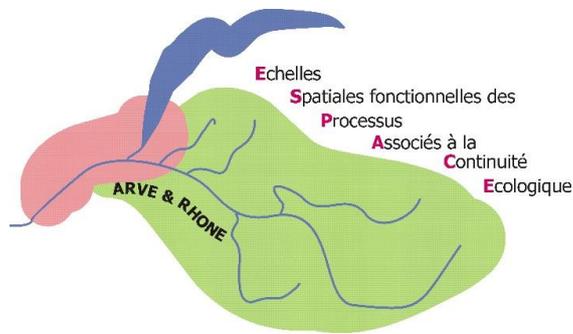
Deux types d'exports sont possibles, un qui ne comprend que les résultats permettant de réaliser cette courbe et un second qui comprend le détail de chacun des scénarii retenus.

A noter qu'en raison du temps que peut représenter l'exécution d'une série de recherche de scénarii optimisés, cette modalité de fonctionnement de M.E.R.C. Poissons doit être réservée aux modèles peu complexes. Pour les bassins versants importants, il est préférable de lancer individuellement chaque recherche. (Cf. paragraphe ci-après sur le premier retour d'expérience).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



3) Retour d'expérience sur le fonctionnement du programme

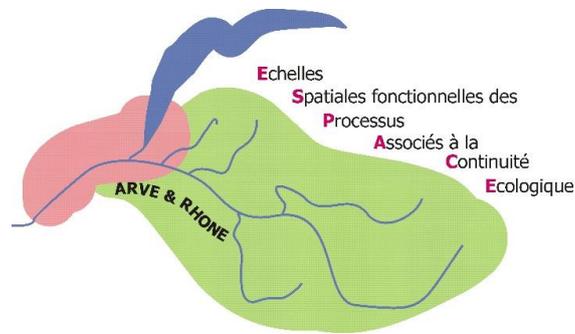
Dans un premier temps le programme a été éprouvé sur un bassin versant virtuel comprenant 35 tronçons, 8 obstacles et 11 projets. Ce bassin expérimental a permis de résoudre les principaux « bugs », d'ajouter un nombre important de tests pour détecter les erreurs dans les données sources et d'anticiper les erreurs d'un utilisateur non expérimenté. Le passage sur le bassin versant réel du Borne, composé de 115 tronçons, 88 obstacles et 44 projets s'est passé sans encombre. Le programme a détecté les erreurs pertinentes dans les données sources puis a fonctionné correctement une fois celles-ci corrigées. La mise en œuvre de cette modélisation s'est donc révélée très rapide une fois les choix des hypothèses de travail déterminés. En revanche il n'a pas été possible dans le cadre du programme INTEREG ESPACE, de tester et de faire tester le modèle auprès d'un panel externe d'utilisateurs, ce qui est une lacune importante si l'objectif est de le diffuser.

Concernant le temps de calcul, l'établissement de la courbe du gain de connectivité en fonction du coût sur la base de 10 modélisations a duré moins de 2 mn pour le bassin versant virtuel, sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel® Pentium® CPU G870 à 3.10 GHz, d'un système d'exploitation Windows 7 pro et d'un logiciel Excel®2013. Sur le bassin versant réel du Borne, il s'est avéré nettement plus limitant et il a été retenu de simuler individuellement chaque modélisation pour un budget donné. Chacune d'elle a duré néanmoins jusqu'à plusieurs heures avec un maximum de 6/7h, pour le budget de modélisation maximum permettant de retenir l'ensemble des projets. Le temps d'exécution est lié au principe de calcul qui comprend des boucles récursives impliquées et dont le nombre augmente exponentiellement avec celui des tronçons. Ces boucles sont exécutées lors de chaque évaluation d'un projet donc le temps de calcul augmente aussi proportionnellement avec le nombre de projets. Concernant la recherche du meilleur scénario, le premier projet est le plus long à sélectionner, puisque tous sont encore disponibles, puis la vitesse de sélection d'un projet augmente progressivement, au fur et à mesure que le choix se réduit. En conclusion, pour optimiser le temps d'exécution il est important d'adapter le niveau de découpage des cours d'eau en tronçons à l'échelle d'analyse. D'un point de vue pratique, fonctionner sous Excel génère certaines instabilités, notamment lors de la mise en veille de l'ordinateur et il s'est avéré nécessaire de supprimer celle-ci temporairement pour ne pas voir la modélisation reprendre à zéro. En revanche, une fois cette précaution effectuée, le modèle a été exécuté sur une dizaine de postes de configurations légèrement différentes sans difficulté. Une fois le classeur généré, il est plus aisé de le copier sur plusieurs postes informatiques et de le faire tourner sur chacun avec un budget différent. Quatre ordinateurs ont ainsi été utilisés pour obtenir en une journée les quinze scénarii du modèle Borne, présentés dans les courbes ci-après. Cet outil s'avère sans doute limité pour ces raisons mais il pose les bases méthodologiques pour l'application de ce type de méthode. Pour un usage à très grande échelle, une conversion des algorithmes dans un langage informatique plus performant, comme le C++, est sans doute nécessaire.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



V. Exemple sur le Borne

Après les phases de tests de fonctionnement sur des bassins versants virtuels, le Borne est le premier essai réalisé sur une géométrie de bassin versant réel. Ce secteur a été retenu en raison de la relative abondance de données disponibles, en particulier concernant le recensement des obstacles artificiels et naturels. Sa taille et sa complexité est moyenne et représente une échelle de travail pertinente. Le modèle présenté ici est une première étape dans la mise en place d'un modèle « Borne » consolidé.

L'objectif n'est pas, ici, de mener la démarche à son terme et les premiers résultats obtenus ne doivent pas être perçus comme des prescriptions opérationnelles pour la restauration de la continuité écologique sur le Borne. En particulier, plusieurs prescriptions aux modélisateurs – présentées ci avant – n'ont pas été menées telles que :

- la validation externe des hypothèses de définition des données ; celles-ci ont été établies en petit comité,
- la démarche séquentielle d'affinement des données, tout comme les tests de robustesse des hypothèses. Celles-ci sont indispensables au regard notamment du niveau de précision relativement bas, retenu entre autre pour le chiffrage des projets de restauration.

En revanche ce modèle permet une confrontation de l'outil à un jeu de données réelles. Il fournit des résultats qui permettent d'en valider le principe de fonctionnement, et de présenter ici sur un exemple concret le type d'exploitation qu'il est possible d'en faire.

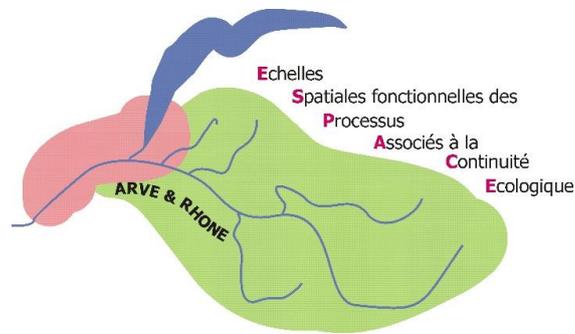
Le modèle Borne est structuré par :

- 115 tronçons hydrographiques (linéaire cumulé de 58 km),
- 88 obstacles recensés,
- dont 44 obstacles artificiels,
- et l'espèce cible est la truite fario.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



1) Alimentation de la table tronçon (Figure 130)

La Fédération pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique de Haute Savoie entretient une base de données géographiques dont le réseau hydrographique est issu de la base de données en accès libre CARTHAGE³⁶. Cette base, travaillée sous QGIS³⁷, a fait l'objet d'un découpage spécifique en tronçons sur les éléments suivants.

- confluences,
- obstacles naturels et artificiels,
- changement significatif dans les caractéristiques du milieu :
 - largeur du cours d'eau,
 - étendue du fond de vallée,
 - géologie,
 - état des eaux hydrobiologie, physico-chimie, + focus sur le paramètre « stress thermique »,
 - anthropisation (avec notamment la présence de digues / enrochements de berge), présence de plans d'eau sur le cours d'eau,
 - tronçons court-circuités, etc.),
 - pente.

Seuls les tronçons de cours d'eau pérennes et présentant des poissons ont été conservés, les affluents apiscicoles ont été retirés du jeu de données. L'Annexe 28 présente les critères chiffrés utilisés pour le découpage en tronçons du réseau hydrographique du bassin versant du Borne.

Ces tronçons sont caractérisés par :

- des éléments d'identification et de positionnement dans le réseau hydrographique,
- une longueur,
- une largeur moyenne,
- une valeur d'habitat,

D'un point de vue méthodologique, les données ont été travaillées alternativement sous SIG (Q Gis) et sous un tableur (Excel®).

Éléments d'identification : pour faciliter la lisibilité des données, les tronçons ont été identifiés par un numéro, croissant d'amont vers l'aval, et par cours d'eau. A l'exception du dernier tronçon de chaque cours d'eau, l'identifiant du tronçon aval a pu être déterminé automatiquement incrémentant l'identifiant du tronçon. Le complément et la vérification globale s'est faite manuellement sous SIG.

Longueur des tronçons : Elle est issue d'une extraction automatique sous SIG.

Largeur moyenne : la largeur moyenne est extrapolée en fonction des données existantes dans la base de données de la Fédération de Pêche. Ont été utilisées en particulier les mesures de largeur de lit mouillé relevées dans le cadre des opérations d'inventaires piscicoles par pêche électrique ou des largeurs de certains ouvrages.

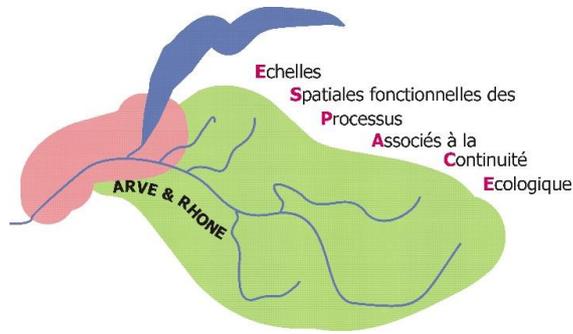
³⁶ BD CarTHAGe ® (Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'eau et du ministère chargé de l'environnement)

³⁷ QGIS Development Team, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation.
URL <http://qgis.osgeo.org>



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



LEGENDE

Largueur cours d'eau	Classe habitat
15 à 30 m	1
10 à 15 m	0.75
7.5 à 10 m	0.5
5 à 7.5 m	0.25
2.5 à 5 m	0



Figure 130 : Représentation géographique de la base de données des tronçons hydrographiques ; les points représentent les limites de tronçons, les étiquettes sont les valeurs d'habitat et les largeurs de trait les classes de largeur des cours d'eau.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

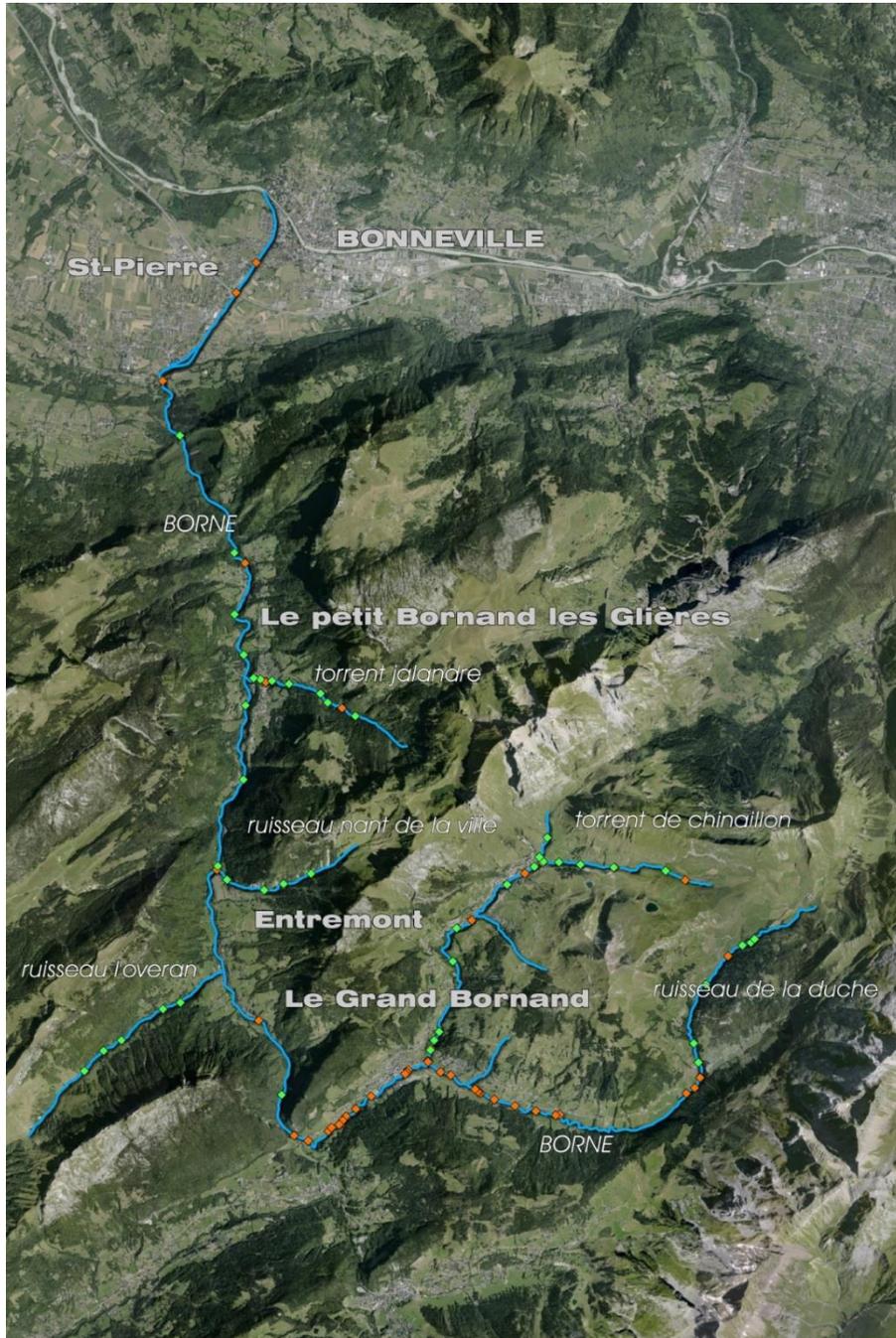
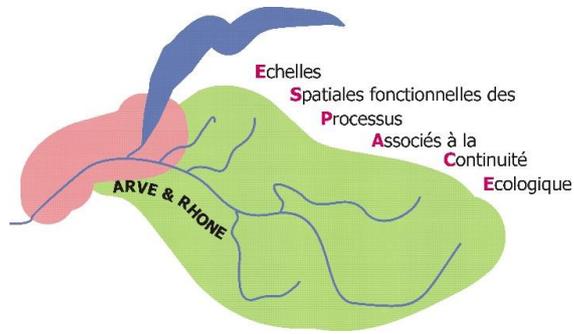


Figure 131 : Représentation géographique de la base de données des obstacles naturels et artificiels sur le Borne.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

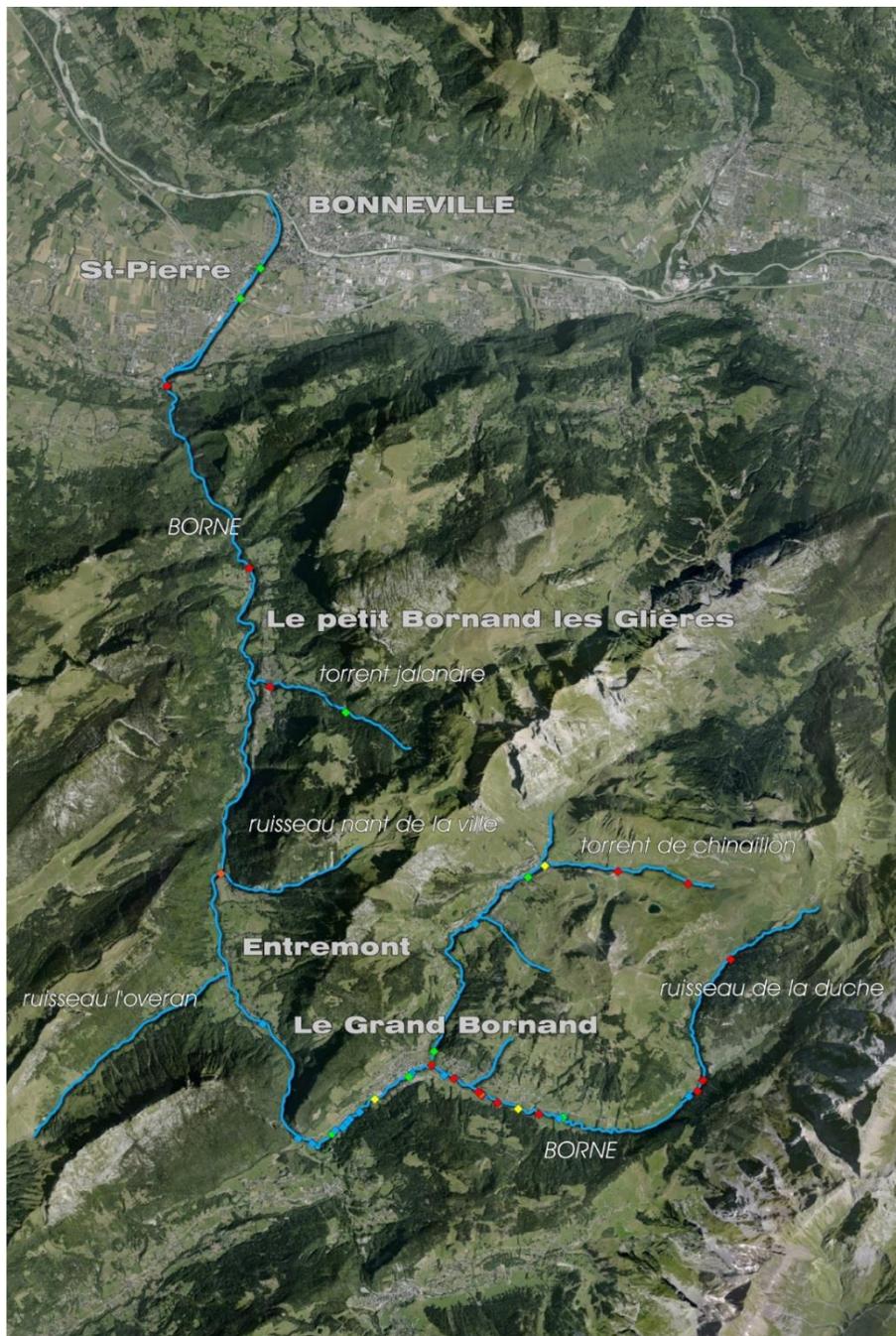
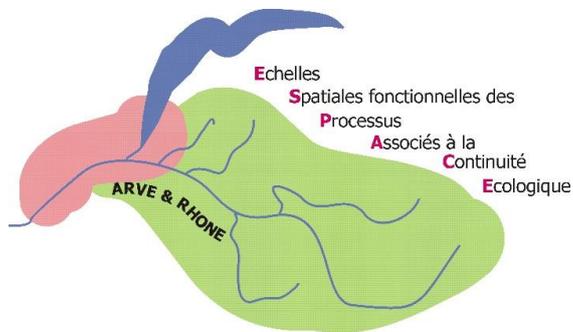


Figure 132 : Représentation géographique des classes ROE à la montaison des obstacles artificiels sur le Borne.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

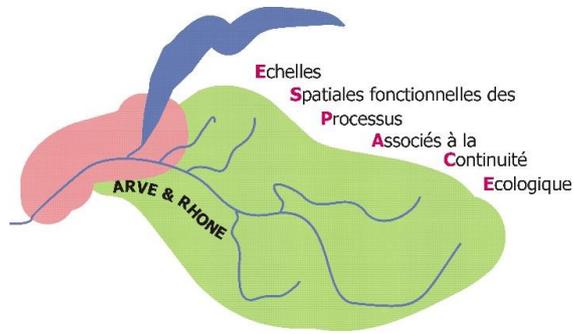
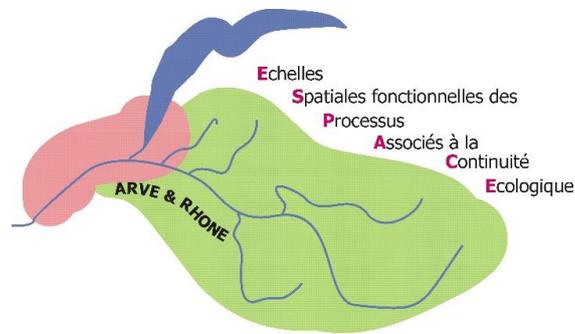


Figure 133 : Représentation géographique des données d'évaluation des possibilités de dévalaison sur les obstacles artificiels du Borne.
Les classes appliquées sont similaires à celles du ROE pour la montagne.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Valeur d'habitat : Définition de la valeur d'habitat selon 3 métriques : thermique / physico-chimique / habitat physique et artificialisation. Chaque métrique intègre plusieurs caractères. Ce choix de définition de la valeur d'habitat peut être affiné.

Les données ayant servi à la définition de la valeur d'habitat ont été récoltées et/ou compilées par la FDPPMA 74. Elles sont relativement abondantes mais hétérogènes. Les données de qualité d'eau (hydrobiologie) et de physico-chimie sont des données publiques issues pour la majorité des mesures en routine sur les stations des réseaux de surveillance. Les données thermiques et les métriques associées proviennent de suivis annuels effectués par la FDPPMA 74 dans le cadre du plan de gestion piscicole du Borne. Le paramètre de pente a été défini à partir de l'IGN. Les autres données plus ponctuelles ont été extraites du SDVP 2007 (présence de tronçons court-circuités) ou fournies par le SM3A (présence de digue). Le détail des critères utilisés pour la définition de chacune des métriques ainsi que les règles de calcul pour les valeurs des sous indices et indice global de la valeur d'habitat sont présentés à l'Annexe 29.

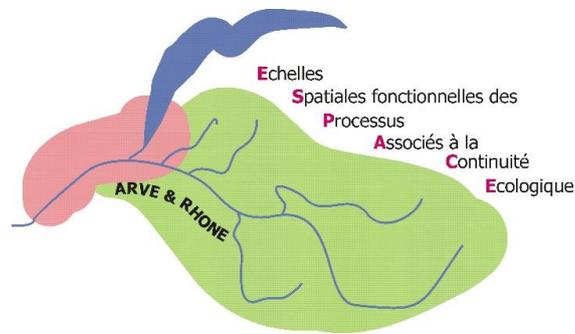
Ces données sont plus complètes sur le cours principal du Borne, qui est le secteur le plus sensible vis-à-vis de la problématique, que sur les affluents. Le principe retenu est qu'en l'absence d'information contraire, un milieu est considéré comme conforme (valeur de 1).

La conséquence de cette démarche est que certains petits affluents ont une valeur d'habitat non limitante, en absence d'information. Du fait de la petite taille de ces milieux l'impact de cette incertitude sur le résultat est vraisemblablement faible mais dans le cadre d'une utilisation opérationnelle du modèle, elle devra être évaluée lors de l'examen critique des scénarii.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



2) Alimentation de la table obstacles (Figure 131, Figure 132 et Figure 133)

La base de données utilisée pour les obstacles artificiels est le ROE (le recensement relève d'une collaboration entre l'ONEMA et la Fédération). En Haute-Savoie la démarche de recensement des obstacles naturels a été menée parallèlement et sur les mêmes bases. Il a été possible d'utiliser ce recensement sans collecte de données complémentaires.

La grille de conversion suivante a été appliquée. A noter que la classe 1, correspondant à un franchissement sans difficulté apparente, est celle appliquée dans le cas d'un seuil équipé d'un ouvrage de franchissement efficace. C'est pourquoi il a été pris le parti d'appliquer une légère décote, entre 0.9 et 0.7 suivant le type d'aménagement et la connaissance de terrain.

Tableau 43: Probabilités de montaison appliquées sur le Borne, à partir des classes ROE disponibles.

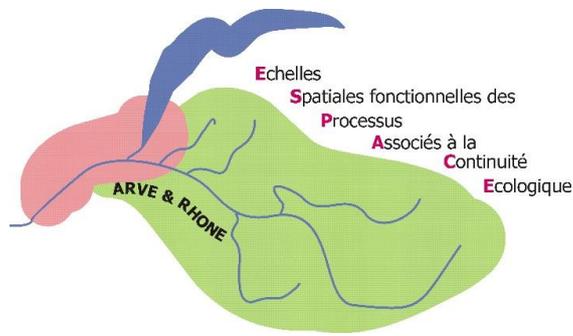
Classe ROE	Appréciation	Probabilité de montaison retenue
0	Absence d'obstacle (ruiné, effacé ou sans impact)	1
1	Franchissable sans difficultés apparente (libre circulation assurée à tout niveau de débit)	0.7 - 0.9
2	Franchissable mais avec risque d'impact (retard ou blocage en conditions hydroclimatiques limitantes)	0.5
3	Difficilement franchissable (impact important en conditions moyennes)	0.3
4	Très difficilement franchissables (passage possible seulement en conditions exceptionnelles)	0.1
5	Infranchissable (passage impossible y compris en conditions exceptionnelles)	0

La même règle a été appliquée pour les classes équivalentes au ROE pour la dévalaison.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



3) Alimentation de la table de projets

Le présent modèle ne s'appuie sur aucune étude de projet de restauration. La table de projets a été renseignée en utilisant les éléments de dénivelé et de type d'ouvrage de la base de données ROE, sur lesquels ont été appliquées les propositions de coûts par type d'actions issus des travaux de LANGUMIER *et al.* (2014). Un projet a été proposé par obstacle artificiel.

Sur cette base, les coûts suivants ont été appliqués :

Tableau 44 : Coûts forfaitaires issus LANGUMIER *et al.* (2014), appliqués sur les obstacles recensés dans le ROE sur le bassin versant du Borne.

Type d'ouvrage	Type d'action	Coût au mètre dénivelé	Pmont	Pdev
barrage	construction d'une passe à poissons (Type 1)	8 000 €	0.5 à 0.7	0.5 à 1
seuil en enrochement liaisonné	arasement d'ouvrage maçonné (Type 4-2)	7 000 €	0.9	1
buse, cadre, radier de pont, seuil en enrochement libre	aménagement de franchissabilité (Type 2)	3 600 €	0.9	1

Des probabilités de restauration optimales ont été visées pour les projets de restauration de type effacement ou aménagement de petits ouvrages. Pour les passes à poissons adossées à des barrages, les gains escomptés ont été atténués en fonction du dénivelé global.

4) Constante de dispersion de la truite fario

D'après DIEBEL (2010), la constante de dispersion d_0 doit être retenue de telle façon à ce que la fonction de pondération de la distance ressemble à la fréquence de distribution des déplacements saisonniers de l'espèce sur un bassin non fragmenté. Pour arriver à cet objectif, les espaces vitaux de 45 truites, suivies par radiopistage sur l'Arve, affluent du Borne, ont été calculés sur une période de plusieurs mois incluant au moins une période de reproduction.

La valeur d_0 a été déterminée par essais successifs de façon à ce que la fonction de pondération de la distance coïncide le plus possible avec la courbe de fréquence cumulée des déplacements des truites. La valeur de 7 km a été finalement retenue (**Figure 134**).

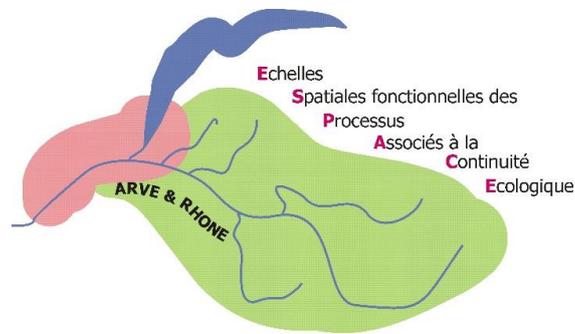
Il peut être reproché à cette démarche que les déplacements de la truite sur un grand milieu tel que l'Arve, soient maximisés en comparaison de ce qui serait observé sur un cours d'eau plus petit. Cette remarque est légitime mais doit être pondérée par plusieurs éléments :

- Cette valeur garde une signification biologique puisqu'elle témoigne d'un potentiel de déplacement réel, mesuré.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- Même si l'Arve est un grand milieu, il n'est pas dénué de contraintes aux déplacements ce qui est susceptible d'influencer à la baisse cette valeur.
- Enfin la période de suivi de chaque poisson, même si elle inclue au minimum une période de migration, reste relativement courte et n'intègre pas l'ensemble de sa vie.

En conclusion, même si des incertitudes subsistent sur cette valeur les données disponibles permettent d'évaluer une valeur vraisemblable de la constante d_0 pour la truite fario.

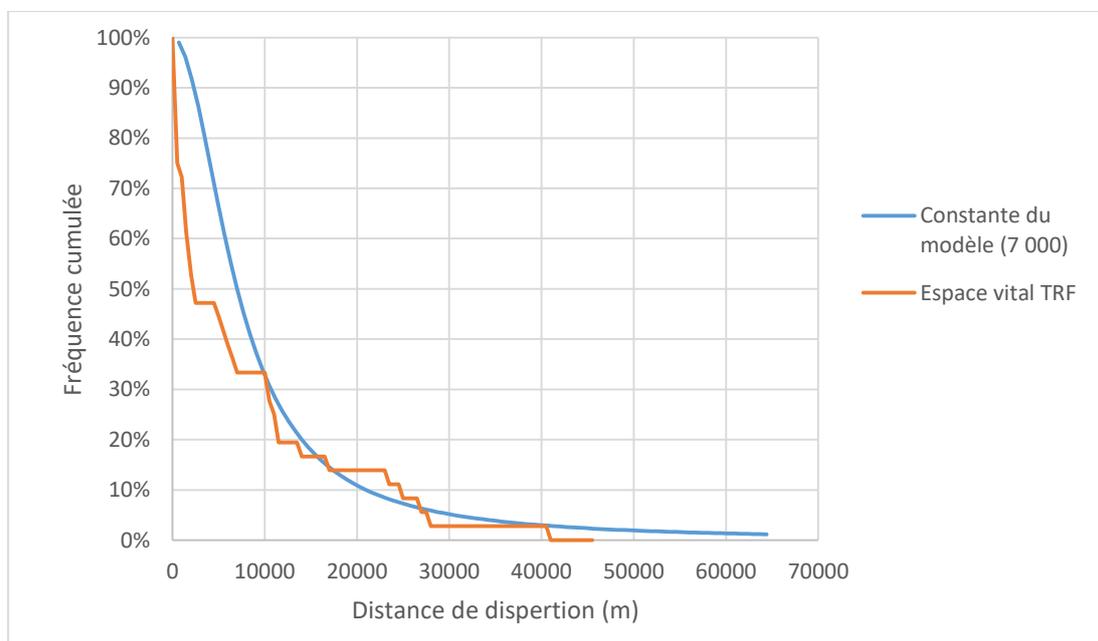
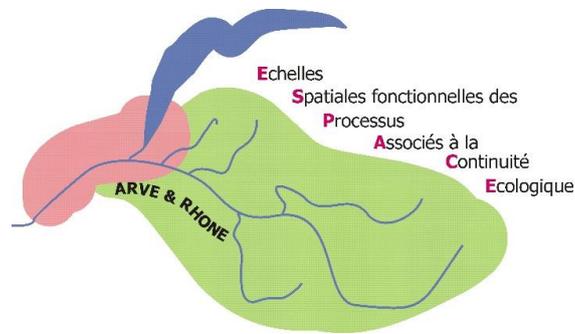


Figure 134 : Comparaison de la fréquence cumulée des déplacements de 45 truites suivies par radiopistage pendant une période de plusieurs mois incluant au minimum une période de reproduction, au résultat de la fonction de pondération des déplacements du modèle pour une valeur de d_0 de 7000 m.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



5) Résultats

La recherche du meilleur scénario d'aménagement a été effectuée pour 15 hypothèses de budget variant de 0 à 2 000 K€. L'export des valeurs de connectivité du bassin versant en l'état actuel a été replacé sous SIG (**Figure 135**).

