



HAL
open science

Utilisation de l'habitat hydraulique et thermique par les poissons (répartition spatiale et temporelle des habitats)

Hervé Capra, H. Pella, J. Bergé, E. Mcneil, M. Ovidio, C. Bouillon M., C. Alfaro, A.-L. Jeanpierre

► To cite this version:

Hervé Capra, H. Pella, J. Bergé, E. Mcneil, M. Ovidio, et al.. Utilisation de l'habitat hydraulique et thermique par les poissons (répartition spatiale et temporelle des habitats). IRSTEA. 2012, 188 pp. hal-04195719

HAL Id: hal-04195719

<https://hal.science/hal-04195719>

Submitted on 4 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Étude Thermique Rhône - Phase 4

Lot 4 :
**Utilisation de l'habitat hydraulique et thermique
par les poissons**
(répartition spatiale et temporelle des habitats)

Rapport final — 12 septembre 2012

Capra H.¹, Pella H.¹, Bergé J.¹, McNeil E.^{2,3}, Ovidio M.⁴,
Bouillon M. C.^{2,3}, Alfaro C.² et Jeanpierre A.¹

¹ – Irstea (anciennement Cemagref); ² – Aecom, ³ – HydroQuébec; ⁴ – Université de Liège

avec la collaboration technique de Pascal Roger et Raphaël Mons (Irstea)



SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	14
RESUME.....	15
Sélection de l’habitat	15
Répartition spatiale.....	16
Déplacements et trajectoires.....	17
Conclusions	17
INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE L’ETUDE	19
Première partie : SITE D’ETUDE	24
Description générale.....	24
Choix de l’échelle spatiale des sites d’études	24
Hydrologie et thermie du Rhône dans le tronçon d’étude.....	25
L’année 2009.....	30
L’année 2010.....	30
Analyse de la variabilité.....	31
Description du site d’étude 2009.....	32
Description du peuplement de poisson du Rhône à Bugey	36
Deuxième partie : MODELISATION HYDRODYNAMIQUE	40
Modèle du tronçon complet.....	40
Modèle du site d’étude de 2009	40
Mise en œuvre du modèle hydrodynamique (d’après Capra <i>et al.</i> , 2011b)	41
Conditions aux frontières	46
Substrat.....	47
Fonctionnement CNPE.....	48
Test des simulations quasi-stationnaires vs non stationnaires	49
Validation du modèle	49
Troisième partie : TELEMETRIE FIXE - 2009.....	52
Description des conditions environnementales	52
Description des conditions hydrodynamiques du site d’étude	55
Expérimentation de télémétrie acoustique fixe	60
Principe – intérêt	60
Déploiement	60
Test de la probabilité de détection et de l’erreur de positionnement	61
Données poissons	62
Marquage.....	62
Description générale des données de base	63
Données hydrodynamiques et thermiques associées aux positionnements des poissons.....	70
Analyses des données de localisation des poissons et résultats	70
Sélection de l’habitat.....	71
Courbes de préférence.....	71

Courbes de préférences pour chaque espèce (globales)	73
Courbes de préférences individuelles	73
Courbes de préférences individuelles en Resting et en Moving	74
Hydrosignature de préférence	79
Hydrosignatures de préférences pour chaque espèce (globales)	79
Variation des hydrosignatures de préférences globales en fonction du débit	84
Analyse des hydrosignatures de préférence hydraulique	85
Pourcentage de temps passé dans les habitats sélectionnés	87
Localisation des poissons versus habitat disponible	87
Répartition spatiale des individus	93
Répartition spatiale par espèce	93
Proportions des localisations des poissons dans l'eau échauffée ou non échauffée	94
Repérage d'habitats utilisés par plusieurs individus de la même espèce	100
Répartition spatiale individuelle.....	104
Répartition des localisations des poissons au cours des phases nyctémérales	105
Répartition des localisations des poissons au cours des phases de débit	109
Utilisation conjointe de l'habitat	110
Descriptif par individu avec superposition des individus principaux	110
Caractérisation des habitats les plus utilisés	111
Analyse des cartographies des localisations conjointes et simultanées	112
Première approche des trajectoires lors des changements de l'environnement	119
Les proportions de resting et moving	119
Déplacements des individus	121
Orientation entre deux localisations	121
Distances parcourues	125
Analyse des trajectoires.....	133
Cartographies des trajectoires pendant les changements de débit.....	133
Visualisateur des déplacements et des chronogrammes d'utilisation de l'habitat .	136
Pour résumer	136
 Quatrième partie : TELEMETRIE MOBILE - 2010	 140
Description des conditions environnementales	140
Expérimentation de télémétrie acoustique mobile	140
Principe – intérêt	140
Déploiement	140
Test de précision.....	142
Données poissons	142
Marquage.....	142
Traitement des enregistrements.....	143
Description générale des résultats	144
Exploration des données.....	148
Résultats généraux.....	148
Analyse des déplacements individuels.....	148
Analyse des déplacements amont – aval	148
Analyse des déplacements nets en fonction de la température de l'eau et du débit...	150
Déplacements par période de température	150
Déplacements par période de température et de changement de débit	153
Conclusions	155
Perspectives	156

CONCLUSIONS	157
Synthèse des résultats.....	157
Sélection de l'habitat.....	157
Répartition spatiale.....	158
Déplacements et trajectoires.....	159
En conclusion	161
Eléments de discussion.....	162
Modélisation hydrodynamique.....	162
Des habitats peu connus	162
Notion de refuge thermique.....	163
Notion de connectivité	163
Problème de référence	164
Représentativité de notre étude	165
BIBLIOGRAPHIE	166
ANNEXES	169

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Tronçon d'étude : le Rhône entre Sault-Brénaz et Jons. Le tracé du Rhône est superposé au modèle numérique de terrain (élévation en m; dégradé de gris pour différentes classe d'élévation en m). Les cinq secteurs sont définis en fonction de la pente. Le polygone noir au droit du CNPE de Bugey matérialise le secteur du Rhône modélisé pour l'étude de 2009. En 2010 c'est l'ensemble du tronçon qui a été étudié. PK = Point Kilométrique.</i>	<i>26</i>
<i>Figure 2 : Quelques photos du tronçon d'étude avec de haut en bas et de gauche à droite : confluence de l'Ain, l'île de la Fenièrre (St Vulbas), les îles de Proulieu, les rapides à l'aval de Loyettes, le CNPE de Bugey, le défilé de Vertrieu, le barrage de Jons, un banc de galet exondé à bas débit à Marcilleux, Sault-Brénaz.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 3 : Débit moyen journalier du Rhône en amont du secteur d'étude (Pk 56, Lagnieu) pour l'année 2009 (rouge), pour l'année 2010 (bleu) et moyenne calculée pour chaque jour de l'année sur la période 1980 – 2008, ainsi que le minimum (Min.) et le maximum (Max.). Données source EDF.</i>	<i>28</i>
<i>Figure 4 : Température moyenne journalière de l'eau du Rhône en amont du secteur d'étude en 2009 (rouge), pour l'année 2010 (bleu) et température moyenne journalière (Moy), minimum (Min) et maximum (Max) sur la période 1980-2008. Données source EDF.</i>	<i>29</i>
<i>Figure 5 : Exemple de variabilité journalière du débit du Rhône à Lagnieu (Pk56) en décembre 2007. Les augmentations et diminutions de débit sont indiquées sur le graphe. (d'après Capra et al. 2011a - rapport de l'accord cadre Cemagref - AERM&C)</i>	<i>31</i>
<i>Figure 6 : photos aériennes du site d'étude à grande résolution (R. Montagnon – Paracom – 2009). Les photos ont été mosaïquées et géoréférencées. On visualise très bien le banc de galets juste en amont de la confluence du rejet 2-3. La confluence de rejet 4-5 est indiquée mais pas visible et la prise d'eau est en amont toujours en rive droite.</i>	<i>32</i>
<i>Figure 7 : vue panoramique du site d'étude rive droite (en haut ; photos H. Pella – Irstea) ; détail de l'aval du rejet principale (tranches 2 et 3) à haut (en bas à gauche ; photos H. Capra – Irstea) et bas débit (en bas à droite ; photos H. Capra – Irstea).....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 8 : vue panoramique du site d'étude rive gauche (en haut ; photos H. Pella – Irstea ; les bouées indiquent la position des blocs bétons utilisés pour l'expérimentation de télémétrie fixe de 2009) ; détail du rejet secondaire (tranches 4 et 5) en bas à gauche et de la prise d'eau (en bas à droite ; photos H. Capra – Irstea).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 9 : Photos infra-rouge réalisées pour le compte d'EDF-CNPE Bugey (fournies gracieusement) le 20 août 2009 ($450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Visualisation des deux rejets (4-5 en haut à gauche, et 2-3 en haut à droite) et vue d'ensemble du site d'étude (en bas).</i>	<i>35</i>
<i>Figure 10 : Description des effectifs moyens par taxon (1=recrutement, 2=juvéniles, 3=adultes) capturés entre 1980 et 2010 sur l'ensemble des stations de pêche du suivi hydrobiologique du CNPE de Bugey par classe de température de l'eau (°C) dans la station de pêche. Les carreaux sont proportionnels à l'effectif.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 11 : Biomasses des stades 3 (adultes) des trois espèces (barbeau, chevaine, et silure, de haut en bas) capturées dans les stations de pêche du suivi hydrobiologique et piscicole du CNPE-Bugey, réparties dans des classes de température (entre 0° et plus que 24°C par pas de 4°C) de l'eau le jour de la pêche.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 12 : Effectif moyen pour trente minutes de pêche (suivi hydrobiologique du CNPE de Bugey) des stades 3 (adultes) des trois espèces (barbeau, chevaine, et silure, de haut en bas) capturés dans les stations réchauffées (rouge) et non-réchauffées (noir), de 1980 à 2010. ...</i>	<i>38</i>
<i>Figure 13 : représentation de l'élévation (altitude en m) du fond du Rhône (à gauche), et maillage construit pour la discrétisation géométrique du site d'étude (à droite).</i>	<i>44</i>
<i>Figure 14 : Représentation des conditions hydrodynamiques à $520 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A gauche les vecteurs vitesse (de taille proportionnelle à la norme du vecteur) sur fond d'isosurfaces de profondeur (m). A droite scalaire de la vitesse (isosurfaces).</i>	<i>45</i>

<i>Figure 15 : Relation entre le débit horaire (en $m^3.s^{-1}$) estimé avec la sonde de pression installée à l'aval du site d'étude (entre Pks 44 & 43) et le débit horaire de la CNR enregistré au centre du site d'étude (Pk 44.5).</i>	46
<i>Figure 16 : Chronique de débit horaire du Rhône ($m^3.s^{-1}$) au centre du site d'étude (Pk 44.5) du 3 juillet au 29 septembre 2009 – Données fournies par la CNR.</i>	46
<i>Figure 17 : Chroniques de la température de l'eau (pas de temps horaire) en amont du site d'étude (T-amont), dans le rejet 4-5 (circuits fermés ; T-rejet4-5) et dans le rejet 2-3 (circuits ouverts ; T-rejet2-3).</i>	47
<i>Figure 18 : cartographie de la répartition spatiale des 6 classes de substrat dominant observées sur le site d'étude (le Rhône au droit du CNPE de Bugey).</i>	48
<i>Figure 19 : Vérification de l'adéquation entre les vitesses simulées (vecteurs répartis sur tout le graphe) et mesurées par ADCP (vecteurs resserrés au centre du graphe) sur un transect à l'aval du CNPE de Bugey et pour un débit bas de $190 m^3.s^{-1}$.</i>	50
<i>Figure 20 : Validation de la simulation de la température de l'eau sur le site d'étude (conditions du 20 août 2009) ; à gauche la simulation, à droite une photo infra-rouge réalisée pour le compte d'EDF-CNPE Bugey (fournie gracieusement).</i>	50
<i>Figure 21 : Validation de la simulation de la température de l'eau sur le site d'étude par comparaison graphique entre les conditions du 19 septembre 2009 (débit entrant $145 m^3.s^{-1}$ et température amont de $17.3^{\circ}C$; isosurfaces colorées en fonction de seuils de température) et des transects de relevés de température du 11 octobre 2009 dans des conditions assez proches (débit entrant $145 m^3.s^{-1}$ et température amont de $16.4^{\circ}C$; trait de couleur fonction de seuils de température).</i>	51
<i>Figure 22 : distribution des débits enregistrés à Bugey en 2009 (juillet – septembre) pour chaque phase de débit.</i>	52
<i>Figure 23 : distribution des débits enregistrés à Bugey en 2009 (juillet – septembre) pour chaque phase nyctémérale.</i>	53
<i>Figure 24 : contour du panache d'eau chaude simulé pour $150, 200, 300, 500$ et $800 m^3.s^{-1}$. Physiquement il n'existe pas de limite stricte, mais un gradient de température (diffusion) au contact entre les veines d'eau chaudes et froides. Nous avons choisi comme limite, les nœuds du maillage pour lesquels la température simulée était de $2^{\circ}C$ plus élevées que la température à l'amont du site. Ce sont les contours des aires d'influence de ces nœuds ayant une température plus chaude de $2^{\circ}C$, qui forment les contours présentés sur cette figure.</i>	54
<i>Figure 25 : représentations des conditions hydrauliques observées dans le site d'étude, sous forme de d'évolution des distribution de profondeur (à gauche) et de vitesse d'écoulement (à droite) entre 150 et $850 m^3.s^{-1}$. Les limites des classes de profondeur sont : $0.8 ; 1.4 ; 1.8 ; 2.2 ; 2.6 ; 3.2 m$ et plus; les limites des classes de vitesse sont : $0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1.0 ; 1.4 m.s^{-1}$ et plus. Chaque courbe est l'évolution en fonction du débit du pourcentage que représente la surface associée à cette classe sur la surface mouillée.</i>	56
<i>Figure 26 : Visualisation de la profondeur d'eau simulée pour chaque nœud dits « en eau » pour un débit de $150, 300$ et $700 m^3.s^{-1}$. Les éléments du maillage situés dans la prise d'eau ou dans les rejets d'eau chaude ont été omis.</i>	57
<i>Figure 27 : Visualisation du scalaire de la vitesse d'écoulement (moyenne sur la profondeur) simulée pour chaque nœud dits « en eau » pour un débit de $150, 300$ et $700 m^3.s^{-1}$. Les éléments du maillage situés dans la prise d'eau ou dans les rejets d'eau chaude ont été omis.</i>	58
<i>Figure 28 : Evolution en fonction du débit de la largeur moyenne en eau, de la surface mouillée, de la profondeur et de la vitesse moyennes.</i>	59
<i>Figure 29 : déploiement du matériel HTI sur le site d'étude (le Rhône au droit du CNPE de Bugey). Des blocs béton de $300 kg$ sont déposés au fond du Rhône en des positions précises déterminée pour maximiser la surface d'écoute du système (A, B et C). Les hydrophones</i>	

<i>installés dans chaque bloc de béton sont reliés par des câbles (D) à une centrale d'acquisition implantée dans le CNPE (E).</i>	60
<i>Figure 30 : positionnement (points rouges) de 28 des 32 hydrophones (les 4 plus aval ne sont pas visible sur cette vue) sur une vue en 3D représentant le modèle numérique de terrain du site d'étude (élévation en m). Noter que les positions des hydrophones ont été déterminées en partie pour maximiser la surface d'écoute (nombre maximum d'hydrophones qui se voient) en fonction de la morphologie du site.</i>	61
<i>Figure 31 : Cartes de probabilité de détection et carte d'erreur de positionnement générées pour la combinaison de variables qui permet d'obtenir la meilleure précision. (d'après Bergé et al., 2012).</i>	62
<i>Figure 32 : Distribution du nombre de blocs de 5 min par séquence continue (seqcont).</i>	66
<i>Figure 33 : distribution du nombre de localisations par bloc de 5 min, toutes seqcont confondues.</i>	66
<i>Figure 34 : visualisation de la seqcont n° 3231 (barbeau 3170) sur la grille fixe à 20 m. En gris sont représentés les données brutes, en vert (moving) et en rouge (resting) sont représentés les données après transformation par blocs de 5 min (cf. texte pour le détail de la transformation). Les points rouges et verts sont reliés pour visualiser la trajectoire résultante.</i>	67
<i>Figure 35 : répartition temporelle des localisations pour chaque individus suivi. Les individus sont représentés par la période de leur marque (cf. Tableau III) en ligne. Le temps de suivi est représenté en abscisse et lorsqu'un poisson donné était localisé à un pas de temps un point noir était ajouté sur la ligne correspondant à sa période.</i>	69
<i>Figure 36 : courbes de préférences spécifiques (incluant par espèces toutes les localisations de tous les individus) pour chacune des 4 variables (en ligne) physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau) et chacune des trois espèces principales (colonnes). Pour chaque graphe sont représentées les distributions utilisées (gris) et disponibles (noir). Attention les axes des abscisses sont discrétisés (classes).</i>	75
<i>Figure 37 : courbes de préférences des 5 barbeaux les mieux suivis pour chacune des 4 variables physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau).</i>	76
<i>Figure 38 : courbes de préférences des 7 chevaines les mieux suivis pour chacune des 4 variables physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau).</i>	77
<i>Figure 39 : courbes de préférences des 6 silures les mieux suivis pour chacune des 4 variables physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau).</i>	78
<i>Figure 40 : Hydrosignatures de préférences (profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) pour les barbeaux (tous les individus). Le n entre parenthèse est le nombre de localisations concernées. Pour faciliter la lecture des hydrosignatures nous avons ajouté un dégradé de couleur pour différents seuils de préférence. Il n'ont pas de signification autre que de séparer les carreaux les uns des autres en fonction de la valeur de préférence qu'ils contiennent. Les limites de classes de préférence pour les couleurs de plus en plus foncées sont : [0-0.05]; [0.05-0.1]; [0.1-0.2]; [0.2-0.5]; [0.5-1.0] pour profondeur * vitesse, et [0-0.34]; [0.34-0.67]; [0.67-1.0] pour les autres hydrosignatures.</i>	80
<i>Figure 41 : Hydrosignatures de préférences (profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) pour les chevaines (tous les individus). Le n entre parenthèse est le nombre de localisations concernées. Pour faciliter la lecture des hydrosignatures nous avons ajouté un dégradé de couleur pour différents seuils de préférence. Il n'ont pas de signification autre que de séparer les carreaux les uns des autres en fonction de la valeur de préférence qu'ils contiennent. Les limites de classes de préférence</i>	