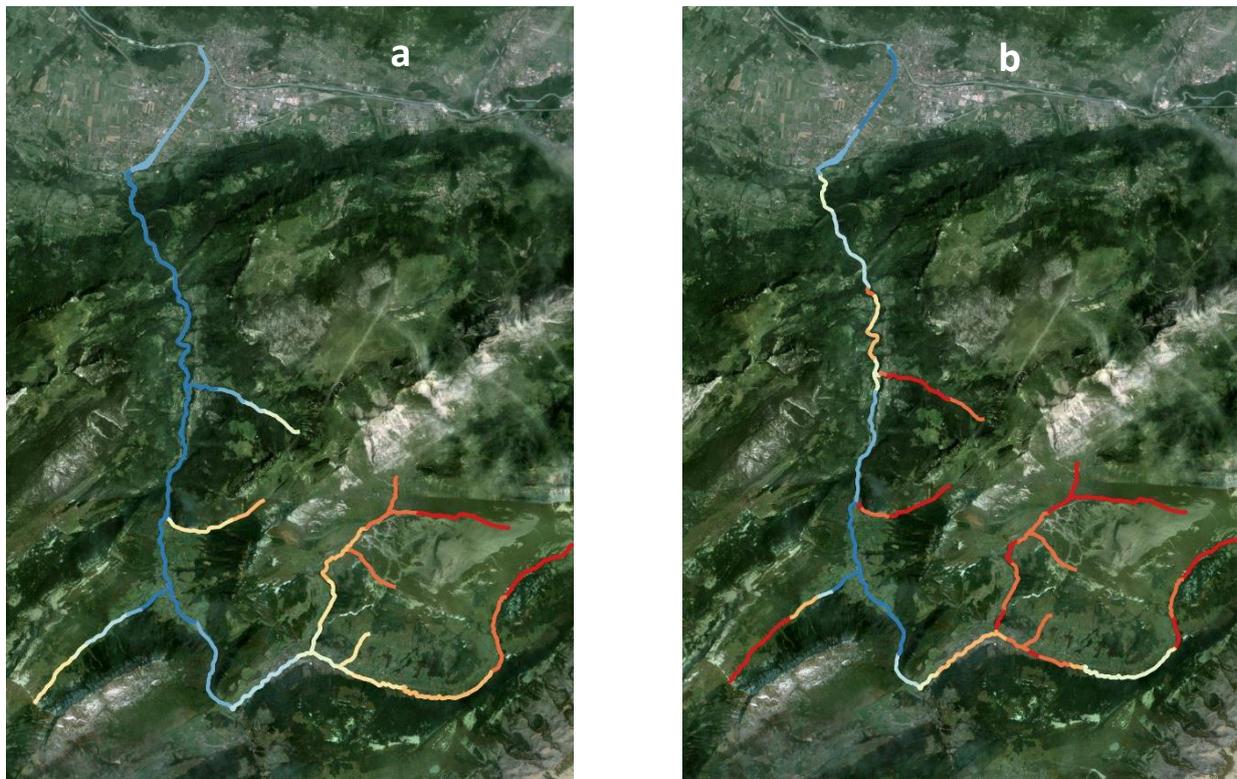


Figure 135: Illustration sous SIG des valeurs de connectivité théorique (a -sans prise en compte des obstacles) et réelle (b- avec prise en compte des obstacles naturels et artificiels) sur le modèle Borne. Les valeurs les plus importantes sont illustrées en couleurs froide, (bleu) et les valeurs les plus faibles en couleur chaude (rouge).

Sans prise en compte des obstacles, les tronçons à forte contribution dans la note globale sont les tronçons centraux du bassin versant. Les obstacles fragmentent cette répartition en deux pôles principaux : un central et un correspondant au Borne aval. La **Figure 136** et la **Figure 137** présentent le gain de SPF et le nombre d'obstacles visés pour les 15 budgets de restauration examinés.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

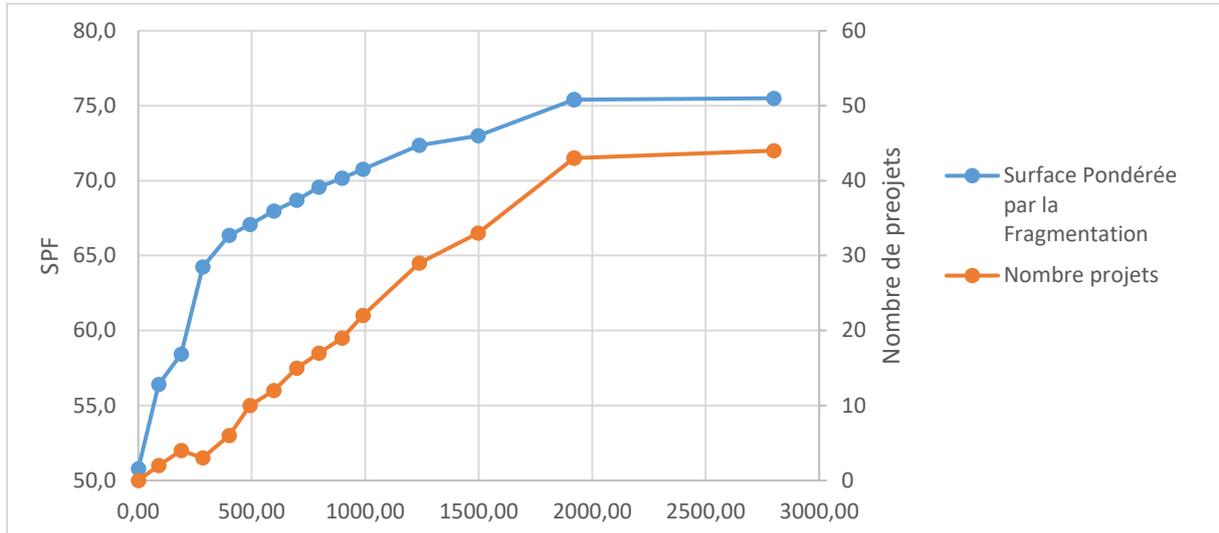
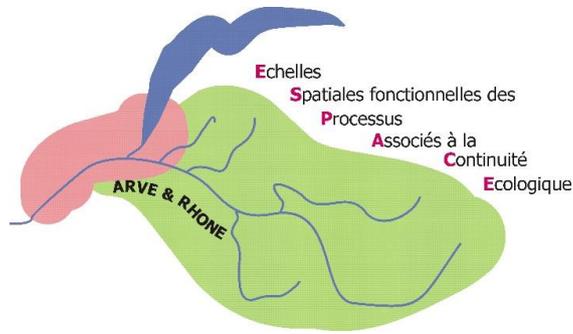


Figure 136 : Evolution de la Surface Pondérée par la Fragmentation et du nombre de projets retenu en fonction du budget pour le modèle Borne.

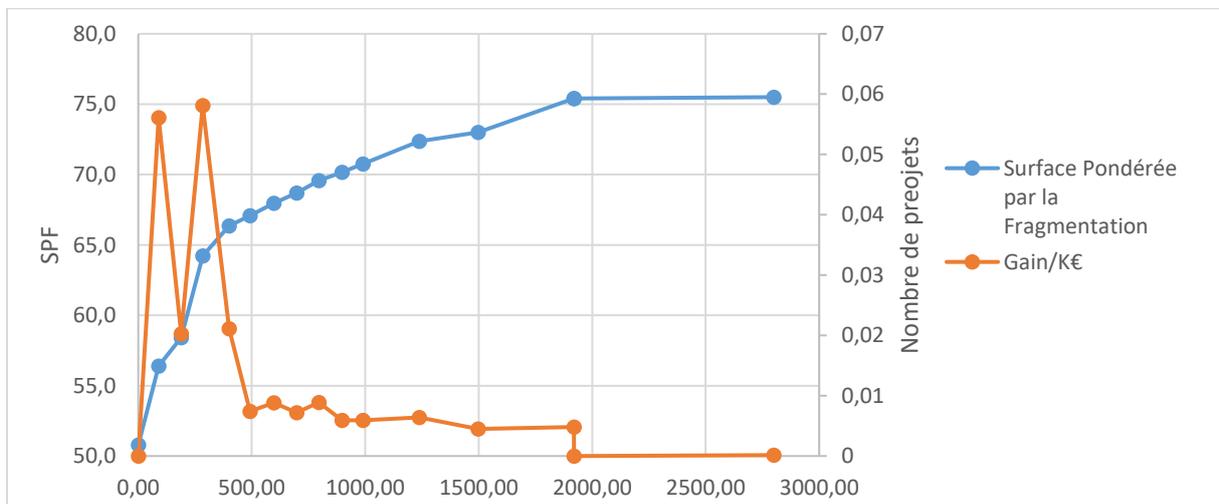


Figure 137 : Evolution de la Surface Pondérée par la fragmentation et du gain de SPF par K€ investis en fonction du budget pour le modèle Borne.

Le gain de SPF présente une forte augmentation jusqu'à un budget d'environ 400 K€. Au-delà ce gain décroît progressivement. Ce premier résultat suggère que les projets de restauration retenus par les premiers scénarios présentent le meilleur gain par euro investi. La Figure 137 présente les mêmes résultats sous une autre forme et confirme la plus grande efficacité économique des scénarios jusqu'à 400 K€. La

Figure 138 présente sur carte les projets retenus comme permettant la meilleure restauration de la continuité écologique pour les budgets de 200, 400, 800 et 1500 K€.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

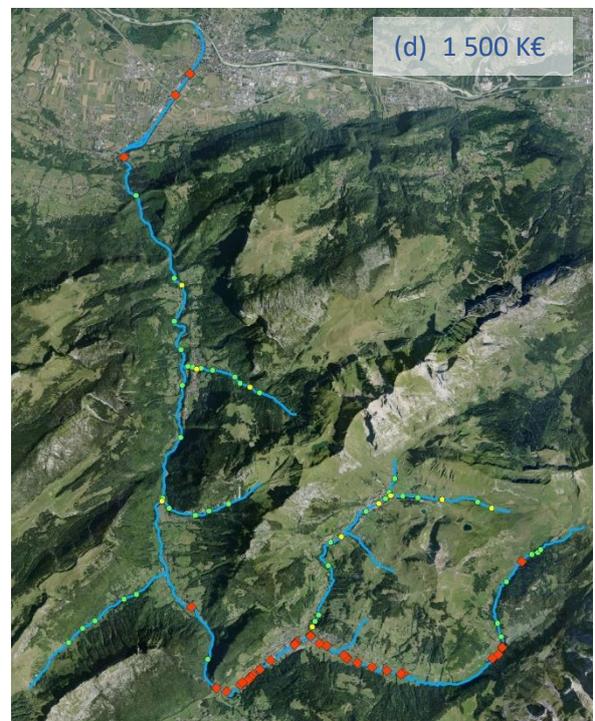
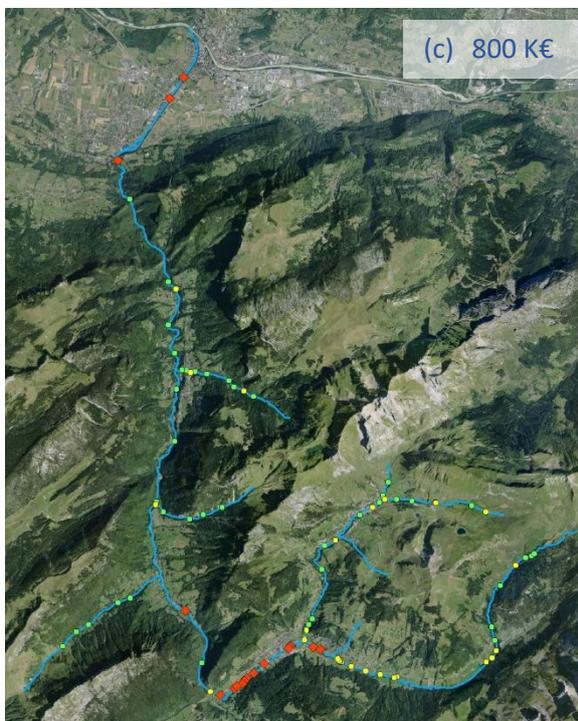
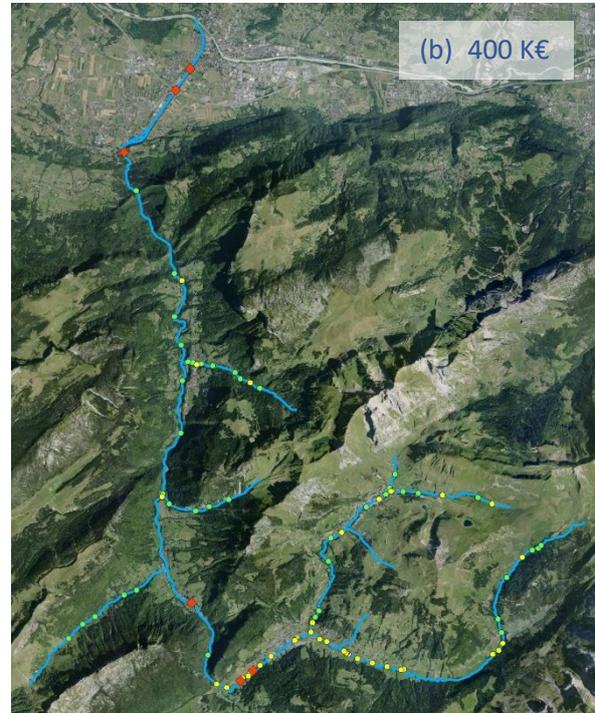
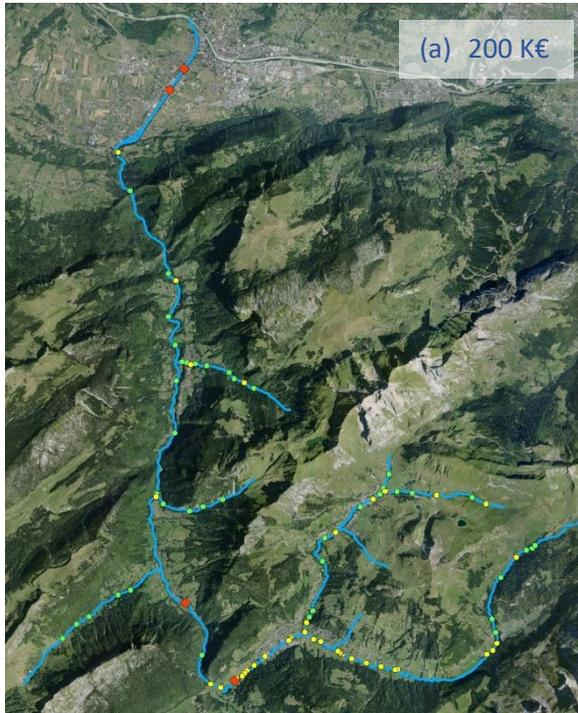
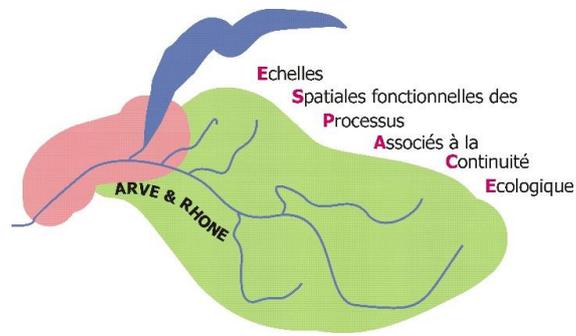
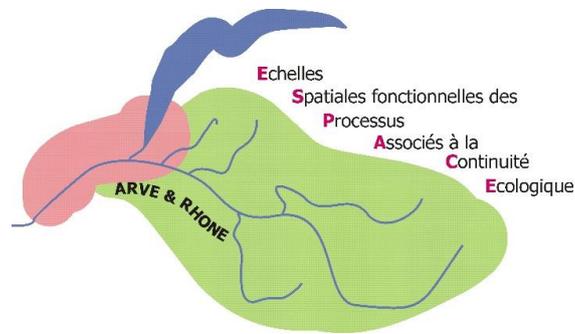


Figure 138 : Projets de restauration sélectionnés sur le Borne pour un budget de 200, 400, 800 et 1500 K€. Les obstacles artificiels proposés en aménagement sont en rouge, les autres sont en jaune et les obstacles naturels sont en vert.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



VI. Bibliographie

NFT 90-344, 2004. Détermination de l'Indice Poisson Rivière – IPR. AFNOR

BAUDOIN J.M., BURGUN V., CHANSEAU M., LARINIER M., OVIDIO M., SREMSKI W., STEINBACH P. ET VOEGTLE B., 2014. Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. *Onema*. 200 p.

BRANCO P., SEGURADO P., SANTOS J.M., FERREIRA M.T., 2014. Prioritizing barrier removal to improve functional connectivity of rivers. *Journal of Applied Ecology*, 51, p. 1197-1206

CAUDRON, A., CHAMPIGNEULLE, A., & LARGE, A., 2006. Etats et caractéristiques des populations autochtones de truite commune identifiées en Haute-Savoie et qualité globale du milieu. pp : 55-118 in programme INTERREG III A- Identification, sauvegarde et réhabilitation des populations de truites autochtones en vallée d'Aoste et en Haute-Savoie. Rapport final. 06/02. 12p + annexes.

DIEBEL M., FEDORA M., COGSWELL S., 2010. Prioritizing road crossing improvement to restore stream connectivity for stream-resident fish. In: *Wagner P.J., Nelson D., Murray E.(Eds.), Proceedings of the 2009 International Conference on Ecology and Transportation. Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, NC*, p. 347-660.

DUMOUTIER Q., VIGIER L. & CAUDRON A. 2010. Macro Excel d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles, MACMASalmo1.0. Rapport SHL293.2010 / FDP74.10/03 disponible sur <http://www.pechehautesavoie.com/>

KEMP P.S., O'HANLEY J.R., 2010. Procedures for evaluating and prioritizing the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology*, 2010, 17, p. 297-322.

KUBY M.J., FAGAN W.F., REVELLE C.S. & GRAF W.L., 2005. A multiobjective optimization model for dam removal: an example trading off salmon passage with hydropower and water storage in the Willamette basin. *Advances in Water Resources* 28, p. 845-855.

LANGUMIER A., JAFFRES G., LUCZYSYN H., GRUFFAZ F., 2014. Détermination des coûts de référence des travaux de restauration hydromorphologique des cours d'eau et conception d'une base de données de projets et d'un outil d'estimation du coût du volet hydromorphologie des programmes de mesures 2016-2021. Rapport, missions 1 et 2. 20 mars 2014. *Agence de l'Eau Seine Normandie*. 71p.

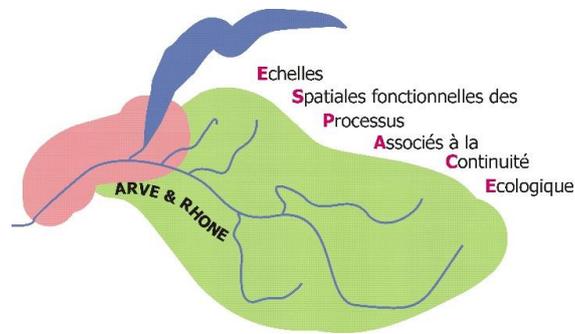
LEONARD A., ZEGEL P., 2010. Référentiel des obstacles à l'écoulement. Version1. Descriptif de contenu. *Référentiel géographique du Système d'information sur l'eau. Eau France*. 30 p.

O'HANLEY J.R., TOMBERLIN D., 2005. Optimizing the removal of small fish passage barriers. *Environmental Modeling and Assessment* 10. p. 85-98.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

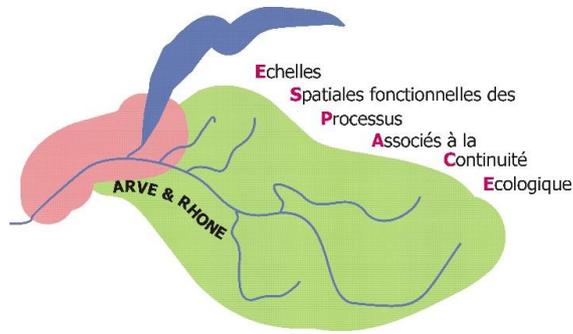


- O'HANLEY J.R., WRIGHT J., DIEBEL M., FEDORA M.A., SOUCY C.L., 2013. Restoring stream habitat connectivity: A proposed method for prioritizing the removal of resident fish passage barriers. *Journal of Environmental Management* 125. p 19-27
- PAULSEN C.M., WERNESTEDT K., 1995. Cost-Effectiveness Analysis for Complex Managed Hydrosystems: An Application to the Columbia River Basin. *Journal of Environmental Economics and Management*. Volume 28, Issue 3, p. 388-400.
- VERNEAU J., 1977. Biotypologie de l'écosystème « eau courante ». Déterminisme approché de la structure biotypologique. *Compte rendu de l'académie des Sciences de Paris*. t. 284, p77-79.
- VERNEAU J., 1977. Biotypologie de l'écosystème « eau courante ». Déterminisme approché de l'appartenance typologique d'un peuplement ichtyologique. *Compte rendu de l'académie des Sciences de Paris*. t. 284, p675-677.



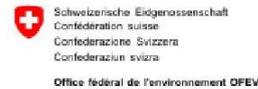
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexes

- Annexe 1: Affiche d'information sur le marquage auprès des pêcheurs du canton de Genève – flyer distribué à tous les titulaires du permis de pêche.



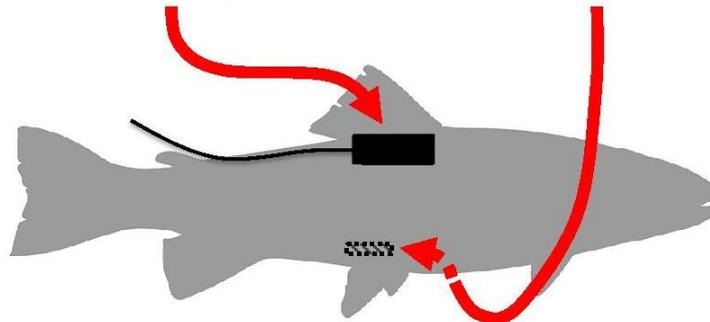
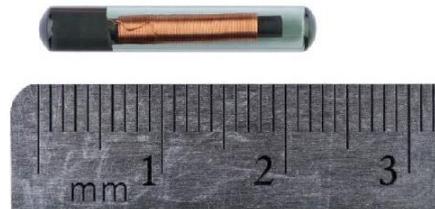
AVIS AUX PECHEURS (rivière Versoix et Lac Léman)

Dans le cadre du Projet hepia Genève – DGNP – OFEV sur l'évaluation de l'efficacité de franchissement des centrales hydroélectriques sur la Versoix, des **truites de rivières** (*Salmo trutta trutta*), **truites lacustres** (*Salmo trutta lacustris*) et **ombres communs** (*Thymallus thymallus*) ont été marqués par deux méthodes : transpondeurs internes et marques radiotéléométriques dorsales :

MARQUE RADIOTELEMETRIQUE
(visible sous nageoire dorsale)



TRANSPONDEUR
(insertion interne – dans cavité générale)



Afin de compléter les connaissances sur ces poissons, nous vous serions reconnaissants, dans le cas où vous captureriez un poisson marqué (marque dorsale ou interne), de **nous retourner marque et transpondeur, avec les informations suivantes** :

- Lieu (aussi précis que possible) et date de capture
- Taille du poisson
- Poids (si possible)
- Sexe (si possible)

Puis de contacter soit :

Votre garde-pêche

Direction Générale Nature et Paysage
Dimitri Jaquet
dimitri.jaquet@etat.ge.ch
+41 (0)79 308 11 46

Hepia Genève
David Grimardias
david.grimardias@hesge.ch
+41 (0)22 546 68 71

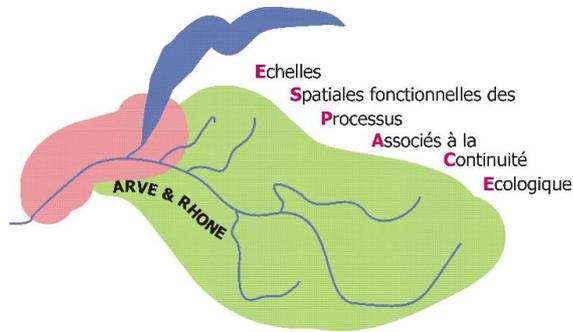
Afin de nous **transmettre les informations et les marques** (ou les déposer à la réception de la DGNP – Rue des Battoirs 7 – 1205 Genève).

En vous remerciant de votre collaboration !



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

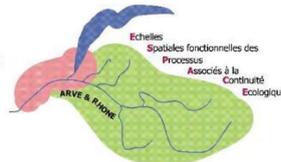


Annexe 2 : Affiche d'information auprès des pêcheurs sur la zone d'étude côté France.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Amis pêcheurs,

Dans le cadre du programme INTERREG franco-suisse ESPACE Arve et Rhône (<http://www.espace-arve-et-rhone.com>), un suivi sur les populations d'ombre commun, de truite fario, de cheveina et de barbeau fluviatile du bassin de l'Arve et du Rhône genevois est en cours.

Pour les années 2013-2015, des poissons seront équipés d'émetteurs radio et de PITtag. Ces marques internes permettront de suivre les déplacements des poissons.

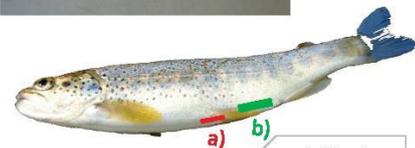
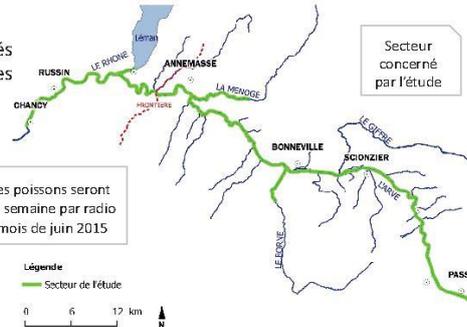
b) Emetteur radio



a) PITtag



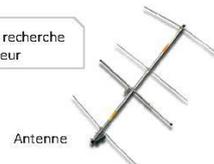
Les déplacements des poissons seront ensuite suivis chaque semaine par radio télémétrie jusqu'au mois de juin 2015



Incision dans la partie ventrale, en arrière de la ceinture pelvienne



Equipement de radio télémétrie pour la recherche des poissons équipés d'un émetteur



Ce travail a pour objectif d'acquérir des connaissances sur les aires de vie et le comportement de ces espèces afin d'améliorer la gestion de leurs populations

Afin de compléter nos connaissances sur ces espèces, nous sollicitons votre contribution

- ❖ Au cas où vous captureriez un individu marqué, nous vous remercions de le relâcher vivant.
 - ❖ Au cas où vous trouveriez un poisson mort, nous vous remercions de nous retourner émetteur radio et/ou PITtag avec les informations suivantes :
 - ➡ Lieu (aussi précis que possible) et date
 - ➡ Taille du poisson
 - ➡ Poids (si possible)
 - ➡ Sexe (si possible)
- Afin de limiter les infections post-opératoires dues aux actes chirurgicaux pratiqués pour le marquage, les poissons reçoivent une injection d'antibiotiques dont les résidus disparaissent après 15 jours*

Merci de votre collaboration et de votre compréhension

Contact:
 Fédération de Haute-Savoie pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
 « Le Villaret »
 2092 route des Diaquenods
 74370 ST MARTIN BELLEVUE
 Tél: 04 50 46 87 55
 Mail: info@pechehautesavoie.com



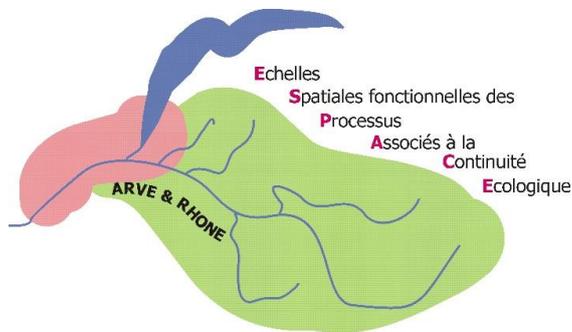
Partenaires techniques et financiers :





h e p i a

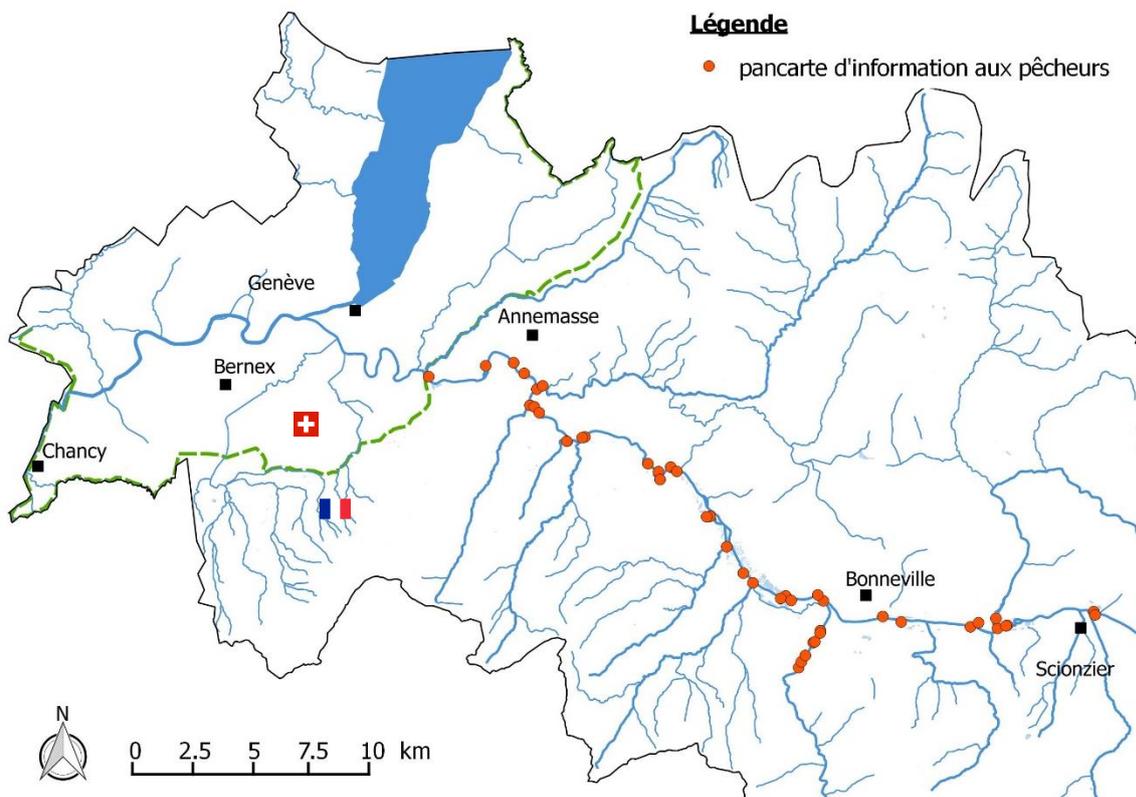
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



▪ **Annexe 3 : Carte de la localisation des pancartes d'information aux pêcheurs sur le bassin de l'Arve.**

Côté France, il a été posé 44 pancartes d'information auprès des pêcheurs sur les 40 km d'Arve étudié et sur l'aval des affluents (Menoge, Nant de Sion, Foron de la Roche, Borne et Giffre) avant l'ouverture de la saison 2014 de pêche en rivière (Carte ci-dessous). Ces dernières expliquent les objectifs et le principe de l'étude de suivi des déplacements piscicoles dans le cadre du programme ESPACE Arve et Rhône.

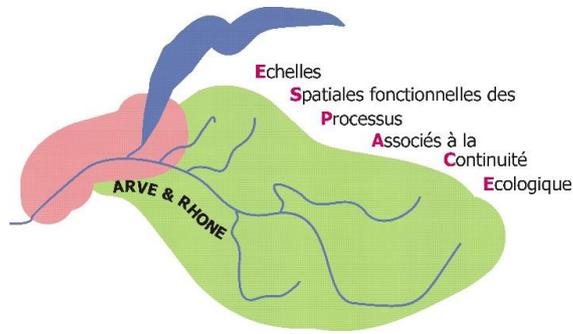
Cet affichage a été maintenu visible et entretenu jusqu'à la fin du programme ESPACE.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



- Annexe 4 : Définition du débit du nant de Sion à la station de mesure mise en place par la FDPPMA 74.

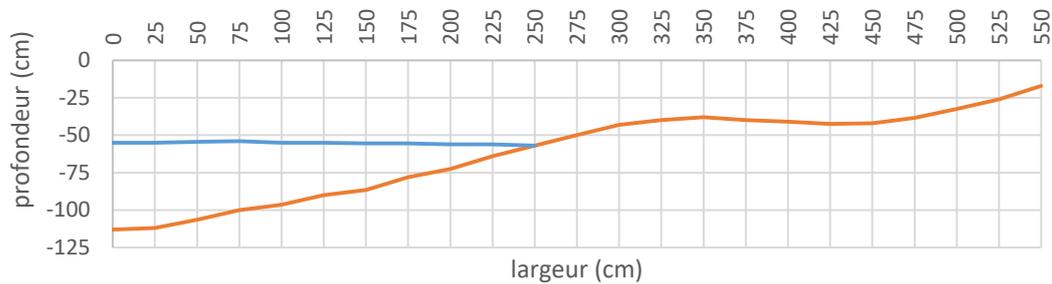


Figure 139 : Transect au droit de la station de mesure de débit du Nant de Sion à proximité de l'installation PIT-tag du pont de la RD19 – commune d'Arenthon.

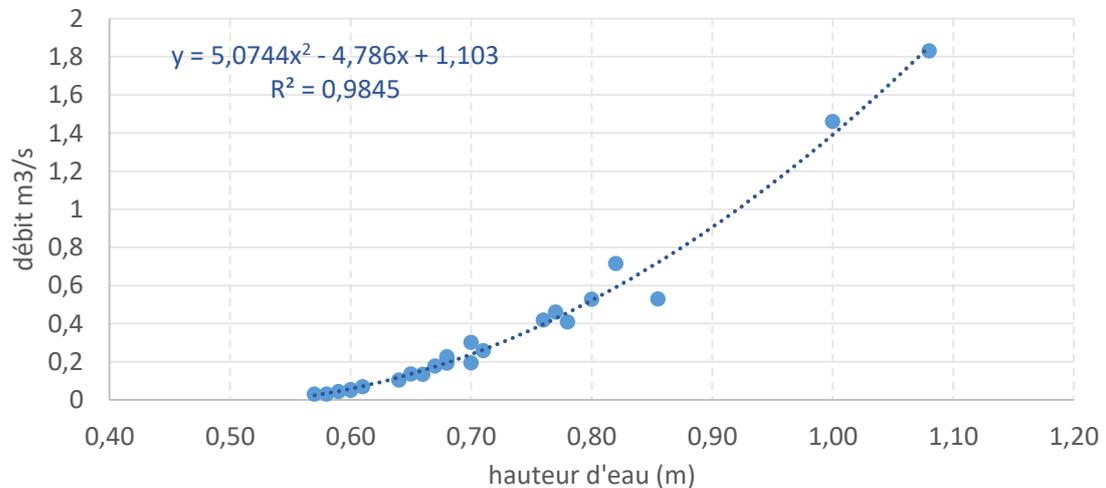
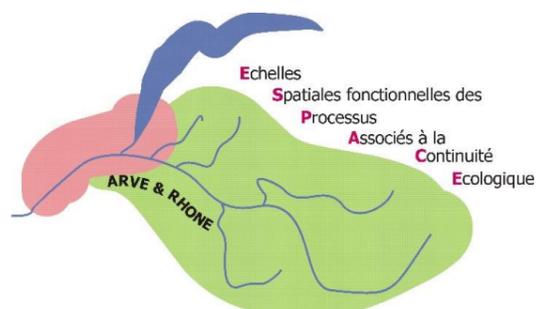


Figure 140 : Courbe de tarage pour le Nant de Sion à Arenthon (amont pont de la RD 19) définie en 2014-2015.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexe 5 : Tableaux des caractéristiques physiques, statuts et domaines vitaux des poissons marqués en radio.

➤ Truites fario

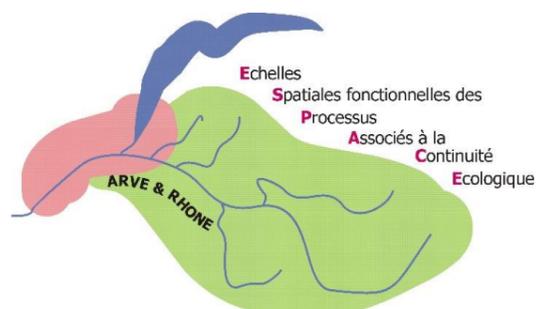
Fr-Code	Cours d'eau capture	durée suivi en jrs	Lt_mm	Poids (g)	Age	Profil génétique	Dom. Vit. Total	Dom. Vit. en phase de Repro	Statuts migration ³⁸
9703-13	Giffre	128	352	467,4	3+	Forte introgression	5663	5663	M
9703-14	Arve	104	335	377,6	3+	faible introgression	25132	3744	M
9703-18	Menoge	176	317	426,0	3+	faible introgression	401	295	S
9703-20	Borne	265	367	648,6	4+	MED pur	1983	497	S
9703-22	Borne	84	393	629,4	3+	MED pur	6800	112	M
9703-75	Nant De Sion	167	375	526,6	4+	Forte introgression	3100	2506	M
9732-14	Arve		420	926,5		MED pur			S
9732-15	Menoge	121	379	664,0		Forte introgression	11104	11104	M
9732-19	Arve	246	453	1025,2	3+	Forte introgression	40720	40720	M
9732-20	Arve	44	324	399,6	3+	Forte introgression	369	140	S
9732-22	Arve		333	422,2	3+	MED pur			S
9753-14	Borne	21	351	511,0		Forte introgression	167		S
9753-15	Giffre	41	356	507,8	2+	Forte introgression	1636		S
9753-22	Giffre		321	365,0	4+	Forte introgression			S
9753-23	Menoge		316	347,2	3+	MED pur			S
9802-11	Giffre	421	400	581,6	4	faible introgression	4053	4031	M
9802-12	Arve		375	485,6		Forte introgression			S
9802-13	Arve	259	380	507,2		MED pur	12676		M
9802-16	Arve	176	436	700,0	4	Forte introgression	935		S
9802-17	Arve	315	380	572,0		Forte introgression	27685	27670	M
9802-18	Arve	146	345	346,8	5	MED pur	5117		M
9802-21	Arve	40	360	530,6	3	Forte introgression	1302		S
9812-11	Arve	95	365	424,6	4	Forte introgression	421		S
9812-16	Arve	369	316	350,6	4	faible introgression	23307	10561	M
9812-19	Borne	440	367	523,0	5	faible introgression	261	206	S
9812-20	Arve	82	348	374,6		Forte introgression	1739		S
9812-8	Arve	301	342	385,8	4	Forte introgression	1096	1096	S
9812-9	Arve		338	430,6		MED pur			S
9823-13	Arve	55	334	395,6	4	faible introgression	186		S
9823-14	Arve	133	358	440,4	5	Forte introgression	10462		M
9823-20	Borne	440	349	478,6	3	MED pur	219	209	S
9823-8	Arve	49	332	346,0	3	Forte introgression			S
9872-24	Borne	209	520	1484,0		MED pur	114		S
9872-5	Borne	209	410	694,2	4	MED pur	399		S
9883-12	Arve	442	560	1698,0		MED pur	10575	10476	M
9883-20	Arve	35	416	674,6		faible introgression	554		S
9892-15	Borne	440	520	1149,2		MED pur	1297	1297	S
9892-18	Arve		469	1169,4		MED pur			S
9892-20a	Arve	42	464	961,2	5	Forte introgression	404		S
9892-20b	Arve	391	456	1053,0		MED pur	16939	7287	M
9892-23	Arve		466	1025,4	7	Forte introgression			S
9892-75	Arve	246	428	781,6		MED pur	34373	4860	M
9902-18	Arve	469	512	1426,0		Forte introgression	1951	517	S
9902-21	Menoge		357	621,0	3+	ATL pur			S
9902-22	Arve	446	410	598,6		Forte introgression	1213	832	S
9902-24	Arve	447	418	724,6	5	MED pur	11084	10904	M
9912-14	Borne	236	500	1270,0	5	faible introgression	453		S
9943-14	Arve	425	392	554,8	5	faible introgression	10244	10244	M
9943-17	Arve		355	455,0		MED pur			S
9943-18	Arve	47	407	610,8		faible introgression	951		S
9943-19	Arve	455	429	736,4	4	MED pur	6273	6201	M
9943-20	Borne	440	362	553,8	5	MED pur	2205	2205	S
9892-11	Menoge	9	390	700,4		Forte introgression			S
9453-26	Rhone	31	402	861,0	10+				S
9473-21	Rhone	30	368	506,0					S
9703-19	Rhone	NS	340	500					S
9732-18	Rhone	18	450	1353,0					S
9802-15	Rhone	42	385	672,0					S
9453-12	Rhone	251	533	1857,0			2792		S
9493-8	Rhone	87	445	980,0			7078		S
9823-9	Rhone	90	405	717,0					S
9883-16	Allondon	8	390	603,0					S
9943-15	Rhone	106	375	597,0			2118		S
9972-19	Rhone	114	640	3700,0			2092		S

³⁸ S = Sédentaire ; M = Migrant (statut fixé en fonction des distances de déplacements effectués).



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



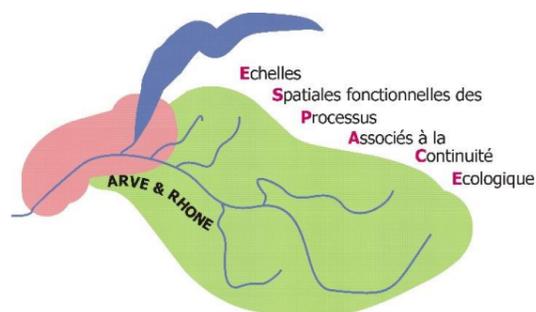
➤ Barbeaux fluviatiles

Code-Fr	Cours d'eau capture	durée suivi en jrs	Lt_mm	Poids (g)	Age	Dom. Vit. Total	Dom. Vit. en phase de Repro	Statuts migration
9412-11	Rhone	NS	471	870,0	7+			
9412-12	Rhone	NS	478	972,0	7+			
9412-14	Rhone	438	653	2160,0	9+	7103	7103	M
9412-17	Rhone	89	382	526,0	5+	8225	8225	M
9412-18	Rhone	437	541	1315,0	10+-11+	2054	2054	M
9412-6	Rhone	518	528	1628,0	8+	1722	1722	S
9412-8	Rhone	437	593	1957,0	8+-9+	1625	1625	M
9412-9	Rhone	138	452	863,0	9+	5261	5174	M
9433-13	Seymaz	370	577	1976,0		4153	4153	M
9433-15	Allondon	11	593	2138,0	10+			
9433-16	Rhone	28	600	2116,0				
9433-17	Rhone	134	656	2696,0		7078	7078	M
9433-18	Rhone	295	595	1836,0		6988	6988	M
9433-20	Rhone	46	550	1763,0		6973	6973	M
9732-13	Menoge	180	440	893,6	10+	280		S
9753-18	Arve	203	585	2312,0	7+	232		S
9823-22	Arve	139	460	954,0		2704	1538	M
9872-17	Arve	238	580	1688,4	6+	3474		M
9872-18	Arve	40	645	2423,0		2405		S
9872-21	Arve	85	495	1261,8		1808		S
9872-22	Arve	159	523	1167,8	7+	8909	7969	M
9872-23	Arve	491	558	1716,0		4288	4136	M
9872-6	Arve	382	535	1460,0	7+	18135	10115	M
9872-75	Arve	16	590	1602,0		300		S
9883-15	Arve	175	559	1817,0	7+	1366	1268	S
9883-23	Arve	92	530	1366,4	11+	1295		S
9883-75	Arve	38	600	2275,0	6+	318		S
9892-17	Arve	72	468	994,0		1525		S
9892-21	Arve	464	505	1408,0	11+	3190	2231	M
9892-24	Arve	464	560	1644,6	5+	752	430	S
9902-14	Arve	62	445	809,0		173		S
9902-17	Arve	464	593	1714,6		2275	423	M
9902-19	Arve	304	585	1637,0	7+	687	167	S
9912-15	Arve	491	520	1456,0	9+	1792	1536	M
9912-16	Arve	84	541	1295,0	6+	1251		S
9912-21	Menoge	441	510	1137,0	8+	1284	144	M
9943-16	Menoge	180	530	1357,0	10+	294		S
9943-21	Menoge	441	495	1095,0	9+	439	341	S
9943-23	Arve	260	581	1773,0	6+	3627	283	M
9943-24	Giffre	421	506	1352,0	7+	642	538	S
9433-9	Seymaz	385	363	428,0	6+	6799	6799	M
9972-14	Menoge	180	543	1519,8	13+	856		S
9972-15	Menoge	118	580	1697,0	10+	301	239	S
9972-17	Menoge	69	545	1752,0	13+	295		S
9972-20	Menoge	145	564	1735,0	7+	1563		S
9972-22	Menoge	62	570	1920,0	11+	503		S
9972-23	Menoge	59	554	1596,0	15	8041		M
9453-13	Rhone	344	585	2140,0		7079	7079	M
9453-15	Allondon	375	597	2322,0	10+	1065	1065	S
9453-19	Rhone	13	363	495,0				
9453-23	Rhone	311	470	948,0		7078	7078	M
9473-14	Rhone	28	488	1068,0				
9473-22	Rhone	318	566	1870,0		7132	7132	M
9473-75	Rhone	105	474	1147,0		8829	1517	M
9493-11	Rhone	337	590	2050,0		7261	7261	M
9493-17	Rhone	318	580	1896,0		7078	7078	M
9493-23	Rhone	5	536	1296,0				
9703-11	Arve	57	468	935,0				
9823-24	Arve	107	619	2303,0		7353	7353	M
9872-13	Rhone	NS	480	984,0				
9872-19	Rhone	209	500	1395,0		7136	7136	M
9883-22	Rhone	37	568	1655,0		6974	6974	M
9912-12	Rhone	343	575	1904,0		7124	7124	M
9972-13	Rhone	65	535	1318,0				
9972-18	Allondon	9	618	2064,0				



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



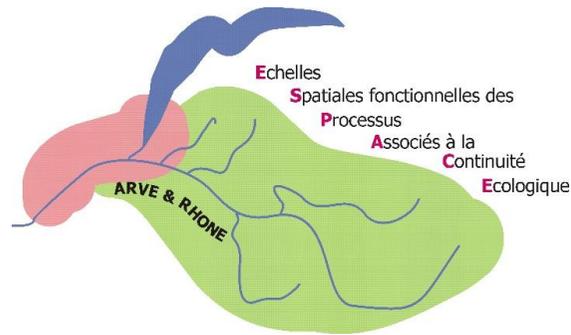
➤ Chevaines

Code-Fr	Cours d'eau capture	durée suivi en jrs	Lt_mm	Poids (g)	Age	Dom. Vit. Total	Dom. Vit. en phase de Repro	Statuts migration
9412-19	Rhone	418	485	1511,0	9+	1255	1255	S
9412-22	Rhone	137	463	1260,0	6+	1657	1625	S
9412-23	Rhone	325	402	861,0	10+			
9412-24	Seymaz	276	367	591,0		1444	1444	S
9412-26	Rhone	675	464	1300,0		3060	3060	M
9433-11	Seymaz	279	356	517,0	7+	3180	3180	M
9433-12	Rhone	41	368	570,0		421	421	S
9433-14	Rhone	4	428	1049,0				
9433-19	Rhone	29	368	506,0				
9433-21	Seymaz	239	405	792,0		11806	1597	S
9433-23	Rhone	41	390	700,0		427	427	S
9433-24	Allondon	113	345	558,0	5+	1782	1401	M
9433-26	Seymaz	109	436	955,0	7+	2932	2835	S
9433-5	Allondon	388	494	1566,0	7+	703	703	S
9433-6	Seymaz	357	410	883,0	6+	4302	4302	M
9433-75	Rhone	NS	357	504,0				
9433-8	Rhone	1	395	825,0				
9453-11	Rhone	224	356	612,0		1285	421	S
9453-18	Rhone	216	345	515,0		8029	4991	M
9453-22	Rhone	48	340	500,0		811	811	S
9453-24	Allondon	113	460	1189,0	7	1816	1816	M
9453-5	Allondon	113	421	939,0	8+	1278	1278	S
9453-75	Rhone	168	331	460,0		2995	788	M
9453-8	Rhone	309	444	1021,0		1368	1368	S
9453-9	Seymaz	51	368	556,0		2599	2599	M
9473-15	Allondon	136	398	741,0	6+	2465	401	M
9473-24	Allondon	520	456	1213,0	10+	740	740	S
9473-26	Seymaz	239	362	543,0		3661	1458	M
9473-9	Rhone	294	371	637,0		2229	2212	
9493-14	Seymaz	129	373	623,0		3340	1439	M
9493-15	Allondon	113	365	561,0	6+	296	296	S
9493-18	Seymaz	325	399	741,0		3509	3347	M
9493-24	Allondon	652	372	1385,0	9+	2606	2606	M
9493-5	Allondon	12	399	745,0				
9493-6	Rhone	60	359	497,0		423	423	S
9493-75	Rhone	92	388	595,0				
9703-15	Menoge	180	403	751,2	7+	342		S
9703-17	Menoge		365	698,0	8+			S
9703-8	Giffre	190	445	1186,6	10+	776		S
9732-23	Menoge	33	435	928,0	5+	290		S
9753-16	Menoge	180	416	954,8		1513		M
9753-19	Rhone	NS	340	500				
9802-14	Menoge		380	650,2	3+			S
9802-19	Arve	90	431	983,6	5+	340		S
9802-20	Arve	68	389	691,0	4+	1300		S
9753-8	Rhone	NS	450	1353,0				
9802-23	Arve	464	425	819,5	8+	4183	897	M
9812-13	Giffre	91	410	874,6	7+	801	774	S
9812-17	Arve		430	920,4				S
9812-18	Arve	140	442	1142,6	5+	1352		S
9812-21	Giffre	421	352	509,0	6+	676	375	S
9812-22	Giffre	421	423	984,2	7+	697	199	S
9802-22	Rhone	258	371	639,0		22685	10460	M
9802-8	Rhone	138	389	696,0		2178	2118	M
9823-17	Arve	154	410	958,4	9+	1344	9	S
9823-18	Arve	68	426	906,0	5+	652		S
9823-19	Arve	128	432	1076,0	5+	1097		M
9823-21	Arve	119	394	724,0	7+	905		S
9812-23	Rhone	6	372	585,0				
9872-15	Arve	464	449	1099,4		5108	1691	M
9872-20	Menoge		405	939,6	5+			S
9883-17	Arve		476	1176,0	8+			S
9883-18	Menoge	69	415	827,6		817		S
9883-21	Menoge	105	400	805,6	5+	4648	4325	M
9883-24	Giffre	30	440	1125,0		470		S
9892-16	Giffre	406	498	1622,8	8+	925	556	S
9812-24	Rhone	NS	428	919,0				
9823-23	Rhone	NS	385	672,0				
9902-16	Menoge	162	445	992,0	6+	1072	1072	S
9912-19	Arve	118	465	1284,2	5+	562		S
9912-22	Giffre	80	455	1267,4	6+	747	747	S
9912-24	Giffre	421	458	1217,6	9+	685	358	S
9943-22	Arve	112	442	1134,0		803		S
9892-19	Rhone	372	431	1097,0		11269	10416	M
9902-11	Rhone	17	401	879,0				
9902-75	Rhone	98	435	1140,0		1656	1656	S
9912-75	Rhone	131	410	913,0		10477	10359	S



h e p i a

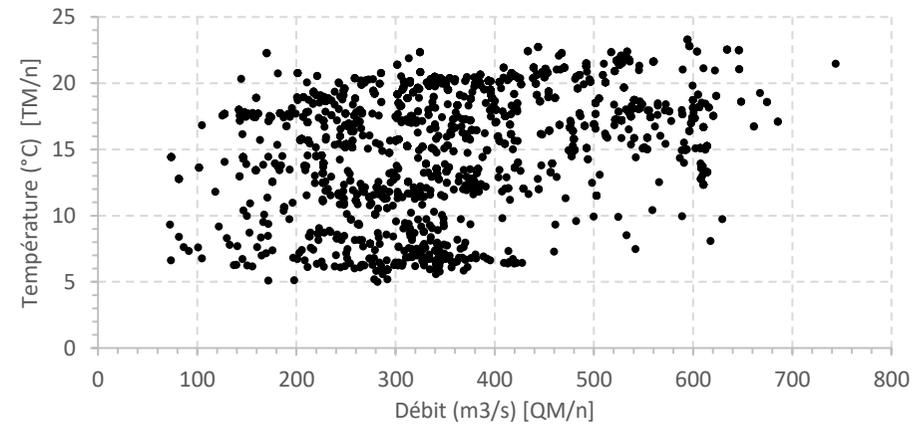
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexe 6 : Corrélations des variables de débit et de température (toutes espèces confondues).

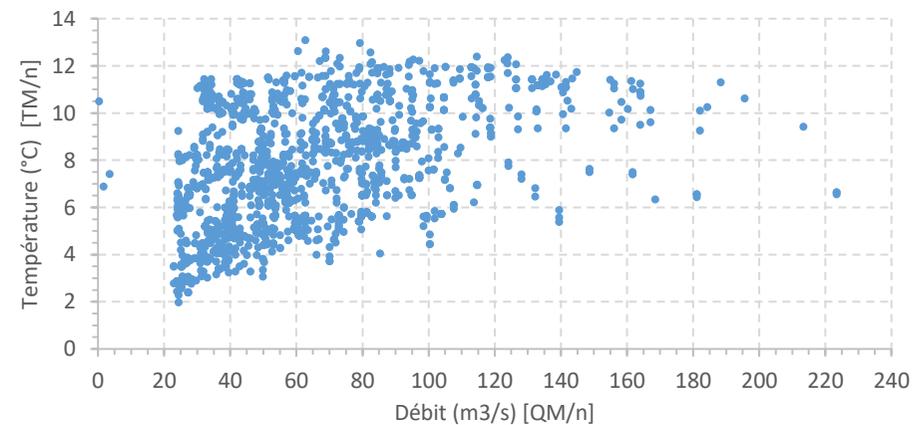
Rhône

Variables	QM/n	QM _{max}	QM _{min}	TM/n	TM _{max}	TM _{min}
Matrice de corrélation (Spearman)	QM/n	1				
	QM _{max}	0,858	1			
	QM _{min}	0,877	0,552	1		
	TM/n	0,311	0,227	0,328	1	
	TM _{max}	0,363	0,359	0,300	0,969	1
TM _{min}	0,241	0,064	0,352	0,958	0,867	1
p-values	QM/n	0				
	QM _{max}	< 0,0001	0			
	QM _{min}	< 0,0001	< 0,0001	0		
	TM/n	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0	
	TM _{max}	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0
TM _{min}	< 0,0001	0,004	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0



Arve

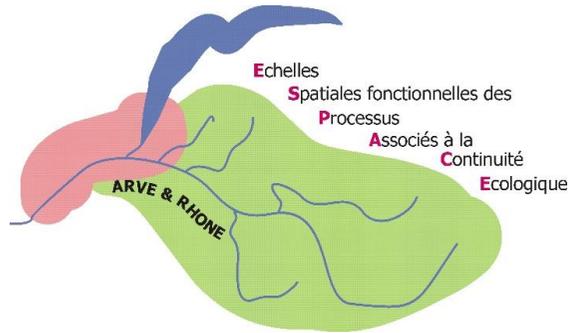
Variables	QM/n	QM _{max}	QM _{min}	TM/n	TM _{max}	TM _{min}
Matrice de corrélation (Spearman)	QM/n	1				
	QM _{max}	0,888	1			
	QM _{min}	0,905	0,651	1		
	TM/n	0,394	0,287	0,426	1	
	TM _{max}	0,412	0,337	0,411	0,983	1
TM _{min}	0,373	0,233	0,438	0,981	0,935	1
p-values	QM/n	0				
	QM _{max}	< 0,0001	0			
	QM _{min}	< 0,0001	< 0,0001	0		
	TM/n	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0	
	TM _{max}	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0
TM _{min}	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0





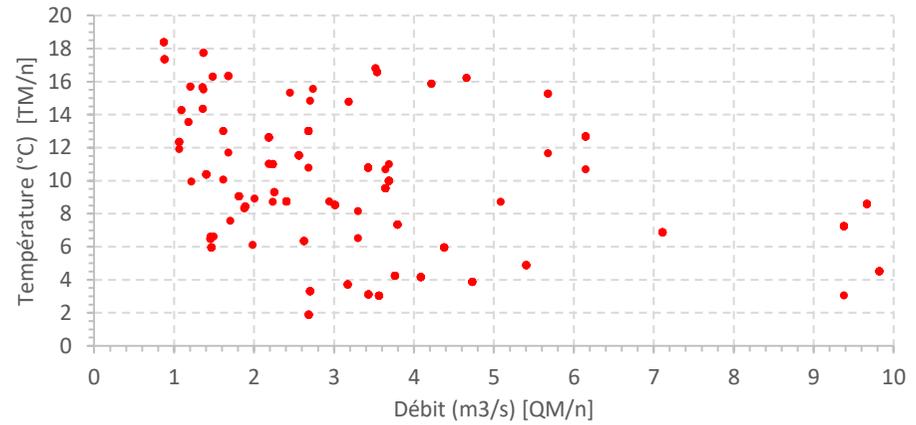
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



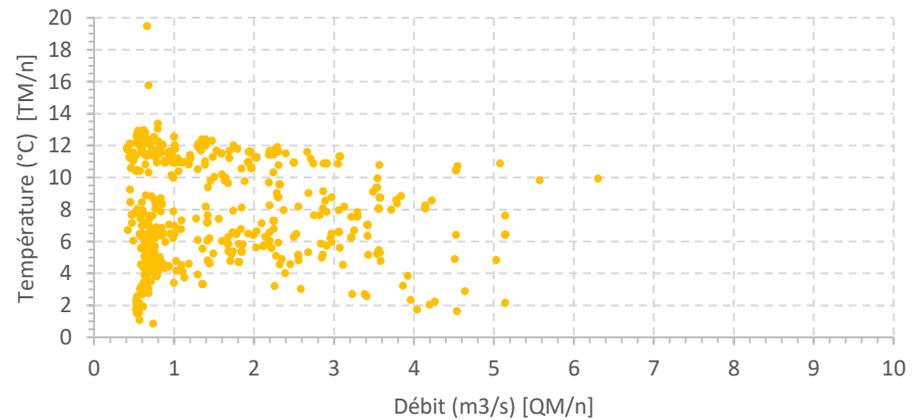
Menoge

Variables		QM/n	QM _{max}	QM _{min}	TM/n	TM _{max}	TM _{min}
Matrice de corrélation (Spearman)	QM/n	1					
	QM _{max}	0,813	1				
	QM _{min}	0,949	0,617	1			
	TM/n	-0,125	-0,178	-0,116	1		
	TM _{max}	-0,124	-0,180	-0,114	0,989	1	
TM _{min}	-0,105	-0,150	-0,104	0,984	0,956	1	
p-values	QM/n	0					
	QM _{max}	< 0,0001	0				
	QM _{min}	< 0,0001	< 0,0001	0			
	TM/n	0,033	0,002	0,048	0		
	TM _{max}	0,036	0,002	0,052	< 0,0001	0	
TM _{min}	0,073	0,010	0,078	< 0,0001	< 0,0001	0	



Borne

Variables		QM/n	QM _{max}	QM _{min}	TM/n	TM _{max}	TM _{min}
Matrice de corrélation (Spearman)	QM/n	1					
	QM _{max}	0,949	1				
	QM _{min}	0,980	0,872	1			
	TM/n	0,057	0,092	0,033	1		
	TM _{max}	0,046	0,090	0,016	0,930	1	
TM _{min}	0,062	0,090	0,042	0,937	0,941	1	
p-values	QM/n	0					
	QM _{max}	< 0,0001	0				
	QM _{min}	< 0,0001	< 0,0001	0			
	TM/n	0,150	0,020	0,398	0		
	TM _{max}	0,239	0,021	0,678	< 0,0001	0	
TM _{min}	0,118	0,021	0,291	< 0,0001	< 0,0001	0	

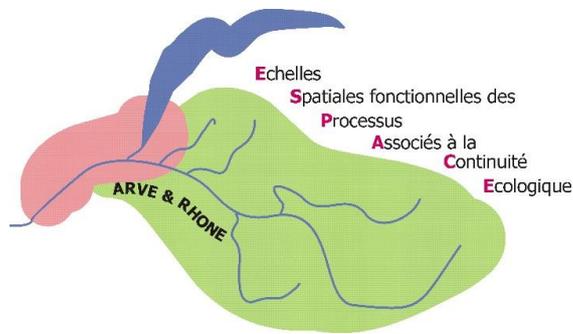


Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha=0,05.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



▪ Annexe 7 : Nombres de mouvements validés et non validés pour le calcul du taux de mobilité pendant toute la durée du suivi et pendant la période de reproduction.