<i>pour les couleurs de plus en plus foncées sont : [0-0.05[; [0.05-0.1[; [0.1-0.2[; [0.2-0.5[; [0.5-1.0] pour profondeur * vitesse, et [0-0.34[; [0.34-0.67[; [0.67-1.0] pour les autres hydrosignatures.</i>	<i>81</i>
<i>Figure 42 : Hydrosignatures de préférences (profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) pour les silures (tous les individus). Le n entre parenthèse est le nombre de localisations concernées. Pour faciliter la lecture des hydrosignatures nous avons ajouté un dégradé de couleur pour différents seuils de préférence. Il n'ont pas de signification autre que de séparer les carreaux les uns des autres en fonction de la valeur de préférence qu'ils contiennent. Les limites de classes de préférence pour les couleurs de plus en plus foncées sont : [0-0.05[; [0.05-0.1[; [0.1-0.2[; [0.2-0.5[; [0.5-1.0] pour profondeur * vitesse, et [0-0.34[; [0.34-0.67[; [0.67-1.0] pour les autres hydrosignatures.</i>	<i>82</i>
<i>Figure 43 : Cartographie des VH aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique calculées avec les courbes de préférence du barbeau adulte de Lamouroux et al. (1999) en haut (à débit moyen) et avec les hydrosignatures de préférence (profondeur * vitesse) de notre étude de 2009 en bas (à débit faible). Les localisations des barbeaux suivis en 2009 sont superposées en fonction des phases nyctémérales et représentées en 4 classes de nombre de localisation par carreau de la grille à 20 m. (les simulations ont été réalisées pour les trois classes de débit, mais seuls deux exemples sont montrés ici).</i>	<i>90</i>
<i>Figure 44 : Cartographie des VH aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique calculées avec les courbes de préférence du chevaine adulte de Lamouroux et al. (1999) en haut (à débit faible) et avec les hydrosignatures de préférence (profondeur * vitesse) de notre étude de 2009 en bas (à débit faible). Les localisations des chevaines suivis en 2009 sont superposées en fonction des phases nyctémérales et représentées en 4 classes de nombre de localisation par carreau de la grille à 20 m. (les simulations ont été réalisées pour les trois classes de débit, mais seuls deux exemples sont montrés ici).</i>	<i>91</i>
<i>Figure 45 : Cartographie des VH aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique calculées avec les hydrosignatures de préférence (profondeur * vitesse) du silure issues de notre étude de 2009 à débit moyen (en haut) et à débit faible (en bas). Les localisations des silures suivis en 2009 sont superposées en fonction des phases nyctémérales et représentées en 4 classes de nombre de localisation par carreau de la grille à 20 m.</i>	<i>92</i>
<i>Figure 46 : Densités de localisations (réparties sur la grille à 20 m) des barbeaux sur le site d'étude pour trois classes de débit. Les limites du panache d'eau échauffées simulées pour chaque borne des classes de débit sont représentées en rose sombre pour la borne inférieure et en rose claire pour la borne supérieure. Pour chaque classe de débit, les densités de localisation sont réparties en fonction des phases nyctémérales.</i>	<i>97</i>
<i>Figure 47 : Densités de localisations (réparties sur la grille à 20 m) des chevaines sur le site d'étude pour trois classes de débit. Les limites du panache d'eau échauffées simulées pour chaque borne des classes de débit sont représentées en rose sombre pour la borne inférieure et en rose claire pour la borne supérieure. Pour chaque classe de débit, les densités de localisation sont réparties en fonction des phases nyctémérales.</i>	<i>98</i>
<i>Figure 48 : Densités de localisations (réparties sur la grille à 20 m) des silures sur le site d'étude pour trois classes de débit. Les limites du panache d'eau échauffées simulées pour chaque borne des classes de débit sont représentées en rose sombre pour la borne inférieure et en rose claire pour la borne supérieure. Pour chaque classe de débit, les densités de localisation sont réparties en fonction des phases nyctémérales.</i>	<i>99</i>
<i>Figure 49 : Nombre de localisations pour le barbeau dans chaque carreau de la grille à 20 m pour l'ensemble du suivi et par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis). Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ; [12-120] ; [120-580] ; [580-5000]).</i>	<i>101</i>

<i>Figure 50 : Nombre de localisations pour le chevaïne dans chaque carreau de la grille à 20 m pour l'ensemble du suivi et par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis). Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ; [12-120] ; [120-580] ; [580-5000]).</i>	101
<i>Figure 51 : Nombre de localisations pour le silure dans chaque carreau de la grille à 20 m pour l'ensemble du suivi et par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis). Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ; [12-120] ; [120-580] ; [580-5000]).</i>	102
<i>Figure 52 : Cartographies montrant pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères de barbeau qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis) et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents.</i>	102
<i>Figure 53 : Cartographies montrant pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères de chevaïne qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis) et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents.</i>	103
<i>Figure 54 : Cartographies montrant pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères de silure qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis) et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents.</i>	103
<i>Figure 55 : Distribution du nombre de localisations du barbeau 3100 par jour de suivi (histogrammes bleus) et visualisation de leur répartition spatiale par phase nyctémérale (cartes).</i>	106
<i>Figure 56 : Représentation du nombre de localisations des 5 barbeaux les mieux suivis sur la grille à 20 m par phase nyctémérale. Le nombre de localisations est répartie en 5 classe d'abondance et représenté par un cercle de taille proportionnelle à la classe (cf. légende à coté des cartes). Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.</i>	114
<i>Figure 57 : Représentation du nombre de localisations des 7 chevaines les mieux suivis sur la grille à 20 m par phase nyctémérale. Le nombre de localisations est répartie en 5 classe d'abondance et représenté par un cercle de taille proportionnelle à la classe (cf. légende à coté des cartes). Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.</i>	115
<i>Figure 58 : Représentation du nombre de localisations des 6 silures les mieux suivis sur la grille à 20 m par phase nyctémérale. Le nombre de localisations est répartie en 5 classe d'abondance et représenté par un cercle de taille proportionnelle à la classe (cf. légende à coté des cartes). Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.</i>	116
<i>Figure 59 : Figure 49 (barbeaux) sur laquelle nous avons reporté les spots des 6 silures pour chaque phase nyctémérale.</i>	117
<i>Figure 60 : Cartographies qui présentent par carreau de la grille à 20 m, pour un mois donné du suivi (juillet 2009), par phase nyctémérale et pour une espèce donnée (silure), le nombre d'heures pendant lesquelles au moins 3 congénères (non identifiés) étaient présents simultanément (à l'échelle de l'heure) dans ce carreau. Le nombre d'heure est réparti en trois classes d'abondance (cf. légende sur le graphe).</i>	118
<i>Figure 61 : représentations de type « clocks » des directions entre 2 localisations successives du barbeau 3744 sur l'ensemble du suivi pour chaque phase nyctémérale. Chaque rayon est proportionnel à la distance totale des déplacements correspondants (somme des distances entre chaque couple de localisations utilisé pour évaluer la direction du déplacement), et les quatre rayon sont normalisés par rapport à la taille du plus grand rayon (valeur max indiquée sur les clocks).</i>	123

<i>Figure 62 : Représentation de type « clock » pour les déplacements des individus (identifiés par le code espèce et la période de leur marque) localisés pendant les 11 plus fortes descentes de débit. Dans chaque quartier le premier rayon dans les sens trigonométrique correspond à la première heure des descentes de débit et le second rayon correspond à l'heure précédente.</i>	124
<i>Figure 63 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les barbeaux les mieux suivis pendant chaque phase nyctémérale.</i>	127
<i>Figure 64 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les chevaines les mieux suivis pendant chaque phase nyctémérale.</i>	128
<i>Figure 65 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les silures les mieux suivis pendant chaque phase nyctémérale.</i>	129
<i>Figure 66 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les barbeaux les mieux suivis pendant chaque phase de débit (montées, stables, et descentes).</i>	130
<i>Figure 67 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les chevaines les mieux suivis pendant chaque phase de débit (montées, stables, et descentes).</i>	131
<i>Figure 68 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les silures les mieux suivis pendant chaque phase de débit (montées, stables, et descentes).</i>	132
<i>Figure 69 : trajectoires (seqconts) enregistrées pendant la descente de débit n° 13 qui a duré 4h. En violet sont représentées les trajectoires des silures, en bleu les trajectoires des chevaines et en vert les trajectoires des barbeaux. Le début des trajectoires sont matérialisés par les points orange, et le poisson correspondant est listé à droite ou à gauche de la carte en face du point. Ne sont représentées que les seqconts ayant des localisations pendant la première heure de changement de débit.</i>	134
<i>Figure 70 : comparaison de la trajectoire du silure 3856 (violet) lors d'une montée de débit (à gauche ; montée n° 6) et lors d'une descente de débit (à droite ; descente n° 52).</i>	135
<i>Figure 71 : visualisateur des déplacements (à gauche) et des chronogrammes (à droite) des variables utilisées (vitesse, profondeur, et température). Pour chaque chronogramme la valeur de la température de l'eau amont et du débit sont indiquées.</i>	136
<i>Figure 72 : Exemple de traces bateau pour la remontée des lômes situées à l'aval de Sault-Brénaz.</i>	141
<i>Figure 73 : Schéma de montage l'ATR et du transformateur.</i>	141
<i>Figure 74 : Schéma de montage du matériel sur le bateau. La coupole en aluminium renforcé permet de limiter l'écoute de l'hydrophone omni-directionnel (330°) à un angle de 180°.</i>	141
<i>Figure 75 : Ecran de contrôle du logiciel MarkTags qui permet de saisir les marques des poissons. Les traits parallèles sont des marques représentant les poissons (ici, il s'agit d'un groupe de barbeaux fréquentant régulièrement le secteur des îles de Proulieu).</i>	142
<i>Figure 76 : relation entre la masse (grammes) et la longueur totale (mm) des individus marqués en 2010 ou en 2009 et dont les marques émettaient encore (et qui ont été détecté au moins une fois). Ne sont pas représentés sur ce graphe : anguille (816 ; 1000) ; brème bordelière (635 ; 3600) ; brochet (905 ; 6000) ; perche commune (445 ; 1600).</i>	143
<i>Figure 77 : Cartographie des cônes de positions de poissons du suivi du 21 décembre 2010. (aval Pont de Lagnieu; ; du Pk 54 à 57). Cf. Figure 1 pour le positionnement global.</i>	145
<i>Figure 78 : Cartographie des cônes de positions de poissons du suivi du 6 avril 2010. (amont Pont de Lagnieu; PK 56 à gauche de l'image). Cf. Figure 1 pour le positionnement global.</i>	146

Figure 79 : Exemple de visualisation des résultat pour le chevaine – 3149. En haut à gauche une vue en plan avec toutes les localisation (le nombre bleus = Pk) en ronds rouges (centre de gravité des triangles). En bas à droite une représentations des localisation en abscisses curvilignes, avec un décalage temporel selon l'axe des ordonnées qui permet de voir les directions des déplacements hebdomadaire (ici d'abord vers l'amont puis vers l'aval). A droite un graphique qui permet de visualiser en même temps les chronique de débit (rouge) et température (bleue) au pas de temps hebdomadaire et les déplacements (abscisse curviligne en noire). 147

Figure 80 : distribution du nombre de localisations faisant suite à un déplacement de plus d'1 km vers l'amont (ordonnées positives) ou vers l'aval (ordonnées négatives) en fonction de la localisation longitudinale de départ du déplacement (axe horizontal, avec l'amont au km 0 et l'aval au km 36, par classes de 2 km) pour les trois espèces principales..... 150

Figure 81 : Distance moyenne (et IC) des déplacements des barbeaux (BAF), chevaines (CHE) et silure (SIL) en 2010 pour les 6 périodes définies relativement à des seuils de température. 152

Figure 82 : Distance moyenne (et IC) des déplacements des barbeaux (BAF), chevaines (CHE) et silure (SIL) en 2010 pour les 6 périodes définies relativement à des seuils de température et pour chacune de ces période pour les montées (bleu clair) et les descente (bleu foncé) de débit entre deux localisations. 154

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I : Résumé de l'évolution des caractéristiques hydrauliques principales (profondeur d'eau, vitesse d'écoulement, et largeur en eau moyennes) en fonction du débit, par secteur (cf. Figure 1) et pour l'ensemble du tronçon (d'après Capra et al., 2011a – Rapport de l'accord cadre Cemagref - AERM&C).</i>	43
<i>Tableau II : Dates et heure des phases de débit non-stationnaires qui sont passées par les valeurs de débit seuil en phase de montée ou de descente de débit</i>	49
<i>Tableau III : Présentation générale des individus marqués et de leur localisations (nombre et durée) au cours du suivi de l'été 2009 (juillet – septembre).</i>	64
<i>Tableau IV : Caractéristiques générales des séquences continues (seqcont) déterminée pour chaque individu mais présentées ici par espèces. La répartition du nombre de seqcont par espèce et par couple de phase de débit et phase nyctémérale est aussi présenté. Le nombre de points est celui de la base de données à 5 minutes (cf. plus loin le lissage à 5 minutes).</i>	65
<i>Tableau V : synthèse des hydrosignatures de préférences globales pour profondeur * vitesse, profondeur * température, vitesse * température et substrat * température pour chaque espèce (tous les individus confondus). Les limites des classes sont pour la profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2, pour la vitesse (m.s-1) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 et pour la température (°C) – T1 à T7 : 18[, 20[, 21[, 22[, 23[, 25[et ≥ 25. Les couples en gras représentent une préférence de 1. Les autres couples ont été sélectionnés si la préférence était > 0.6.</i>	83
<i>Tableau VI : synthèse des hydrosignatures de préférences pour profondeur*vitesse, profondeur*température et vitesse*température pour chaque espèce (tous les individus confondus) dans 3 gammes de débit différentes : faible ($< 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), moyen ($300\text{-}500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et fort ($> 500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les limites des classes sont pour la profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2, pour la vitesse (m.s-1) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 et pour la température (°C) – T1 à T7 : 18[, 20[, 21[, 22[, 23[, 25[et ≥ 25. Les couples en gras représentent une préférence de 1. Les autres couples ont été sélectionnés si la préférence était > 0.6.</i>	84
<i>Tableau VII : synthèse des hydrosignatures de préférences pour profondeur * vitesse pour chaque espèce (tous les individus confondus) dans différentes situations : dans le panache (échauffé) ou hors du panache (non-échauffé); en déplacement (moving) ou immobile (resting) et en fonction des différentes phases de débit (monté, stable et descente). Les classes des variables profondeur et vitesse sont pour la profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2 et pour la vitesse (m.s-1) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 ; Les couples en gras représentent une préférence de 1. Les autres couples ont été sélectionnés si la préférence était > 0.6. Les effectifs de localisations ayant permis la construction de l'hydrosignature est indiqué en tête de colonne.</i>	85
<i>Tableau VIII : nombre de phases (montée ou descente) pendant lesquelles le nombre de localisations en moving était inférieur, identique ou supérieur au nombre de localisations en resting. Les localisations sont analysées pendant la première heure de chaque montée (n=83) et de chaque descente (n=86) de débit (1^o heure) et pour la première heure des plus fortes montées (n=17) et des plus fortes descentes (n=11) de débit (fortes).</i>	120
<i>Tableau IX : proportions de localisations de type resting et moving au cours des 3 gouttes froides, pendant les phase de baisse et de remonté de la température de l'eau, pour chacune des trois espèces principales. Les gouttes froides sont décrites par l'amplitude des variations de la température de l'eau et par les durées des descente et des remontés de température de l'eau.</i>	121

Tableau X : répartition des différents types de trajectoires individuelles (vers l'amont, vers l'aval, transversale et mixte) recensées dans la première heure de chaque montée (n=83) et de chaque descente (n=86) de débit..... 133

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord l'ensemble des institutions collaboratrices pour le financement de ce travail : l'Agence de l'Eau RMC, Electricité De France (EDF), l'Union Européenne / FEDER, la Direction Générale d'Irstea et la région Aquitaine.

Dans le cadre de l'expérimentation de télémétrie au droit du CNPE de Bugey, nous avons particulièrement apprécié le soutien d'EDF à travers le dévouement de certaines personnes de la centrale nucléaire du Bugey, qui nous ont facilité le travail à l'intérieur et à l'extérieur du CNPE : Mr. Jean-Claude Zwald, Mr. Jean-Pierre Grosclaude, Mr. Dominique Diévert, Mr. Serge Alcaraz et Mr. Gabriel Rigot.

Nous tenons à remercier chaleureusement les ingénieurs de la société HTI qui sont venus nous aider à mettre en place et étalonner le système de télémétrie. Leur aide a été TRES précieuse et leur formation indispensable. Merci à Tracey Steig, Patrick Neelson, Samuel Johnston et Dave Ouellette.

Nous remercierons aussi toutes les personnes qui ont participé aux préparatifs des expérimentations, à leur déroulement et au traitement des données : Eric Oriol (EDF-DTG), Elise Bultel, Kun-Théa Li, Aubanie Raynal (stagiaires Irstea), Frédérique Baud et Olivier Croze (Irstea Bordeaux).

Merci enfin à l'atelier d'apprentissage de gorge de loup (Denis Brude et ses élèves) pour avoir réalisé dans des délais toujours trop courts tous les supports pour nos expérimentations.

RESUME

Les conclusions du groupe de travail Etude Thermie Rhône- Phase III soulignaient le besoin de prendre en compte conjointement la variabilité spatio-temporelle des conditions d'habitat et de la température pour mieux comprendre les déterminismes de la structuration des communautés de poissons du Rhône. De ce constat sont nés les deux principaux objectifs du Lot 4 de l' Etude Thermie Rhône- Phase IV intitulé « utilisation de l'habitat hydraulique et thermique par les poissons » : (1) modéliser précisément en deux dimensions les variations spatio-temporelles des conditions d'habitat et de température du Rhône dans le secteur de Bugey et (2) analyser les réponses comportementales des poissons soumis à des variations simultanées et contrastées de disponibilité en habitat et de température. Cette étude très novatrice à l'échelle d'un fleuve vise à améliorer la compréhension de la dynamique de structuration des peuplements de poissons en apportant une vision éthologique de la sélection de l'habitat par les poissons en fonction de la température de l'eau et des variations de débit.

Dans un premier temps, nous avons quantifié les choix (sélection) de positionnement des poissons (localisations) au sein du site d'étude (disponibilité), dans différentes configurations de débit, de température et de luminosité. Un second objectif visait plus particulièrement à décrire la répartition spatiale des individus (localisations), en fonction des variations environnementales. Un troisième objectif visait à analyser les déplacements des individus en supposant que lors des variations des conditions environnementales les déplacements (trajectoires) des poissons pouvaient se modifier significativement, et qu'il était possible de d'évaluer ces modifications à partir de nos enregistrements.

Nous avons étudié à deux échelles de temps et d'espace le comportement de trois espèces de poisson caractéristiques du peuplement piscicole actuel du Haut Rhône, le barbeau, le chevine et le silure. Le comportement des poissons était déterminé à partir des localisations des poissons dans le site d'étude obtenues à l'aide d'un équipement de télémétrie acoustique. Une première expérimentation était mise en œuvre dans une station d'étude de presque 2 km au droit du CNPE de Bugey pour étudier l'effet de variations environnementales infra journalières sur le comportement des poissons. Un équipement de télémétrie acoustique fixe était déployé au sein de la station d'étude permettant une localisation très précise et très fréquente des poissons de juillet à septembre 2009. Dans une seconde expérimentation, analysant l'effet de variations environnementales hebdomadaires (ou saisonnières) sur les déplacements des poissons (estimation des domaines vitaux), le pas de temps retenu pour la localisation des poissons était de 1 semaine d'avril à décembre 2010. Une technique de télémétrie acoustique mobile (recherche active des poissons marqués) était utilisée sur l'ensemble du tronçon non court-circuité du Rhône entre Sault-Brénaz et Jons (35 km). Pour les deux expérimentations, les conditions environnementales étaient parfaitement connues en tout point et à tout moment grâce à des enregistrements horaires du débit et de la température de l'eau du Rhône et grâce à un modèle hydrodynamiques en 2D, étalonné et validé pour une large gamme de débit (simulations des conditions hydrodynamiques (2009 et 2010) et de la température de l'eau en (2009 uniquement)).

Sélection de l'habitat

L'analyse des préférences d'habitat globales a montré que les barbeaux sélectionnent préférentiellement des vitesses faibles ($<0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) associées à des profondeurs faibles ($<0.8 \text{ m}$) à fort débit ($> 500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) ou au contraire à des profondeurs très fortes ($>3.2 \text{ m}$) pour des débits faibles à moyens ($< 500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Dans la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 (de 15°C à 24°C) ces préférences hydrauliques sont bien marquées. Dans les veines d'eau chauffées à l'aval des rejets du CNPE, les profondeurs préférées sont comprises entre 1 m et 3 m pour une gamme de vitesses plus fortes (de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à

1.4 m.s⁻¹). Les barbeaux ne sélectionnent pas les températures supérieures à 25°C. Le substrat utilisé préférentiellement est le caillou, puis dans une moindre mesure le gravier et le bloc.

Les chevaines sélectionnent très fortement les profondeurs faibles (<0.8 m) associées à des vitesses faibles (<0.2 m.s⁻¹) dans toute la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 (de 15°C à 24°C). Dans le panache d'eau échauffée les chevaines sélectionnent des profondeurs (<1.4 m) et des vitesses un peu plus importantes (< 0.8 m.s⁻¹). Ils sélectionnent des habitats profonds (>3.2 m) uniquement à faible débit et leur spectre de préférences est sensiblement plus large lorsque le débit est stable. Les chevaines ne sélectionnent pas les températures supérieures à 23°C. Enfin aucun type de substrat ne semble être particulièrement sélectionné.

Les silures sélectionnent principalement des vitesses faibles à moyennes (<0.8 m.s⁻¹) pour pratiquement toutes les classes de profondeur, et plus spécialement les faibles profondeurs à fort débit. La gamme de température sélectionnée par les silures s'étale au delà de 23°C. Le substrat sélectionné est fin (sable) ou grossier (pierre et bloc).