➤ Truites fario

		Arve	Borne	Rhône
Durée totale du suivi	Mouvements validés	331	131	24
	Mouvements non validés	659	611	92
	Total	990	742	116
	Pourcentage taux de mobilité	33	18	21
Période de reproduction	Mouvements validés	198	81	
	Mouvements non validés	287	302	
	Total	485	383	
	Pourcentage taux de mobilité	41	21	

➤ Barbeaux fluviatile

		Arve	Menoge	Rhône	Giffre
Durée totale du suivi	Mouvements validés	296	46	441	13
	Mouvements non validés	655	195	814	45
	Total	951	241	1255	58
	Pourcentage taux de mobilité	31	19	35	22

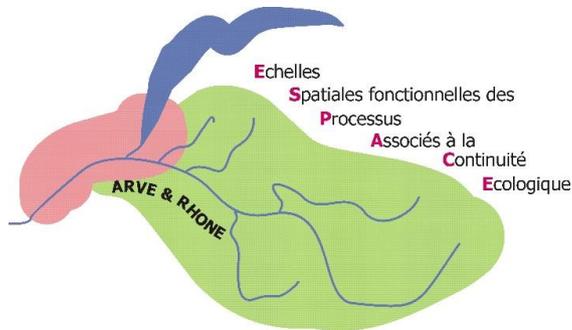
➤ Chevaines

		Arve	Menoge	Rhône	Giffre
Durée totale du suivi	Mouvements validés	96	28	253	61
	Mouvements non validés	186	65	353	223
	Total	282	93	606	284
	Pourcentage taux de mobilité	34	30	42	21

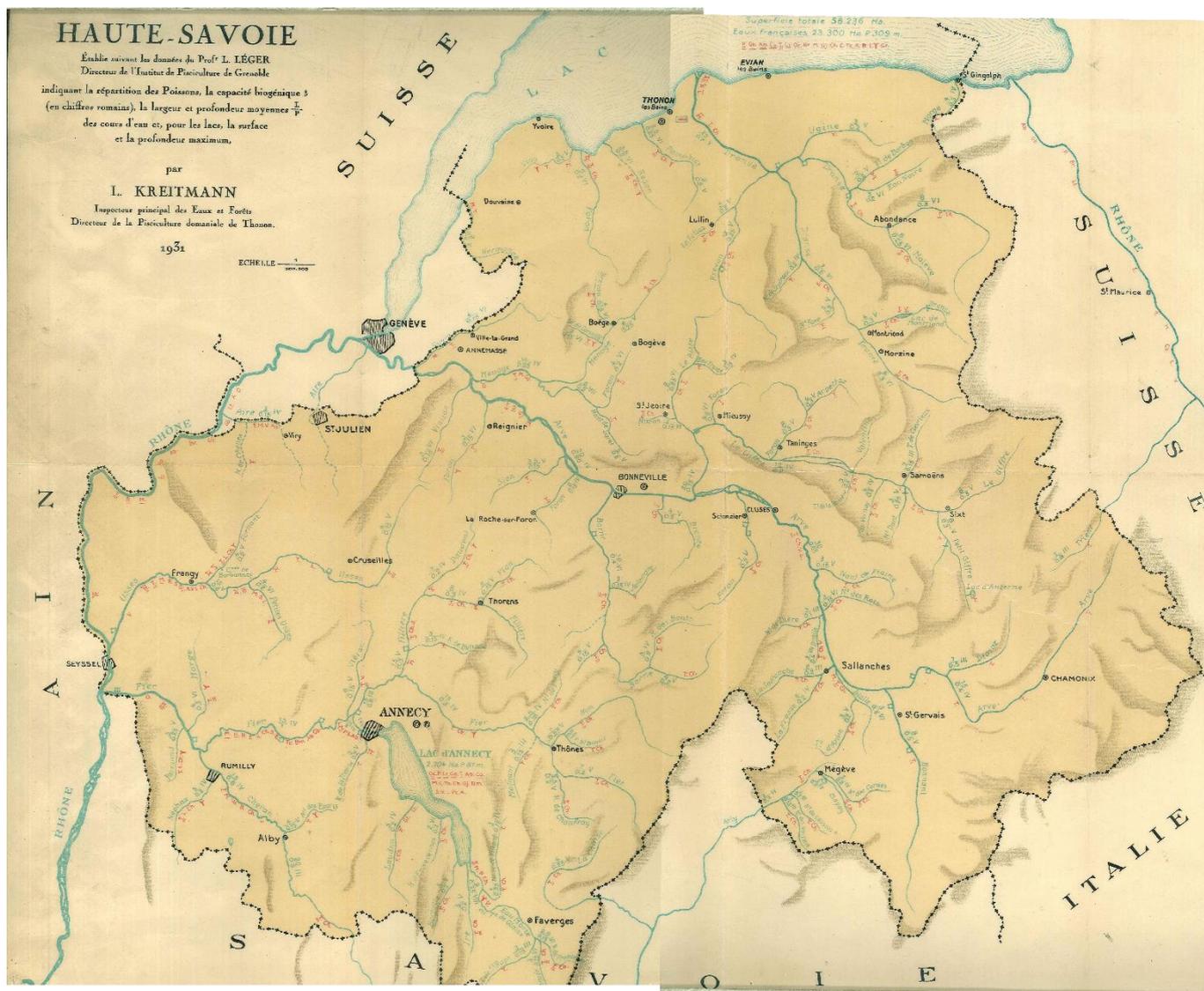


h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- Annexe 8 : Carte de Kreitman (1931) répertoriant la présence et l'abondance des espèces sur le département de la Haute-Savoie.



Signes abrégés des Poissons.

Les diverses espèces de poissons existant dans les cours d'eau sont indiquées par des lettres conformément au tableau ci-dessous, exemple : la lettre **T** indique la présence de la Truite. La limite d'extension d'une espèce de poisson donnée est indiquée par une flèche surmontant la lettre abrégée **T** et dont la pointe est tournée vers la portion du cours d'eau habitée par l'espèce considérée.

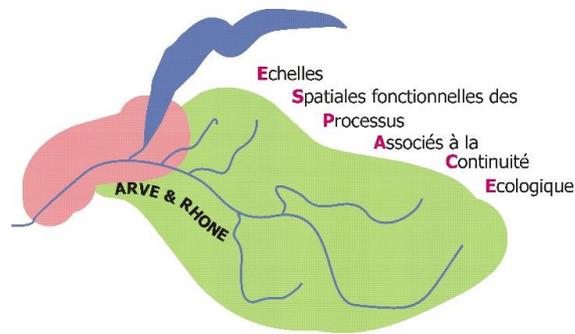
La fréquence relative de chaque espèce est indiquée par un ou deux traits placés en dessous de la lettre abrégée; l'absence de trait **T** indique seulement la présence du poisson dans le cours d'eau; un trait **I** indique que le poisson y est assez commun; deux traits **I** indiquent qu'il y est commun ou domine au point de vue de la faune piscicole.

A. Anguille commune, <i>Anguilla vulgaris</i> Flem.	L. Loche franche, Dormille, <i>Cobitis barbata</i> L.
Ab. Ablette commune, Mirandelle, <i>Alburnus lucidus</i> Heck.	Lt. Lotte commune, <i>Lota vulgaris</i> Cav.
As. Ablette spirin, <i>Alburnus bipunctatus</i> Bloch.	M. Meunier, Chevaîne, <i>Squalius cephalus</i> L.
B. Barbeau commun, <i>Barbus fluviatilis</i> Agass.	O. Ombre commun, <i>Thymallus agassizii</i> Ag.
Bm. Brème, <i>Abramis brama</i> L.	Oc. Omble chevalier, <i>Salvelinus umbla</i> L.
Br. Brochet, <i>Esox lucius</i> L.	P. Perche, <i>Perca fluviatilis</i> L.
Ch. Chabot, Chavasseau, <i>Cottus gobio</i> L.	Pc. Poisson-chat, <i>Ameiurus nebulosus</i> Le Sueur.
C. Carpe, <i>Cyprinus carpio</i> L.	S. Suiffe, Blageon, <i>Thymallus agassizii</i> Heck.
Co. Fera, Gravenche et autres Corégones acclimatés.	T. Truite commune, <i>Salmo fario</i> L.
E. Epinoche, <i>Gasterosteus aculeatus</i> L.	Tc. Tanche, <i>Tinca vulgaris</i> Cav.
Gb. Gardon blanc, Véron, <i>Leuciscus rutilus</i> L.	V. Vairon commun, Cuzeau, <i>Phoxinus phoxinus</i> Agass.
Gj. Goujon, <i>Gobio fluviatilis</i> Cav.	Vd. Vandoise, Dard, <i>Squalius leuciscus</i> L.
Gr. Gardon rouge, Rosse, <i>Scardinius erythrophthalmus</i> L.	Y. Ecrevisse, <i>Astacus pallipes</i> Lereb.
H. Hotu, Nase, <i>Chondrostoma nasus</i> L.	



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



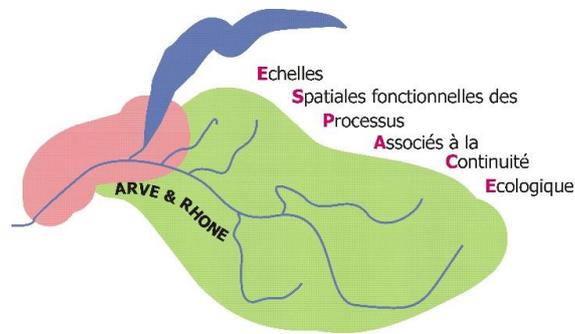
■ Annexe 9 : Caractéristiques des individus marqués par radio détectés sous le barrage de Verbois.

ID	Espèce	Longueur Totale (mm)	Poids (g)	Temps de présence (h)	Date d'arrivée
9412.14	BAF	653	2160	478	12/07/2013
9433.13	BAF	577	1976	2	27/04/2014
9433.16	BAF	600	2116	45	18/06/2014
9433.17	BAF	656	2696	194	19/06/2014
9433.18	BAF	595	1836	34	19/06/2014
9433.20	BAF	550	1763	186	02/06/2014
9453.12	TRF	533	1857	23	23/06/2014
9453.13	BAF	585	2140	438	09/05/2014
9453.16	TRL	710	2870	17	23/06/2014
9453.23	BAF	470	948	131	02/06/2014
9473.22	BAF	566	1870	293	03/06/2014
9493.11	BAF	590	2050	501	08/05/2014
9493.17	BAF	580	1896	95	03/06/2014
9872.19	BAF	500	1395	146	19/05/2014
9883.22	BAF	568	1655	75	09/06/2014
9912.12	BAF	575	1904	132	20/05/2014
9943.15	TRF	375	597	14	12/04/2014
9972.19	TRF	640	3700	792	28/05/2014



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



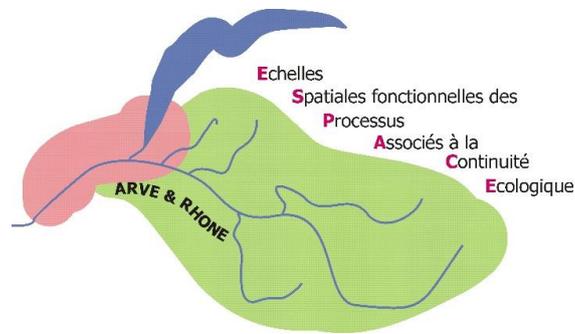
■ Annexe 10 : Caractéristiques des individus marqués par radio détectés sous le barrage de Chancy-Pougny.

ID	Espèce	Longueur Totale (mm)	Poids (g)	Temps de présence (h)	Date d'arrivée
9412-6	BAF	382	526	1945	11/07/2013
9412-8	BAF	541	1315	110	04/06/2014
9412-17	CHE	463	1260	14	13/07/2013
9412-18	BAF	528	1628	399	13/04/2014
9412-22	BAF	593	1957	40	11/07/2013
9433-15	BAF	593	2138	32	11/07/2013
9433-24	CHE	345	558	12	30/08/2013
9453-12	TRF	533	1857	39	23/06/2014
9453-15	BAF	597	2322	1	09/04/2014
9453-24	CHE	460	1189	884	10/07/2013
9453-26	TRF	486	1310	163	21/06/2014
9473-14	BAF	488	1068	431	04/06/2014
9473-15	CHE	398	741	6	21/08/2013
9493-5	CHE	372	1385	58	13/07/2013
9493-24	CHE	399	745	61	15/07/2013
9972-18	BAF	618	2064	2	05/04/2014



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



▪ **Annexe 11 : Caractéristiques des individus marqués par radio détectés sous les autres barrages équipés.**

Barrage d'Arthaz-Pont-Notre-Dame.

ID	Espèce	Longueur Totale (mm)	Poids (g)	Temps de présence (h)	Date d'arrivée
9732-19	TRF	453	1025	211	16/09/2014
9802-17	TRF	380	572	106	14/11/2014
9812-16	TRF	316	350	26	30/09/2014
9892-75	TRF	428	781	215	09/09/2014

Barrage de Vessy.

ID	Espèce	Longueur Totale (mm)	Poids (g)	Temps de présence (h)	Date d'arrivée
9823-24	BAF	619	2303	15	21/04/2014
9872-22	BAF	523	1167	48	18/06/2014
9883-18	CHE	415	827	10	18/04/2014
9943-23	BAF	581	1773	199	12/09/2014
9972-23	BAF	554	1596	15	26/12/2014

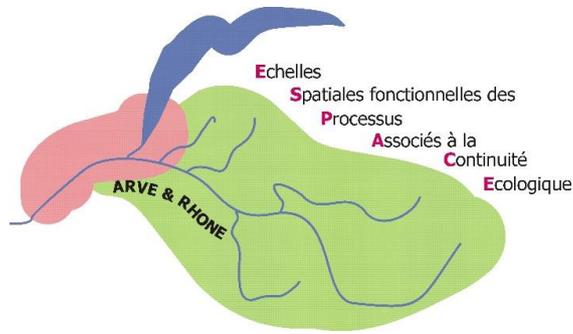
Barrage du Seujet.

ID	Espèce	Longueur Totale (mm)	Poids (g)	Temps de présence (h)	Date d'arrivée
9433-22	BAF	698	4776	12	10/06/2014
9453-13	BAF	585	2140	1	17/10/2014
9493-14	CHE	373	623	1	02/10/2014
9493-16	BAF	565	1677	5	03/07/2014
9493-18	CHE	399	741	1	08/07/2014
9753-16	CHE	416	954	1	16/02/2014
9892-19	CHE	431	1097	2	19/09/2014



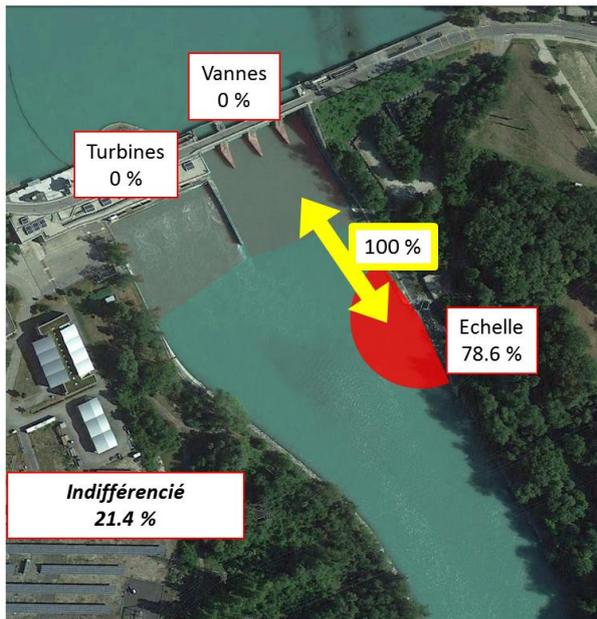
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

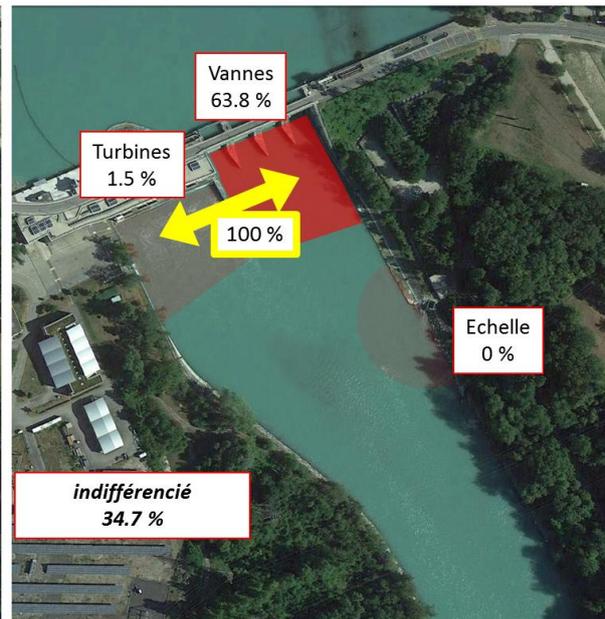


Annexe 12 : Exemples de comportement individuel sous le barrage de Verbois (truites fario).

Truite de rivière 9943-15



Truite de rivière 9972-19



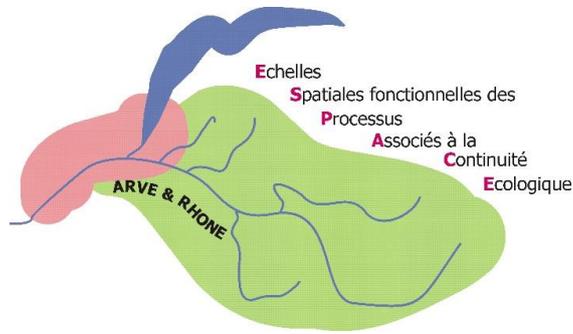
Lieu de lâcher	Port Aire-la-Ville
Première approche	Vannes
Temps de présence	14h
Taux de transition	0.21 transitions/heure

Lieu de lâcher	Port Aire-la-Ville
Première approche	Vannes
Temps de présence	792 h
Taux de transition	0.02 transitions/heure



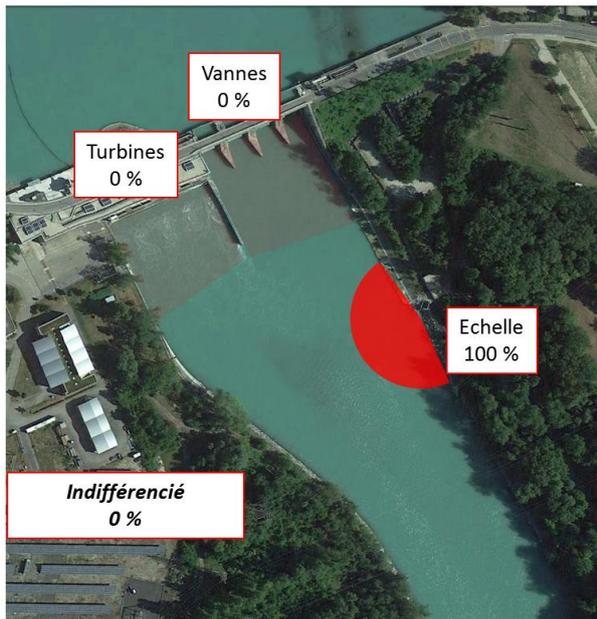
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

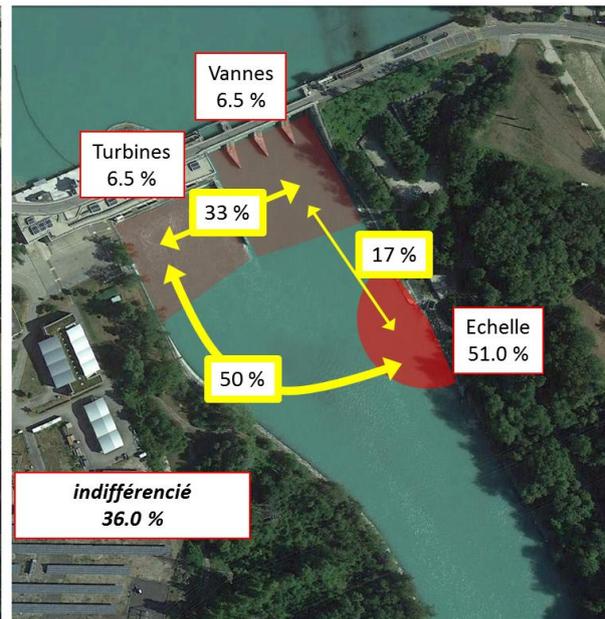


Annexe 13 : Exemples de comportement individuel sous le barrage de Verbois (barbeaux fluviatiles).

Barbeau 9883-22



Barbeau 9433-16



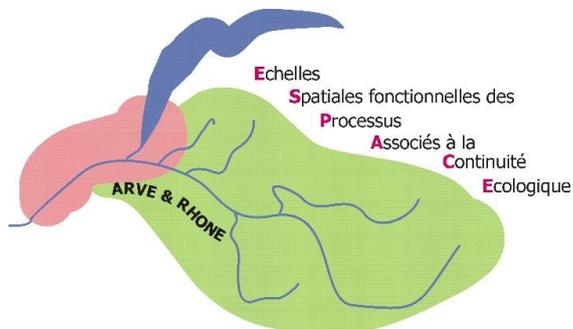
Lieu de lâcher	Retenue Chancy-Pougny
Première approche	Passé
Temps de présence	75h
Taux de transition	0.05 transitions/heure

Lieu de lâcher	Retenue Chancy-Pougny
Première approche	Turbines
Temps de présence	41 h
Taux de transition	0.27 transitions/heure



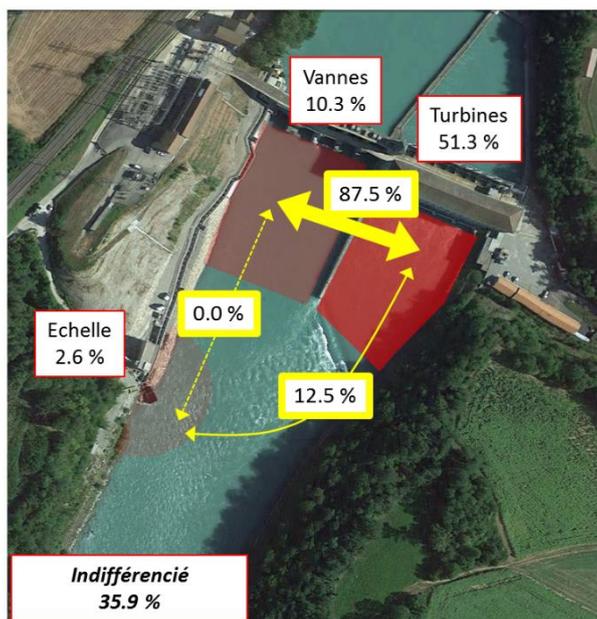
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



▪ Annexe 14 : Exemples de comportement individuel sous le barrage de Chancy-Pougny (truites fario).

Truite de rivière 9453-12

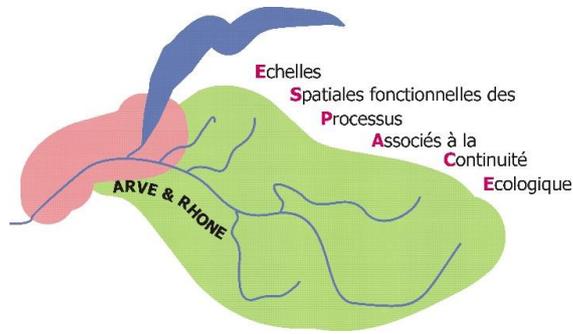


Lieu de lâcher	Embouchure Laire
Première approche	Passe
Temps de présence	39h
Taux de transition	0.21 transitions/heure



h e p i a

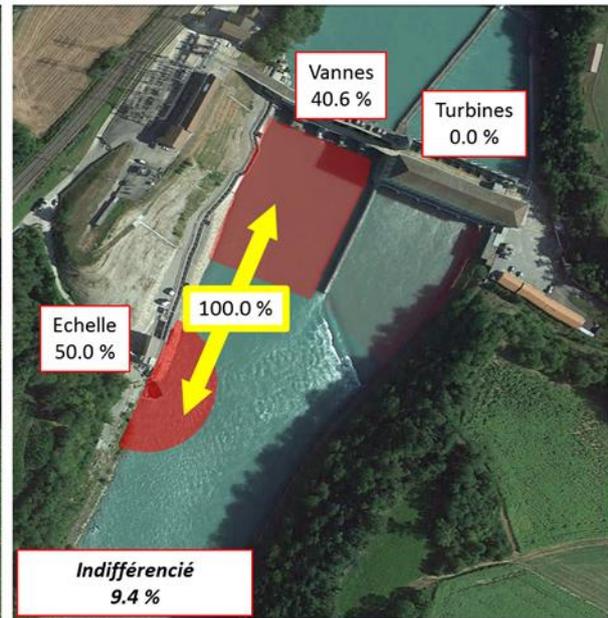
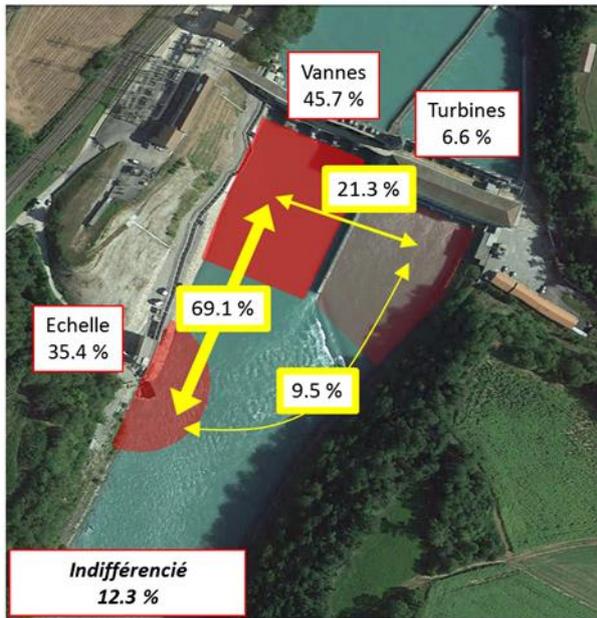
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexe 15 : Exemples de comportement individuel sous le barrage de Chancy-Pougny (barbeaux fluviatiles).

Barbeau 9412-06

Barbeau 9433-15



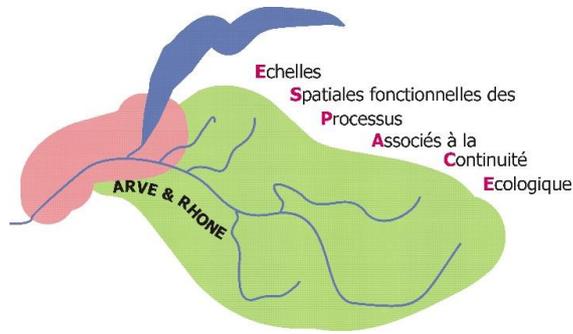
Lieu de lâcher	Embouchure Laire
Première approche	Passé
Temps de présence	1945 h
Taux de transition	0.31 transitions/heure

Lieu de lâcher	Embouchure Laire
Première approche	Vanne
Temps de présence	32 h
Taux de transition	0.03 transitions/heure



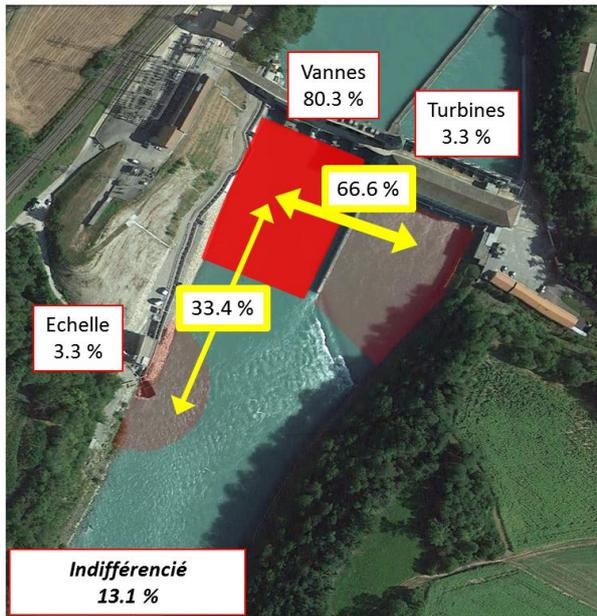
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

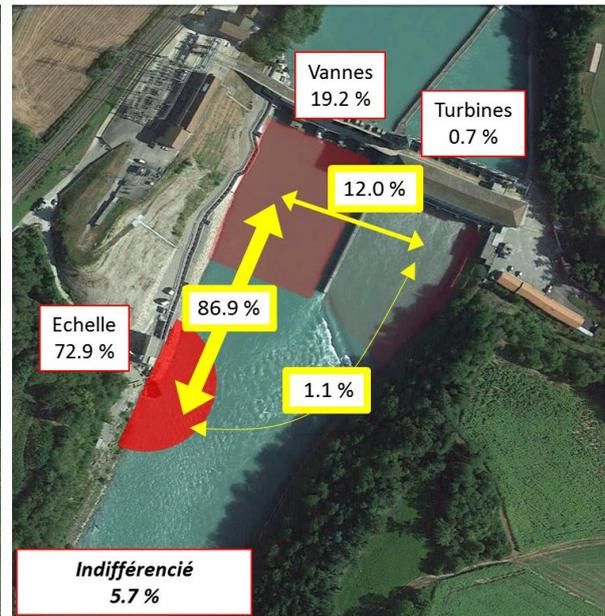


Annexe 16 : Exemples de comportement individuel sous le barrage de Chancy-Pougny (chevaines).

Chevaine 9493-24



Chevaine 9453-24



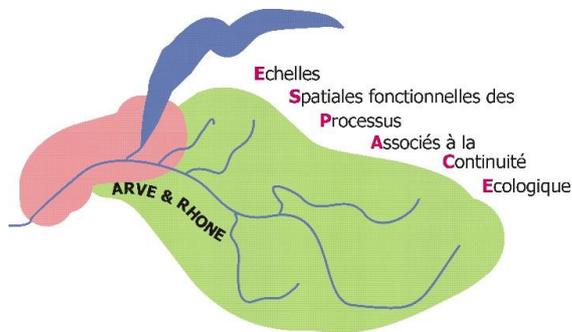
Lieu de lâcher	Embouchure Laire
Première approche	Vannes
Temps de présence	61 h
Taux de transition	0.10 transitions/heure

Lieu de lâcher	Embouchure Laire
Première approche	Vannes
Temps de présence	884 h
Taux de transition	0.10 transitions/heure



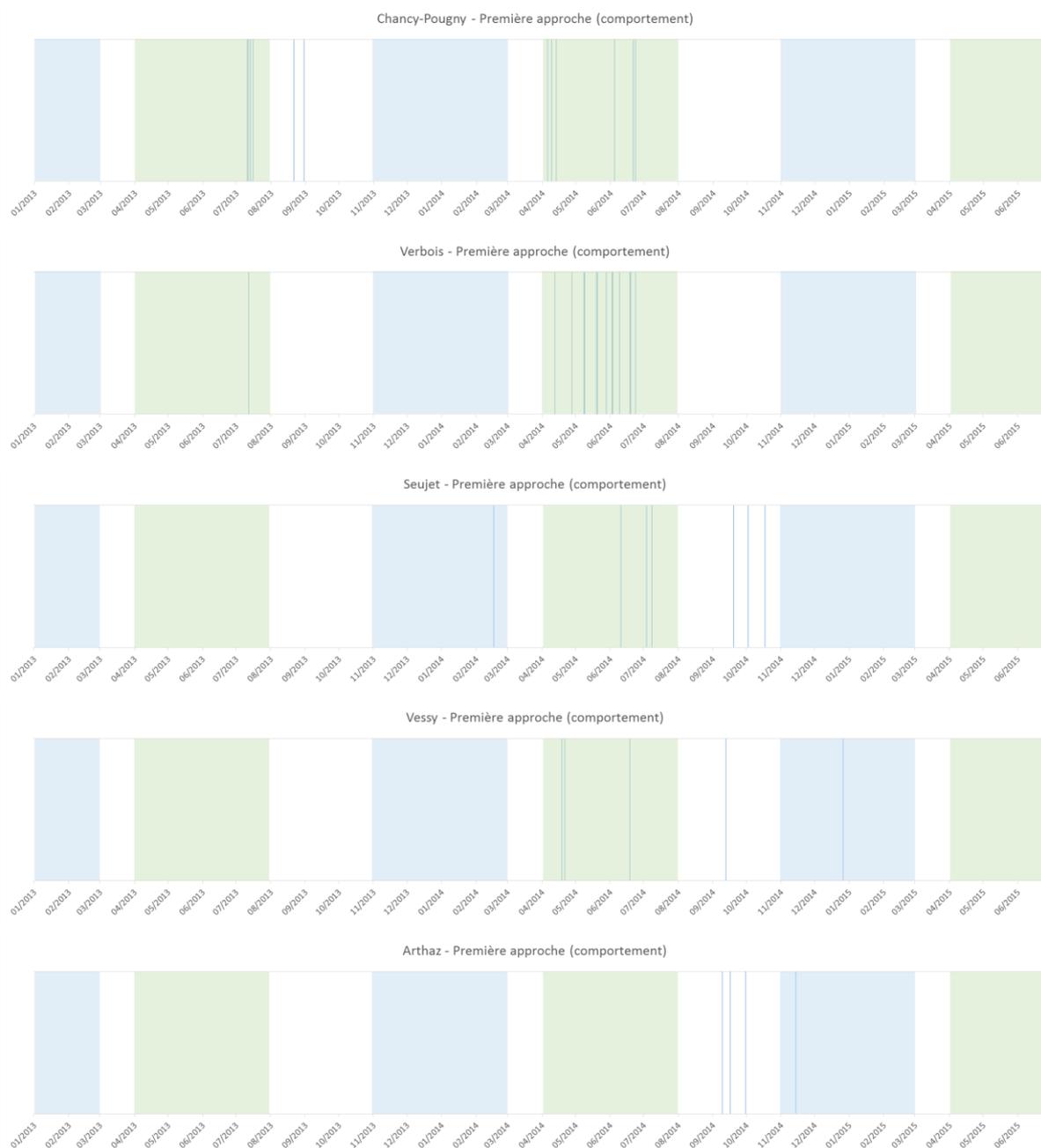
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexe 17 : Distribution dans le temps des premières approches (comportement sous le barrage ; traits verticaux) pour les 5 ouvrages étudiés.

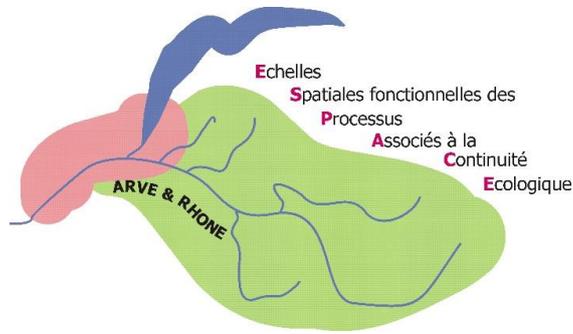
En bleu : période de reproduction des truites ;
 En vert : période de reproduction des Cyprinidés étudiés.





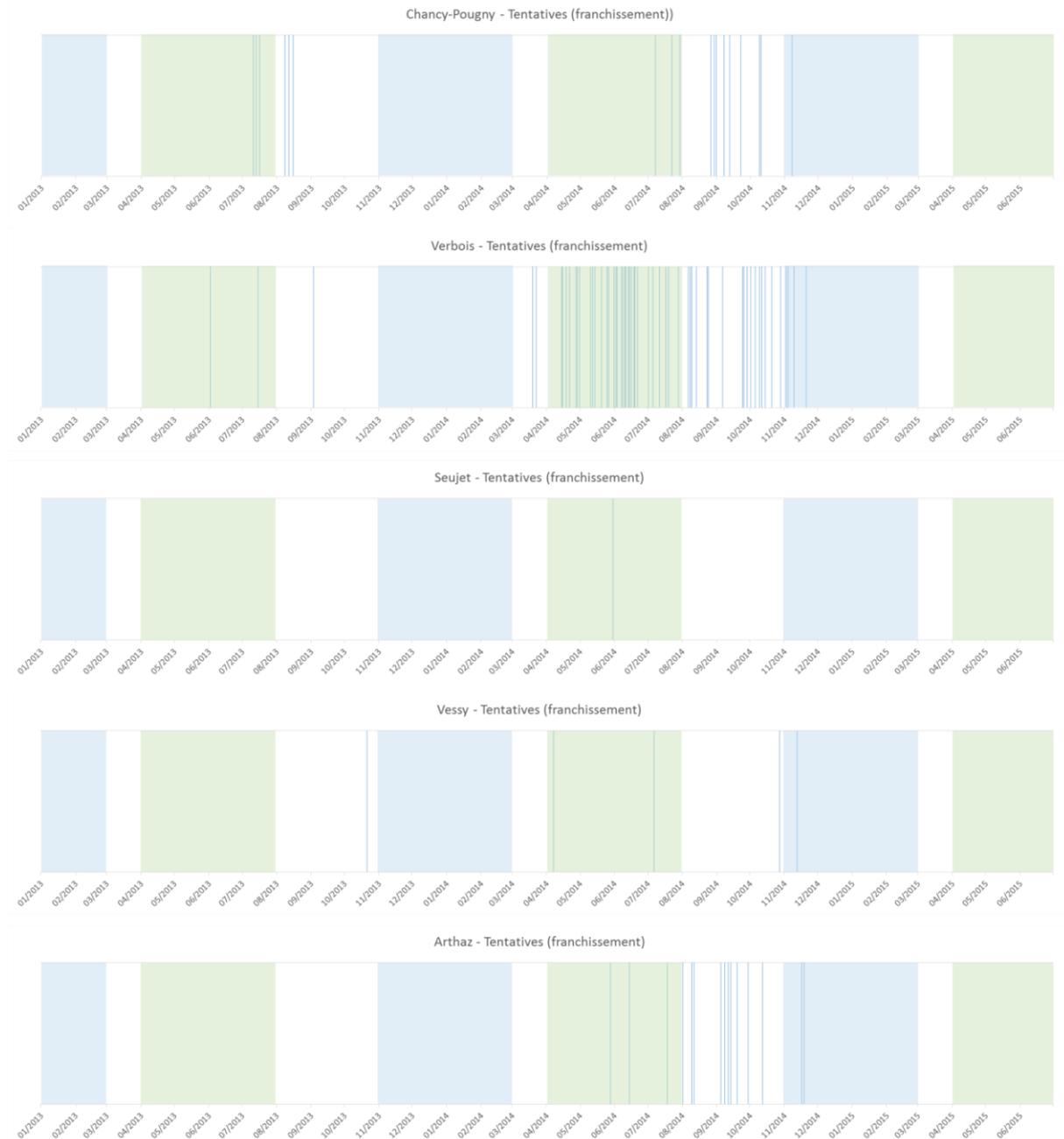
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexe 18 : Distribution dans le temps des tentatives de franchissements (traits verticaux) pour les 5 ouvrages étudiés.

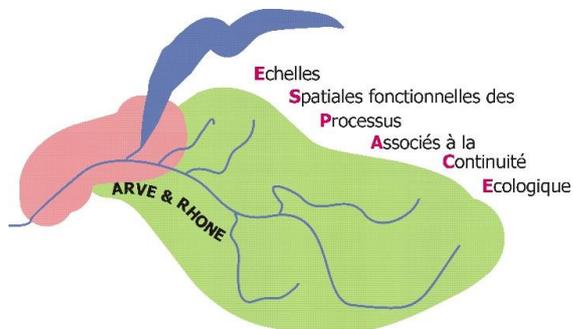
En bleu : période de reproduction des truites ;
 En vert : période de reproduction des Cyprinidés étudiés.





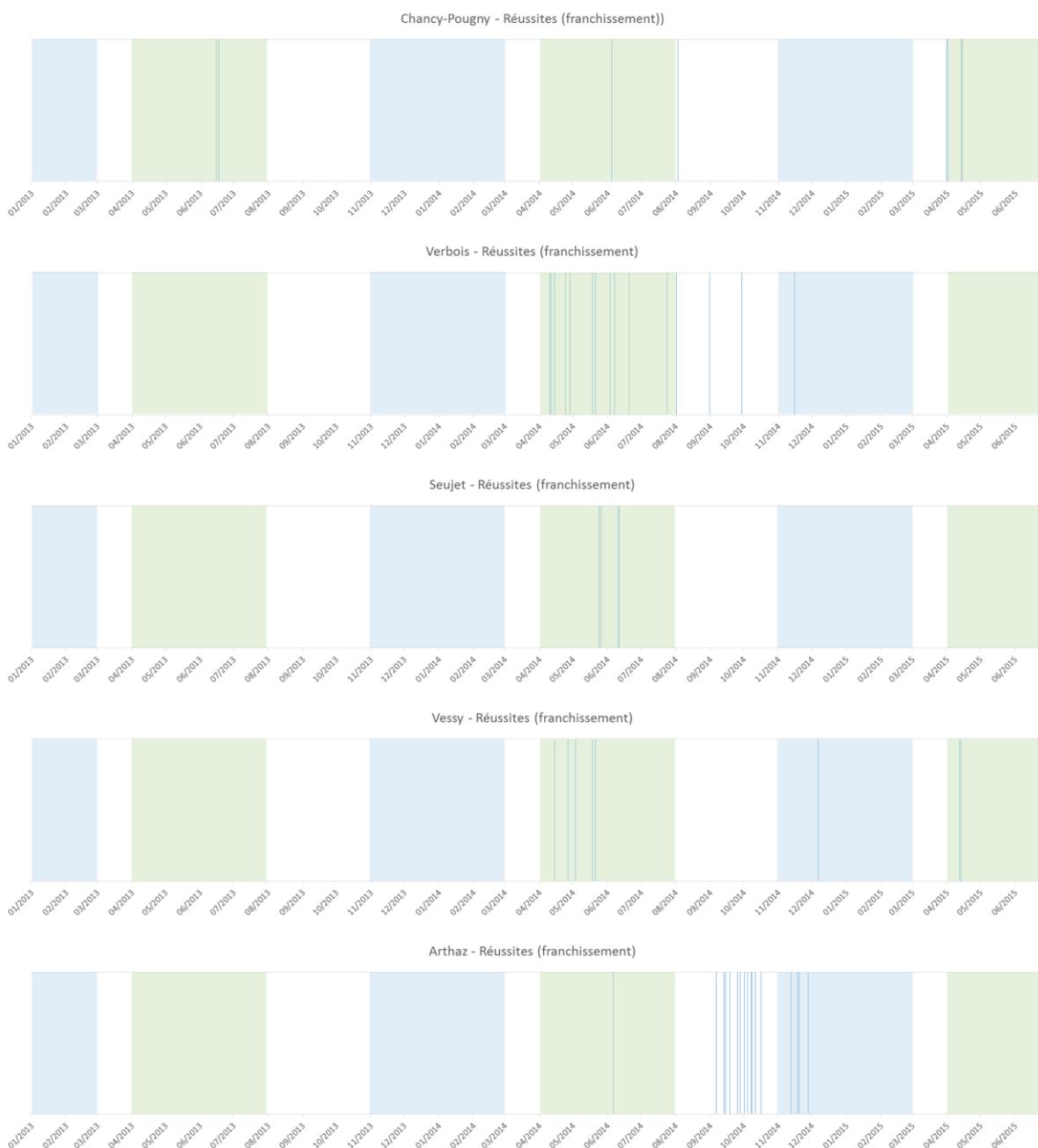
h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Annexe 19 : Distribution dans le temps des franchissements réussis (traits verticaux) pour les 5 ouvrages étudiés.

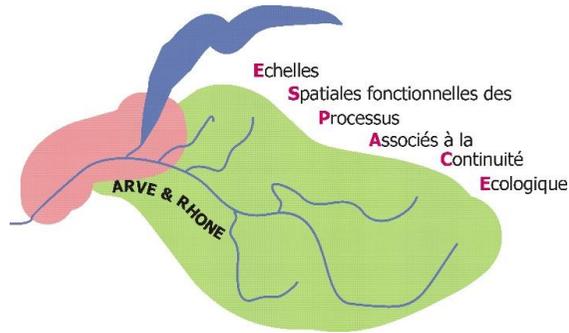
En bleu : période de reproduction des truites ;
 En vert : période de reproduction des Cyprinidés étudiés.



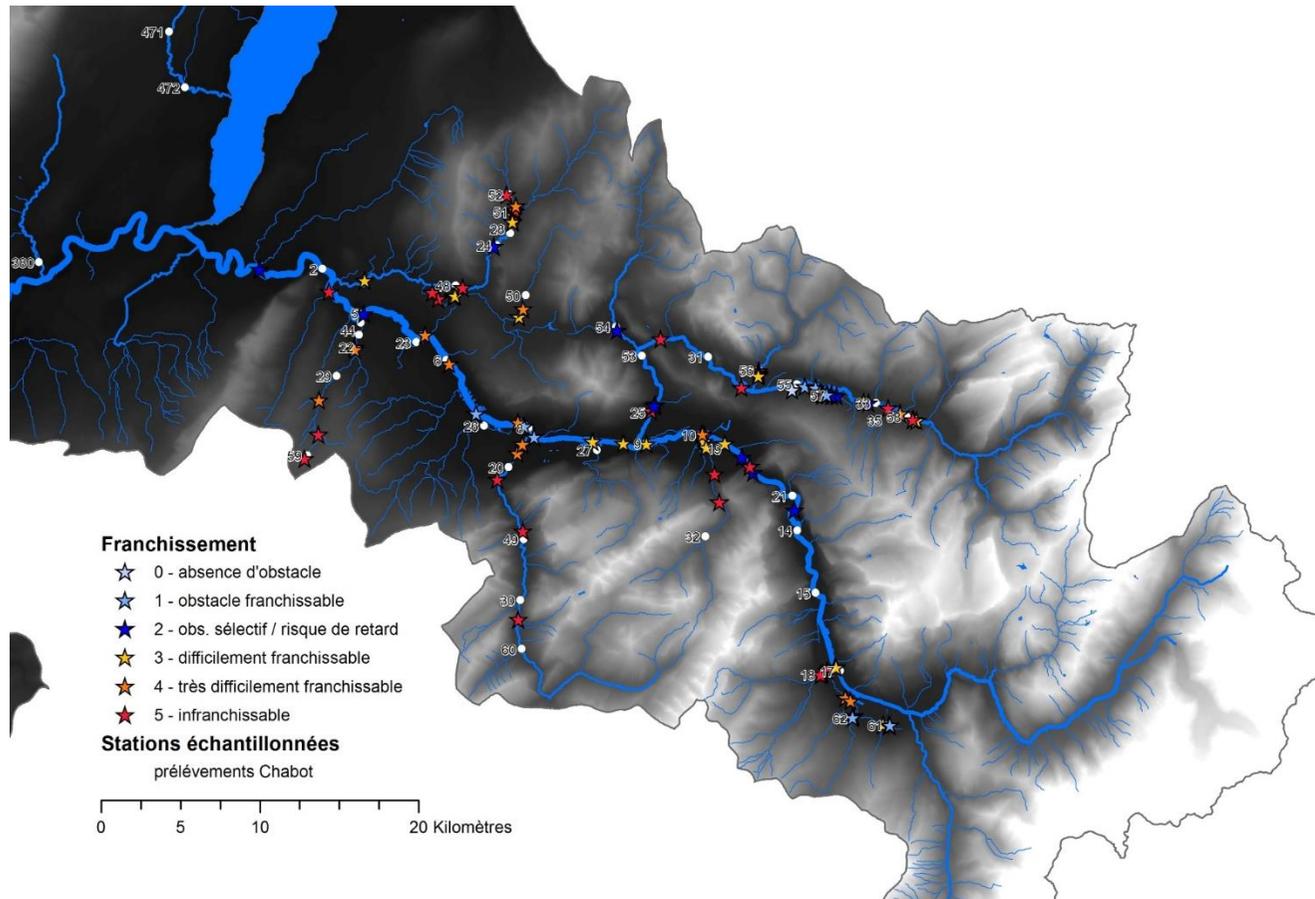


h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



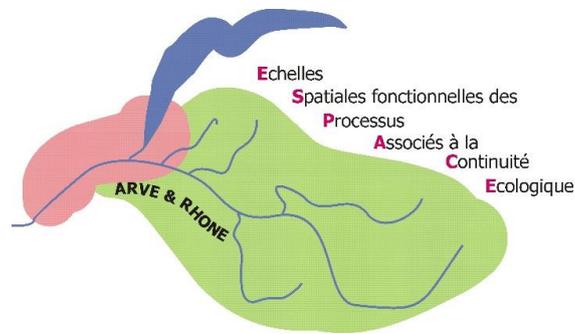
■ Annexe 20: Carte représentant les stations échantillonnées et les ouvrages localisés entre ces stations selon leur « franchissabilité »





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



■ Annexe 21: Détails des 2 kits d'amplification multiplex (Cg1 et Cg2) utilisés pour cette étude

Locus	Motif de base	Fluorochrome	Gamme de taille (pb)		nb allèles	nb génotypes
Cott708#	AC	FAM	97	107	4	9
Cco17	AAG	FAM	120	191	22	115
Cott686	GCA	FAM	234	254	7	18
CottES1#	AG	NED	80	92	7	13
LCE59	TG	NED	163	221	13	19
LCE88	AG	NED	238	261	13	30
Cott150#	GT	PET	92	117	10	24
Cott255	CT	PET	179	206	9	36
Cott138	CA	PET	271	296	9	22
Cott210#	GT	VIC	88	141	20	82
CottE13	GT	VIC	147	183	12	34
Cott588	TG	VIC	229	314	27	82

Kit Cg1

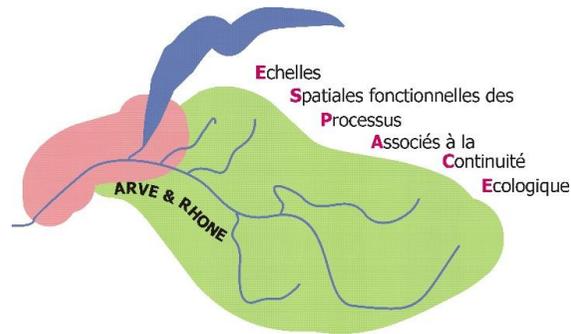
Locus	Motif de base	Fluorochrome	Gamme de taille (pb)		nb allèles	nb génotypes
Cgo1033PBBE	CA	FAM	90	112	8	24
LCB16	AC	FAM	149	174	-	-
LCE89	TATC	FAM	199	280	9	25
LCE43#	TG	A550	116	148	11	30
LCE46	TG	NED	189	197	2	3
CottE10	AC	NED	264	346	28	105
Cott687#	CT	PET	123	153	9	18
LCE78	TG	A565	186	196	4	8
Cgo56MEHU	GT	PET	231	280	17	53
Cott105	CA	PET	321	352	4	7
CottE6#	GT	VIC	72	85	-	-
Cgo1114PBBE	(GT)7.TT(GT)	VIC	121	127	2	3
LCE51	GT	YKY	244	296	15	50

Kit Cg2



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



■ Annexe 22 : Résultats détaillés par marqueur (23 microsattellites) pour chacune des 45 stations échantillonnées

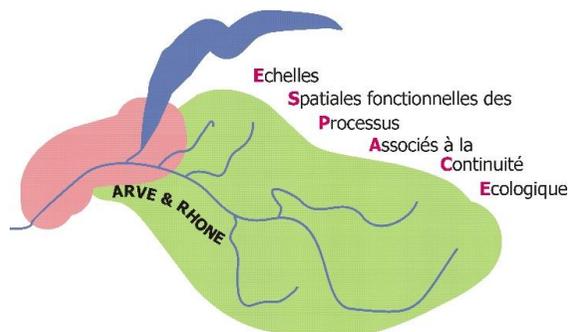
Pour chaque station, sont reportés : le nombre d'individus analysés (**N**), le nombre d'allèles observés par marqueur (**A**), la richesse allélique standardisée pour un effectif de 24 individus (**Ar**), les taux d'hétérozygotie observée (**Ho**) et attendue (**He**) et l'indice de fixation (**Fis**) (n.a. : non applicable).

Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotE51	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
61	27	A	7	4	2	3	1	4	4	7	3	4	3	2	4	7	5	3	5	2	4	2	2	5	3	86
		Ar	5,52	3,60	2,00	3,00	1,00	2,62	3,85	6,44	2,60	3,53	3,00	2,00	3,93	5,54	4,59	2,21	4,82	2,00	3,73	1,98	2,00	4,98	2,98	3,39
		Ho	0,67	0,63	0,26	0,48	0	0,37	0,74	0,7	0,56	0,41	0,44	0,37	0,63	0,89	0,7	0,15	0,74	0,3	0,44	0,11	0,33	0,56	0,67	0,48
		He	0,76	0,63	0,28	0,47	0	0,34	0,57	0,74	0,53	0,37	0,42	0,38	0,62	0,78	0,6	0,14	0,65	0,25	0,55	0,28	0,32	0,75	0,59	0,48
		Fis	0,128	-0,001	0,067	-0,031	n.a.	-0,098	-0,293	0,043	-0,044	-0,102	-0,066	0,036	-0,017	-0,147	-0,166	-0,064	-0,139	-0,174	0,195	0,600	-0,028	0,262	-0,129	-0,011
62	34	A	8	3	2	4	1	4	4	6	4	4	3	2	4	6	5	3	6	2	6	3	2	6	4	92
		Ar	6,31	3,00	2,00	3,65	1,00	3,32	2,98	5,96	2,95	2,52	3,00	2,00	3,46	5,26	4,65	2,50	4,64	1,89	5,18	2,46	2,00	4,84	3,73	3,45
		Ho	0,74	0,59	0,41	0,44	0	0,26	0,41	0,79	0,41	0,38	0,62	0,59	0,47	0,76	0,68	0,29	0,71	0,09	0,59	0,21	0,29	0,68	0,44	0,47
		He	0,75	0,59	0,48	0,48	0	0,26	0,48	0,8	0,4	0,38	0,61	0,44	0,6	0,74	0,61	0,25	0,6	0,08	0,59	0,19	0,25	0,67	0,43	0,47
		Fis	0,025	-0,001	0,150	0,087	n.a.	0,000	0,146	0,010	-0,033	-0,013	-0,016	-0,344	0,218	-0,035	-0,112	-0,155	-0,174	-0,046	0,010	-0,099	-0,172	-0,010	-0,019	-0,014
17	33	A	7	3	2	7	1	5	4	11	4	6	3	4	4	7	6	3	6	2	6	3	3	5	4	106
		Ar	6,76	3,00	2,00	6,40	1,00	3,94	4,00	8,79	3,42	3,77	2,99	2,51	3,97	5,84	5,31	2,77	4,84	2,00	3,31	2,75	2,52	4,97	3,53	3,93
		Ho	0,76	0,7	0,42	0,76	0	0,48	0,73	0,85	0,45	0,64	0,7	0,61	0,61	0,82	0,79	0,24	0,64	0,27	0,55	0,24	0,45	0,64	0,52	0,56
		He	0,8	0,62	0,48	0,65	0	0,41	0,64	0,82	0,5	0,62	0,62	0,53	0,7	0,77	0,68	0,24	0,66	0,32	0,5	0,22	0,49	0,73	0,46	0,54
		Fis	0,053	-0,133	0,112	-0,159	n.a.	-0,189	-0,128	-0,029	0,086	-0,032	-0,130	-0,145	0,133	-0,060	-0,165	-0,002	0,029	0,138	-0,090	-0,109	0,070	0,123	-0,131	-0,033
18	34	A	9	3	2	4	1	4	4	9	3	3	4	3	4	7	4	2	4	2	6	3	2	6	3	92
		Ar	6,96	3,00	2,00	4,00	1,00	3,30	2,90	6,94	2,90	2,51	3,99	2,49	4,00	6,73	3,76	1,96	3,44	2,00	5,91	2,03	2,00	5,46	3,00	3,58
		Ho	0,79	0,71	0,41	0,65	0	0,26	0,68	0,74	0,32	0,47	0,71	0,56	0,38	0,85	0,41	0,03	0,18	0,32	0,82	0,06	0,44	0,71	0,56	0,48
		He	0,82	0,65	0,36	0,68	0	0,33	0,55	0,82	0,41	0,5	0,69	0,5	0,45	0,82	0,41	0,03	0,19	0,34	0,78	0,06	0,38	0,74	0,67	0,49
		Fis	0,027	-0,085	-0,144	0,048	n.a.	0,189	-0,219	0,103	0,209	0,061	-0,019	-0,115	0,152	-0,035	0,007	-0,015	0,069	0,059	-0,062	-0,023	-0,177	0,048	0,162	0,011



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

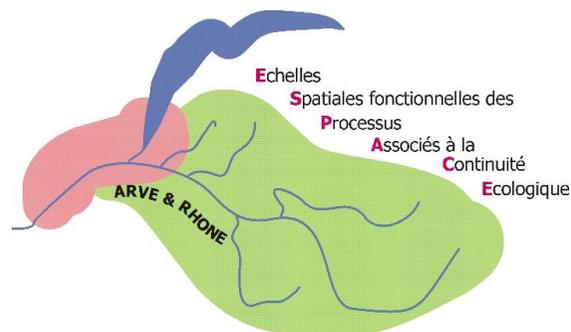


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
32	34	A	5	2	2	3	1	2	2	4	4	4	5	3	3	5	1	1	2	1	1	1	1	1	2	56
		Ar	4,88	2,00	1,75	3,00	1,00	2,00	2,00	4,00	3,91	3,94	4,52	2,93	3,00	4,01	1,00	1,00	1,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,49	2,32
		Ho	0,76	0,44	0,15	0,71	0	0,44	0,29	0,68	0,5	0,74	0,91	0,44	0,71	0,65	0	0	0,26	0	0	0	0	0	0,03	0,34
		He	0,72	0,45	0,14	0,66	0	0,5	0,39	0,68	0,5	0,66	0,73	0,37	0,65	0,64	0	0	0,27	0	0	0	0	0	0,03	0,32
		Fis	-0,063	0,015	-0,079	-0,065	n.a.	0,117	0,244	0,008	0,007	-0,118	-0,241	-0,201	-0,088	-0,007	n.a.	n.a.	0,024	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-0,015
19	33	A	7	4	2	7	1	4	3	5	5	4	4	4	3	7	2	1	4	1	2	1	2	5	1	79
		Ar	5,51	3,31	2,00	4,54	1,00	3,54	2,77	3,53	4,00	3,98	4,00	3,75	2,99	5,33	1,00	1,00	2,30	1,00	1,00	1,00	1,77	3,44	1,00	2,77
		Ho	0,79	0,33	0,33	0,76	0	0,58	0,39	0,61	0,73	0,64	0,85	0,36	0,67	0,73	0,03	0	0,15	0	0	0	0,03	0,09	0	0,35
		He	0,7	0,35	0,32	0,71	0	0,51	0,32	0,6	0,73	0,67	0,71	0,36	0,62	0,68	0,03	0	0,2	0	0,06	0	0,03	0,17	0	0,34
		Fis	-0,130	0,036	-0,054	-0,069	n.a.	-0,123	-0,224	-0,007	-0,001	0,053	-0,199	-0,014	-0,083	-0,075	-0,015	n.a.	0,227	n.a.	1,000*	n.a.	-0,015	0,469*	n.a.	-0,041
58	24	A	5	3	2	4	1	1	2	5	3	3	3	1	2	3	2	1	3	1	3	1	2	4	2	57
		Ar	4,51	2,95	1,88	4,00	1,00	1,00	2,00	4,61	2,99	3,00	3,00	1,00	1,99	2,88	2,00	1,00	2,88	1,00	2,86	1,00	1,99	3,96	2,00	2,41
		Ho	0,67	0,29	0,04	0,83	0	0	0,67	0,5	0,54	0,71	0,79	0	0,12	0,5	0,5	0	0,38	0	0,46	0	0,21	0,62	0,42	0,36
		He	0,64	0,32	0,04	0,73	0	0	0,49	0,47	0,57	0,66	0,63	0	0,12	0,56	0,41	0	0,37	0	0,51	0	0,19	0,7	0,41	0,34
		Fis	-0,044	0,094	-0,021	-0,136	n.a.	n.a.	-0,371	-0,069	0,042	-0,075	-0,248	n.a.	-0,067	0,106	-0,210	n.a.	-0,017	n.a.	0,110	n.a.	-0,116	0,108	-0,008	-0,055
35	30	A	4	3	1	4	1	1	2	5	3	3	4	1	2	4	2	1	3	2	2	1	2	4	2	57
		Ar	3,99	3,00	1,00	3,97	1,00	1,00	2,00	4,53	2,97	3,00	2,55	1,00	2,00	3,78	2,00	1,00	3,00	1,99	2,00	1,00	2,00	3,54	2,00	2,36
		Ho	0,43	0,53	0	0,73	0	0	0,6	0,63	0,4	0,73	0,77	0	0,27	0,7	0,4	0	0,43	0,2	0,47	0	0,57	0,73	0,23	0,38
		He	0,57	0,56	0	0,65	0	0	0,49	0,63	0,36	0,65	0,53	0	0,28	0,58	0,42	0	0,51	0,23	0,49	0	0,41	0,68	0,34	0,36
		Fis	0,236	0,050	n.a.	-0,126	n.a.	n.a.	-0,222	-0,009	-0,106	-0,125	-0,456	n.a.	0,040	-0,199	0,048	n.a.	0,159	0,135	0,050	n.a.	-0,395	-0,076	0,313	-0,054
33	30	A	3	3	2	4	1	2	2	7	3	5	4	2	2	4	2	1	3	2	3	1	2	4	2	64
		Ar	2,99	2,97	1,57	3,96	1,00	1,96	2,00	5,03	3,00	4,39	3,85	1,80	1,99	3,92	2,00	1,00	3,00	1,00	2,00	1,00	2,00	4,00	2,00	2,54
		Ho	0,5	0,57	0,03	0,57	0	0,1	0,47	0,47	0,63	0,63	0,53	0,07	0,13	0,47	0,6	0	0,63	0,03	0,6	0	0,43	0,5	0,4	0,36
		He	0,56	0,61	0,03	0,66	0	0,1	0,5	0,59	0,59	0,68	0,47	0,06	0,12	0,53	0,48	0	0,61	0,03	0,49	0	0,43	0,74	0,44	0,38
		Fis	0,110	0,075	-0,017	0,135	n.a.	-0,053	0,063	0,211	-0,068	0,070	-0,136	-0,035	-0,071	0,124	-0,250	n.a.	-0,045	-0,017	-0,218	n.a.	-0,001	0,324	0,100	0,043