Les préférences hydrauliques des trois espèces étudiées se caractérisent par des habitats plutôt lents (< 0.2 m³.s⁻¹) et majoritairement peu profonds (< 0.8 m). Ce type d'habitat, d'autant plus sélectionné que le débit augmente, est utilisé plus de 20% du temps total de localisation pour chacune des trois espèces alors qu'il ne représente que 4.3 % de la surface totale disponible à 300 m³.s⁻¹. L'habitat favorable ainsi défini est uniquement disponible en berge. Dans le panache d'eau échauffée à l'aval des rejets du CNPE de Bugey les préférences hydrauliques des cyprinidés évoluent vers des habitats plus profonds et plus rapides. Des habitats favorables sont disponibles en rive droite pour les deux espèces de cyprinidés, mais ces habitats sont peu utilisés, sans doute à cause de la température de l'eau échauffée.

Il est important de souligner qu'il existe une variabilité interindividuelle des préférences hydrauliques et thermiques très forte pour les barbeaux, assez forte pour les silures (sauf pour la vitesse de courant) et faible pour les chevaines.

Répartition spatiale

Les barbeaux sont majoritairement localisés en rive gauche (non échauffée), avec un faible chevauchement des habitats utilisés individuellement, et dans une moindre mesure en rive droite en amont du rejet 4-5, dans la confluence du rejet 2-3 et enfin autour du banc de galet. Les barbeaux étaient localisés 7% du temps dans l'eau échauffée, avec des durées d'utilisation des habitats très courtes et très peu nombreuses pour chaque individu. Les habitats utilisés conjointement par plusieurs barbeaux sont peu nombreux (banc de galets et la confluence du rejet 2-3) et recensés le jour uniquement. La nuit les barbeaux utilisent des habitats très peu chevauchants.

Les chevaines sont fortement inféodés à la rive gauche, avec quelques habitats utilisés le jour et la nuit en rive droite (surtout en aval du rejet 4-5). Les chevaines étaient localisés 4% du temps dans l'eau échauffée, avec des durées d'utilisation des habitats très courtes et très peu nombreuses pour chaque individu. Le chevauchement des habitats utilisés est très fort, principalement le jour et lors des changements de luminosité (aurore / crépuscule).

Les silures sont plus densément localisés en rive droite, principalement à l'aval du rejet 4-5 et au niveau de la confluence du rejet 2-3, mais également en rive gauche. Les silures étaient localisés 53% du temps dans l'eau échauffée. Les localisations des silures semblent plus concentrées que celles des deux autres espèces et sont faiblement chevauchantes.

Les individus des trois espèces n'utilisent pas des habitats différents en fonction des variations de débit. En revanche il semble que lorsque le débit demeure stable il y ait plus de localisations éparpillées (mouvements), et notamment dans le chenal. Selon les espèces et les individus c'est plutôt lorsque le débit monte (barbeau, chevaine, silure) ou descend (chevaine) que les localisations sont les plus regroupées (immobiles).

Les barbeaux et les silures semblent beaucoup moins grégaires dans notre site d'étude que le chevaine. Les habitats utilisés par les barbeaux sont assez indépendants de ceux utilisés par les silures (un peu de chevauchement le jour), alors que ceux des chevaines sont assez chevauchants avec les habitats utilisés par les silures le jour et la nuit.

Déplacements et trajectoires

Les barbeaux sont plus immobiles le jour (56%) alors que pendant les trois autres phases les proportions de localisations immobiles ou en mouvement sont comparables. Les chevaines sont plus en mouvement à l'aurore (67%) et le jour (61%) et plus immobiles la nuit (65%). Les silures sont plus immobiles le jour (68%) et sont plus en mouvement la nuit (57%).

Pendant les phases de changement de débit, seuls les barbeaux sont plus souvent localisés en mouvement, pendant les montées de débit (surtout les plus importantes).

Le passage des gouttes froides ne modifient pas les proportions de localisations immobiles ou en mouvement observées pour l'ensemble du suivi.

L'analyse de l'orientation des déplacements entre deux localisations montre que les individus se déplacent soit de manière homogène dans les 4 directions principales (surtout les barbeaux) soit principalement dans le sens longitudinal (surtout chevaines et quelques silures). Il faut souligner une forte variabilité interindividuelle dans la direction des déplacements.

Les barbeaux se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min. Les barbeaux ne montrent globalement pas de différence de distance parcourue entre les différentes phases de débit.

Les chevaines se déplacent individuellement de 0 à 250 m en 10 min. Les chevaines se déplacent moins la nuit. Les déplacements médians les plus élevés s'observent à l'aurore et au crépuscule. Il ne semble pas y avoir de lien entre la taille des individus et leurs déplacements médians par phase nyctémérale. Enfin, les chevaines ont tendance à se déplacer un peu moins lorsque le débit baisse.

Les silures se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min. Les silures se déplacent moins le jour et plus la nuit. Les silures ont tendance à moins se déplacer quand le débit monte et plus quand le débit baisse.

A l'échelle du tronçon de 35 km, les premiers résultats obtenus avec l'analyse exploratoire des données de 2010, montrent que la température de l'eau et le débit sont, pour les trois espèces, des facteurs qui régulent les déplacements individuels. Il semble qu'en dessous de 10°C très peu de déplacements sont effectués par les trois espèces. Entre 10°C et 17°C les cyprinidés (barbeaux et chevaines) effectuent leurs plus longs déplacements, et c'est au delà de 17°C que les silures se déplacent le plus. Les silures se déplacent moins que les barbeaux et que les chevaines. L'influence du débit est plus difficile à mettre en évidence et semble moins prédominante que celle de la température.

L'analyse descriptive des trajectoires individuelles lors des montées et descentes de débit ne permet pas de détecter un comportement particulier suggérant une réponse de type spécifique et systématique aux modifications de débit (e.g. échappement vers les berges lors des montées de débit)

Soulignons enfin qu'un effort particulier a été fait pour développer des outils de visualisation des déplacements des poissons dans le site d'étude, avec les chronogrammes des profondeurs, des vitesses et des températures utilisées à chaque localisation (pour 2009), et avec une indication du débit et de la température de l'eau en amont du site d'étude.

Conclusions

Les deux expérimentations de télémétrie acoustique mises en œuvre ont confirmé que seul ce type d'échantillonnage était adapté aux questions posées concernant l'analyse des comportements individuels des poissons dans un fleuve, et que cette technique peut être utilisée avec dans le Rhône et garantir une bonne précision dans la localisation des poissons.

Les simulations très précises des conditions hydrodynamiques et thermiques, compatibles avec les échelles spatiales et temporelles de localisation des poissons dans leur milieu, ont permis l'acquisition de données uniques pour l'analyse du comportement, grâce à la connaissance de la disponibilité en habitat.

Les variations de débit liées à la production hydroélectrique ne semblent pas influencer instantanément le comportement des poissons étudiés. Ceux-ci sélectionnent très fortement les habitats lents et peu profonds. Or ces habitats à faible vitesse disparaissent très vite au delà de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui impose aux différents individus de rester en berge la plupart du temps. L'effet des variations artificielles de débit est sans doute de contraindre les individus à se maintenir dans les habitats les moins rapides. Cette contrainte semble cependant essentiellement contraindre les comportements des barbeaux. Ceux-ci semblent en effet moins grégaires que dans d'autres sites d'études (Ain, RCCs, Seine) et utilisent des habitats moins lotiques, pourtant disponibles.

Les cyprinidés étudiés en été 2009 (barbeaux et chevaines) utilisent très peu les habitats dont la température est échauffée par les rejets d'eau chaude du CNPE. Ces individus ne sélectionnent pas les habitats dont la température de l'eau est supérieure à 25°C pour les barbeaux et à 23°C pour les chevaines. Le silure est plus thermophile, avec une sélection des températures de l'eau supérieure à 23°C , mais il ne semble pas se cantonner aux veines d'eau échauffées. Rappelons ici que l'emprise du panache d'eau chaude est d'autant plus forte, par rapport à la surface en eau, que le débit est bas.

Nous supposons que les préférences d'habitat des barbeaux sont difficilement transférable du fait d'un comportement assez différent des connaissances disponibles à propos de cette espèce. Pour les chevaines cela semble possible du fait de la cohérence avec les courbes de préférence déjà disponibles. Pour les silures, il n'existe pas de modèle de préférence déjà établi, mais ils sont sensibles aux forts débits, et de ce fait l'exportation vers des cours d'eau à plus faible gabarit, i.e. avec une disponibilité en habitat plus favorable, peut être délicate.

Les variations infra-journalières de débit du Rhône dans le tronçon étudié ne semblent pas empêcher le comportement de migration des poissons adultes. Cela confirme l'exigence forte des poissons pour la connectivité entre différents types d'habitats (e.g. accès à des habitats de reproduction, d'abris...). Il faut maintenant caractériser les spécificités physiques et thermiques des habitats sélectionnés lors de ces longs déplacements, mais les seuils de température et les ordres de grandeur des domaines vitaux observés sont cohérentes avec certains résultats obtenus dans d'autres études.

Enfin, il est important de noter que la variabilité inter individuelle montrée par nos données est très forte et que tous les individus étudiés en 2009 et en 2010 sont des adultes (individus de plusieurs années) d'espèces bien implantées dans le Rhône à Bugey. Les individus suivis sont donc des individus qui connaissent bien leur environnement et en particulier les variations de débit ou la présence des veines d'eau échauffées.

INTRODUCTION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif principal du groupe de travail 'Etude Thermie Rhône- Phase III' (EDF, Drire, Agence de l'Eau, Diren, Université Lyon I, Aralep, Cemagref Aix en Provence et Lyon) était d'évaluer les impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés des CNPEs implantés le long du Rhône (Khalanski *et al.*, 2009). Dans ce cadre une analyse diachronique de la structure du peuplement piscicole du Rhône fut réalisée à partir des résultats des échantillonnages annuels des suivis réglementaires sur des périodes de 20 à 26 ans selon les CNPEs. Pour Bugey en particulier, Daufresne *et al.* (2004) montrent que la variance inter-annuelle (en terme de structure de la communauté d'année en année) est trois fois plus élevée que la variance inter-stations (en terme de structure de la communauté entre les stations d'échantillonnage). Pour le Rhône à Bugey, cet effet, illustré par la disparition progressive des espèces d'eau froide au profit d'espèces thermophiles, est plus marqué dans les stations les plus échauffées (Daufresne *et al.*, 2005). Ce changement progressif de la structure du peuplement piscicole s'observe aussi pour les autres secteurs du Rhône, mais également sur la Seine et sur la Loire (Daufresne & Boët, 2007).

Les conclusions et recommandations du groupe de travail 'Etude Thermie Rhône- Phase III' illustrent clairement le besoin de prendre en compte conjointement la variabilité spatio-temporelle des conditions de débit, d'habitat et de température pour compléter l'étude de la variabilité de la structure des communautés vivantes du Rhône (poissons, invertébrés, plantes; Carrel *et al.*, 2006 ; Khalanski *et al.*, 2009).

De ce constat, et parce que le faible effet inter-station mis en évidence sur le secteur de Bugey (Daufresne *et al.*, 2005) était sans doute lié à un effet habitat sous jacent, sont nés les deux principaux objectifs qui constituent le cadre de travail du Lot 4 de l'Etude Rhône Thermie – Phase IV intitulé « utilisation de l'habitat hydraulique et thermique par les poissons » :

1. quantifier précisément les variations spatio-temporelles des conditions de vie (habitat et température) des communautés aquatiques du Rhône sur un tronçon non court-circuité (variabilité du débit naturelle et surtout liée à la production d'électricité de pointe) ;
2. analyser les réponses comportementales des poissons soumis à des variations simultanées et contrastées d'habitat et de température ;

A ce jour, il existe peu de connaissances permettant de prédire les réponses des communautés d'invertébrés et de poissons d'eau douce à une forte variabilité hydrologique d'origine anthropique. L'objectif du projet désigné par « Lot 4 » au sein du projet d'étude « Rhône phase 4 » est de décrire le comportement des poissons dans un environnement hydraulique et thermique très contrasté dans le temps et dans l'espace. Cette étude très novatrice à l'échelle d'un fleuve vise à améliorer la compréhension de la dynamique de structuration des peuplements de poissons afin d'être capable de prédire son évolution face à des pressions croisées (e.g. dues au changement climatique ou dues aux différents scénarios de gestion du débit du fleuve pour la production hydroélectrique).

Dans les cours d'eau, l'hydraulique à l'échelle du micro-habitat est un déterminisme très fort des stratégies des espèces aquatiques, les milieux peu profonds et rapides sélectionnant par exemple les espèces à stratégie démographique opportuniste (Blanck, 2007). Le concept de l'« Habitat temple » (Southwood, 1977 ; Poff & Ward, 1990 ; Townsend & Hildrew, 1994) ou encore du Patch Dynamic Concept (Townsend, 1989, re-décrit par Lake, 2000) mettent

l'accent sur la variabilité spatio-temporelle de l'habitat comme facteur structurant majeur des communautés en fonction de leurs caractéristiques biologiques. Ils suggèrent que l'habitat fournit un cadre dans lequel les caractéristiques environnementales varient à la fois dans le temps et dans l'espace, le maintien ou l'élimination des espèces dans ce cadre étant dicté par l'adéquation entre leurs traits biologiques et les caractéristiques de l'habitat. Des études révèlent effectivement un rôle significatif de l'hydraulique dans la structuration des communautés de poissons (Lamouroux *et al.*, 2002).

La variabilité hydrologique est par association à l'hydraulique locale un élément structurant de premier ordre, surtout dans une vision stochastique de l'écologie (Grossman *et al.* 1982). Même s'il reste difficile de mettre en évidence et de quantifier les effets des modifications des régimes hydrologiques, il est raisonnable de penser que les altérations hydrologiques conduisent à des changements écologiques, notamment en ce qui concerne la structuration des communautés de poissons (Tedesco, 2006), qui sont d'autant plus marqués que les changements hydrologiques sont intenses (Poff & Zimmerman, 2010). Analyser précisément les réponses écologiques face à des modifications de l'hydrologie doit être un objectif principal (Poff & Zimmerman, 2010).

S'il est classiquement admis que dans un cours d'eau une des sources principales de perturbation (variation environnementale) est le changement de débit, les variations du régime thermique sont aussi susceptibles de représenter des perturbations (Townsend & Hildrew, 1994). L'hétérogénéité spatiale de l'habitat et de la température peuvent jouer un rôle important pour certaines espèces de poissons, notamment celles en marge de leurs tolérances. Précisons ici que l'effet de ce type de perturbations hydrologiques et thermiques est d'autant plus atténué que la disponibilité en abris, en refuges, est importante. Enfin, précisons aussi que les interactions biotiques ou les contraintes historiques et phylogénétiques sont aussi structurantes pour les peuplements en place, mais que la simplification envisagée en se limitant à l'habitat physique est dans un premier temps obligatoire.

D'où l'hypothèse testée dans un numéro spécial de *Freshwater Biology* (vol 31, n° 3) en 1994 : les conditions d'habitat observées sont en correspondance avec les traits d'espèces observés dans les milieux. Mais l'analyse de Persat *et al.* (1994) n'a pas permis de relier les traits d'espèces ou la richesse spécifique du peuplement de poissons du Rhône à Brégnier-Cordon à différents types d'habitat et à leur variabilité spatiale et temporelle. Peut être les données n'étaient elles pas adéquates ? Plus vraisemblablement, la définition des types d'habitat et l'évaluation de leur variabilité spatiale et temporelle utilisée dans cette étude du Haut-Rhône (Cellot *et al.*, 1994) n'était sans doute pas la manière dont les poissons appréhendent leur milieu. Les changements d'habitat assez nets (shifts) au cours du développement des individus (site de ponte, de croissance, d'abris...) et des échelles de temps et d'espace non adaptées aux changements étudiés peuvent expliquer le résultat négatif de ce test de la pertinence de l'« habitat temple ». D'autre part, les effets des changements profonds de fonctionnement de l'écosystème Rhône après les aménagements hydroélectriques (Brégnier-Cordon date de 1984, soit 10 ans avant l'étude) n'étaient peut être pas encore quantifiables. De plus, la faible richesse spécifique de la communauté piscicole du Rhône n'était sans doute pas un avantage pour le test effectué. Et finalement, dans leurs suggestions pour une recherche future, Persat *et al.* (1994) proposaient entre autre une redéfinition des échelles d'approche, avec une évaluation du degré de connectivité entre les habitats du fait de l'importante mobilité des poissons.

Pour comprendre l'importance du déterminisme physique, résumé par l'habitat temple ou le patch dynamique concept, il semble important de travailler à l'échelle de la perception

environnementale des organismes concernés dans l'évaluation du rôle de l'hétérogénéité spatio-temporelle de l'environnement. L'analyse du comportement des individus est en cela une bonne voie. De plus l'interaction entre les individus et les conditions hydrodynamiques, plus que la description statique des types d'habitat (comme dans Persat *et al.*, 1994), est un des processus quantifiable ayant une action démontrée par certaines études (e.g. Lamouroux *et al.* 2006).

La prise en compte la variabilité spatio-temporelle des conditions d'habitat pour décrypter l'évolution de la structure des communautés vivantes du Rhône (poissons, invertébrés) ne peut se faire que par l'intermédiaire d'une modélisation hydrodynamique. En effet, la modélisation de l'histoire d'habitat, vécue par les peuplements en place, peut permettre de détecter les phases limitantes (durée, intensité) de la structuration de ces communautés. Mais la modélisation de l'habitat, et surtout les interprétations que l'on peut en faire, ne seront validées que lorsque le comportement des poissons sera réellement connu in situ. La connaissance des réponses des poissons à des variations de débit dans différentes conditions de température est une question urgente et d'intérêt primordial. Ainsi l'objectif du « Lot 4 » au sein du projet d'étude « Rhône phase 4 » est d'apporter, sur un site atelier unique, des connaissances éthologiques essentielles pour interpréter l'effet des variations spatio-temporelles de l'habitat physique sur la structure de la communauté piscicole du Rhône. La question centrale du travail présenté ici, composé de deux expérimentations, est de savoir si la sélection de l'habitat par les poissons peut être influencée par la température de l'eau et / ou les variations de débit.

Dans un premier temps, nous souhaitons décrire la sélection des habitats hydrauliques par les poissons dans des conditions hydrologiques très perturbées (éclusées journalières) et dans un gradient important de température (présence des rejets d'eau échauffée du CNPE de Bugey). Ces informations n'existaient pas pour un cours d'eau du gabarit de celui du Rhône à Bugey et le but principal de notre travail était d'acquérir des données permettant d'ébaucher une description de la sélection de l'habitat de quelques espèces de poisson du Rhône à Bugey. Un premier objectif était d'évaluer la sélection de l'habitat par les poissons. Il s'agissait de quantifier les choix (sélection) de positionnement des poissons (localisations) au sein du site d'étude (disponibilité). Cette sélection de l'habitat peut être représentée par deux modèles : des courbes de préférence (univariées ; e.g. Lamouroux *et al.*, 1999) et des hydrosignatures (bivariées ; Scharl & Le Coarer, 2005). Ces modèles, développés dans différentes configurations permettent d'évaluer la variabilité inter-individuelle de la sélection d'habitat, l'influence des changements de débit, des contrastes de température, de l'activité des individus et de mieux illustrer l'interaction entre l'hydraulique et la température de l'eau.

Un second objectif visait plus particulièrement à décrire la répartition spatiale des individus (localisations), en fonction des variations environnementales (photopériode, débit et température). Comme pour la sélection de l'habitat, une analyse de l'utilisation de l'espace à l'échelle individuelle en fonction de la photopériode et en fonction du débit sera très informative quant à la part individuelle ou spécifique des observations. Par exemple une analyse des utilisations individuelles conjointes de l'habitat permettrait d'évaluer le degré de superposition des habitats utilisés par les différents congénères, approchant ainsi la notion de grégarité (plusieurs congénères utilisant simultanément le même habitat).

Un troisième objectif visait à analyser le comportement individuel (à travers les déplacements des individus) des poissons dans la configuration environnementale contrastée et très fluctuante du Rhône à Bugey. Une des hypothèses de départ était que lors des changements de débits, lors des baisses ou des montées de température de l'eau du Rhône, lors des différentes

phases nyctémérales, les trajectoires ou les déplacements des poissons pouvaient se modifier significativement, et qu'il était donc possible de l'évaluer. Pour cela nous pouvons étudier les mouvements des individus, les directions / orientations des déplacements des individus, les distances parcourues ou encore les trajectoires (déplacements en continu d'un individu dans le plan de la station d'étude matérialisés par une succession de localisations). Ces analyses peuvent être menées à des échelles de temps et d'espace très fines (suivi en temps réel des individus) associées par exemple à la sélection de l'habitat ou beaucoup plus grande (suivi sur plusieurs saisons) associées par exemple aux déplacements de reproduction.