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

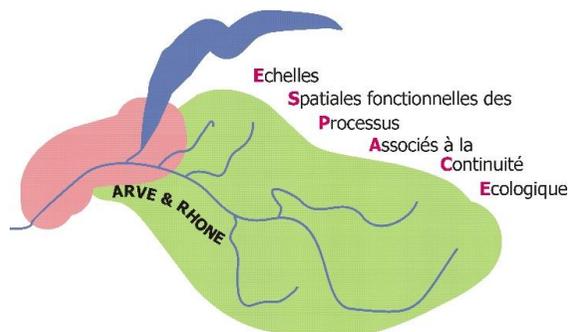


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
57	27	A	4	2	1	4	1	2	2	4	3	3	3	1	1	4	2	1	2	2	2	1	2	3	1	51
		Ar	3,86	2,00	1,00	3,99	1,00	1,00	2,00	3,96	3,00	2,60	3,00	1,00	1,00	3,61	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,98	1,00	2,13
		Ho	0,48	0,33	0	0,59	0	0,04	0,33	0,44	0,63	0,33	0,89	0	0	0,59	0,15	0	0,26	0,33	0,44	0	0,33	0,48	0	0,29
		He	0,65	0,28	0	0,62	0	0,04	0,4	0,59	0,58	0,33	0,63	0	0	0,65	0,3	0	0,23	0,28	0,38	0	0,4	0,52	0	0,3
		Fis	0,254	-0,200	n.a.	0,040	n.a.	-0,019	0,169	0,247	-0,094	-0,006	-0,404	n.a.	n.a.	0,089	0,509	n.a.	-0,149	-0,200	-0,157	n.a.	0,169	0,068	n.a.	0,029
55	27	A	4	3	2	4	1	2	2	5	3	3	3	1	2	4	2	1	3	1	2	1	2	4	2	57
		Ar	3,00	3,00	2,00	4,00	1,00	2,00	2,00	3,58	3,00	3,00	3,00	1,00	2,00	3,98	2,00	1,00	3,00	1,00	2,00	1,00	2,00	4,00	2,00	2,37
		Ho	0,59	0,48	0,11	0,85	0	0,22	0,67	0,48	0,52	0,63	0,63	0	0,44	0,52	0,37	0	0,63	0	0,48	0	0,26	0,85	0,56	0,4
		He	0,67	0,43	0,1	0,74	0	0,2	0,5	0,49	0,54	0,61	0,63	0	0,35	0,59	0,49	0	0,54	0	0,48	0	0,43	0,7	0,46	0,39
		Fis	0,112	-0,116	-0,059	-0,158	n.a.	-0,125	-0,335	0,010	0,042	-0,028	0,002	n.a.	-0,286	0,125	0,250	n.a.	-0,172	n.a.	-0,013	n.a.	0,399	-0,219	-0,218	-0,040
56	29	A	3	2	1	4	1	1	2	2	2	3	3	1	2	3	2	1	2	1	2	1	2	3	2	46
		Ar	2,00	1,81	1,00	3,93	1,00	1,00	2,00	1,58	2,00	3,00	2,93	1,00	2,00	3,00	2,00	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	2,00	3,00	2,00	1,92
		Ho	0,59	0,03	0	0,55	0	0	0,52	0,03	0,34	0,55	0,55	0	0,21	0,62	0,48	0	0,21	0	0,41	0	0,38	0,66	0,24	0,28
		He	0,51	0,03	0	0,63	0	0	0,49	0,03	0,37	0,63	0,54	0	0,19	0,51	0,45	0	0,33	0	0,45	0	0,38	0,62	0,31	0,28
		Fis	-0,143	-0,018	n.a.	0,122	n.a.	n.a.	-0,055	-0,018	0,058	0,121	-0,019	n.a.	-0,115	-0,220	-0,068	n.a.	0,370	n.a.	0,084	n.a.	0,011	-0,049	0,215	0,015
31	29	A	4	2	2	4	1	2	2	7	2	3	4	1	2	5	2	1	3	2	3	1	2	4	2	61
		Ar	3,97	1,92	1,00	4,00	1,00	1,00	2,00	3,52	2,00	3,00	3,59	1,00	2,00	4,55	2,00	1,00	2,84	1,59	2,59	1,00	2,00	3,81	2,00	2,32
		Ho	0,62	0,14	0,03	0,76	0	0,03	0,52	0,28	0,45	0,83	0,55	0	0,21	0,69	0,55	0	0,38	0,03	0,59	0	0,55	0,76	0,41	0,36
		He	0,61	0,13	0,03	0,74	0	0,03	0,5	0,31	0,41	0,66	0,68	0	0,19	0,66	0,49	0	0,37	0,03	0,51	0	0,49	0,71	0,4	0,35
		Fis	-0,021	-0,074	-0,018	-0,030	n.a.	-0,018	-0,035	0,104	-0,082	-0,260	0,183	n.a.	-0,115	-0,046	-0,115	n.a.	-0,037	-0,018	-0,143	n.a.	-0,137	-0,068	-0,036	-0,055
54	35	A	8	4	2	3	1	3	4	7	5	7	3	3	3	5	2	3	4	2	4	2	3	3	4	85
		Ar	5,71	3,50	2,00	2,97	1,00	1,00	3,49	5,21	3,98	5,14	2,99	2,00	3,00	2,73	2,00	2,71	3,98	1,95	3,87	1,74	3,00	2,76	3,76	3,06
		Ho	0,43	0,57	0,31	0,46	0	0,06	0,49	0,66	0,49	0,66	0,54	0,54	0,51	0,4	0,46	0,11	0,66	0,09	0,51	0,06	0,57	0,34	0,69	0,42
		He	0,42	0,6	0,26	0,41	0	0,06	0,43	0,61	0,48	0,66	0,56	0,43	0,59	0,36	0,48	0,11	0,65	0,08	0,46	0,06	0,57	0,41	0,63	0,4
		Fis	-0,031	0,041	-0,186	-0,111	n.a.	-0,022	-0,131	-0,075	-0,015	0,009	0,029	-0,268	0,123	-0,101	0,048	-0,049	-0,008	-0,045	-0,126	-0,029	-0,005	0,161	-0,080	-0,031



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

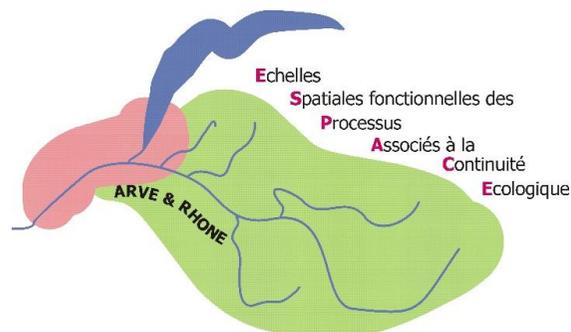


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
53	33	A	7	4	2	6	1	2	4	6	5	8	3	3	3	6	3	4	4	2	5	2	3	5	4	92
		Ar	4,29	2,98	2,00	5,00	1,00	1,00	3,39	3,75	3,51	6,20	3,00	2,00	3,00	5,20	2,90	2,85	3,49	1,99	4,97	1,50	2,95	4,03	3,92	3,26
		Ho	0,58	0,64	0,24	0,33	0	0,09	0,36	0,58	0,61	0,7	0,45	0,42	0,7	0,48	0,42	0,24	0,7	0,18	0,64	0,03	0,52	0,52	0,82	0,45
		He	0,61	0,57	0,33	0,43	0	0,09	0,45	0,64	0,62	0,74	0,63	0,39	0,66	0,57	0,51	0,22	0,53	0,17	0,61	0,03	0,55	0,52	0,67	0,46
		Fis	0,059	-0,119	0,275	0,227	n.a.	-0,048	0,189	0,104	0,024	0,055	0,276	-0,088	-0,064	0,151	0,167	-0,107	-0,308	-0,100	-0,041	-0,015	0,060	0,012	-0,218	0,028
25	27	A	10	2	2	5	1	3	4	7	4	9	4	3	3	9	4	3	4	2	5	1	3	4	5	97
		Ar	5,70	2,00	1,00	4,47	1,00	2,99	3,58	5,88	3,98	5,08	3,99	2,00	3,00	7,57	2,99	2,45	3,95	1,62	4,62	1,00	2,98	2,99	3,62	3,41
		Ho	0,41	0,52	0,19	0,44	0	0,33	0,44	0,63	0,7	0,7	0,78	0,37	0,74	0,67	0,48	0,07	0,59	0,07	0,48	0	0,59	0,56	0,81	0,46
		He	0,59	0,48	0,17	0,57	0	0,34	0,47	0,65	0,66	0,74	0,67	0,39	0,66	0,62	0,54	0,14	0,56	0,07	0,56	0	0,52	0,61	0,67	0,46
		Fis	0,314*	-0,074	-0,102	0,216	n.a.	0,022	0,049	0,029	-0,070	0,049	-0,152	0,058	-0,122	-0,076	0,115	0,468	-0,055	-0,039	0,133	n.a.	-0,135	0,085	-0,209	0,009
60	33	A	10	5	2	4	2	3	4	6	6	6	5	3	3	8	5	2	4	1	5	2	1	5	4	96
		Ar	8,50	4,46	2,00	2,76	2,00	2,79	3,95	3,49	5,99	4,51	4,96	2,90	2,00	7,22	4,91	2,00	3,90	1,00	4,42	2,00	1,00	4,05	3,51	3,67
		Ho	0,88	0,64	0,42	0,3	0,48	0,48	0,7	0,45	0,76	0,45	0,52	0,48	0,55	0,7	0,82	0,27	0,76	0	0,64	0,45	0	0,39	0,61	0,51
		He	0,85	0,63	0,48	0,27	0,4	0,47	0,68	0,43	0,81	0,41	0,47	0,38	0,46	0,7	0,75	0,32	0,66	0	0,62	0,47	0	0,38	0,63	0,49
		Fis	-0,040	-0,009	0,112	-0,124	-0,222	-0,024	-0,029	-0,055	0,063	-0,109	-0,093	-0,275	-0,175	0,007	-0,095	0,138	-0,155	n.a.	-0,027	0,034	n.a.	-0,029	0,039	-0,044
30	30	A	9	3	2	4	2	4	4	6	6	4	4	3	2	8	6	2	4	1	5	3	1	3	3	89
		Ar	7,83	3,00	2,00	3,18	2,00	3,81	3,57	5,44	5,97	3,92	2,95	2,97	2,00	6,51	4,82	2,00	4,00	1,00	4,96	2,80	1,00	2,98	3,00	3,55
		Ho	0,87	0,83	0,37	0,2	0,47	0,4	0,6	0,53	0,77	0,47	0,33	0,5	0,33	0,83	0,6	0,4	0,7	0	0,8	0,5	0	0,43	0,53	0,5
		He	0,81	0,62	0,5	0,19	0,5	0,37	0,51	0,62	0,79	0,44	0,32	0,46	0,42	0,79	0,75	0,36	0,72	0	0,74	0,45	0	0,48	0,6	0,5
		Fis	-0,074	-0,335	0,266	-0,075	0,063	-0,083	-0,178	0,142	0,030	-0,065	-0,047	-0,096	0,206	-0,055	0,199	-0,118	0,026	n.a.	-0,084	-0,124	n.a.	0,096	0,105	-0,005



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

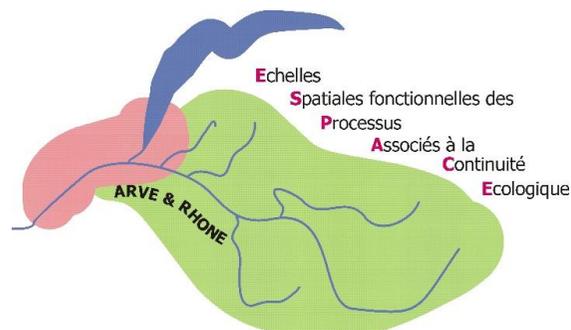


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotE51	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
49	34	A	9	4	2	3	2	5	4	6	6	5	4	2	2	12	6	2	4	1	4	2	1	3	4	93
		Ar	8,42	4,00	2,00	2,39	2,00	4,24	3,99	5,62	4,77	4,03	3,77	2,00	2,00	8,92	4,28	2,00	3,00	1,00	4,00	2,00	1,00	3,00	3,77	3,57
		Ho	0,88	0,74	0,32	0,12	0,18	0,47	0,62	0,76	0,88	0,65	0,65	0,5	0,56	1	0,59	0,32	0,74	0	0,71	0,38	0	0,59	0,65	0,53
		He	0,86	0,66	0,34	0,11	0,16	0,4	0,65	0,68	0,77	0,63	0,51	0,38	0,46	0,84	0,64	0,31	0,67	0	0,56	0,45	0	0,58	0,62	0,49
		Fis	-0,029	-0,119	0,059	-0,050	-0,097	-0,181	0,057	-0,133	-0,153	-0,028	-0,269	-0,333	-0,202	-0,195	0,085	-0,046	-0,095	n.a.	-0,251	0,146	n.a.	-0,021	-0,051	-0,091
20	34	A	9	5	2	4	2	5	5	5	7	6	5	3	3	11	4	2	4	2	5	3	2	3	5	102
		Ar	7,83	3,99	2,00	3,00	1,89	3,98	3,99	4,50	6,85	3,88	3,99	2,99	2,98	8,77	4,00	2,00	4,00	1,95	4,53	3,00	1,99	2,00	4,90	3,87
		Ho	0,85	0,53	0,47	0,56	0,24	0,35	0,65	0,62	0,76	0,65	0,68	0,41	0,32	0,82	0,65	0,29	0,71	0,15	0,59	0,56	0,15	0,32	0,68	0,52
		He	0,83	0,52	0,47	0,56	0,25	0,49	0,61	0,74	0,75	0,56	0,68	0,44	0,42	0,83	0,7	0,39	0,68	0,14	0,63	0,54	0,14	0,39	0,73	0,54
		Fis	-0,024	-0,010	0,004	0,001	0,062	0,284	-0,063	0,160	-0,022	-0,156	-0,002	0,066	0,225	0,010	0,076	0,244	-0,044	-0,079	0,069	-0,032	-0,079	0,166	0,079	0,039
59	35	A	3	2	2	2	1	2	3	3	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	3	1	2	1	1	43
		Ar	2,97	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00	3,00	3,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,99	1,00	3,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,87
		Ho	0,4	0,31	0,31	0,54	0	0,63	0,74	0,66	0,26	0,29	0	0,31	0,29	0,29	0,34	0	0,11	0	0,71	0	0,54	0	0	0,29
		He	0,4	0,26	0,44	0,49	0	0,5	0,66	0,61	0,22	0,24	0	0,5	0,28	0,41	0,43	0	0,16	0	0,67	0	0,5	0	0	0,29
		Fis	0,012	-0,186	0,288	-0,119	n.a.	-0,266	-0,124	-0,082	-0,148	-0,167	n.a.	0,369	-0,006	0,300	0,205	n.a.	0,271	n.a.	-0,073	n.a.	-0,089	n.a.	n.a.	0,004
29	32	A	3	3	2	3	1	2	3	3	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	3	1	2	1	1	45
		Ar	2,98	2,95	2,00	2,78	1,00	2,00	2,99	2,00	1,90	2,00	1,00	2,00	2,00	1,55	2,00	1,00	2,00	1,00	3,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,88
		Ho	0,59	0,53	0,5	0,44	0	0,44	0,59	0,25	0,12	0,34	0	0,22	0,44	0,06	0,38	0	0,38	0	0,56	0	0,31	0	0	0,27
		He	0,52	0,5	0,48	0,41	0	0,49	0,53	0,22	0,12	0,39	0	0,24	0,38	0,06	0,4	0	0,38	0	0,49	0	0,43	0	0	0,26
		Fis	-0,138	-0,053	-0,036	-0,060	n.a.	0,111	-0,117	-0,125	-0,067	0,119	n.a.	0,095	-0,167	-0,032	0,073	n.a.	0,000	n.a.	-0,151	n.a.	0,273	n.a.	n.a.	-0,018
22	25	A	9	3	2	5	2	3	5	9	4	9	3	2	3	6	4	2	5	2	6	3	3	4	3	97
		Ar	6,57	3,00	2,00	4,96	1,62	2,96	4,86	6,72	3,87	6,49	2,94	2,00	2,00	3,86	3,57	1,95	3,00	1,60	5,33	1,63	2,99	3,50	2,00	3,45
		Ho	0,84	0,56	0,32	0,76	0,08	0,36	0,72	0,72	0,56	0,68	0,4	0,52	0,48	0,6	0,56	0,04	0,52	0,08	0,44	0,08	0,52	0,28	0,44	0,46
		He	0,81	0,56	0,44	0,74	0,08	0,31	0,66	0,76	0,57	0,68	0,37	0,49	0,51	0,59	0,53	0,11	0,48	0,08	0,67	0,08	0,56	0,25	0,4	0,47
		Fis	-0,039	0,001	0,265	-0,028	-0,042	-0,175	-0,084	0,055	0,013	0,001	-0,094	-0,067	0,058	-0,011	-0,053	0,645	-0,087	-0,042	0,340	-0,031	0,066	-0,122	-0,093	0,014



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

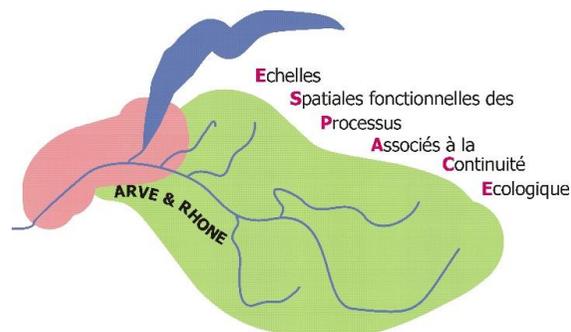


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
44	29	A	9	3	2	5	2	4	4	8	6	7	3	3	3	7	3	1	3	2	6	2	3	3	4	93
		Ar	7,18	2,95	2,00	4,88	1,89	3,56	3,95	4,00	4,84	5,95	3,00	2,66	2,67	5,26	2,86	1,00	2,96	1,66	5,54	1,67	3,00	1,86	3,87	3,44
		Ho	0,67	0,54	0,42	0,71	0,04	0,25	0,5	0,71	0,54	0,58	0,46	0,21	0,42	0,58	0,33	0	0,62	0,08	0,58	0,04	0,75	0,08	0,62	0,42
		He	0,8	0,56	0,47	0,75	0,04	0,23	0,6	0,77	0,66	0,62	0,45	0,49	0,47	0,58	0,36	0	0,54	0,08	0,57	0,04	0,6	0,08	0,57	0,45
		Fis	0,169	0,036	0,111	0,051	-0,021	-0,095	0,160	0,078	0,175	0,067	-0,008	0,578*	0,111	-0,006	0,079	n.a.	-0,154	-0,044	-0,029	-0,021	-0,243	-0,032	-0,089	0,057
52	33	A	3	2	1	3	1	2	3	4	1	3	2	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	42
		Ar	3,00	1,96	1,00	3,00	1,00	1,91	2,77	3,76	1,00	2,54	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,87	2,00	1,00	1,00	1,00	1,77
		Ho	0,76	0,15	0	0,76	0	0,09	0,48	0,73	0	0,18	0,27	0,48	0	0,48	0,33	0	0	0	0,09	0,3	0	0	0	0,22
		He	0,67	0,14	0	0,66	0	0,09	0,54	0,62	0	0,24	0,24	0,5	0	0,46	0,43	0	0	0	0,09	0,3	0	0	0	0,22
		Fis	-0,137	-0,082	n.a.	-0,151	n.a.	-0,048	0,104	-0,173	n.a.	0,249	-0,158	0,029	n.a.	-0,048	0,232	n.a.	n.a.	n.a.	-0,048	-0,019	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
51	34	A	3	2	1	3	1	2	3	5	1	5	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	3	1	48
		Ar	3,00	2,00	1,00	2,74	1,00	1,78	3,00	4,73	1,00	4,21	2,00	2,00	1,77	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,98	1,96	1,00	2,87	1,00	2,00
		Ho	0,59	0,32	0	0,44	0	0,09	0,65	0,53	0	0,62	0,38	0,56	0,03	0,47	0,38	0	0	0	0,15	0,18	0	0,26	0	0,25
		He	0,63	0,31	0	0,36	0	0,08	0,65	0,64	0	0,58	0,31	0,48	0,03	0,49	0,43	0	0	0	0,14	0,16	0	0,24	0	0,24
		Fis	0,063	-0,046	n.a.	-0,216	n.a.	-0,046	-0,003	0,167	n.a.	-0,058	-0,236	-0,167	-0,015	0,046	0,104	n.a.	n.a.	n.a.	-0,079	-0,097	n.a.	-0,115	n.a.	n.a.
28	35	A	3	2	1	3	1	2	4	5	1	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1	2	1	45
		Ar	3,00	2,00	1,00	2,94	1,00	1,89	3,49	4,74	1,00	2,88	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,97	1,00	1,73	1,00	1,85
		Ho	0,66	0,49	0	0,4	0	0,09	0,51	0,57	0	0,49	0,43	0,4	0,03	0,2	0,34	0	0	0	0	0,09	0	0,03	0	0,2
		He	0,65	0,42	0	0,42	0	0,08	0,66	0,66	0	0,47	0,37	0,43	0,03	0,34	0,41	0	0	0	0	0,08	0	0,08	0	0,22
		Fis	-0,012	-0,157	n.a.	0,057	n.a.	-0,045	0,225	0,132	n.a.	-0,037	-0,165	0,072	-0,015	0,406	0,160	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-0,045	n.a.	0,652	n.a.	n.a.
24	35	A	3	2	1	3	1	2	3	5	1	4	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	46
		Ar	3,00	2,00	1,00	2,77	1,00	1,51	3,00	3,95	1,00	3,87	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,49	2,00	1,00	1,00	1,00	1,81
		Ho	0,57	0,37	0	0,43	0	0,06	0,51	0,43	0	0,69	0,43	0,34	0,06	0,2	0,46	0	0	0	0,09	0,23	0	0,06	0	0,21
		He	0,64	0,37	0	0,34	0	0,06	0,63	0,62	0	0,61	0,34	0,32	0,06	0,3	0,41	0	0	0	0,08	0,24	0	0,06	0	0,22
		Fis	0,107	-0,010	n.a.	-0,252	n.a.	-0,029	0,188	0,308	n.a.	-0,125	-0,273	-0,071	-0,029	0,339	-0,120	n.a.	n.a.	n.a.	-0,045	0,067	n.a.	-0,029	n.a.	n.a.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

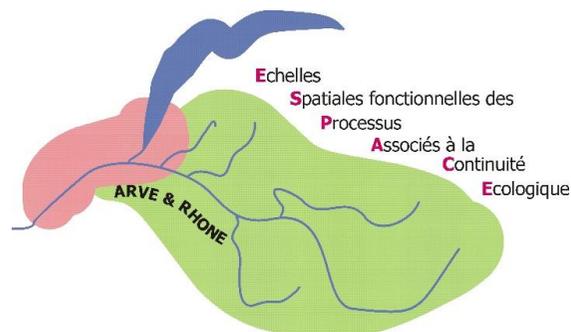


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
48	30	A	4	3	1	3	1	2	4	7	1	5	4	2	1	3	2	1	1	2	1	2	2	1	2	55
		Ar	3,98	2,98	1,00	2,84	1,00	1,92	3,00	6,45	1,00	2,92	2,86	2,00	1,00	2,92	2,00	1,00	1,00	1,92	1,00	1,98	1,99	1,00	1,00	2,12
		Ho	0,6	0,5	0	0,6	0	0,07	0,63	0,67	0	0,67	0,53	0,27	0	0,5	0,43	0	0	0,07	0	0,17	0,1	0	0,07	0,26
		He	0,64	0,45	0	0,52	0	0,06	0,69	0,7	0	0,58	0,5	0,32	0	0,45	0,38	0	0	0,06	0	0,15	0,1	0	0,06	0,25
		Fis	0,060	-0,124	n.a.	-0,148	n.a.	-0,035	0,077	0,051	n.a.	-0,157	-0,070	0,167	n.a.	-0,107	-0,156	n.a.	n.a.	-0,035	n.a.	-0,091	-0,053	n.a.	-0,035	-0,037
50	33	A	4	3	1	2	2	1	2	2	1	5	2	2	2	3	1	1	1	1	2	1	2	1	1	43
		Ar	2,77	2,75	1,00	2,00	2,00	1,00	1,56	2,00	1,00	4,00	2,00	2,00	2,00	2,96	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,74
		Ho	0,39	0,45	0	0,39	0,45	0	0,03	0,42	0	0,67	0,64	0,52	0,42	0,48	0	0	0	0	0,39	0	0,55	0	0	0,25
		He	0,37	0,5	0	0,47	0,47	0	0,03	0,46	0	0,69	0,43	0,48	0,5	0,55	0	0	0	0	0,32	0	0,46	0	0	0,25
		Fis	-0,057	0,090	n.a.	0,163	0,034	n.a.	-0,015	0,083	n.a.	0,035	-0,467	-0,066	0,144	0,124	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-0,245	n.a.	-0,179	n.a.	n.a.	-0,013
21	35	A	8	3	2	4	1	5	4	6	5	2	4	3	4	6	3	3	5	2	5	2	3	6	3	89
		Ar	7,68	3,00	2,00	3,00	1,00	3,95	3,38	5,39	4,26	2,00	3,97	2,94	3,47	5,93	2,54	2,38	3,70	1,99	4,86	1,99	2,99	5,42	3,00	3,51
		Ho	0,8	0,71	0,17	0,51	0	0,54	0,54	0,6	0,43	0,57	0,6	0,6	0,54	0,86	0,29	0,17	0,31	0,23	0,57	0,17	0,43	0,8	0,54	0,48
		He	0,81	0,66	0,32	0,6	0	0,52	0,55	0,64	0,56	0,48	0,67	0,54	0,5	0,78	0,25	0,18	0,3	0,2	0,66	0,16	0,41	0,75	0,55	0,48
		Fis	0,018	-0,076	0,464	0,149	n.a.	-0,050	0,008	0,064	0,233	-0,191	0,109	-0,109	-0,080	-0,098	-0,149	0,069	-0,034	-0,129	0,133	-0,094	-0,042	-0,070	0,005	0,009
27	35	A	9	4	2	4	1	3	5	7	6	8	3	3	3	9	4	4	5	2	5	2	3	4	5	101
		Ar	6,26	2,97	1,99	3,71	1,00	2,72	4,24	6,21	4,73	6,50	3,00	2,52	3,00	4,01	3,00	3,77	4,39	1,76	4,86	1,86	2,95	2,99	4,65	3,61
		Ho	0,69	0,83	0,17	0,4	0	0,23	0,43	0,77	0,71	0,86	0,77	0,46	0,6	0,63	0,6	0,37	0,54	0,09	0,77	0,03	0,63	0,46	0,63	0,51
		He	0,67	0,6	0,16	0,4	0	0,21	0,44	0,74	0,69	0,76	0,64	0,45	0,59	0,59	0,63	0,4	0,63	0,08	0,67	0,03	0,52	0,44	0,66	0,48
		Fis	-0,023	-0,382	-0,094	0,012	n.a.	-0,094	0,035	-0,047	-0,040	-0,121	-0,211	-0,015	-0,015	-0,067	0,053	0,080	0,133	-0,045	-0,148	-0,015	-0,218	-0,050	0,046	-0,060
26	17	A	6	4	2	3	1	1	4	6	4	6	3	2	3	8	3	3	4	2	4	3	3	4	2	81
		Ar	4,56	3,16	1,94	2,19	1	1	2,17	4,49	3,45	4,91	2,29	2	2,49	5,76	2,12	2,59	3,49	1,54	3,5	2,1	2,2	2,92	1,98	2,78
		Ho	0,76	0,65	0,29	0,29	0	0	0,24	0,53	0,65	0,82	0,53	0,65	0,47	0,82	0,29	0,47	0,53	0,12	0,59	0,24	0,35	0,29	0,35	0,43
		He	0,73	0,64	0,33	0,34	0	0	0,22	0,77	0,66	0,8	0,4	0,44	0,51	0,84	0,26	0,39	0,66	0,11	0,7	0,3	0,3	0,56	0,42	0,45
		Fis	-0,052	-0,008	0,101	0,146	n.a.	n.a.	-0,088	0,311	0,013	-0,035	-0,313	-0,478	0,078	0,019	-0,141	-0,220	0,197	-0,063	0,156	0,214	-0,179	0,474	0,150	0,040



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

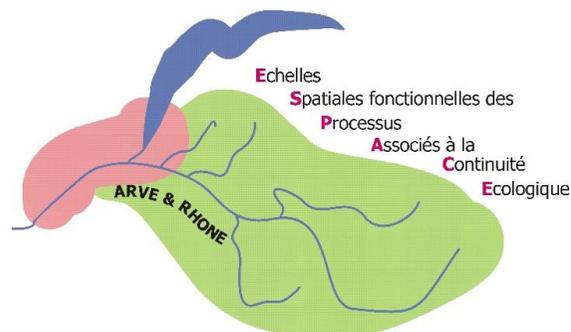


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotE51	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
23	31	A	3	2	2	2	1	1	4	4	3	1	3	2	2	3	1	1	2	1	4	1	2	3	4	52
		Ar	2,55	1,92	2,00	2,00	1,00	1,00	3,56	3,92	3,00	1,00	3,00	2,00	2,00	3,00	1,00	1,00	1,98	1,00	2,99	1,00	2,00	2,96	3,96	2,17
		Ho	0,39	0,1	0,65	0,26	0	0	0,58	0,71	0,55	0	0,55	0,52	0,45	0,77	0	0	0,29	0	0,39	0	0,48	0,45	0,58	0,34
		He	0,4	0,09	0,5	0,27	0	0	0,68	0,7	0,47	0	0,51	0,5	0,49	0,67	0	0	0,25	0	0,48	0	0,45	0,54	0,55	0,33
		Fis	0,026	-0,051	-0,292	0,046	n.a.	n.a.	0,142	-0,013	-0,178	n.a.	-0,080	-0,033	0,073	-0,163	n.a.	n.a.	-0,170	n.a.	0,190	n.a.	-0,080	0,166	-0,050	-0,024
15	8	A	5	3	2	4	1	3	3	8	4	3	3	2	4	5	3	3	4	2	3	1	2	4	2	74
		Ar	4,35	2,37	1,98	2,96	1	2,44	2,45	5,83	2,92	2,5	2,82	2	3,68	4,27	2,57	2,09	3,01	1,81	2,5	1	2	3,69	1,93	2,7
		Ho	0,75	0,38	0,5	0,38	0	0,25	0,5	1	0,38	0,62	0,75	0,5	0,62	0,62	1	0,25	0,38	0,25	0,62	0	0,5	0,62	0,38	0,49
		He	0,77	0,32	0,38	0,48	0	0,32	0,4	0,82	0,41	0,46	0,6	0,5	0,7	0,76	0,55	0,23	0,54	0,22	0,46	0	0,47	0,7	0,3	0,45
		Fis	0,030	-0,171	-0,333	0,226	n.a.	0,220	-0,255	-0,219	0,094	-0,356	-0,247	0,000	0,101	0,175	-0,803	-0,103	0,304	-0,143	-0,356	n.a.	-0,067	0,101	-0,231	-0,083
14	23	A	10	4	2	6	1	5	4	12	4	4	4	3	4	7	5	3	7	2	7	3	4	6	4	111
		Ar	8,22	3,54	2,00	5,30	1,00	4,68	3,91	8,62	3,98	2,78	3,80	2,78	3,79	6,75	3,53	1,96	5,03	2,00	4,12	2,88	3,51	5,88	3,90	4,09
		Ho	0,74	0,52	0,61	0,57	0	0,48	0,65	0,91	0,7	0,7	0,65	0,57	0,65	0,78	0,52	0,17	0,57	0,39	0,65	0,35	0,65	0,91	0,7	0,58
		He	0,79	0,59	0,45	0,61	0	0,4	0,63	0,86	0,57	0,51	0,64	0,5	0,68	0,78	0,59	0,16	0,64	0,36	0,59	0,29	0,49	0,76	0,64	0,55
		Fis	0,070	0,114	-0,342	0,077	n.a.	-0,182	-0,028	-0,058	-0,229	-0,371	-0,027	-0,126	0,036	-0,004	0,110	-0,070	0,110	-0,075	-0,097	-0,183	-0,324	-0,203	-0,095	-0,071
10	30	A	10	3	2	5	1	4	5	11	5	5	4	4	4	10	3	1	5	2	3	2	3	5	4	101
		Ar	7,52	2,80	2,00	4,80	1,00	3,05	4,35	7,66	4,78	4,74	4,00	2,52	3,79	7,73	2,71	1,00	4,59	1,90	2,99	1,00	1,99	4,69	3,39	3,70
		Ho	0,6	0,4	0,27	0,53	0	0,53	0,47	0,57	0,63	0,57	0,7	0,27	0,6	0,67	0,1	0	0,33	0,1	0,27	0,03	0,2	0,33	0,3	0,37
		He	0,75	0,57	0,28	0,75	0	0,54	0,56	0,8	0,74	0,68	0,69	0,29	0,65	0,79	0,21	0	0,4	0,1	0,48	0,03	0,24	0,42	0,46	0,45
		Fis	0,198	0,293*	0,040	0,293*	n.a.	0,013	0,161	0,290*	0,139	0,162	-0,019	0,082	0,079	0,161	0,528*	n.a.	0,159	-0,053	0,444*	-0,017	0,149	0,205	0,349	0,187*
09	31	A	9	4	2	7	1	4	5	10	6	7	4	3	4	6	4	3	5	1	5	2	2	5	4	103
		Ar	6,69	2,92	1,84	5,80	1,00	3,00	4,04	7,77	5,89	5,75	3,92	2,52	3,00	4,00	2,54	2,36	4,50	1,00	4,25	1,00	2,00	3,58	2,97	3,58
		Ho	0,68	0,39	0,13	0,71	0	0,52	0,35	0,52	0,58	0,58	0,74	0,39	0,65	0,71	0,16	0,06	0,48	0	0,35	0,03	0,23	0,23	0,29	0,38
		He	0,8	0,53	0,17	0,8	0	0,54	0,48	0,78	0,7	0,75	0,69	0,32	0,67	0,72	0,15	0,06	0,54	0	0,56	0,03	0,29	0,45	0,4	0,46
		Fis	0,149	0,274	0,262	0,112	n.a.	0,043	0,262	0,342*	0,175	0,229	-0,080	-0,200	0,040	0,017	-0,062	-0,025	0,109	n.a.	0,370*	-0,016	0,226	0,498*	0,282	0,162*



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

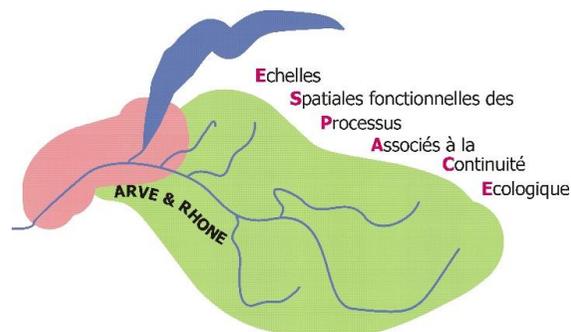


Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
08	29	A	9	3	2	6	1	7	4	8	6	7	4	4	3	8	4	4	5	2	7	4	3	5	5	111
		Ar	4,53	3,00	1,99	3,42	1,00	5,07	3,81	5,73	5,33	6,34	3,98	2,56	3,00	5,29	3,50	3,50	4,75	2,00	5,00	2,00	3,00	3,78	3,97	3,76
		Ho	0,66	0,69	0,14	0,38	0	0,24	0,41	0,79	0,72	0,72	0,62	0,24	0,76	0,66	0,38	0,31	0,55	0,1	0,55	0,14	0,45	0,48	0,62	0,46
		He	0,56	0,6	0,19	0,36	0	0,31	0,38	0,71	0,7	0,76	0,67	0,32	0,65	0,6	0,47	0,28	0,61	0,1	0,63	0,13	0,62	0,54	0,65	0,47
		Fis	-0,176	-0,147	0,256	-0,055	n.a.	0,219	-0,103	-0,123	-0,036	0,051	0,067	0,243	-0,174	-0,085	0,193	-0,125	0,089	-0,055	0,121	-0,050	0,281	0,109	0,039	0,018
06	35	A	10	4	2	5	2	6	5	12	7	10	5	3	4	9	4	4	5	2	7	3	3	5	6	123
		Ar	7,36	3,00	2,00	4,45	1,94	5,32	4,33	9,35	4,98	7,35	3,48	2,00	3,00	5,38	2,99	3,74	3,99	1,96	6,38	2,64	2,98	3,63	5,36	4,24
		Ho	0,71	0,6	0,23	0,54	0,11	0,4	0,54	0,77	0,91	0,8	0,6	0,43	0,69	0,66	0,49	0,4	0,71	0,17	0,69	0,2	0,54	0,57	0,89	0,55
		He	0,81	0,6	0,24	0,54	0,16	0,45	0,48	0,82	0,75	0,81	0,66	0,38	0,66	0,67	0,51	0,34	0,71	0,16	0,63	0,18	0,56	0,6	0,72	0,54
		Fis	0,119	0,002	0,067	-0,010	0,271	0,116	-0,123	0,064	-0,215	0,008	0,086	-0,128	-0,045	0,022	0,050	-0,163	-0,001	-0,094	-0,094	-0,082	0,034	0,048	-0,231	-0,016
05	6	A	7	3	2	2	2	4	3	5	4	5	4	3	3	3	3	3	4	1	5	3	2	4	3	78
		Ar	5,28	2,65	1,98	1,66	1,91	2,98	2,32	4,15	3,82	4,48	3,31	2,64	2,89	2,81	2,67	2,55	3,55	1	3,95	2,33	1,99	3,31	2,91	2,92
		Ho	0,83	0,5	0,33	0,17	0,33	0,5	0,33	0,5	0,83	1	0,67	0,5	0,67	0,33	0,83	0,33	0,83	0	0,67	0,33	0,5	0,5	0,83	0,54
		He	0,82	0,54	0,44	0,15	0,28	0,42	0,29	0,72	0,71	0,76	0,58	0,49	0,61	0,57	0,57	0,4	0,65	0	0,69	0,29	0,38	0,62	0,61	0,5
		Fis	-0,017	0,077	0,250	-0,091	-0,200	-0,200	-0,143	0,308	-0,177	-0,309	-0,143	-0,029	-0,091	0,415	-0,463	0,172	-0,277	n.a.	0,040	-0,143	-0,333	0,200	-0,364	-0,062
02	30	A	14	6	2	8	2	6	5	10	6	10	5	5	3	13	3	4	6	2	7	4	3	7	5	136
		Ar	9,41	5,50	2,00	4,99	1,99	5,19	4,79	7,83	5,26	7,80	4,11	2,79	2,99	8,40	2,91	1,58	5,29	1,56	6,37	2,59	2,97	5,54	4,62	4,63
		Ho	0,77	0,8	0,27	0,37	0,07	0,37	0,6	0,8	0,77	0,87	0,67	0,6	0,53	0,8	0,4	0,2	0,63	0,13	0,6	0,17	0,47	0,6	0,53	0,52
		He	0,84	0,68	0,39	0,4	0,06	0,37	0,5	0,78	0,73	0,79	0,64	0,56	0,6	0,74	0,5	0,19	0,69	0,12	0,71	0,16	0,44	0,62	0,7	0,53
		Fis	0,087	-0,177	0,318	0,088	-0,035	0,021	-0,189	-0,026	-0,049	-0,100	-0,035	-0,064	0,108	-0,083	0,194	-0,075	0,081	-0,071	0,150	-0,064	-0,062	0,026	0,234	0,017
471	35	A	12	3	2	9	1	3	5	3	5	8	3	5	3	9	3	2	5	2	6	5	2	4	4	104
		Ar	9,35	2,98	2,00	8,22	1,00	2,50	3,50	2,99	5,00	6,72	3,00	3,63	3,00	7,46	2,74	2,00	3,90	1,76	4,92	3,99	2,00	3,26	3,00	3,87
		Ho	0,89	0,54	0,37	0,74	0	0,26	0,31	0,69	0,71	0,66	0,77	0,54	0,57	0,83	0,31	0,11	0,23	0,03	0,66	0,37	0,6	0,69	0,57	0,5
		He	0,85	0,5	0,37	0,84	0	0,31	0,32	0,61	0,79	0,73	0,64	0,63	0,56	0,78	0,3	0,16	0,21	0,03	0,59	0,36	0,5	0,54	0,67	0,49
		Fis	-0,040	-0,088	-0,010	0,115	n.a.	0,163	0,028	-0,121	0,092	0,101	-0,211	0,140	-0,017	-0,057	-0,058	0,271	-0,083	-0,015	-0,110	-0,041	-0,200	-0,262	0,144	-0,015



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



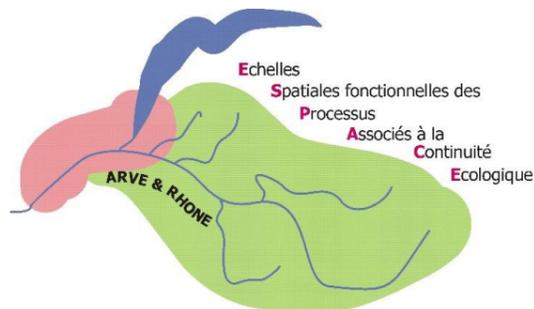
Code station	N	Descripteurs	Cco17	Cg1033	Cg1114	Cg56	Cot105	Cot138	Cot150	Cot210	Cot255	Cot588	Cot686	Cot687	Cot708	CotE10	CotE13	CotES1	LCE43	LCE46	LCE51	LCE59	LCE78	LCE88	LCE89	Total
472	34	A	14	3	2	10	1	3	5	6	6	6	4	4	3	12	5	3	4	1	6	7	2	3	4	114
		Ar	10,49	3,00	2,00	7,27	1,00	1,99	2,72	4,01	5,62	4,27	3,00	3,93	2,95	8,55	3,98	1,77	2,04	1,00	4,78	4,78	2,00	2,94	3,98	3,83
		Ho	0,85	0,5	0,29	0,74	0	0,18	0,32	0,79	0,79	0,68	0,5	0,65	0,41	0,79	0,35	0,12	0,21	0	0,56	0,44	0,47	0,5	0,62	0,47
		He	0,82	0,59	0,44	0,76	0	0,16	0,28	0,65	0,74	0,68	0,61	0,64	0,46	0,84	0,5	0,11	0,22	0	0,58	0,42	0,49	0,53	0,65	0,49
		Fis	-0,034	0,157	0,328	0,037	n.a.	-0,082	-0,144	-0,214	-0,072	0,007	0,181	-0,010	0,109	0,054	0,288	-0,050	0,050	n.a.	0,043	-0,041	0,046	0,050	0,047	0,038
380	28	A	3	6	2	2	2	4	3	3	5	6	3	3	2	5	3	3	4	2	3	1	2	3	2	72
		Ar	2,82	5,84	2,00	2,00	2,00	3,00	2,59	2,98	4,83	5,41	3,00	2,57	2,00	3,82	2,00	2,60	3,44	1,00	1,93	1,00	1,00	2,00	1,58	2,67
		Ho	0,5	0,79	0,5	0,43	0,46	0,57	0,46	0,21	0,61	0,82	0,64	0,25	0,29	0,46	0,64	0,36	0,61	0,04	0,11	0	0,04	0,5	0,11	0,41
		He	0,47	0,79	0,46	0,5	0,47	0,48	0,53	0,25	0,75	0,76	0,55	0,23	0,46	0,61	0,52	0,57	0,56	0,04	0,1	0	0,04	0,45	0,1	0,42
		Fis	-0,060	0,004	-0,089	0,139	0,010	-0,190	0,126	0,158	0,188	-0,081	-0,171	-0,111	0,378	0,235	-0,228	0,373	-0,088	-0,018	-0,044	n.a.	-0,018	-0,118	-0,057	0,029

NB : Les **Fis** significatifs (après correction de Benjamini et Hochberg, au seuil 0,05), sont en **gras** et mis en évidence par un astérisque *.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



Interreg FRANCE-SUISSE

Annexe 23: Différenciation des 45 stations échantillonnées (Fst) = « Distances génétiques »

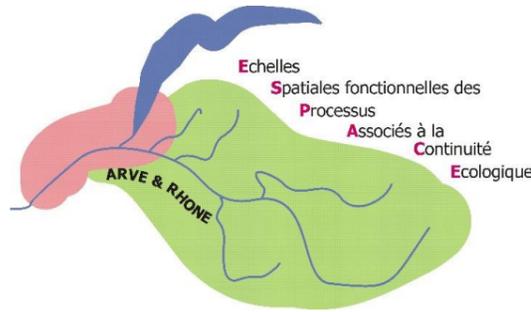
Les valeurs de Fst non significatives (seuil 0,05) apparaissent grisées, les valeurs surlignées en jaune-orangé correspondent aux Fst supérieures à 0,25 traduisant une différenciation très importante, les valeurs surlignées en jaune clair correspondent aux Fst compris entre 0,15 et 0,25 traduisant une différenciation importante.

Table with 45 rows and 45 columns representing genetic distance (Fst) between sampling stations. The table is color-coded: grey for non-significant values, yellow-orange for high differentiation (>0.25), and yellow for important differentiation (0.15-0.25). The diagonal is all 1.0. The last two columns are labeled 471 and 472.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Annexe 24: Taux de migration par génération

Le tableau se lit comme suit : chaque chiffre correspond au pourcentage d'individus de la station en ligne qui proviennent de la station en colonne à chaque génération. Les stations étant ordonnées d'amont en aval, la moitié inférieure gauche correspond aux taux de migration vers l'aval (dévalaison) et la moitié supérieure droite correspond aux taux de migration vers l'amont (montaison).

Les taux de migration significativement différents de zéro (IC 95%) sont inscrits en noir ; ceux non-significativement différents de zéro sont inscrits en gris ; ceux supérieurs à 1% sont surlignés en jaune ; ceux supérieurs à 5% sont surlignés en jaune-orange et ceux supérieurs à 10% sont surlignés en orange.

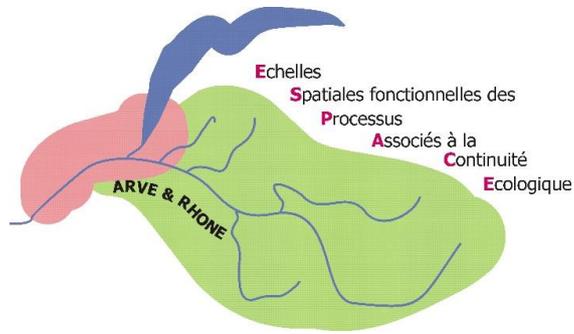
Les taux surlignés en gris correspondent au pourcentage d'individus sédentaires par génération (ceux surlignés en gris clair correspondent aux taux d'individus sédentaires inférieurs à 70% et recevant donc beaucoup de migrants).

nom	61	62	17	18	15-14	21	32	19	10	9	58	35	33	57	55	56	31	54	53	25	27	60	30	49	20	8	6	23	59	29	22	44	52	51	28	24	48	50	2	471	472	380	
61_Bialle1	69,56	10,05	0,64	0,54	0,66	0,61	0,57	0,51	0,49	0,42	0,56	0,66	0,46	0,38	0,63	0,54	0,53	0,55	0,49	0,41	0,47	0,36	0,48	0,50	0,58	0,41	0,52	0,51	0,45	0,42	0,45	0,49	0,55	0,51	0,45	0,52	0,59	0,49	0,54	0,53	0,46	0,44	
62_Bialle2	0,57	81,65	0,70	0,42	0,64	0,47	0,39	0,55	0,42	0,44	0,39	0,40	0,50	0,44	0,40	0,41	0,41	0,46	0,54	0,35	0,41	0,40	0,49	0,45	0,50	0,44	0,40	0,34	0,44	0,46	0,29	0,49	0,44	0,45	0,40	0,37	0,47	0,34	0,43	0,67	0,36	0,40	
17_Bialle3	0,59	11,29	68,24	0,52	0,73	0,60	0,49	0,56	0,49	0,48	0,47	0,50	0,53	0,47	0,51	0,50	0,49	0,74	0,58	0,56	0,57	0,48	0,42	0,50	0,50	0,45	0,50	0,49	0,50	0,49	0,51	0,48	0,53	0,49	0,48	0,44	0,48	0,50	0,44	0,47	0,46	0,51	
18_Bialle4	0,40	8,00	0,48	71,57	0,61	3,06	0,50	0,52	0,48	0,41	0,35	0,43	0,48	0,46	0,35	0,65	0,39	0,49	0,47	0,51	0,38	0,56	0,39	0,39	0,48	0,38	0,43	0,47	0,46	0,44	0,44	0,44	0,39	0,41	0,47	0,43	0,43	0,46	0,33	0,43	0,35	0,46	
15-14_Arve.amont1-2	0,50	12,18	0,54	1,54	68,17	0,51	0,52	0,48	0,45	0,48	0,47	0,48	0,45	0,46	0,41	0,42	0,46	0,49	0,41	0,37	0,50	0,42	0,56	0,50	0,43	0,44	0,40	0,43	0,50	0,48	0,50	0,44	0,48	0,48	0,39	0,51	0,45	0,40	0,42	0,50	0,58	0,42	
21_Arve.amont3	0,52	4,77	0,56	1,25	0,43	76,97	0,32	0,41	0,41	0,34	0,32	0,51	0,54	0,34	0,54	0,48	0,42	0,41	0,44	0,47	0,48	0,50	0,37	0,37	0,43	0,38	0,43	0,62	0,50	0,40	0,46	0,25	0,42	0,40	0,49	0,43	0,35	0,35	0,44	0,54	0,44	0,52	
32_Scionz1	0,52	0,36	0,52	0,48	0,42	0,31	81,78	0,70	0,53	0,50	0,50	0,37	0,50	0,39	0,42	0,46	0,52	0,37	0,62	0,47	0,31	0,49	0,36	0,38	0,59	0,40	0,48	0,39	0,41	0,52	0,37	0,38	0,40	0,44	0,44	0,48	0,39	0,31	0,43	0,46	0,34	0,51	
19_Scionz2	0,47	0,44	0,46	0,48	0,45	0,89	10,71	69,84	0,39	0,45	0,47	0,47	0,43	0,48	0,51	0,88	0,47	0,46	0,54	0,44	0,54	0,40	0,38	0,47	0,39	0,51	0,44	0,53	0,49	0,54	0,44	0,46	0,38	0,40	0,44	0,44	0,48	0,51	0,39	0,49	0,49	0,42	0,54
10_Arve.inter1	0,51	2,63	0,61	0,41	0,55	0,77	6,27	2,69	67,49	0,42	0,49	0,51	0,49	0,39	0,58	2,73	0,74	0,54	0,45	0,50	0,48	0,47	0,45	0,46	0,45	0,46	0,52	0,48	0,47	0,43	0,43	0,44	0,48	0,41	0,46	0,39	0,44	0,53	0,54	0,51	0,47	0,46	
09_Arve.inter2	0,49	2,02	0,63	0,50	0,67	1,28	5,32	1,26	67,21	0,52	0,47	0,47	0,45	0,50	0,44	1,39	0,48	3,59	0,45	0,59	0,70	0,51	0,56	0,46	0,52	0,49	0,49	0,58	0,53	0,50	0,45	0,43	0,48	0,44	0,47	0,55	0,51	0,50	0,50	0,49	0,52	0,53	
58_Giffre.amont1	0,47	0,50	0,48	0,60	0,46	0,58	0,50	0,47	0,49	0,55	68,33	0,92	0,73	0,50	0,68	10,62	0,56	0,59	0,46	0,48	0,50	0,56	0,53	0,42	0,55	0,40	0,60	0,46	0,53	0,61	0,48	0,43	0,55	0,47	0,45	0,54	0,49	0,48	0,46	0,52	0,51	0,49	
35_Giffre.amont2	0,33	0,49	0,55	0,46	0,45	0,46	0,47	0,59	0,43	0,49	0,52	70,20	0,69	0,54	0,50	10,24	0,49	0,46	0,55	0,40	0,52	0,43	0,54	0,58	0,50	0,48	0,35	0,48	0,40	0,52	0,48	0,49	0,53	0,47	0,45	0,54	0,44	0,52	0,57	0,46	0,50	0,46	
33_Giffre.amont3	0,50	0,63	0,58	0,53	0,55	0,56	0,43	0,62	0,50	0,48	0,57	1,77	68,87	0,59	0,59	9,14	0,68	0,53	0,50	0,48	0,47	0,39	0,54	0,47	0,59	0,46	0,62	0,48	0,50	0,48	0,48	0,49	0,43	0,43	0,48	0,59	0,50	0,40	0,43	0,48	0,53	0,48	0,54
57_Giffre.amont4	0,47	0,43	0,44	0,36	0,56	0,58	0,37	0,44	0,51	0,54	0,55	0,48	0,56	74,77	0,39	6,04	0,38	0,39	0,41	0,55	0,60	0,51	0,38	0,54	0,44	0,46	0,50	0,43	0,44	0,65	0,41	0,46	0,50	0,61	0,44	0,51	0,57	0,46	0,53	0,43	0,43	0,49	
55_Giffre.amont5	0,64	0,56	0,59	0,63	0,47	0,55	0,63	0,59	0,61	0,62	0,67	0,59	1,11	0,55	68,27	7,55	0,89	0,58	0,63	0,59	0,55	0,61	0,52	0,59	0,50	0,59	0,47	0,56	0,52	0,62	0,57	0,64	0,51	0,65	0,58	0,64	0,50	0,61	0,60	0,65	0,53	0,67	
56_Giffre.amont6	0,59	0,40	0,34	0,47	0,45	0,38	0,40	0,45	0,44	0,39	0,47	0,49	0,46	0,47	0,51	80,73	0,42	0,52	0,49	0,47	0,50	0,50	0,57	0,61	0,55	0,34	0,47	0,49	0,58	0,41	0,50	0,45	0,47	0,51	0,35	0,53	0,34	0,51	0,37	0,54	0,47	0,60	
31_Giffre.amont7	0,60	0,45	0,43	0,53	0,47	0,48	0,50	0,53	0,49	0,49	0,48	0,45	0,52	0,50	0,61	12,15	68,24	0,48	0,46	0,45	0,48	0,50	0,45	0,55	0,38	0,43	0,47	0,47	0,55	0,46	0,47	0,44	0,60	0,60	0,47	0,45	0,47	0,48	0,50	0,46	0,43	0,48	
54_Risse	0,52	0,38	0,39	0,39	0,41	0,37	0,31	0,38	0,50	0,48	0,41	0,45	0,53	0,39	0,48	0,38	0,35	82,11	0,60	0,44	0,58	0,44	0,44	0,40	0,55	0,35	0,34	0,40	0,38	0,42	0,48	0,41	0,36	0,40	0,47	0,48	0,59	0,53	0,38	0,55	0,50	0,33	
53_Giffre.aval1	0,42	0,43	0,44	0,44	0,43	0,39	0,41	0,42	0,39	0,45	0,43	0,43	0,47	0,44	0,39	2,08	0,52	11,10	68,96	0,52	1,02	0,43	0,47	0,44	0,47	0,47	0,33	0,40	0,44	0,47	0,36	0,49	0,49	0,50	0,43	0,45	0,47	0,48	0,45	0,46	0,49	0,42	
25_Giffre.aval2	0,56	0,35	0,48	0,50	0,49	0,50	1,49	0,59	0,50	0,53	0,57	0,56	0,52	0,50	0,46	1,87	0,51	9,35	0,83	67,54	0,83	0,38	0,49	0,49	0,49	0,58	0,54	0,42	0,57	0,49	0,53	0,49	0,53	0,63	0,46	0,52	0,53	0,50	0,46	0,43	0,52	0,42	
27_Bronze	0,45	0,39	0,37	0,40	0,38	0,38	0,38	0,46	0,40	0,39	0,49	0,41	0,45	0,49	0,49	0,55	0,36	6,42	0,82	0,54	75,61	0,46	0,47	0,41	0,57	0,49	0,38	0,39	0,42	0,42	0,40	0,33	0,50	0,46	0,48	0,57	0,45	0,43	0,39	0,42	0,51	0,41	
60_Borne.amont1	0,45	0,47	0,44	0,31	0,43	0,48	0,57	0,42	0,37	0,47	0,49	0,55	0,45	0,37	0,39	0,55	0,38	0,45	0,52	0,47	0,39	81,56	0,46	0,75	0,45	0,54	0,37	0,47	0,41	0,46	0,41	0,38	0,32	0,46	0,49	0,41	0,40	0,38	0,46	0,46	0,41	0,54	
30_Borne.amont2	0,43	0,40	0,41	0,48	0,44	0,52	0,47	0,45	0,46	0,38	0,40	0,43	0,42	0,44	0,50	0,46	0,46	0,46	0,46	0,40	0,63	13,22	68,44	0,61	0,44	0,41	0,44	0,43	0,42	0,47	0,44	0,43	0,47	0,45	0,60	0,48	0,49	0,46	0,48	0,43	0,43	0,49	
49_Borne.aval1	0,39	0,49	0,42	0,49	0,37	0,33	0,39	0,41	0,37	0,43	0,51	0,52	0,47	0,48	0,46	0,32	0,48	0,36	0,28	0,56	0,48	1,58	0,56	80,72	0,50	0,38	0,42	0,86	0,49	0,42	0,28	0,52	0,32	0,53	0,41	0,33	0,49	0,45	0,44	0,33	0,46	0,50	
20_Borne.aval2	0,40	0,85	0,41	0,39	0,41	0,46	0,58	0,33	0,51	0,30	0,45	0,47	0,47	0,46	0,42	0,39	0,37	0,48	0,58	0,37	0,77	5,61	0,45	4,25	72,26	0,41	0,40	0,36	0,66	0,45	0,53	0,43	0,39	0,37	0,41	0,35	0,35	0,40	0,46	0,52	0,51	0,54	
08_Arve.aval1	0,54	0,57	0,50	0,50	0,51	0,53	0,51	0,43	0,49	0,49	0,47	0,49	0,61	0,55	0,61	0,62	0,49	8,56	0,93	0,58	2,66	0,52	0,58	0,48	0,59	67,71	0,48	0,57	0,51	0,54	0,51	0,58	0,53	0,52	0,50	0,53	0,47	0,63	0,49	0,57	0,54	0,53	
06_Arve.aval2	0,43	0,42	0,46	0,45	0,44	0,47	0,38	0,37	0,42	0,41	0,45	0,49	0,55	0,42	0,51	0,56	0,40	5,51	0,56	0,39	8,32	1,11	0,41	0,59	0,79	0,58	67,60	0,42	0,71	0,41	0,40	0,37	0,34	0,39	0,50	0,44	0,44	0,40	0,45	0,39	0,40	0,45	
23_Bordes	0,43	0,44	0,48	0,41	0,45	0,46	0,54	0,43	0,41	0,49	0,44	0,62	0,57	0,43	0,42	0,33	0,41	0,40	0,46	0,43	0,39	0,51	0,45	0,44	0,53	0,51	0,46	81,25	0,49	0,43	0,60	0,39	0,39	0,45	0,41	0,34	0,40	0,51	0,46	0,44	0,53	0,55	
59_Reign.amont1	0,58	0,49	0,47	0,38	0,50	0,40	0,45	0,59	0,44	0,54	0,56	0,39	0,40	0,45	0,45	0,38	0,53	0,42	0,39	0,46	0,50	0																					

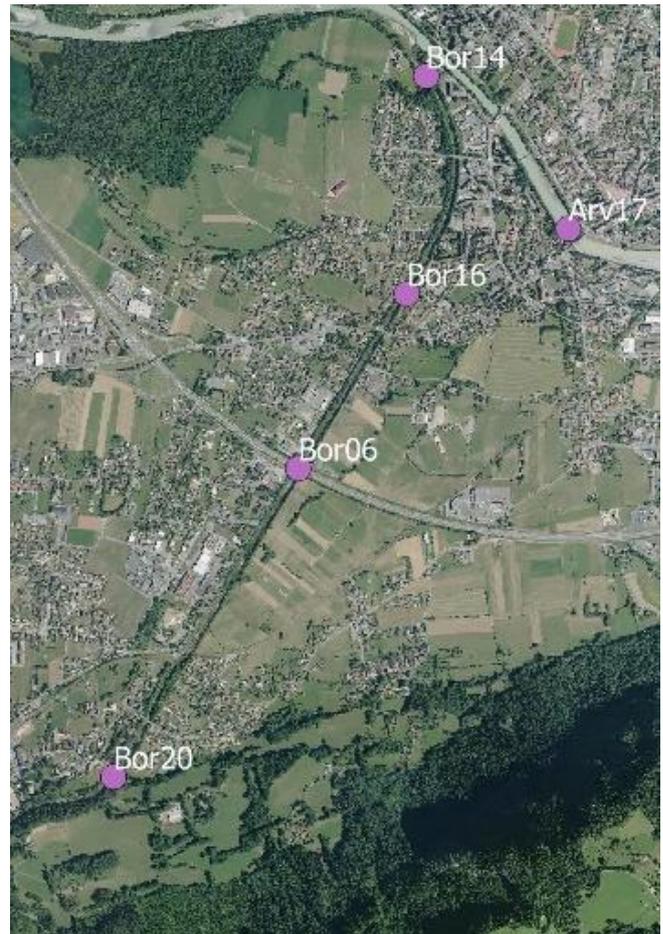
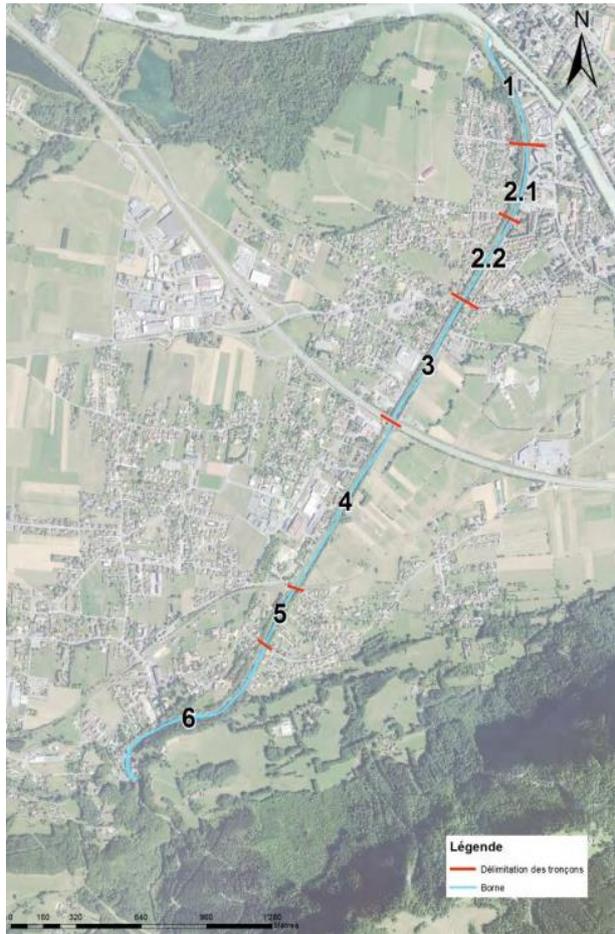


h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



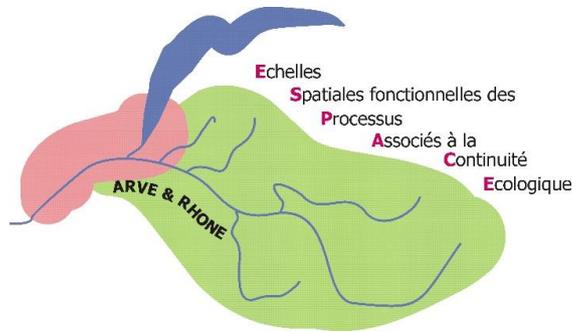
- Annexe 25 : Situation géographique des stations de pêche électrique de la FDPMA74 existantes par rapport aux tronçons définis dans l'étude d'aménagement du Borne aval.





h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



■ Annexe 26 : Modalités pratiques pour l'utilisation de la méthode IAM (DEGIORGI *et al*, 2012).