Ainsi, une première expérimentation avait pour objectif d'évaluer les effets des fluctuations de débit infra-journalières (éclusées hydroélectriques) sur le comportement des poissons du Rhône. Dans cette expérimentation ce sont les rythmes d'activité des poissons, les distances parcourues, les sélections d'habitat (hydraulique, thermique) et les changements de comportement (mobilité vs immobilité) qui étaient étudiés pour différentes périodes de la journée et pour différentes phases de débit (monté, descente, stable). Ces questions impliquaient une étude sur une échelle de temps très courte et donc à une échelle spatiale réduite. Le pas de temps retenu pour la localisation des poissons dans cette expérimentation était de quelques secondes pour une durée totale de plusieurs semaines. Nous avons sélectionné un secteur d'étude de presque deux kilomètres, au droit du CNPE de Bugey, qui nous permettait d'évaluer les comportements des poissons en réponse aux fluctuations de débit et simultanément leur répartition spatiale autour des veines d'eau chaude liées aux rejets du CNPE. Seule une technique de télémétrie fixe permettait d'enregistrer les positions des poissons en continu sur une certaine durée. La volonté de suivre un grand nombre de poissons simultanément, avec une précision de localisation importante, dans un milieu courant et donc potentiellement bruyant nous a conduit à choisir la technologie développée par la société Hydroacoustic Technology, Inc. (HTI).

Des connaissances plus générales de l'écologie des espèces présentes dans le Rhône dans le secteur du Bugey, nous permettaient de supposer que certains individus pouvaient avoir des « home ranges » (surface totale prospectée par un individu d'un stade de développement donné) bien supérieurs à la surface du secteur d'étude sélectionné au droit du CNPE de Bugey (2 km de long), notamment en lien avec la reproduction (Ovidio et Philippart, 2007). Là encore peu d'informations étaient disponibles pour les espèces étudiées dans un fleuve comme le Rhône. L'objectif de notre seconde expérimentation était donc de connaître pour quelques espèces du peuplement de poissons du Rhône dans le secteur du Bugey la variabilité de la taille des « home ranges » (leurs capacités à exploiter le milieu disponible). D'autre part nous souhaitions relier les déplacements des poissons à des changements de leur environnement physique et pour cela nous avons relié nos observations aux variations de la température de l'eau et du débit.

Une seconde expérimentation avait pour objectif d'évaluer les déplacements des poissons du Rhône à Bugey avant, autour et après leur période de reproduction pour évaluer la taille des « home ranges » ou domaines vitaux de ces espèces. L'objectif ici était d'évaluer les distances parcourues par les individus marqués en fonction du débit et de la température. La longueur du tronçon d'étude, correspondant à l'espace potentiellement utilisable par les poissons, ne permettait d'envisager qu'une technique mobile (recherche active des poissons marqués), et une fréquence de localisation nettement moins importante que pour la première expérimentation. Le pas de temps retenu pour la localisation des poissons dans cette expérimentation était la semaine pour une durée totale de plusieurs mois. Cette approche devait permettre de compléter les connaissances sur les déplacements des poissons du Rhône

au cours de l'année, i.e. en lien par exemple avec les changements saisonniers de débit et de température. Le secteur d'étude était ici le tronçon non court-circuité du Rhône de 35 kilomètres entre Sault-Brénaz et Jons. La technologie utilisée était également celle développée par la société HTI pour rester compatible avec les acquis de 2009.

Le présent rapport rend compte de ces deux expérimentations et présente les premiers résultats obtenus. Dans une première partie nous avons décrit les sites étudiés en 2009 et en 2010 en insistant sur la thermie et l'hydrologie, et nous avons également décrit le peuplement de poissons en place grâce aux études existantes. Dans une seconde partie nous avons détaillé la modélisation hydrodynamique en deux dimensions (2D) qui est un des travaux les plus importants de cette étude. Dans une troisième partie nous présentons l'expérimentation de télémétrie fixe de 2009 au droit du CNPE de Bugey avec les aspects techniques et les principaux résultats disponibles à ce jour. Enfin dans une quatrième partie nous présentons les résultats de l'expérimentation de télémétrie mobile de 2010 avec là encore des aspects techniques et les principaux résultats disponibles.

Première partie : SITE D'ETUDE

Description générale

Le tronçon étudié est le plus long tronçon du Rhône français non dérivé par une installation hydroélectrique, exceptés le petit et le grand Rhône entre Fourques / Arles et la Méditerranée. Ce tronçon est long de 35 kilomètres et se situe au Nord-Est de Lyon, entre les barrages de Villebois (Sault-Brénaz) à l'amont et de Jons à l'aval (Figure 1 et Figure 2). L'amont du tronçon se situe 152 km à l'aval de l'exutoire du Lac Léman, matérialisé par le barrage du Seujet, et à l'aval des barrages suisses de Verbois et de Chancy-Pougny et du barrage français de Génissiat (99 km en amont de Villebois). D'autres barrages sont présents entre Génissiat et Villebois mais ce sont des barrages de dérivation (Seysssel, Motz, Lavours et Brégnier-Cordon) qui fonctionnent au fil de l'eau. Le barrage de Villebois, associé au barrage de Sault-Brénaz coupe également le Rhône dans toute sa largeur, sans dérivation et sans écluse, et nous pouvons admettre en première approximation qu'aucune migration de poisson n'est possible vers l'amont. Depuis l'aval les poissons ne franchissent ni le barrage de Jons ni le barrage usine de Cusset. Le tronçon Sault-Brénaz – Jons est donc considéré fermé, exceptées les dévalaisons (tous stades de développement) depuis l'amont qui ne sont pas quantifiées à ce jour.

Choix de l'échelle spatiale des sites d'études

Le caractère « fermé » du tronçon Sault-Brénaz – Jons, du fait de l'absence de connectivité dans le sens aval – amont, et les connaissances sur l'écologie des poissons du Rhône, font que pour étudier la structure du peuplement de poisson du Rhône à Bugey il faut étudier l'ensemble de ce tronçon. En effet chaque individu est susceptible de se déplacer dans l'ensemble du tronçon.

Il n'est pas raisonnable d'échantillonner systématiquement l'entièreté du tronçon, et des choix de station d'étude se justifient, comme pour le suivi réglementaire des effets des rejets d'eau chaude du CNPE de Bugey par exemple (7 stations d'échantillonnage réparties entre l'amont et l'aval du CNPE).

Pour l'étude du comportement des poissons du tronçon Sault-Brénaz – Jons, nous avons choisi deux échantillonnages différents en fonction des questions posées et des techniques d'échantillonnage à mettre en œuvre.

Pour l'étude des réponses individuelles face aux variations horaires du débit, il était important de suivre en continu les individus marqués. Ce type de suivi n'est possible qu'avec un réseau d'hydrophones fixes (télémetrie acoustique fixe). Et les hydrophones étant reliés par des câbles aux récepteurs – enregistreurs, la taille du site d'étude est très vite limité par le nombre d'hydrophones et de câbles que les opérateurs peuvent acheter et déployer. Cette contrainte logistico-financière nous a conduit à équiper une station d'étude d'une longueur maximale de 2 km au droit du CNPE de Bugey pour étudier les comportement individuel en continu. L'hypothèse forte associée à ce choix « contraint » de station d'étude est que les poissons marqués doivent rester au sein de la station, à condition qu'ils soient échantillonnés au sein même de cette station (hors période de reproduction). Ainsi chaque poisson marqué pouvait potentiellement être localisé toutes les 3 secondes sur la durée du suivi.

Pour compléter notre étude des comportements individuels, il était justement important de connaître les « home ranges » (aire utilisée par un individu au cours de sa vie, incluant les déplacements) des espèces peuplant le tronçon et les distances et périodes de déplacements principaux des individus au cours de l'année. C'est pour cela que l'expérimentation de 2010 était effectuée sur l'ensemble du tronçon Sault-Brénaz – Jons, avec un matériel de télémétrie acoustique mobile. L'utilisation de ce matériel et la durée nécessaire à chaque échantillonnage ne permettait pas le suivi en continu des individus, mais nous avons mené un suivi hebdomadaire. Ainsi chaque poisson marqué pouvait potentiellement être localisé chaque semaine du suivi.

En résumé :

- en 2009 l'étude s'est déroulée sur 3 mois (juillet – septembre) dans un secteur long de 1.7 km situé au milieu du tronçon Sault-Brénaz – Jons, au droit du CNPE de Bugey ;
- en 2010 l'étude s'est déroulée dans l'ensemble du tronçon Sault-Brénaz – Jons (35 km) et pendant 9 mois (avril – décembre).

Hydrologie et thermie du Rhône dans le tronçon d'étude

Les débits du Rhône sont essentiellement régulés par les barrages de retenue situés en amont du tronçon (Seujet, Verbois et Génissiat) et sont compris 90% du temps entre 160 et 742 m³.s⁻¹ pour un module de l'ordre de 473 m³.s⁻¹ en moyennes journalières (www.hydro.eaufrance.fr/; à Lagnieu; débit médian = 470 m³.s⁻¹).

La température moyenne journalière de l'eau fluctue globalement entre 4°C et 21°C (avec des extrêmes observés entre 1°C et 26°C), avec des faibles valeurs observées entre décembre et mars, et des fortes valeurs entre juin et septembre. La température moyenne journalière de l'eau du Rhône est assez fluctuante d'une année à l'autre mais une tendance nette au réchauffement est confirmée depuis le début des années quatre vingt (cf. Carrel *et al.*, 2006). Cette tendance se caractérise par une moyenne annuelle de plus en plus élevée, qui traduit des températures estivales plus chaudes et des températures printanières chaudes qui apparaissent plus tôt.

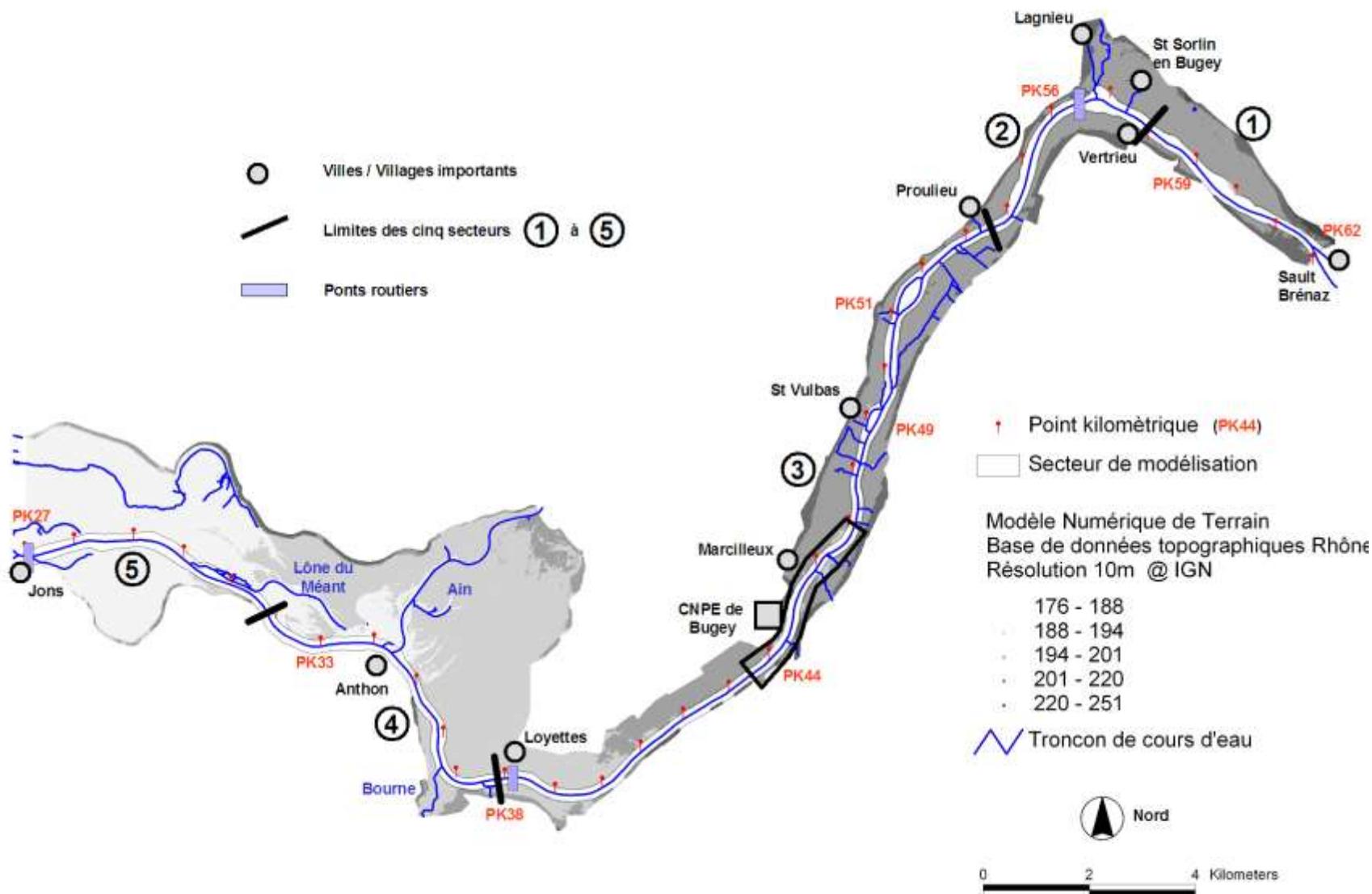


Figure 1 : Tronçon d'étude : le Rhône entre Sault-Brenaz et Jons. Le tracé du Rhône est superposé au modèle numérique de terrain (élévation en m; dégradé de gris pour différentes classe d'élévation en m). Les cinq secteurs sont définis en fonction de la pente. Le polygone noir au droit du CNPE de Bugey matérialise le secteur du Rhône modélisé pour l'étude de 2009. En 2010 c'est l'ensemble du tronçon qui a été étudié. PK = Point Kilométrique.



Figure 2 : Quelques photos du tronçon d'étude avec de haut en bas et de gauche à droite : confluence de l'Ain, l'île de la Fenière (St Vulbas), les îles de Proulieu, les rapides à l'aval de Loyettes, le CNPE de Bugey, le défilé de Vertrieu, le barrage de Jons, un banc de galet exondé à bas débit à Marcilleux, Sault-Brenaz.

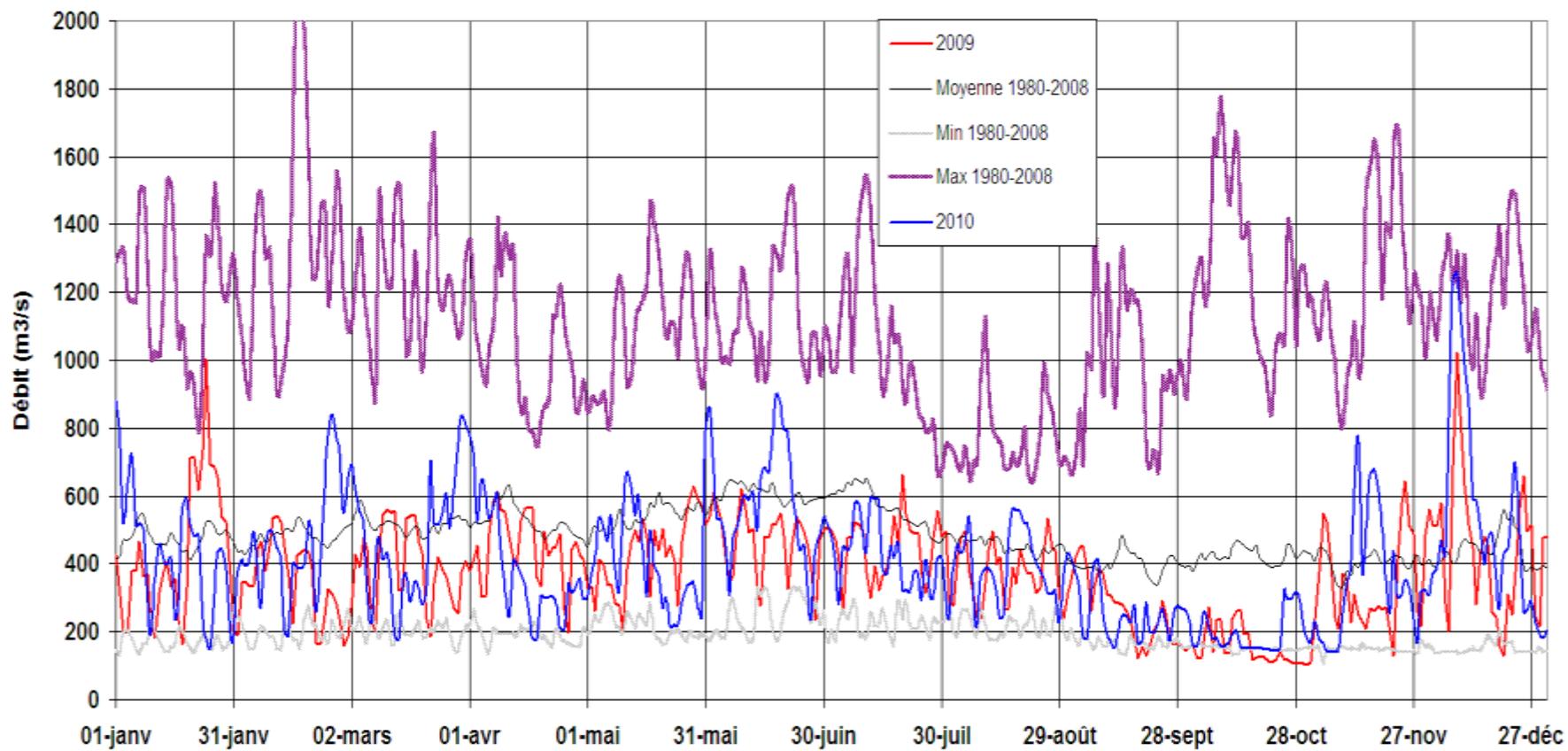


Figure 3 : Débit moyen journalier du Rhône en amont du secteur d'étude (Pk 56, Lagnieu) pour l'année 2009 (rouge), pour l'année 2010 (bleu) et moyenne calculée pour chaque jour de l'année sur la période 1980 – 2008, ainsi que le minimum (Min.) et le maximum (Max.). Données source EDF.