Pour pouvoir comparer différentes stations d'un même cours d'eau entre elles ou en mesurer l'évolution temporelle, il est important de **standardiser** les modalités pratiques de relevés de terrain et de cartographie. Avant tout, **les descriptions se font en été** (périodes de développement des herbiers), durant l'**étiage moyen** (facteur limitant).

Toutefois, pour certains cours d'eau ou pour certaines problématiques, une description complémentaire pourra être réalisée pour le débit à pleins bords ou /et pour une crue de fréquence annuelle ou/et en étiage d'hiver. Lors de mesures réalisées pour des débits importants, la cartographie est simplement réajustée à partir des relevés réalisés en étiage (hauteurs d'eau et vitesses mesurées de nouveau mais substrats inchangés sauf pour les bordures). Pour chaque cartographie, 4 séries de mesures et de dessins sont réalisées en découpant la station en placettes homogènes pour le descripteur considéré (vitesses du courant, hauteurs d'eau, substrats et supports, pôles d'attraction).

Sur le terrain, les vitesses et les hauteurs d'eau sont mesurées et repérées sur des transects à l'aide d'une jauge graduée, d'un courantomètre et de plusieurs décamètres. Des lignes d'isovitesses et d'isoprotendues sont alors tracées par intrapolation entre les différents transects : si besoin, les limites de zones obtenues sont vérifiées par des mesures ponctuelles complémentaires. Les placettes associées aux différents substrats/supports dont l'attractivité est hiérarchisée sont métrees à l'aide d'un topofil et représentée exhaustivement.

Définition des faciès

Les faciès sont des zones homogènes définies par la **forme globale** du lit (chenal ou annexes, dénivélé, courbure...), la **dominante des vitesses de courant** et la **hauteur modale** de la tranche d'eau au centre du chenal. Les différents faciès sont répertoriés dans l'annexe "Explication des fiches de description de l'habitat du tronçon".

Description du substrat-support

La station est ensuite découpée en placettes d'une surface supérieure à 1 mètre carré ou 0,1.P, l étant la largeur de la lame d'eau, **homogène** en ce qui concerne les substrats support. La plupart du temps, seul l'élément le plus attractif relevé sur une placette est noté. En cas de substrats/supports composites, la hiérarchisation indiquée ci-dessous permet de choisir la dominante. Un substrat/support secondaire ou une indication d'altération de l'attractivité peut cependant être ajouté (cf. ci-dessous).

* Hiérarchisation des substrats :

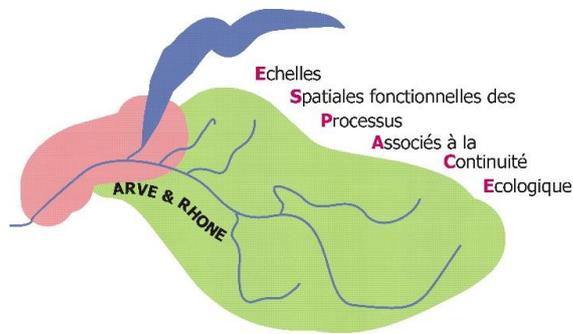
La hiérarchisation est effectuée à partir du degré d'attractivité exercé sur l'ichtyofaune. Cette « hospitalité » différentielle est considérée pour différents écostades, différentes espèces, différentes exigences de chaque espace (nutrition, reproduction, caches/abri, circulation/transition...). Suivant cette optique, c'est surtout la **taille des anfractuosités** servant de support ou de cache aux poissons (ainsi qu'à leur nourriture) qui est prise en compte : ainsi on met sur le même plan, branchage, hydrophytes non colmatés et sous-berges. Toutefois, les hydrophytes et dans une moindre mesure les branchages présentent un attrait supplémentaire comme support de fraie et de nutrition.

- 1° **Hydrophytes (HYI)** : végétaux aquatiques ou amphiphytes noyés à tige souple habitat encombré dans la masse d'eau, avec des coulées d'importance décimétrique.
- 2° **Branchages immergés (BRA)** : amas de branchages, arbres tombés ou s'avancant dans l'eau ou réseaux de racines de gros diamètre. Substrat considéré comme étant le plus attractif.
- 3° **Sous-berge (BER)** : abri creusé sous une berge en terre, créé par une cavité sous des racines immergées, faille dans une paroi rocheuse, ou cache dans les bancs de tufs fracturés (même loin du bord). Cette anfractuosité doit réellement constituer un abri contre le courant et non pas un simple marche pied.
- 4° **Blocs (BLO)** : granulats d'une taille supérieure à 20 cm et offrant une cache assez importante (si un bloc est posé sur du sable ou dégagé par une érosion active, il n'offre plus la même qualité d'abri, il n'est pas noté comme bloc (blo) mais comme bloc sans anfractuosité (bls).
- 5° **Hydrophytes à feuilles flottantes (HYF)** : végétaux aquatiques noyés à feuilles flottantes (nénuphars, potamots...) formant un couvert horizontal, mais ne constituant pas un habitat très encombré dans la masse d'eau.
- 7° **Hélophytes (HEL)** : végétaux à tige ligneuse immergés en partie : densification d'éléments verticaux d'écartement centimétrique à pluri-centimétrique.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



- 6° **Blocs sans anfractuosité (BLS)** : blocs posés sur le sable ou dégagés par l'érosion : il n'y a pas de caches proprement dites mais des zones de turbulence encore attractives pour le poisson.
- 8° **Végétations aquatiques rases (CHV)** : tous supports végétaux de faible hauteur offrant des vides de taille relativement réduite (importance centimétrique) mais très nombreuses (système de racines de petite taille, bryophytes ou autres végétaux hydrophytes ou amphiphytes en début de croissance...)
- 9° **Galets (GAL)**, taille 2 à 20 cm : anfractuosités d'ordre centimétrique, non colmatées
- 10° **Galets et graviers mélangés (GGR)**, taille 0,2 à 20 cm
- 11° **Graviers (GRA)** : taille 0,2 à 2 cm : anfractuosité d'ordre millimétrique
- 12° **Sable (SAB)** : taille 0,2 à 2 mm.
- 13° **Éléments fins (FIN)** : minéral ou organique granulométrie inférieure à 2 mm, substrat n'offrant aucun abri (vase, limon...), mais éventuellement des ressources alimentaires.
- 14° **Dalle (DAL)** : substrat dur horizontal ou vertical n'offrant aucun abri (roche, marne, surface artificielle jointive, palplanche ...) et peu ou pas de ressources alimentaires.
- 15° **Substrats particuliers** : lorsque la problématique de l'étude impose une description plus fine des supports végétaux (ex : cartographie des zones de frayère des espèces recherchant spécifiquement certains types de végétation...) ou lors de cartographie de stations particulières (ex : baissière en zone inondable avec une végétation de prairie terrestre...) des substrats supplémentaires peuvent être ajoutés, en particulier "Prairie immergée" (PRA) correspondant à une végétation terrestre graminée.

* *Choix du nombre de substrats :*

Les principes de descriptions proposés doivent parfois être modulés en fonction des caractéristiques de la rivière, des espèces présentes, de la précision des relevés... Cependant, le principe de travail fondamental est le suivant : **on indique un seul substrat lorsque l'un des deux substrats possède une attractivité nettement plus faible que l'autre** (HYI/fin ou BLO/GRA sont ainsi notés HYI ou BLO dans la plupart des cas). Un substrat secondaire devra être précisé suivant les règles suivantes :

- 1° Le **substrat le plus attractif** relevé sur une placette est considéré comme étant le substrat principal ou le substrat unique s'il représente au moins **25%** de la surface ou de l'encombrement spatial. Sinon, il est noté en substrat secondaire tandis que le support dominant est indiqué en substrat principal, même si ce n'est pas le plus attractif.
- 2° On indiquera également deux substrats lorsque la dimension des caches ou vides caractéristiques de ces substrats est très différente et n'intéresse pas les mêmes poissons (ou même écostades).

Exemples : les racines regroupant à la fois un substrat du type chevelu racinaire et une sous-berge seront notées comme "ber" en substrat principal et comme "chv" en substrat secondaire : les chabots trouveront refuge dans les petites racines, tandis que les chevaines, truites, perches... utiliseront la sous-berge. De la même manière, les zones mixtes de blocs/galets peuvent intéresser les truites, barbeaux, chevaines (dans les blocs) et les loches, chabots (dans les galets). Un substrat mixte composé principalement de petites racines, de sous-berges et branchages associés est noté "chv/bra" : chv en tant que support dominant en proportion, de nature très différente de bra ou ber (taille des vides) et bra car ce substrat est plus attractif que ber. Tuf fracturé formant des caches et bryophytes = ber/chv.

- 3° Enfin lorsqu'un substrat **ne dépassant pas 75 %** de surface par placette demeure systématiquement moins attractif que le substrat conjoint (exemple sable à 40% ou 60% avec galets, graviers, blocs...) mais qu'il n'apparaît jamais en substrat "pur" ou principal (>25%), il passe substrat principal sur une fraction des placettes composites proportionnelle. Sa représentativité est appréciée empiriquement.

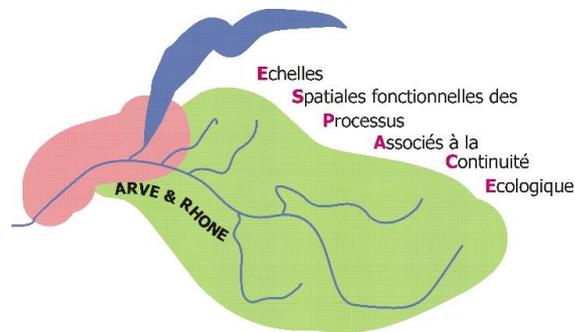
* *Altération ou modification de l'attractivité*

◇ **Épaississement spatial, densification** (suffixe "D" à la place de la troisième lettre) Une indication de densité d'encombrement de l'habitat est utilisée pour préciser la description



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



des supports végétaux lorsqu'ils sont fermés par une densification qui semble pénalisante pour la circulation et la vie du poisson.

Par exemple, herbier à cératophylles très serré, envahissant et encroûté, noté HYD, ou roselière très dense et fermée notée HLD. *A contrario*, des héliophytes très épars ou des herbiers clairsemés sur fond nus sont notés hle ou hye.

- ◇ **Algues filamenteuses (alg)** : lorsque les algues colmatent un habitat, celles-ci sont indiquées en substrat secondaire uniquement en raison des cycles de développement très rapide de ces végétaux et pour rendre comparable les cartographies.

La mention supplémentaire "alg" ne sera indiquée que lorsque le développement des algues filamenteuses est visiblement **anormal** et qu'il pénalise l'habitabilité d'un substrat en colmatant les anfractuosités ; ce colmatage est par définition variable suivant les saisons (cf. Cycle de développement des algues filamenteuses).

- ◇ **Éléments colmatants (col)** : lorsque des éléments fins colmatent un habitat ceux-ci sont indiqués en substrat secondaire uniquement de la même manière que pour les algues, afin de différencier les zones de sédimentation naturelle des secteurs qui voient leur habitabilité potentielle réduite par des pollutions physiques ou organiques.

Soit les éléments fins constituent le substrat normal et unique de la placette en zone de sédimentation : **un seul substrat** est noté (fin) ; soit le colmatage par des éléments fins rend le substrat sous-jacent inutilisable par les poissons : le **substrat sous-jacent** est alors indiqué **associé** à la mention "col" pour indiquer la pollution par des matières en suspension. Cette notation permet de différencier les zones où les phénomènes de sédimentation sont naturels des secteurs qui voient leur habitabilité altérée.

- ◇ **Pavage** des galets et des blocs (bls, gls) : lorsque des éléments minéraux grossiers sont pavés, c'est à dire lorsqu'ils compose une cuirasse sans anfractuosités ou/ et sons englobés dans des substrats plus fins qui les ferment complètement leur attractivité est fortement diminuée. Cette tendance est plus particulièrement sensible pour les galets qui perdent beaucoup de leur capacité biogènes lorsqu'ils sont pavés.

* Représentation cartographique :

Pour les stations où les relevés ont été réalisés à pied, la représentation des surfaces observées pour chaque substrat est réalisée à l'échelle sur un fond de carte sur toute la surface du cours d'eau. Le substrat secondaire ou l'indication d'altération est indiqué en inscrivant le code du substrat (3 lettres voir plus haut).

Description de la hauteur d'eau

Les hauteurs de la tranche d'eau sont mesurées à pied ou par écho-sondeurs sur des transects placés et divisés de façon à encadrer les ruptures de pente et les variations nettes de profondeur, ce qui représente 5 à 20 transects par station selon l'hétérogénéité du milieu. Ces mesures sont ensuite regroupées en 5 classes :

- | | | |
|---------------------|-------------------|----------------------|
| - 1 : moins de 5 cm | - 3 : 21 à 70 cm | |
| - 2 : 6 à 20 cm | - 4 : 71 à 150 cm | - 5 : plus de 151 cm |

Description de la vitesse du courant

La vitesse mesurée à 0,6 fois la hauteur d'eau sur les transects vitesses "représentatives" définis ci-dessus

- | | | |
|------------------------|---------------------|------------------------|
| - 1 : moins de 10 cm/s | - 3 : 41 à 80 cm/s | |
| - 2 : 11 à 40 cm/s | - 4 : 81 à 150 cm/s | - 5 : plus de 151 cm/s |

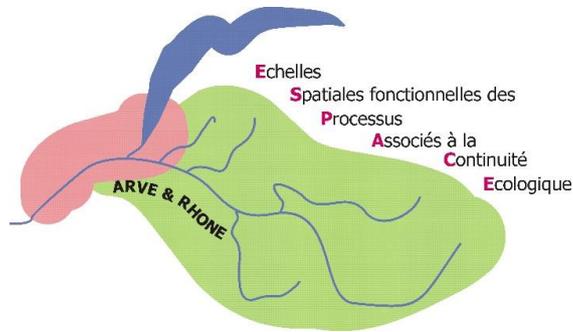
Constitution des pôles d'attraction

L'intersection des 3 niveaux d'information précédents sert à délimiter les pôles d'attraction. Un pôle d'attraction est donc défini par le substrat principal uniquement, dans un but de simplification, par la hauteur d'eau et par la vitesse. Par conséquent, les pôles sont codifiés par les 3 lettres du substrat principal, par le chiffre correspondant à la classe de hauteur d'eau et par le chiffre de la classe de vitesse.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



Expression des résultats et règles d'interprétations.

Les cartes obtenues permettent de visualiser l'attractivité ou l'uniformité des mosaïques d'habitats (fig. 15 et ann. 6). Plus synthétiquement, des indices replacent les résultats obtenus pour chaque station sur des échelles d'hétérogénéité et d'attractivité biogène.

- * **Var** = variété : nombre de catégories (de substrats/supports) ou de classes (de vitesses et de profondeurs) pour chacune des composantes de la qualité des mosaïques d'habitats
- * **Div** = Diversité : mesure de la complexité et de l'hétérogénéité quantitative de la répartition des surfaces entre les catégories de chaque composante de la qualité de l'habitat :

$$-\sum_n^1 S_i * [\log_{10}(S_i)]$$
 où : n est le nombre de catégorie (n=var)

S_i est la surface cumulée des placettes de la $i^{\text{ème}}$ catégorie

* **Reg** = Régularité : rapport entre la diversité observée et la diversité optimale pour une même variété correspondant à l'équi-répartition.

* **IAM** = Indice d'Attractivité Morphodynamique sanctionnant la variété des classes de profondeur, de vitesses et de substrats/supports ainsi que leur attractivité vis-à-vis de l'ichtyofaune.

$$\text{IAM} = [\sum (S_i * \text{Attract.}(\text{subst}_i))] * \text{Var}(\text{subst}) * \text{Var}(\text{h.e.}) * \text{Var}(\text{v.})$$

où : v. vitesses h.e : hauteurs d'eau subs. substrats/supports Attract. attractivité (tab. XI).

La hiérarchisation et la cotation de l'attractivité **globale** des substrats/supports a été déterminée statistiquement sur plusieurs dizaines de rivières (tab. I). Ces scores prennent en compte les exigences de l'ensemble des pisciaires et intègrent donc l'ensemble des ressorts physiques nécessaires aux transferts trophiques.

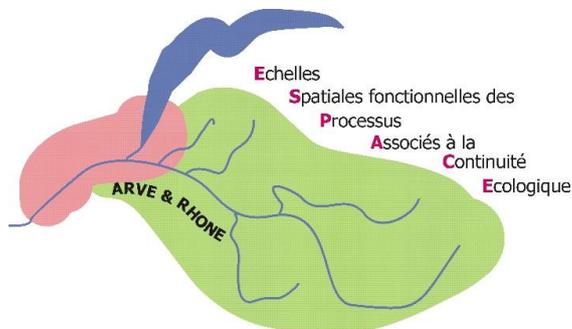
Code	Substrat	Attractivité
BRA	branchages, grosses racines immergés	100
BER	sous-berges	90
HYI	hydrophytes immergés	80
AFF	sources, résurgences, affluents	70
BLO	blocs avec caches	60
GAL	galets	50
HEL	hélophytes	40
CHV	chevelus racinaires, végétations rases	40
BLO	blocs sans anfractuosités	30
GGR	galets et graviers mélangés	25
GRA	graviers	20
GLS	galets pavés (sans anfractuosités)	10
LIT	litières organiques	10
SAB	sables	8
FIN	éléments fins, limons, vases	4
DAL	dalles, surfaces indurées (sans cache)	1

Tableau I : hiérarchisation de l'attractivité des différents substrats.



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



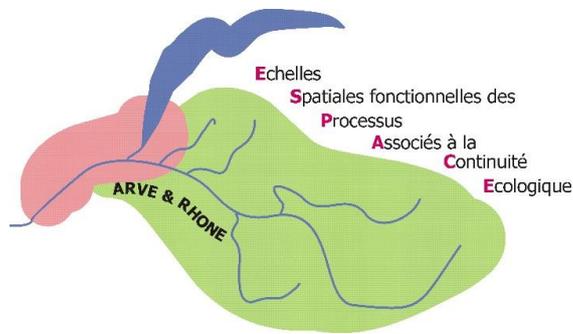
Annexe 27 : Fiches-terrains pour l'utilisation de la méthode du MAG12 (ou MAG20).

IDENTIFICATION DU PRELEVEMENT			
Cours d'eau :		Station :	
Syndicat :		Commune :	
Date :		Heure :	
Préleveur (s) :			
LOCALISATION DU PRELEVEMENT (Lambert II étendu)			
X amont :	X aval :	Altitude :	
Y amont :	Y aval :		
CONDITIONS METEOROLOGIQUES			
<input type="checkbox"/> ensoleillé	<input type="checkbox"/> variable	<input type="checkbox"/> couvert	
<input type="checkbox"/> bruine	<input type="checkbox"/> averse	<input type="checkbox"/> pluie	
<input type="checkbox"/> brouillard	<input type="checkbox"/> neige	<input type="checkbox"/> orage	
MESURES PHYSICO CHIMIQUES IN SITU			
Matériel de mesures :	Multi WTW 340i Kit complet - sondes 1m (2F30 - 104211) Bandelettes nitrites, nitrates, phosphates, ammonium		
Température de l'air :		pH :	
Température de l'eau :		Conductivité :	
Teneur en O ₂ dissous :		Saturation O ₂ dissous :	
NO ₃ ⁻ :		NO ₂ ⁻ :	
PO ₄ ³⁻ :		NH ₄ ⁺ :	
CONDITIONS HYDROLOGIQUES			
<input type="checkbox"/> Etiage	<input type="checkbox"/> Eaux moyennes	<input type="checkbox"/> Hautes eaux	
<input type="checkbox"/> Non perturbée	<input type="checkbox"/> Influencée	<input type="checkbox"/> Décru	
Observations visuelles et olfactives			
Aspect des abords :	<input type="checkbox"/> propres	<input type="checkbox"/> sale	
Ombrage :	<input type="checkbox"/> absent	<input type="checkbox"/> faible	
	<input type="checkbox"/> moyen	<input type="checkbox"/> fort	
Présence d'hydrocarbures :	<input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> traces
Présence de mousses (détergents) :	<input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non	
Présence de bois, feuilles :	<input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non	
Présence de végétaux aquatique :	<input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non	<input type="checkbox"/> algues
Présence d'autres corps :	<input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non	
Couleur :	<input type="checkbox"/> incolore	<input type="checkbox"/> légèrement coloré	<input type="checkbox"/> très coloré
Limpidité :	<input type="checkbox"/> limpide	<input type="checkbox"/> légèrement trouble	<input type="checkbox"/> trouble
Odeur :	<input type="checkbox"/> sans	<input type="checkbox"/> légère	<input type="checkbox"/> forte



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



TYPES DE FACIES D'ECOULEMENTS PRELEVES					
chenal lentique		chenal lotique		mouille	
radier		rapide		cascade	
plat lentique		plat courant			

OCCUPATION DU SOL					
prairial		forestier		agricole	
peupleraie		marais		friches	
urbanisé		industriel			

CARACTERISTIQUES DES BERGES						
	Rive droite			Rive gauche		
Nature :	naturelle			naturelle		
	artificielle			artificielle		
Pente :	douce			douce		
	inclinée			inclinée		
	verticale			verticale		
Densité de la ripisylve :	absente			absente		
	éparse			éparse		
	équilibrée			équilibrée		
	dense			dense		
Type de la ripisylve :	arbustive et/ou arborée			arbustive et/ou arborée		
	herbacée			herbacée		
	exotique colonisatrice			exotique colonisatrice		
	ligneuse plantée			ligneuse plantée		
	culture			culture		

Schéma de la station					



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

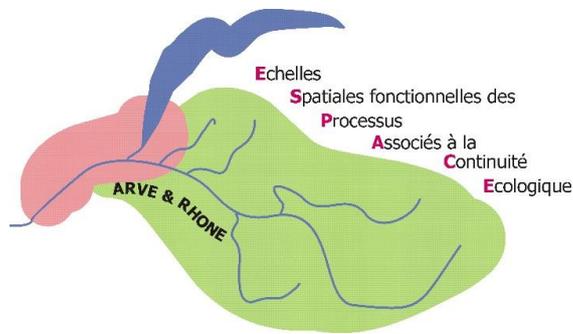


TABLEAU D'ECHANTILLONNAGE

SUPPORTS			CLASSES DE VITESSES							
			N2 > 150cm/s	N4 75 à 150cm/s	N5 25 à 75cm/s	N3 6 à 25cm/s	N1 < 5cm/s			
Nature	Superficie relative		Prélèvements							
	%estimé	D*-M*								
Bryophytes	9									
Hydrophytes	8									
Litières, débris végétaux	7A									
Branchages, racines	7b									
Pierres et galets	6									
Blocs	1R									
Graviers	5									
Hélophytes	4									
Vases	3									
Sables, limons	2									
Algues	0									
Dalles, Argiles	1D									

D* : Support Dominant > 5%

M* : Support Marginal < 5%

- Largeur de plein bord estimée (Lpb_{est}):
- Longueur station repérée (Lsr) = $Lpb_{est} \times 30$ (grand cours d'eau) à 50 (petits cours d'eau) :
- Largeur moyenne de plein bord mesurée (Lpb) = moyenne (10 transects espacés de $1,5Lpb_{est}$)

Lpb 1	Lpb 2	Lpb 3	Lpb 4	Lpb 5	Lpb 6	Lpb 7	Lpb 8	Lpb 9	Lpb 10	Lpb Moyenne

- Longueur totale de la station (Lt) = 12, 18 ou $6 \times Lpb = 5,1 \times 12 =$
 12 (petit et moyen cours d'eau) ; 18 (très petit cours d'eau) ; 6 (grands cours d'eau)

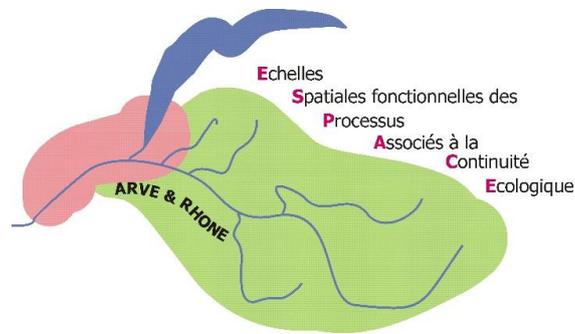
CONDITIONS DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

Prélèvements	Hauteur d'eau Profondeur en cm	Colmatage du substrat	Végétation		Stabilité du substrat
			Nature	Abondance	
P1					
P2					
P3					
P4					
P5					
P6					
P7					
P8					
P9					
P10					
P11					
P12					



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève



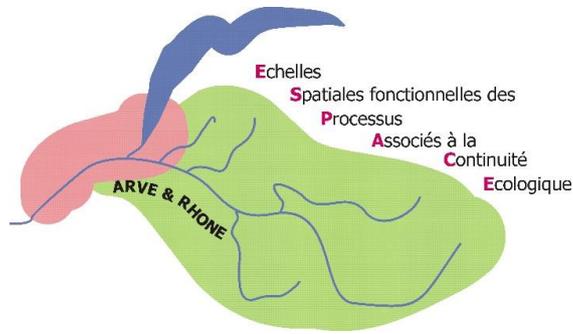
Annexe 28 : Définition des critères de découpage des tronçons homogènes pour le modèle

	Critères	Valeurs prises en compte pour le découpage (synonyme de dégradation ou bonus)
Thermie	risque développement de la PKD	>360 hrs
	stress thermique > 25°C	> 50 hrs
	stress thermique : durée de la période où T°C comprise entre 4 et 19°C	< 50 %
	durée de la Phase Embryo-Larvaire (PEL)	>200 jours
Habitat	tronçons court-circuités	
	présence de plans d'eau sur les cours d'eau	
	ruptures de pente	autre >200 ‰ = apiscicole
	style fluvial / largeur fond de vallée	secteur restreint secteur en divagation
	présence de digue (prospection berge) en bordure de lit mineur	liaisonnée libre
	Géologie	<i>alluvion+graviers + sables</i>
roch sédimentaires		turbidité pour les marnes et argiles.
roch métamorphiques		faible minéralisation / pauvre
granite		faible minéralisation / pauvre
Qualité d'eau	hydrobiologie	IBGN =< 5
		IBGN =< 12
		IBGN =< 14
	physico-chimie (cf. CAUDRON <i>et al.</i> , 2006)	DBO5 > 3 mg/l
		Dureté totale < 20 mg/l
		O2 dissous < 70%
		NH3 >0,025 mg/l
		NO2 > 0,1 mg/l
		NH4 > 0,3 mg/l
		NH4 > 1 mg/l
PO4 > 0,3 mg/l		
PO4 > 1 mg/l		



h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève



- **Annexe 29 : Définition des 3 métriques utilisées dans le calcul de l'indice global de la valeur d'habitat attribué à chaque tronçon dans l'exemple d'utilisation du modèle pour le bassin versant du Borne.**

Métrique physico-chimique	Indice retenu	IBGN (classes DCE)		Seuil physico-chimique selon CAUDRON <i>et al.</i> (2006)	Indice de qualité des eaux
	0		TB	>14	
-1		B	14<IBGN<12	en dessous de souhaitable	0,75
-2		Moy/Médiocre	12<IBGN<5	néfaste	0,5
-3		Mauvais	5	léta / sub léta	0,25

Métrique thermique	Indice retenu	% de température entre 4-19°C	Stress estival T°C >25°C*	Temps de la Phase Embryo-Larvaire	Indicateur PKD*	Indice thermique
	0					
-1		40%	1-10 hrs			0,75
-2		50%-55%	10-50 hrs		> 300 hrs	0,5
-3		< 50 %	> 50 hrs	> 200 jrs	>360 hrs	0,25

* valeur issue directement de la macro MACMA Salmo (DUMOUTIERS *et al.*, 2010)

Métrique habitat physique / artificialisation	Indice retenu	Artificialisation des berges/lit	Impact hydroélectrique	Indice hydromorphologique
	0		>10%	nul ou insensible
-1		10-25%	sensible	0,1
-2		25-50%	marqué	0,25
-3		>50%	fort	0,5

Valeur d'un sous indice = valeur la plus faible parmi celles de tous les critères

Indice global = le plus faible des 3 sous indices