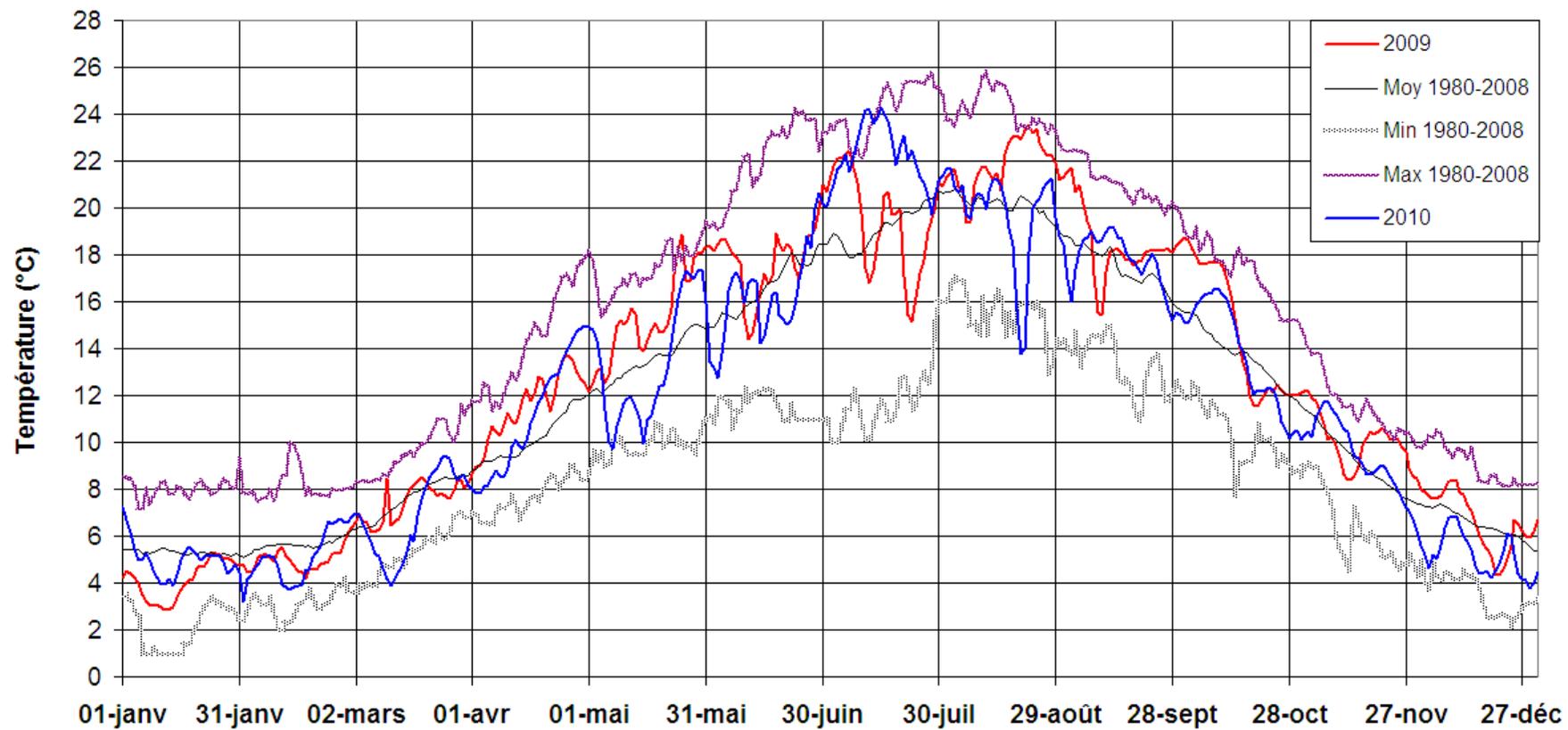


Figure 4 : Température moyenne journalière de l'eau du Rhône en amont du secteur d'étude en 2009 (rouge), pour l'année 2010 (bleu) et température moyenne journalière (Moy), minimum (Min) et maximum (Max) sur la période 1980-2008. Données source EDF.

L'année 2009

La moyenne des débits moyens journaliers de l'année 2009 du Rhône à Lagnieu est de $378 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (troisième plus faible valeur depuis 1980) et la moyenne des températures moyennes journalières était de $12.7 \text{ }^\circ\text{C}$ en amont du CNPE de Bugey.

Les débits moyens journaliers ont été fréquemment inférieurs à la moyenne inter-annuelle calculée depuis 1980 (Figure 3). Il est possible d'identifier chaque semaine de l'année à l'aide des très fortes baisses de débit à la fin de chacune des semaines (samedi et dimanche), et pour une longue période de septembre à octobre, pendant laquelle les débits moyens journaliers ont été inférieurs aux minimums observés depuis 1980. Le nombre de jours avec un faible débit ($< 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 120 jours) est le plus fort des quatre dernières années. Le nombre de jours à fort débits ($> 500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; 75 jours) est quant à lui le plus faible depuis 2005. Dans l'ensemble 2009 se caractérise par une très faible hydraulité et ne comporte pas d'événement hydrologique exceptionnel (crues).

A la différence du débit, la température moyenne journalière observée en 2009 reste très fréquemment supérieure à la fluctuation annuelle moyenne depuis 1980 (Figure 4), notamment d'avril à mi-octobre. Une forte (presque $7 \text{ }^\circ\text{C}$) baisse de température a été observée dans la seconde moitié de juillet et en septembre. La température de l'eau du Rhône en amont du CNPE a dépassé 20°C (sans dépasser 23.6°C) pendant 48 jours sur l'ensemble de l'année. La moyenne inter-annuelle du nombre total de jours avec une température moyenne journalière de l'eau du Rhône, en amont du CNPE de Bugey, supérieure à 20°C est de 37 jours/an sur la période 1980 à 2008. Enfin la température moyenne (14.9°C) de la période principale de reproduction (avril-juin) est la troisième plus forte valeur observée depuis 1980.

L'année 2010

La moyenne des débits moyens journaliers de l'année 2010 du Rhône à Lagnieu était de $406 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et la moyenne des températures moyennes journalières était de $12.2 \text{ }^\circ\text{C}$ en amont du CNPE de Bugey.

Les débits moyens journaliers ont été fréquemment inférieurs à la moyenne inter-annuelle calculée depuis 1980 (Figure 3). Il est encore possible d'identifier chaque semaine de l'année à l'aide des très fortes baisses de débit à la fin de chacune des semaines (samedi et dimanche). Pour une longue période de mi-septembre à fin octobre les débits moyens journaliers ont été très proches des minimums observés depuis 1980. Le nombre de jours avec un faible débit (115 jours $< 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et 20 jours $< 160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) est encore important et est comparable à l'année 2009. Le nombre de jours à fort débits est quant à lui assez faible (seulement 12 jours $> 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Dans l'ensemble 2010 se caractérise par une très faible hydraulité liée principalement à de très faibles débits moyen journaliers, notamment en automne, et à l'absence de forts débits. Cette analyse ne met pas en évidence la très forte variabilité du débit à l'échelle de la journée.

A la différence du débit, la température moyenne journalière observée en 2010 reste globalement proche de la fluctuation annuelle moyenne depuis 1980 (Figure 4). La seconde moitié d'avril et le mois de juillet se caractérisent cependant par de fortes températures relativement à la moyenne inter-annuelle calculée depuis 1980 (dépassant même le maximum observé pendant 4 jours), tandis que janvier, février et décembre se caractérisent par des températures plus basses que la moyenne inter-annuelle. Une forte baisse de température

(goutte froide de 7 °C) a été observée entre le 15 et le 21 août 2010. La température de l'eau du Rhône en amont du CNPE a dépassé 20°C pendant 51 jours, et 24°C pendant 4 jours consécutifs (en juillet). La moyenne inter-annuelle du nombre total de jours avec une température moyenne journalière supérieure à 20°C est de 38 jours/an sur la période 1980 à 2009.

Analyse de la variabilité

Une analyse détaillée d'une chronique hydrologique de 1991 à 2009 (en moyenne journalière) extraite de la banque HYDRO et une chronique (en moyenne horaire) fourni gracieusement par la CNR au PK56 (Lagnieu) a montré (Capra *et al.*, 2011a) :

- qu'il existe une différence assez marquée entre les années antérieures à 2001 et les années postérieures à 2001. En effet les dernières années ont les débits les plus faibles en termes de débits faibles;
- que les distributions annuelles de l'écart type journalier des débits horaires sont stables de 1991 à 2001, et ensuite l' écart type journalier augmente progressivement jusqu'à 2009. D'autre part les écart-types journaliers médians du lundi au vendredi sont plus élevés depuis 2001. Le lundi semble aussi se détacher du reste de la semaine, avec une variabilité plus prononcée (cf. exemple Figure 5);
- que même sous l'hypothèse que ces dernières années l'hydrologie dans et autour de l'amont du bassin du Rhône se caractérise essentiellement 1) par une hausse des débits minimums hivernaux, 2) par une réduction des durées d'étiages hivernaux (moins de neige, fonte plus rapide) et 3) par une absence de tendance significative sur les modules ou sur les minimums estivaux (Bar *et al.*, 2010), cela peut difficilement expliquer les augmentations des variations journalières qui par conséquent seraient plus liées à des changements de gestion des débits, en lien avec la production d'électricité de pointe;
- que les variations de débit ne correspondent pas à de vraies éclusées (en terme de gradient), même si presque la moitié des baisses de débit enregistrées entre 1991 et 2009 s'y apparentent.

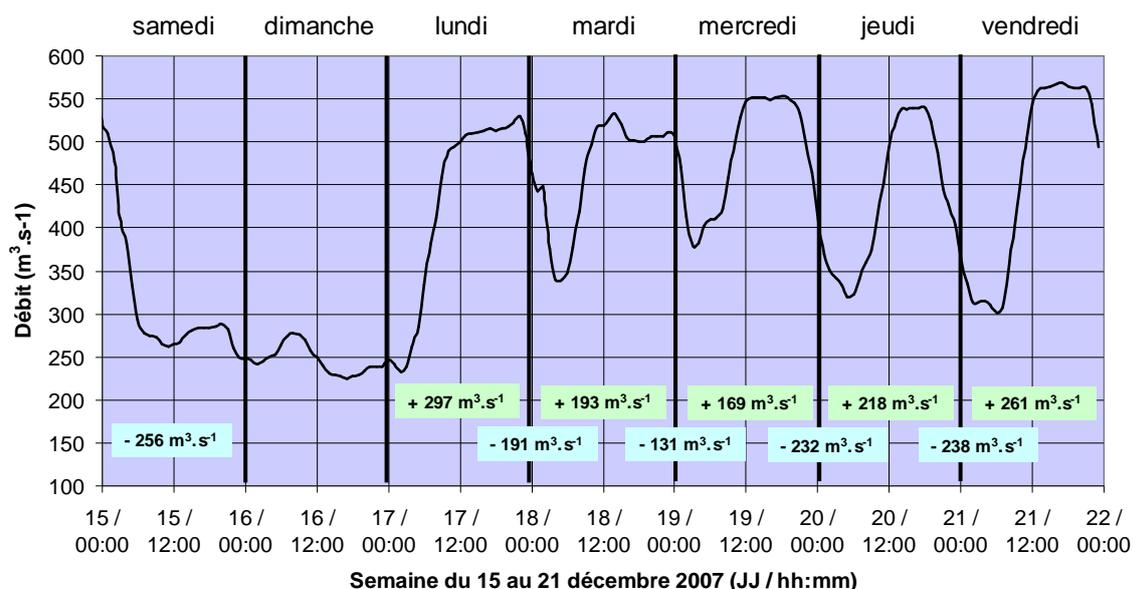


Figure 5 : Exemple de variabilité journalière du débit du Rhône à Lagnieu (Pk56) en décembre 2007. Les augmentations et diminutions de débit sont indiquées sur le graphe. (d'après Capra *et al.* 2011a - rapport de l'accord cadre Cemagref - AERM&C)

Enfin, il est important de noter que la rivière d'Ain conflue avec le Rhône dans la partie aval du tronçon étudié. Le module inter annuel de l'Ain à Chazey sur Ain est estimé à $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Description du site d'étude 2009

Le secteur étudié plus particulièrement pendant l'été 2009, situé approximativement au milieu du tronçon Sault-Brenaz - Jons, s'étend sur 3,5 km entre l'amont (pk47) et l'aval (pk43,5) du CNPE de Bugey (EDF). Mais le site d'étude au sein duquel le système de télémétrie fixe a été déployé (hydrophones) pour enregistrer le comportement des poissons est situé juste au droit du CNPE de Bugey et s'étend entre l'amont et l'aval du CNPE sur une distance de 1.7 km (voir la photo aérienne Figure 6 et les photos des Figure 7 et Figure 8). La largeur du lit mineur sur le secteur est de 130-150 m.

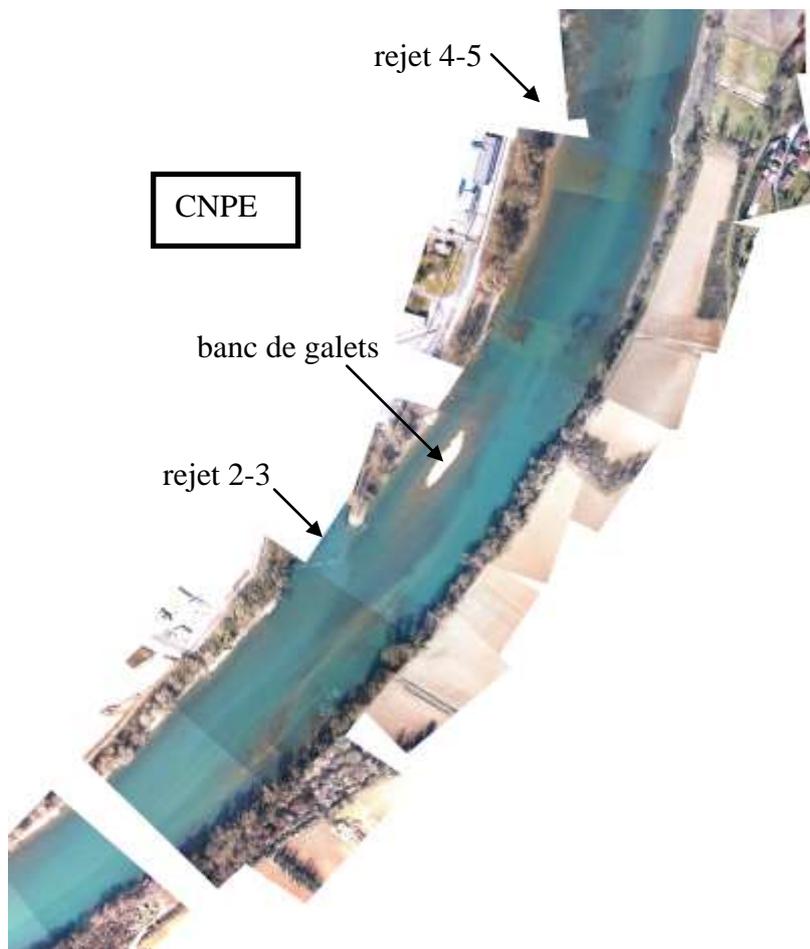


Figure 6 : photos aériennes du site d'étude à grande résolution (R. Montagnon – Paracom –2009). Les photos ont été mozaïquées et géoréférencées. On visualise très bien le banc de galets juste en amont de la confluence du rejet 2-3. La confluence de rejet 4-5 est indiquée mais pas visible et la prise d'eau est en amont toujours en rive droite.

A pleine puissance, le CNPE dérive environ $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour refroidir les 4 réacteurs nucléaires. Les tranches 2 et 3, en circuit ouvert, utilisent presque $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et les tranches 4 et 5, en circuit fermés (avec aéro-réfrigération) n'utilisent que $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ environ. L'eau du rejet 2-3 est entre 8°C et 10°C plus chaude que l'eau pompée. L'eau du rejet 4-5 peut également être bien plus chaude que l'eau pompée mais sa température est aussi grandement liée aux conditions atmosphériques (Figure 9).



Figure 7 : vue panoramique du site d'étude rive droite (en haut ; photos H. Pella – Irstea) ; détail de l'aval du rejet principale (tranches 2 et 3) à haut (en bas à gauche ; photos H. Capra – Irstea) et bas débit (en bas à droite ; photos H. Capra – Irstea)



Figure 8 : vue panoramique du site d'étude rive gauche (en haut ; photos H. Pella – Irstea ; les bouées indiquent la position des blocs bétons utilisés pour l'expérimentation de télémétrie fixe de 2009) ; détail du rejet secondaire (tranches 4 et 5) en bas à gauche et de la prise d'eau (en bas à droite ; photos H. Capra – Irstea).

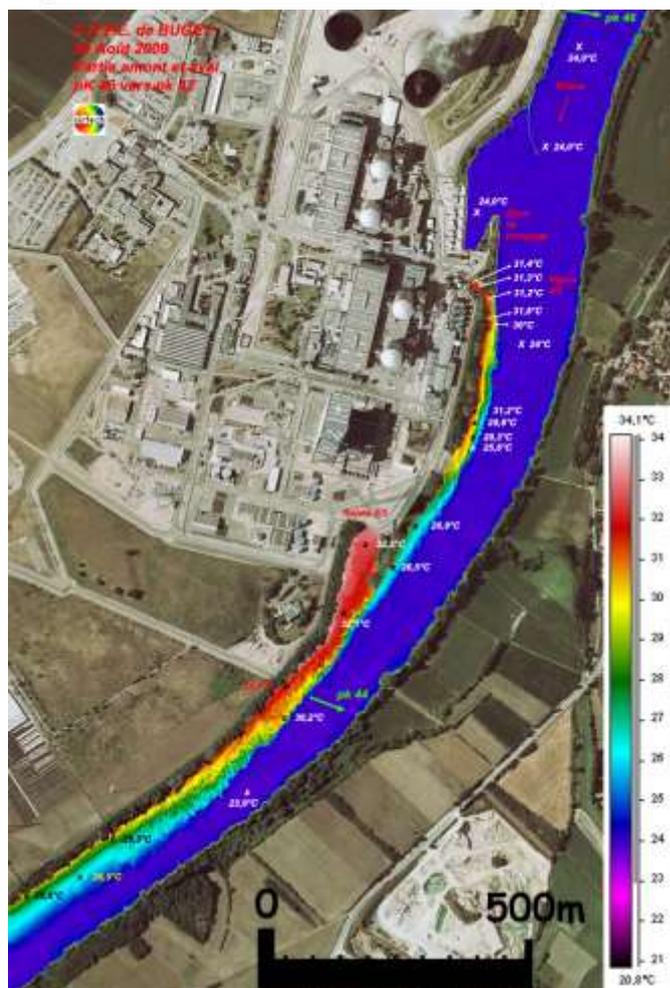
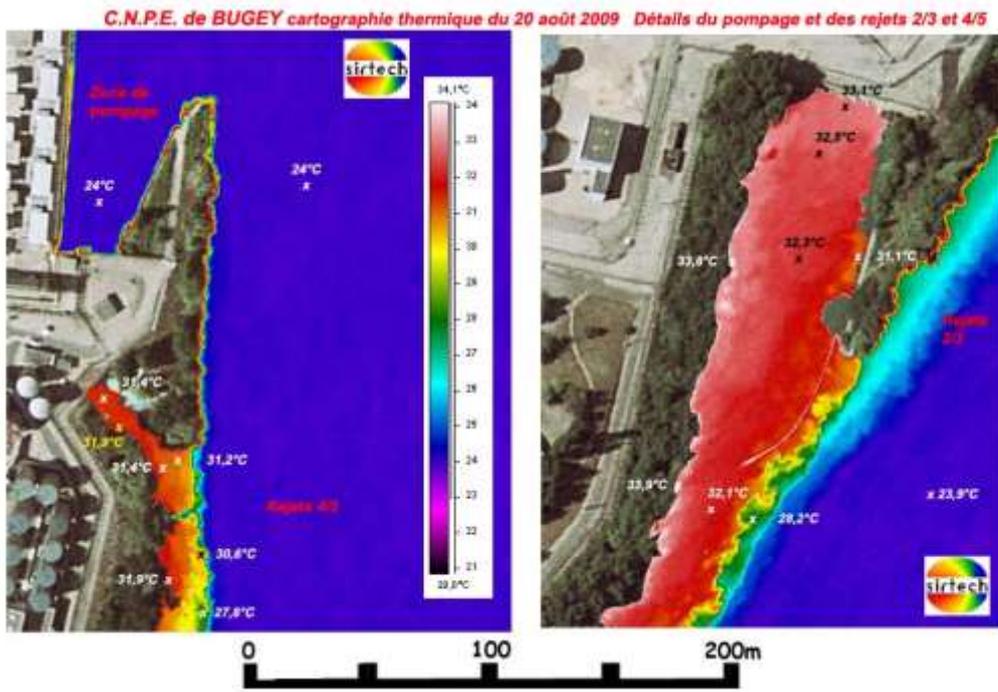


Figure 9 : Photos infra-rouge réalisées pour le compte d'EDF-CNPE Bugey (fournies gracieusement) le 20 août 2009 ($450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Visualisation des deux rejets (4-5 en haut à gauche, et 2-3 en haut à droite) et vue d'ensemble du site d'étude (en bas).

Description du peuplement de poisson du Rhône à Bugey

Dans le cadre du suivi hydrobiologique et piscicole lié à l'arrêté de prise d'eau et de rejet d'eau échauffée par le CNPE, la communauté piscicole est échantillonnée chaque année depuis 1980, dans 8 stations réparties entre l'amont et l'aval du CNPE, et ce 4 fois par an. Ces données permettent d'illustrer la structure du peuplement du tronçon d'étude :

- effectifs moyens par taxon et pour 30 min de pêche (Figure 10) ou biomasses des adultes de trois espèces (Figure 11) par classe de température de l'eau le jour de la pêche (cf. liste des abréviations des taxons en Annexe 1)
- évolution des effectifs par taxon et pour 30 min de pêche, dans les stations réchauffées et non-réchauffées (cf. 3 exemples Figure 12).

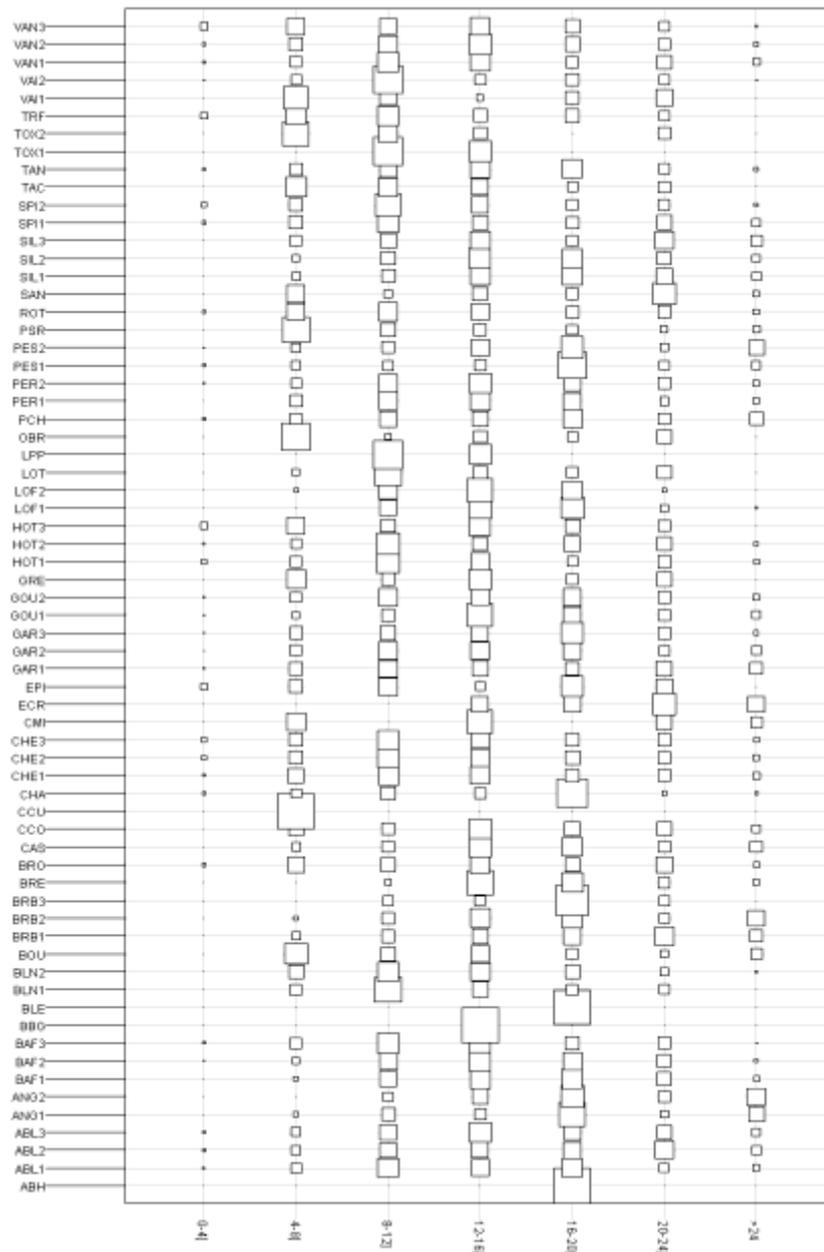


Figure 10 : Description des effectifs moyens par taxon (1=recrutement, 2=juvéniles, 3=adultes) capturés entre 1980 et 2010 sur l'ensemble des stations de pêche du suivi hydrobiologique du CNPE de Bugey par classe de température de l'eau (°C) dans la station de pêche. Les carreaux sont proportionnels à l'effectif.

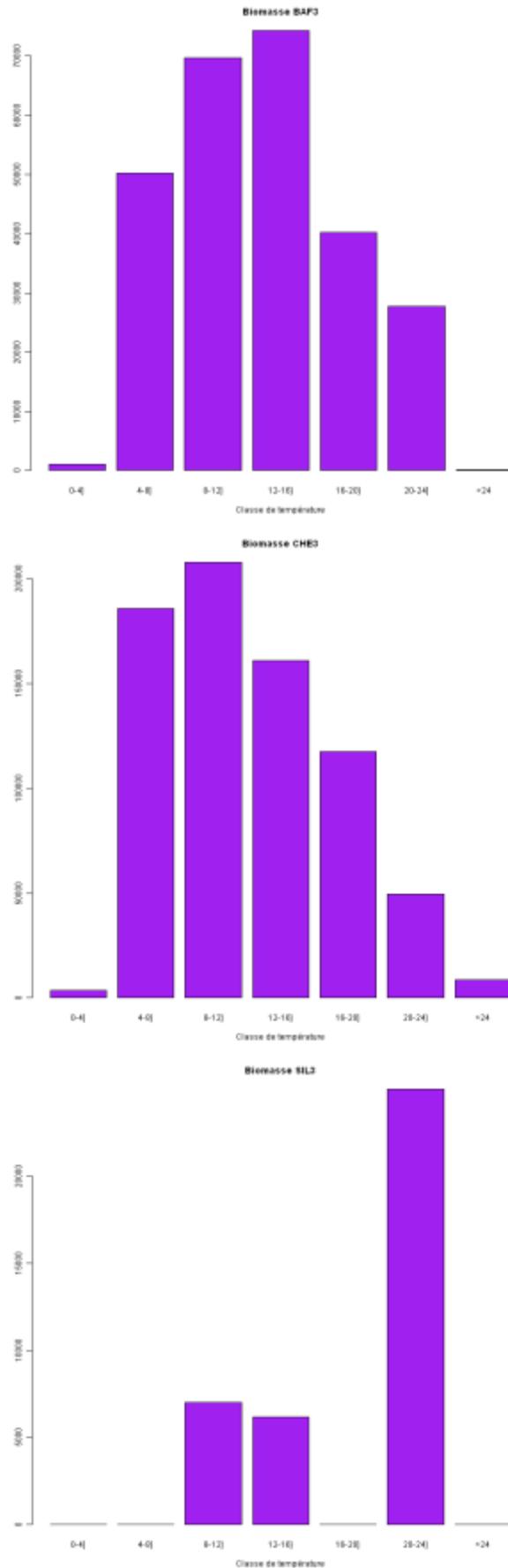


Figure 11 : Biomasses des stades 3 (adultes) des trois espèces (barbeau, chevain, et silure, de haut en bas) capturées dans les stations de pêche du suivi hydrobiologique et piscicole du CNPE-Bugey, réparties dans des classes de température (entre 0° et plus que 24°C par pas de 4°C) de l'eau le jour de la pêche.

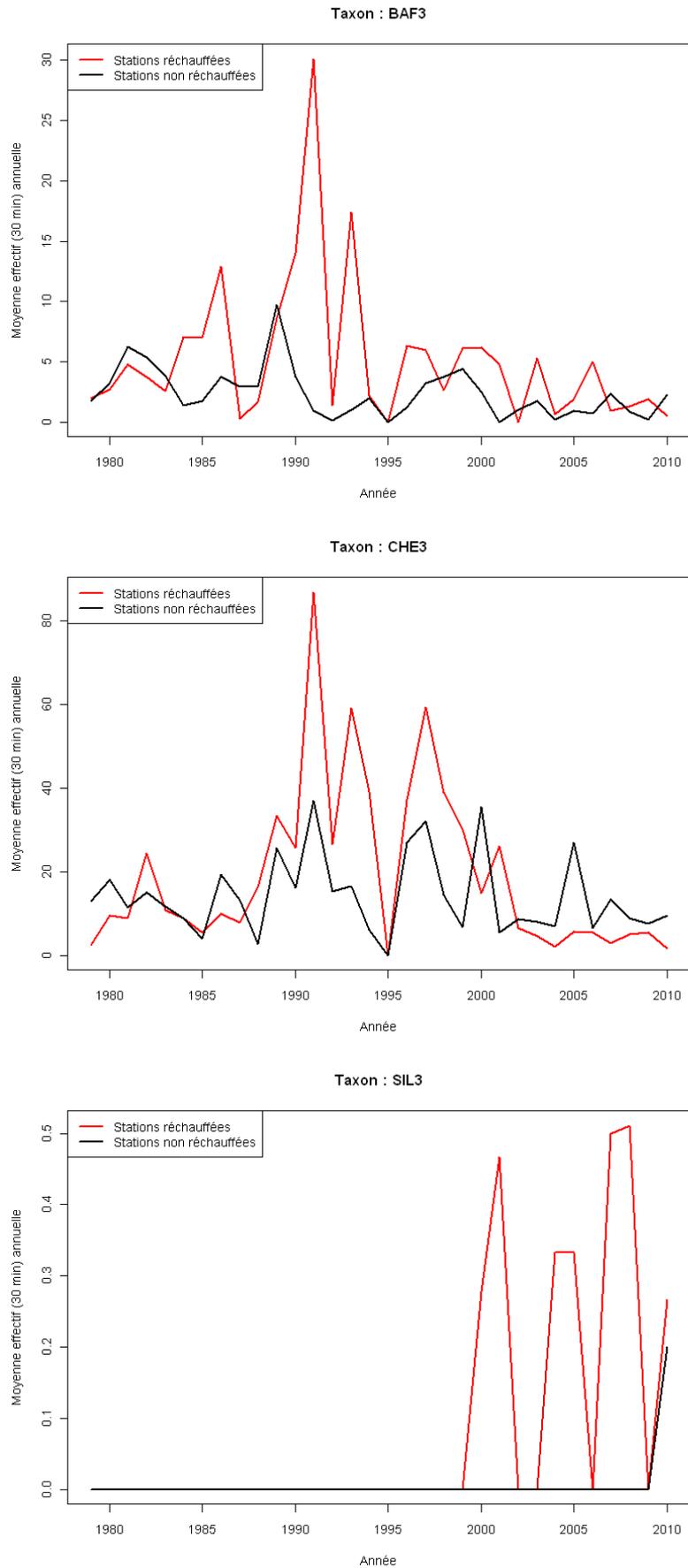


Figure 12 : Effectif moyen pour trente minutes de pêche (suivi hydrobiologique du CNPE de Bugey) des stades 3 (adultes) des trois espèces (barbeau, chevaine, et silure, de haut en bas) capturés dans les stations réchauffées (rouge) et non-réchauffées (noir), de 1980 à 2010.

De ces résultats généraux il est possible de constater que :

- les trois espèces barbeau, chevaine et silure sont assez bien représentatives de la structure de la communauté de poissons du Rhône à Bugey telle qu'observée depuis quelques années déjà (en abondance et en biomasse) ;
- d'autres espèces seraient très intéressantes à étudier en terme de comportement, notamment le spiralin, la vandoise, le hotu, le gardon, le goujon ou encore l'ablette mais leur taille maximale ou leur rareté (e.g. adultes de hotu) rendent cet objectif très difficile à réaliser ;
- le chevaine semble être celle des trois espèces la moins souvent capturée dans les eaux chaudes et / ou réchauffées alors que le silure lui est clairement thermophile ;

D'autre part, nous avons décrit simultanément les données de Olivier *et al.*, 2011 (suivi des RCCs de Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon et Pierre-Bénite dans le cadre du suivi de la restauration du Rhône) et les données du suivi hydrobiologique et piscicole de l'effet des rejets d'eau chaude du CNPE de Bugey présentées brièvement ci-dessus. Nous avons calculé l'abondance relative moyenne de chaque espèce observée dans chaque secteur (pour les RCCs depuis l'augmentation du débit réservé, et de 2006 à 2010 pour Bugey). Notons aussi ici que les protocoles d'échantillonnage sont très différents entre les secteurs, mais homogènes au cours du temps au sein de chaque secteur.

Entre Chautagne et Pierre-Bénite 35 espèces ont été observées. Pour chaque secteur, la richesse spécifique varie de 24 à 30 espèces (observées au moins une fois). L'abondance relative moyenne par espèce varie de 0.01% à 47.01%. Si on considère le nombre d'espèces dont l'abondance relative est supérieure à 1%, 2% et 5%, on constate que Bugey a systématiquement la valeur la plus basse (partagée avec Pierre-Bénite pour le seuil 1%, et avec Chautagne pour le seuil 2%).

Globalement le secteur de Bugey est moins équilibré que les secteurs du Haut-Rhône et présente des abondances relatives par espèce inférieures à celles des trois RCCs étudiés. Pour Bugey le déséquilibre vient surtout de l'écrasante domination du spiralin (47% en moyenne). Les espèces dépassant les 5% d'abondance relative sont le chevaine, le hotu, le barbeau, et l'ablette. L'abondance relative moyenne du silure est plus importante à Bugey qu'à Pierre-Bénite, et sa biomasse relative est depuis quelques années de loin la plus importante sur le secteur (cf. rapports Bugey).

Si les peuplements de poissons des RCCs sont jugés perturbés, alors le peuplement de poissons du Rhône dans le secteur de Bugey, qui n'est pas différent voire moins bien structuré, peut être considéré comme potentiellement perturbé, au moins autant que ceux des RCCs. D'autre part les espèces chevaine et barbeau sont très bien représentées dans les RCCs, et relativement moins abondantes à Bugey. L'intérêt de suivre le comportement de quelques individus de ces deux espèces est justifié. Pour le silure la justification d'étudier plus particulièrement le comportement de certains individus vient de l'augmentation progressive mais significative de son abondance relative, et surtout de sa biomasse. D'autre part c'est une espèce thermophile qui pourrait tirer parti des rejets d'eau chaude.

Deuxième partie : MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

Modèle du tronçon complet

Un modèle 2D a été étalonné pour une gamme de débit de 150 à 1000 m³.s⁻¹ pour l'ensemble du tronçon de 35 km entre Sault-Brenaz et Jons. Il est possible de simuler pour n'importe quel débit dans cette gamme (en mode stationnaire pour l'instant) les conditions hydrodynamiques présentes dans l'ensemble du secteur (cf. caractéristiques générales Tableau I). Ce modèle est développé en collaboration avec L'INRS-ETE de Québec (Yves Secretan) et Environnement Canada (Jean Morin) sous le logiciel Modeleur –V. mai 2008.

Des modifications du modèle et notamment de nouveaux étalonnages et une nouvelle validation sont nécessaires. Ces modifications concernent la reprise du modèle numérique de terrain suite à la mise à disposition par l'Agence de l'Eau RM&C (via IGN) de la Base de Données Topographiques du Rhône fin 2010. Ces données complémentaires permettront de mieux décrire les berges et les haut de berge. Cela implique des modifications du maillage actuel et surtout une nouvelle phase d'étalonnage, validation, simulation.

Les principales étapes de construction de ce modèle sont contenues dans Capra *et al.* (2011a - rapport de l'accord cadre Cemagref - AERM&C). Dans ce rapport sont présentées également des simulations des conditions hydrodynamiques, et les conditions d'habitat pour les poissons et les invertébrés du Rhône. Il est aussi possible de caractériser la répartition des habitats fonctionnels (Le Pichon *et al.*, 2008), i.e. les habitats potentiels de reproduction, d'alimentation, ou de repos.

Un couplage entre les localisations des poissons dans le tronçon et la description des habitats hydrauliques disponibles est à développer et à analyser, mais cette étape n'a pas pu être réalisée dans le cadre de la phase IV de l'étude thermie Rhône.

Modèle du site d'étude de 2009

Le modèle utilisé dans le cadre plus spécifique du Lot4 de la phase IV de l'Etude Thermie Rhône, i.e. sur le secteur d'étude au droit du CNPE de Bugey (Figure 13), pour l'expérimentation de 2009, a été développé sous Télémac 2D (E. McNeil, M.C. Bouillon et C. Alfaro, travaillant à l'époque chez RSW. Inc, devenu AECOM).

Ce modèle avait pour objectif de simuler pour tout le secteur d'étude de 2009 les conditions hydrauliques (exemples sur la Figure 14) et la température de l'eau en mode non stationnaire (i.e. variable dans le temps) pour toute la durée de l'expérimentation. Il a donc fallu accorder beaucoup d'attention aux phases d'étalonnage et de validation compte tenu des gammes très larges de débits et de température observées en été 2009 (Capra *et al.*, 2011b).

Mise en œuvre du modèle hydrodynamique (d'après Capra *et al.*, 2011b)

Une schématisation bidimensionnelle a été retenue pour caractériser les conditions abiotiques qui prévalent au sein du site à l'étude. Ce choix résulte des considérations suivantes : 1) les modèles de préférence d'habitat des poissons sont définis en fonction de vitesses moyennes sur la colonne d'eau ; 2) il n'y a pas de stratification verticale de la température de l'eau ; 3) il convient de disposer d'une description des conditions abiotiques avec une configuration et une résolution spatiale compatible avec une étude comportementale des poissons (ce que n'aurait pas permis d'atteindre le recours à une schématisation unidimensionnelle ; les poissons étant susceptibles de se déplacer tant latéralement que longitudinalement par rapport au cours d'eau), et 4) une approche de modélisation hydrodynamique en trois dimensions n'aurait pas, dans le contexte du projet, apporté davantage d'information, tout en s'avérant plus complexe à mettre en œuvre et à valider.

La discrétisation géométrique du tronçon à l'étude a été réalisée sous la forme d'un maillage irrégulier d'éléments triangulaires en tenant notamment compte de la configuration bathymétrique du secteur (recours, à titre d'exemple, à un maillage de Delaunay contraint au droit de certaines sections de contrôle de l'écoulement à faibles débits). Le tronçon considéré pour les simulations numériques des conditions abiotiques a été étendu vers l'amont par rapport aux limites de la zone à l'intérieur de laquelle l'analyse comportementale du poisson est visée, ceci afin de palier aux risques d'introduction d'un biais lié à l'hypothèse de la distribution du débit spécifié à titre de condition à la frontière amont du domaine de calcul. L'attribution des élévations caractéristiques du lit du cours d'eau a bénéficié des efforts déployés à la caractérisation des élévations du lit mineur et des berges du secteur étudié.

Pour obtenir une forte densité de point de bathymétrie, les levés bathymétriques ont été réalisés avec un sondeur multi-faisceaux (Pella *et al.*, 2007). Des données complémentaires de bathymétrie et de topographie ont été récoltées avec des techniques plus classiques (tachéomètre, DGPS et sondeur mono faisceau), et à partir de relevés LiDAR mis en œuvre par l'IGN pour l'Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée et Corse en 2009. Les données ont été géo-référencées en utilisant la projection Lambert II étendu, généralement utilisée pour l'ensemble de la France Métropolitaine (projection conique conforme). Les coordonnées de chaque point sont considérées « centimétriques », ce qui signifie que, compte tenu des techniques utilisées pour les recueillir, les écarts entre les valeurs mesurées et la réalité sont de l'ordre de quelques centimètres.

La caractérisation des conditions de substrat prévalant au droit de chaque nœud du maillage a été établie à partir d'une cartographie de la répartition spatiale du substrat au sein du tronçon étudié. Cette cartographie a été élaborée en se basant sur des données acquises à partir d'observations directes depuis un bateau de même qu'à partir d'analyse de photos aériennes prises à très bas débit en hiver, garantissant ainsi une visibilité maximale.

Une attention particulière a été portée au processus d'étalonnage et de validation du modèle numérique d'écoulement, y compris au niveau de l'acquisition des données requises pour la réalisation de ces processus. A cet effet, une procédure permettant de varier les coefficients de friction le long du tronçon à l'étude en fonction du débit qui y transite a été implantée. Pour les processus d'étalonnage et de validation, des relevés de niveaux d'eau en fonction du débit ont été effectués au droit de six stations limnimétriques implantées sur les berges le long du tronçon étudié pour une large gamme de débits susceptibles d'y prévaloir. Pour chaque station limnimétrique, une relation niveau-débit a été établie pour une gamme de débit variant de 150 à 1100 m³·s⁻¹. Les relevés réalisés au droit de la station limnimétrique située à l'extrémité

aval du tronçon à l'étude ont été exploités, compte tenu du caractère fluvial des écoulements prévalant dans le secteur, pour le traitement de la condition spécifiée à la frontière aval du tronçon; un hydrogramme étant spécifié à titre de condition à la frontière amont. Par ailleurs, des profils longitudinaux de surface libre (mesure du niveau d'eau en continu dans l'axe principal du fleuve) pour différents débits stabilisés (6 relevés entre 190 et 600 m³·s⁻¹) ont été relevés entre l'amont et l'aval du secteur d'étude.

La répartition transversale des vitesses moyennes d'écoulement sur la colonne d'eau a été estimée à plusieurs débits (190 à 600 m³·s⁻¹) dans l'axe de six sections transversales réparties le long du tronçon à l'étude. Les enregistrements étaient effectués à l'aide d'un ADCP (Rio Grande 1200 Khz– RD Instruments) couplé à un système DGPS (Leica 1200) pour le géoréférencement. De la même manière, la température de l'eau du Rhône (à 0,5 m sous la surface) a été mesurée (sonde de type NKE SP2T10) dans l'axe de trois sections transversales pour différentes conditions de débit (450 à 600 m³·s⁻¹) et de température de l'eau à l'amont du site (19,4 à 22,7 °C; Capra *et al.*, 2008 [7]).

Une partie des données susmentionnées de conditions d'écoulement et de température de l'eau ont servi à l'étalonnage des modèles numériques d'écoulement et de température de l'eau. Les données n'ayant pas servi à l'étalonnage ont été utilisées pour la validation des processus d'étalonnage.

Au cours des relevés, les débits ont été mesurés avec un ADCP ou estimés à partir des débits déterminés par la Compagnie Nationale du Rhône au droit du site d'étude (pk 44,5). Certains relevés de niveaux d'eau ont été couplés à des mesures de débit au même moment.

Les résultats des simulations hydrodynamiques permettent de caractériser, pour chaque nœud du maillage, la vitesse moyenne d'écoulement et la profondeur prévalant localement en fonction du débit transitant par le tronçon à l'étude. Les conditions hydrodynamiques ainsi simulées servent d'intrants, avec les conditions de fonctionnement du CNPE (nb de groupes en fonction), aux simulations de la répartition spatiale des températures de l'eau.

Les simulations hydrodynamiques et thermiques ont été réalisées pour une gamme de débit variant de 150 à 750 m³·s⁻¹, laquelle correspond aux fluctuations typiques des débits durant la période d'enregistrement des déplacements des poissons au sein du site d'étude. Ces simulations permettent, pour les conditions de fluctuation de débit considérées, des visualisations en plan (cartographies) de la répartition spatiale des différentes variables simulées (la cartographie du substrat étant définie non variable en fonction du débit) et de connaître pour chaque localisation de poisson dans le site d'étude, les conditions d'habitat (e.g. hauteur d'eau, vitesse, substrat, température) utilisées par le poisson localisé.

Tableau I : Résumé de l'évolution des caractéristiques hydrauliques principales (profondeur d'eau, vitesse d'écoulement, et largeur en eau moyennes) en fonction du débit, par secteur (cf. Figure 1) et pour l'ensemble du tronçon (d'après Capra *et al.*, 2011a – Rapport de l'accord cadre Cemagref - AERM&C).

Secteurs	Variables	Débits de simulation (régime permanent)							
		150	200	250	300	400	500	700	900
1 (3930)	largeur (m)	123.3	127.9	131.2	133.8	137.8	140.3	143.4	144.6
	profondeur (m)	3.30	3.40	3.60	3.70	3.90	4.20	4.70	5.30
	vitesse (cm.s ⁻¹)	0.33	0.41	0.48	0.54	0.65	0.76	0.94	1.10
2 (4410)	largeur (m)	152.7	161.1	165.1	167.7	170.3	172.6	176.0	177.5
	profondeur (m)	1.40	1.60	1.70	1.90	2.20	2.50	3.10	3.60
	vitesse (cm.s ⁻¹)	0.65	0.75	0.84	0.91	1.03	1.12	1.25	1.37
3 (15560)	largeur (m)	122.2	127.6	131.5	133.6	136.2	138.4	140.6	142.2
	profondeur (m)	1.80	1.90	2.10	2.30	2.70	3.10	3.70	4.20
	vitesse (cm.s ⁻¹)	0.66	0.76	0.85	0.92	1.04	1.14	1.31	1.48
4 (6230)	largeur (m)	117.8	124.2	129.5	133.3	137.3	139.6	142.9	144.6
	profondeur (m)	1.70	1.80	1.90	2.10	2.30	2.60	3.10	3.60
	vitesse (cm.s ⁻¹)	0.84	0.93	1.01	1.09	1.22	1.34	1.53	1.71
5 (4920)	largeur (m)	151.5	151.9	152.2	152.5	153.2	153.8	154.9	155.2
	profondeur (m)	3.10	3.20	3.20	3.30	3.50	3.60	3.90	4.00
	vitesse (cm.s ⁻¹)	0.47	0.56	0.64	0.73	0.88	1.01	1.25	1.53
Total (35050)	largeur (m)	129.5	134.7	138.2	140.5	143.2	145.3	147.8	149.2
	profondeur (m)	2.08	2.21	2.36	2.51	2.81	3.10	3.64	4.07
	vitesse (cm.s ⁻¹)	0.60	0.69	0.77	0.84	0.96	1.06	1.23	1.40

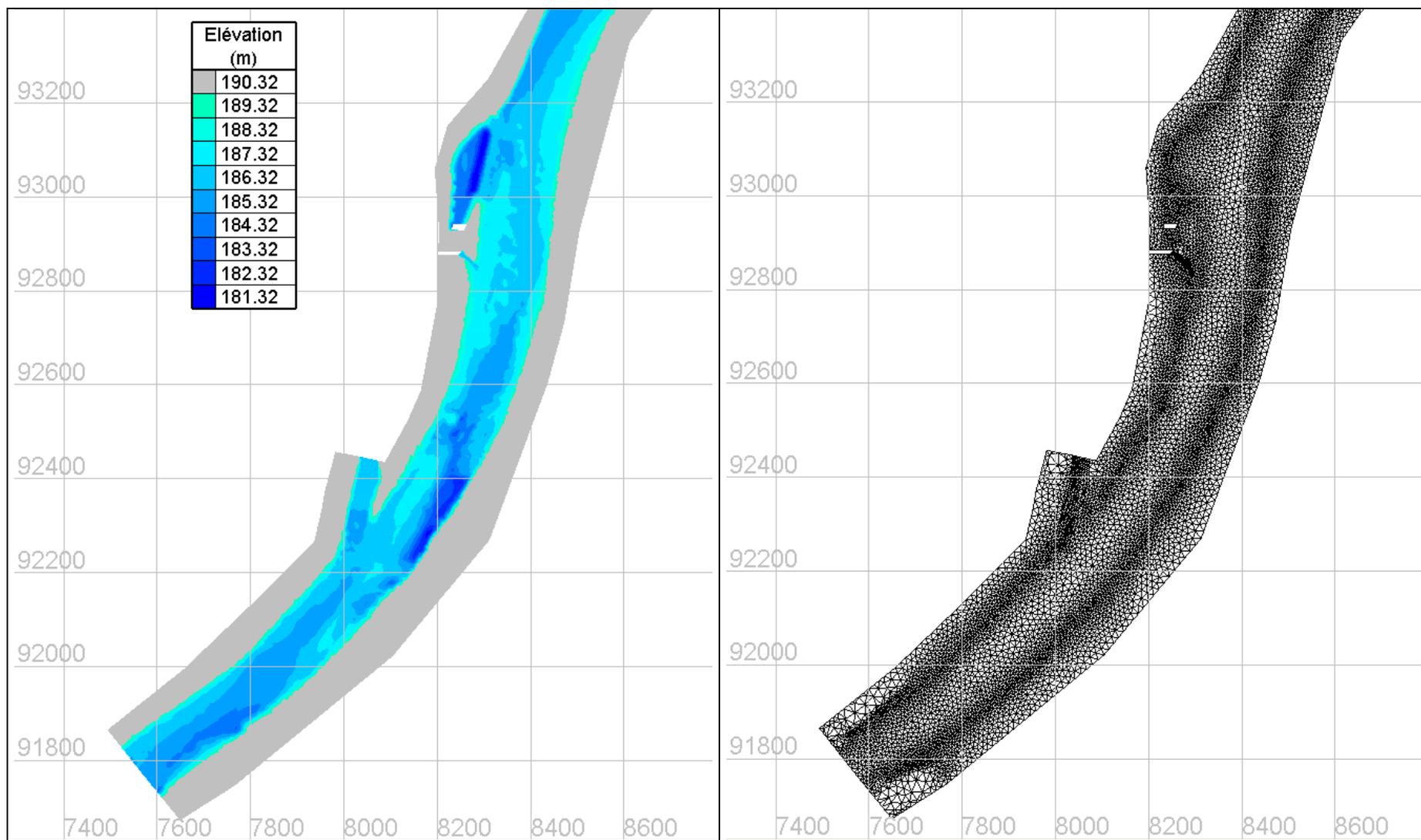


Figure 13 : représentation de l'élévation (altitude en m) du fond du Rhône (à gauche), et maillage construit pour la discrétisation géométrique du site d'étude (à droite).

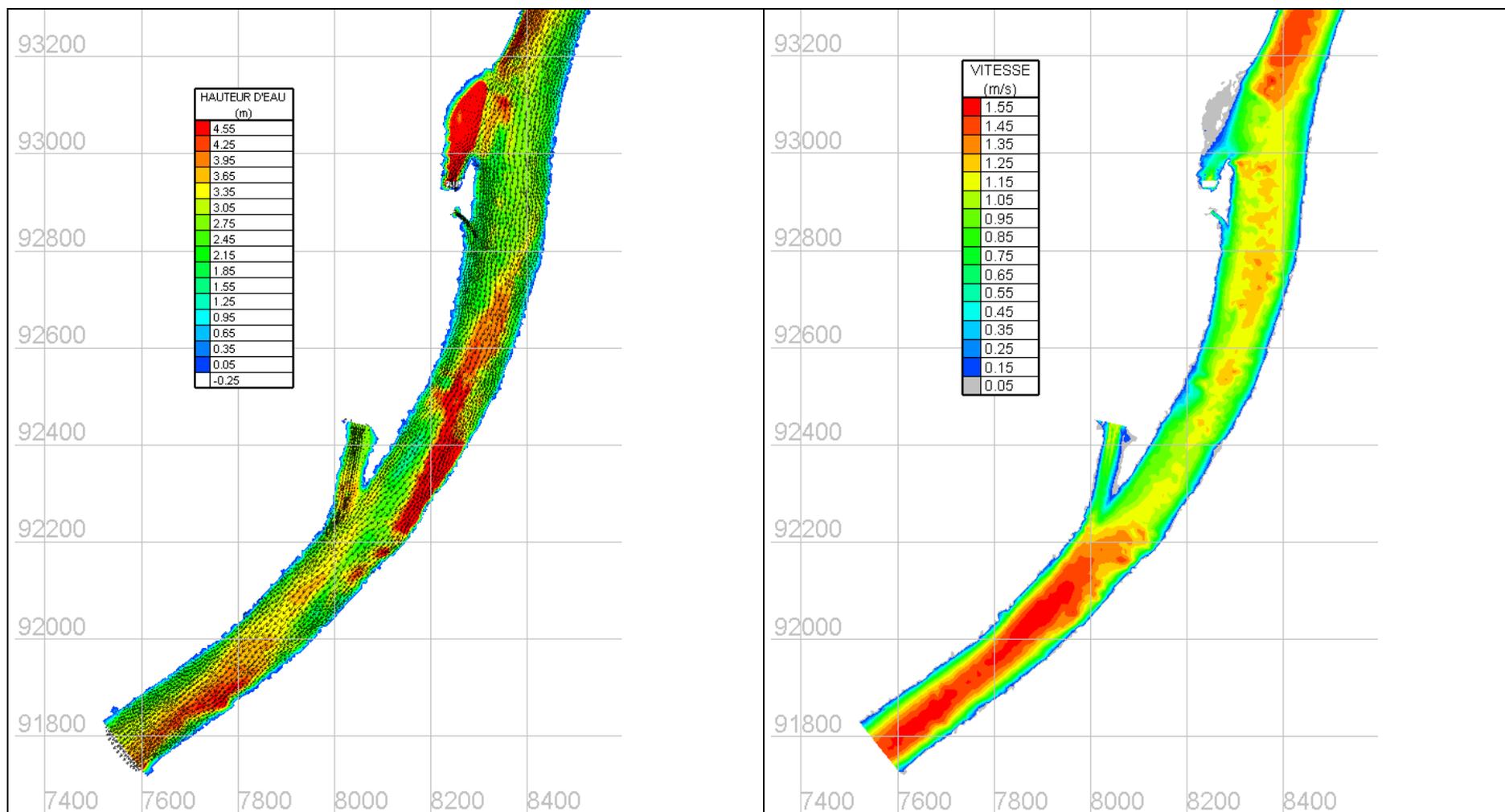


Figure 14 : Représentation des conditions hydrodynamiques à $520 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A gauche les vecteurs vitesse (de taille proportionnelle à la norme du vecteur) sur fond d'isosurfaces de profondeur (m). A droite scalaire de la vitesse (isosurfaces).

Conditions aux frontières

Débit

Une sonde de pression a été installée à l'aval du site d'étude. Après calage entre le niveau d'eau et le débit instantané (lors d'épisode de stabilité de débit), le débit était estimé au pas de temps 5 min pendant toute la durée de l'expérimentation. La reconstitution des débits horaires (moyenne des 12 valeurs enregistrées chaque heure) a été comparée à celle enregistrée (et fourni gracieusement) par la CNR au PK 44.5 (face au CNPE). La très bonne correspondance observée entre les deux chroniques (Figure 15) permet d'utiliser la chronique de la CNR au Pk 44.5 (centre du site d'étude ; Figure 16). L'enregistrement des niveaux d'eau en fonction du temps, et donc du débit, à permis de valider les relations niveaux-débits déterminées à partir des relevés effectués sur l'échelle limnimétrique placée en limite aval du secteur modélisé.

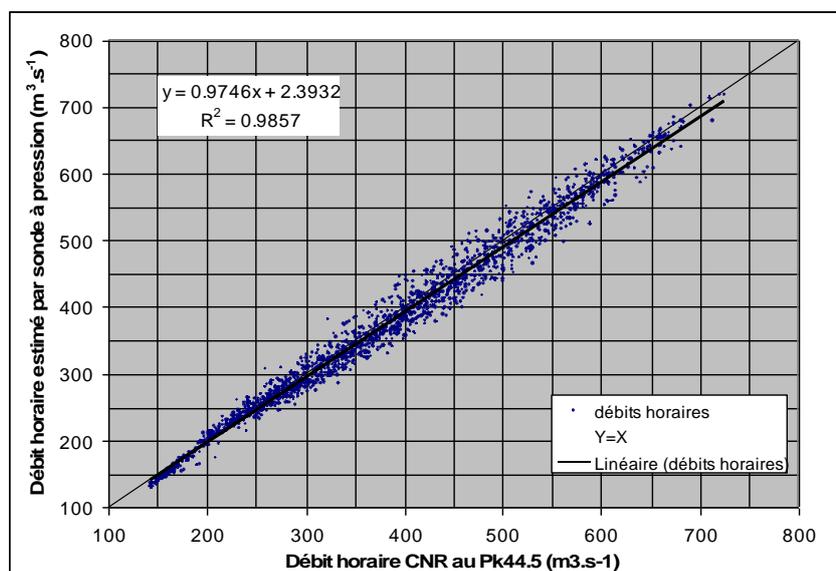


Figure 15 : Relation entre le débit horaire (en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) estimé avec la sonde de pression installée à l'aval du site d'étude (entre Pks 44 & 43) et le débit horaire de la CNR enregistré au centre du site d'étude (Pk 44.5).

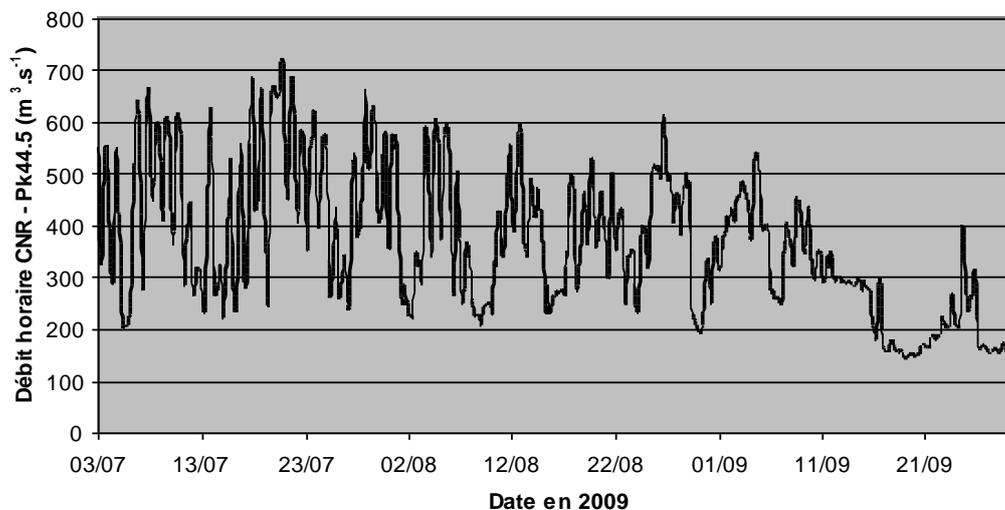


Figure 16 : Chronique de débit horaire du Rhône ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) au centre du site d'étude (Pk 44.5) du 3 juillet au 29 septembre 2009 – Données fournies par la CNR.

Température

Des enregistrements ponctuels de la température de l'eau ont été réalisés en continu (au pas de temps horaire) avec des thermographes de type Vemco-Minilog. Ces thermographes étaient positionnés :

- en amont du site d'étude au Pk46, en rive droite et en rive gauche ;
- au centre du site d'étude au Pk44.3, en rive droite (entre le rejet 4-5 et le rejet 2-3) et en rive gauche (non échauffée) ;
- à l'aval du site d'étude au Pk 43 en rive droite (échauffée) et en rive gauche (non échauffée) ;
- dans les deux rejets d'eau chaude du CNPE (rejet 2-3 (circuits ouverts) à l'aval et rejet 4-5 (circuits fermés) à l'amont).

Des variations importantes de la température ont été observées (Figure 17). Certaines variations infra-journalières étaient dues sans doute à des exondations du thermographe. Ces exondations dépendaient du débit et de l'emplacement du thermographe. D'autres baisses brutales de la température n'étaient pas liées au débit. Par conséquent nous avons laissé les enregistrements sans correction des valeurs.

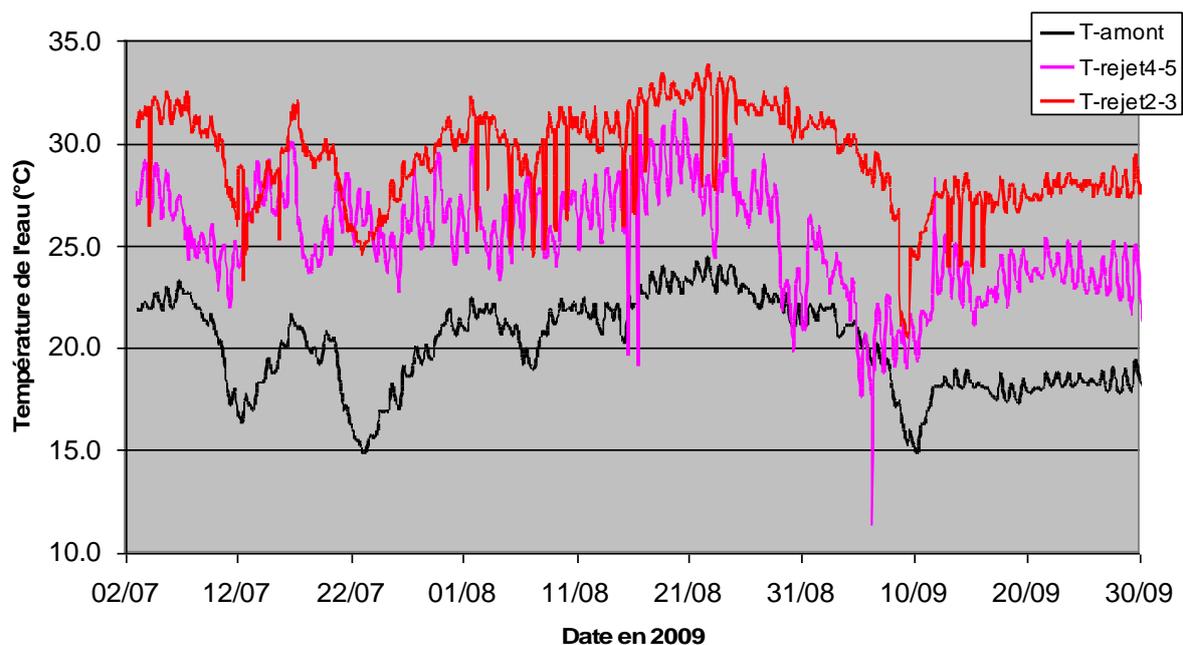


Figure 17 : Chroniques de la température de l'eau (pas de temps horaire) en amont du site d'étude (T-amont), dans le rejet 4-5 (circuits fermés ; T-rejet4-5) et dans le rejet 2-3 (circuits ouverts ; T-rejet2-3).

Substrat

Une cartographie du substrat a été réalisée à partir d'observations visuelles sub-aquatiques et à partir de photos aériennes à grande résolution (Figure 6). Six classes de substrat ont été définies : sable, gravier, caillou, pierre, bloc et rocher (Figure 18).

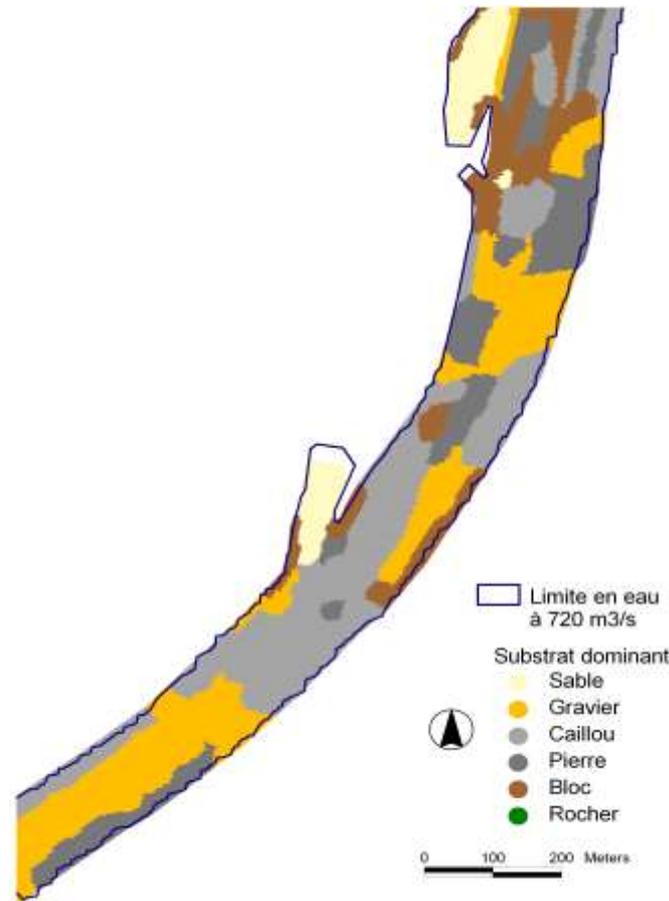


Figure 18 : cartographie de la répartition spatiale des 6 classes de substrat dominant observées sur le site d'étude (le Rhône au droit du CNPE de Bugey).

Fonctionnement CNPE

Le débit pompé et les débits rejetés par le CNPE, ainsi que les températures des eaux rejetées sont des paramètres d'entrée (conditions aux frontières) obligatoires et fondamentaux pour le modèle hydrodynamique et la qualité des simulations effectuées. Au cours de l'été 2009 le CNPE de Bugey n'a jamais fonctionné à pleine puissance. En utilisant les données de fonctionnement (pompage & rejets) recueillies auprès du CNPE et nos propres relevés de température de l'eau, nous avons reconstitué un historique des pompages et des rejets (débits et températures). Les approximations parfois nécessaires pour construire cet historique auront une incidence sur les simulations des conditions hydrodynamiques et thermiques, mais cela reste impossible à évaluer.

(Pour information le CNPE donne (présentation C. Rety (CIDEN) au groupe GT Thermie du 7 décembre 2011 à Paris) 3 tranches en fonctionnement (1 en circuit ouvert, et 2 en circuit fermé jusqu'au 29 août 2009), puis 2 tranches en fonctionnement (1 en circuit ouvert, et 1 en circuit fermé jusqu'au 15 septembre 2009).

Test des simulations quasi-stationnaires vs non stationnaires

Un test précis de comparaisons des simulations quasi-stationnaire et non stationnaire pour des valeurs de débit équivalentes a été mené. L'objectif était de pouvoir travailler avec des simulations quasi-stationnaires entre 150 et 850 m³.s⁻¹ avec une simulation tous les 10 m³.s⁻¹, plus simple à manipuler qu'une modélisation non stationnaire sur 3 mois.

Pour le test nous avons comparé à chacun des nœuds du site d'étude les valeurs de profondeur et de vitesse d'écoulement pour des simulations à 150, 200, 300, 500, et 700 m³.s⁻¹. Les débits correspondaient soit à une valeur de plateau en quasi-stationnaire soit à un passage à la valeur de débit retenue (en monté et en descente) en non-stationnaire (Tableau II).

Tableau II : Dates et heure des phases de débit non-stationnaires qui sont passées par les valeurs de débit seuil en phase de monté ou de descente de débit

Débit (m ³ .s ⁻¹)	Profondeur / Vitesse	
	monté	descente
150	19/09 - sem39/ J78 - 13h	29/09 - sem40/ J88 - 2h
200*	22/09 - sem39/ J81 - 14h	29/08 - sem36/ J57 - 23h
300	17/08 - sem34/ J45 - 5h	3/08 - sem32/ J31 - 6h
500	28/07 - sem31/ J25 - 15h	23/07 - sem30/ J20 - 0h
700	20/07 - sem30/ J17 - 18h	ND

* il s'agit de 204 m³.s⁻¹ pour la phase de monté

Au final, les moyennes des écarts entre les deux types de simulations pour la profondeur comme pour la vitesse ne dépassent jamais 3 cm ou 3 cm.s⁻¹.

Validation du modèle

(cf. Capra *et al.*, 2011b)

Niveau d'eau

De l'ordre du cm au maximum (écart entre niveau d'eau simulé et observé)

Vitesse d'écoulement (moyenne sur la profondeur)

Répartition transversale, directions et normes des vecteurs proches des observations (Figure 19).

L'erreur maximum est estimée à 0.1 m.s⁻¹.

Température

Une validation a posteriori des simulations de température de l'eau s'est faite en comparant une cartographie des températures à une photo IR du 20 août 2009 réalisée pour EDF-CNPE Bugey (Figure 20), et en comparant une cartographie des températures à des relevés effectués sur des transects dans des conditions très proches en octobre 2009.

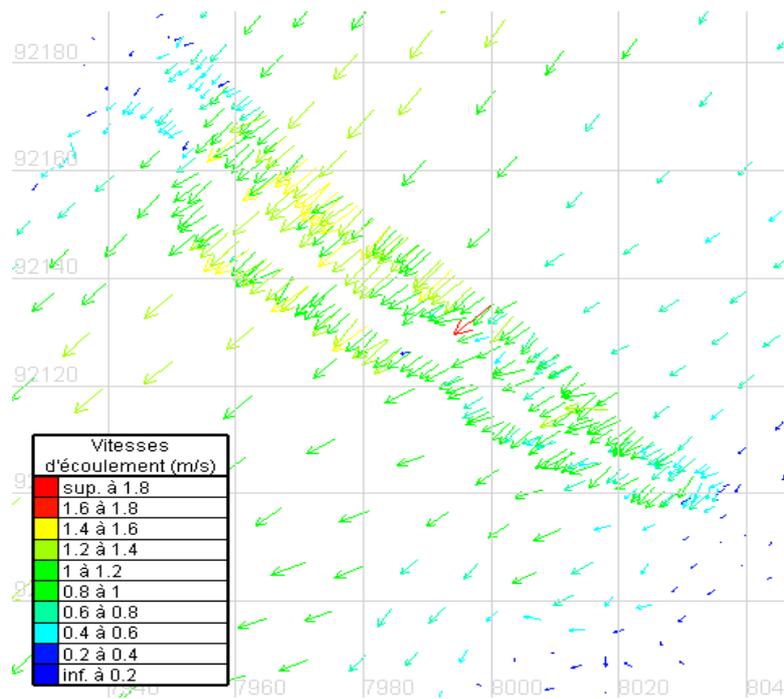


Figure 19 : Vérification de l'adéquation entre les vitesses simulées (vecteurs répartis sur tout le graphe) et mesurées par ADCP (vecteurs resserrés au centre du graphe) sur un transect à l'aval du CNPE de Bugéy et pour un débit bas de 190 m³.s⁻¹.



Figure 20 : Validation de la simulation de la température de l'eau sur le site d'étude (conditions du 20 août 2009) ; à gauche la simulation, à droite une photo infra-rouge réalisée pour le compte d'EDF-CNPE Bugéy (fournie gracieusement).

Il est difficile d'évaluer précisément l'ordre de grandeur de l'erreur maximum des simulations, mais 1°C semble une première approximation raisonnable.

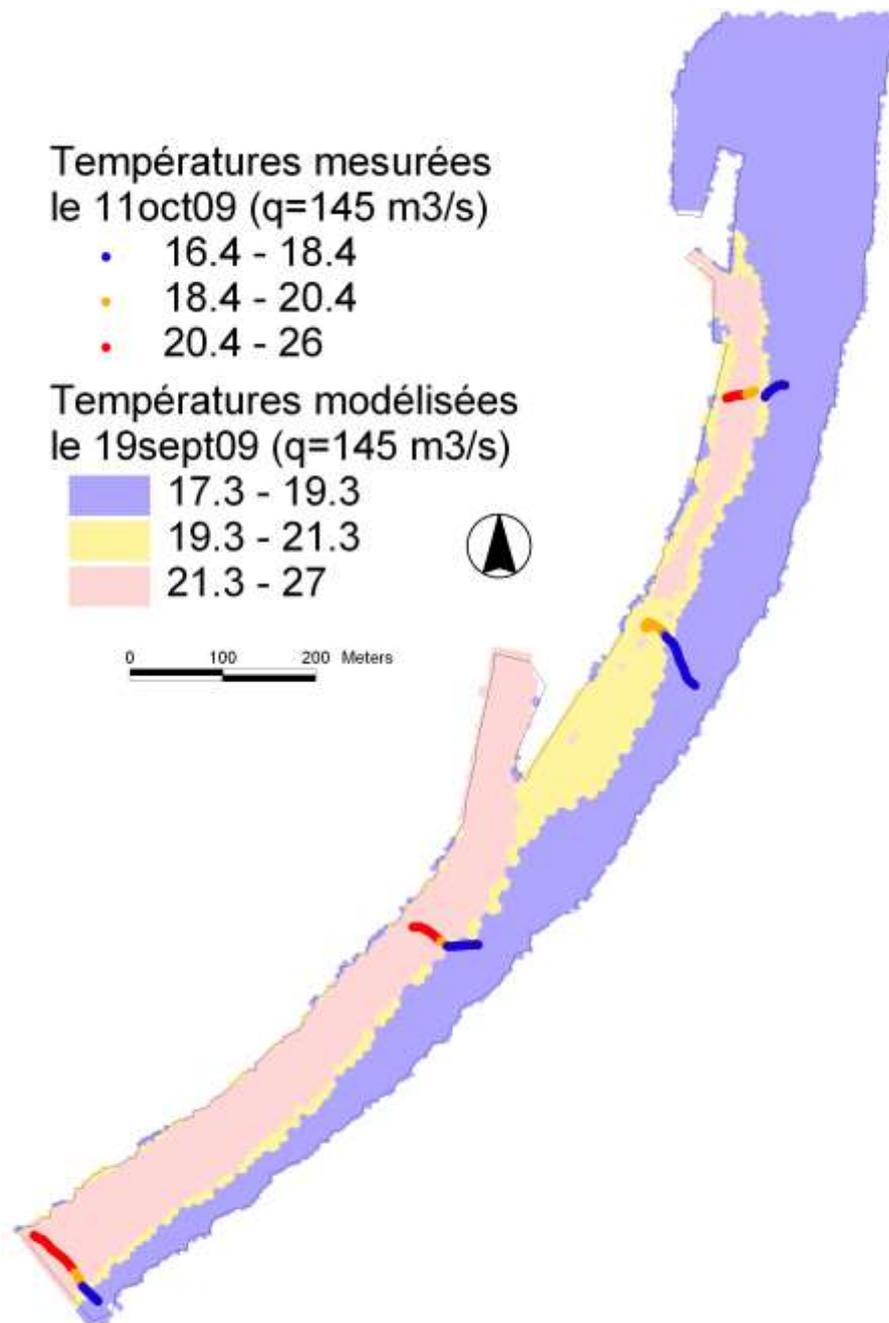


Figure 21 : Validation de la simulation de la température de l'eau sur le site d'étude par comparaison graphique entre les conditions du 19 septembre 2009 (débit entrant 145 m³/s et température amont de 17.3°C; isosurfaces colorées en fonction de seuils de température) et des transects de relevés de température du 11 octobre 2009 dans des conditions assez proches (débit entrant 145 m³/s et température amont de 16.4°C ; trait de couleur fonction de seuils de température)

Troisième partie : TELEMETRIE FIXE - 2009

Description des conditions environnementales

Les facteurs environnementaux retenus pour décrire la variabilité des conditions de vie des poissons pendant le suivi télémétrique de 2009 sont : le débit (pas de temps horaire), la température (pas de temps horaire et simulations), la photopériode (phases nycthémerales), le substrat et les variables hydrauliques profondeur et vitesse du courant (simulations hydrodynamiques).

Le débit (Figure 16) et la température (Figure 17) de l'eau enregistrés au cours de l'été 2009 dans le site d'étude sont présentés ci-dessus.

Nous avons défini différentes phases pour :

- le débit : montée, descente ou stable
- la photopériode : aurore, jour, crépuscule et nuit

Pour le débit un gradient seuil de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ a été choisi pour séparer les phases de débit stables ($< 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) des phases de montée ou de descente de débit.

Les phases nycthémerales sont définies à partir des heures de lever et de coucher du soleil. L'aurore et le crépuscule sont respectivement des périodes de 2h centrées autour des heures officielles du lever et du coucher du soleil.

La distribution des valeurs de débit pendant les différentes phases de débit sont très homogènes entre les montées et les descentes, mais sont assez différentes entre ces deux phases et la phase de débit stable (Figure 22). Les différences sont surtout :

- plus de débit entre 200 et $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- moins de débit entre 450 et $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- moins de débits de plus de $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (mais ce sont des débits peu fréquents pendant l'été 2009)

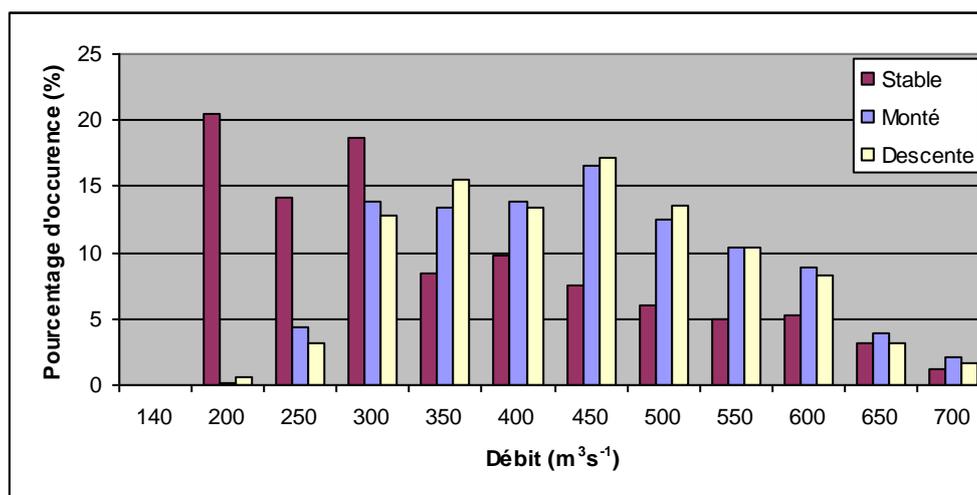


Figure 22 : distribution des débits enregistrés à Bugey en 2009 (juillet – septembre) pour chaque phase de débit.

La distribution des valeurs de débit pendant les différentes phases nyctémérales montrent quelques hétérogénéités (Figure 23).

Aurore :

plus de débit entre 200 et 400 m^3s^{-1} ; beaucoup moins de débit entre 500 et 700 m^3s^{-1} , que pour le jour et la nuit ; beaucoup plus de débit entre 300 et 400 m^3s^{-1} et moins de débit entre 500 et 700 m^3s^{-1} , que le crépuscule.

Crépuscule :

moins de 200, 300, 400 m^3s^{-1} , plus de 550 à 700 m^3s^{-1} que le jour et la nuit.

Jour & Nuit :

jour et nuit sont assez proches ; nuit plus de 200 et 250 m^3s^{-1} ; jour plus de 550 à 700 m^3s^{-1} .

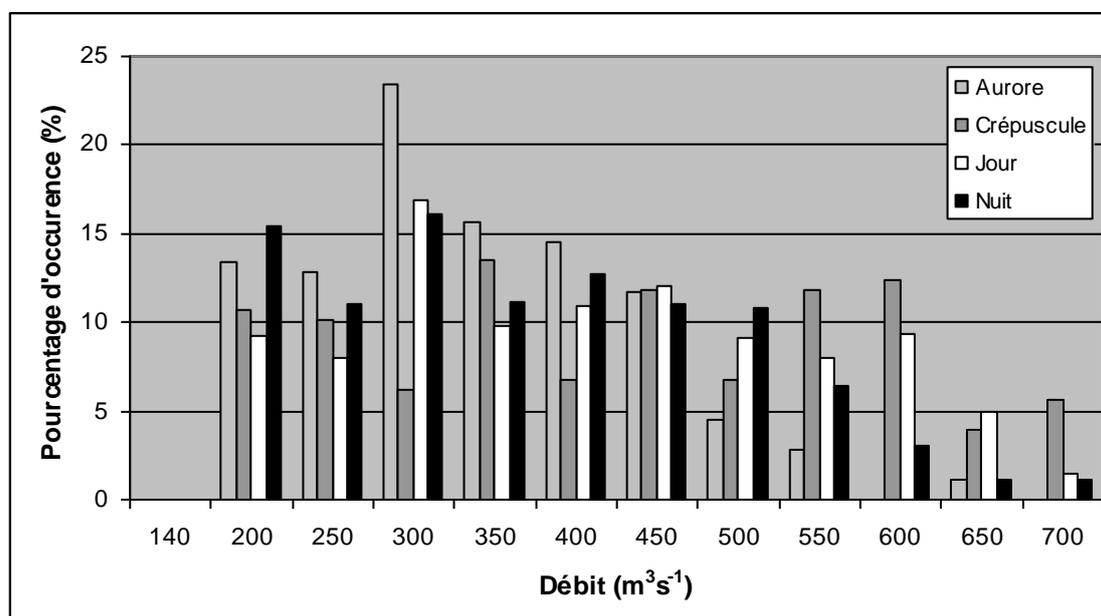


Figure 23 : distribution des débits enregistrés à Bugey en 2009 (juillet – septembre) pour chaque phase nyctémérale.

Globalement (pour la très grande majorité) les montées de débit telles que définies dans notre étude ont lieu la journée et les descentes de débit ont lieu la nuit. Il n'y a pas de lien fort entre l'heure de début de montée et l'amplitude de la montée, mais lorsque la montée intervient au delà de 13h (14 montées concernées), le gradient ne dépasse jamais $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{h}^{-1}$ (exceptée celle du 13 juillet 2009 à 16h). De la même manière les 5 descentes de débit qui interviennent entre 6h et 16h ont des gradients qui ne dépassent pas $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{h}^{-1}$.

Chaque heure du suivi est caractérisée par une phase de débit et une phase nyctémérale, par conséquent les localisations de poissons obtenues dans ces heures sont automatiquement associées à ces mêmes phases.

Pour connaître la température de l'eau en tout point du site d'étude et à chaque instant, nous avons utilisé la modélisation hydrodynamique en temps réel (cf. ci-dessus). Une température

supérieure de 2°C à la température amont à un instant donné sera considérée comme réchauffée (Figure 24).

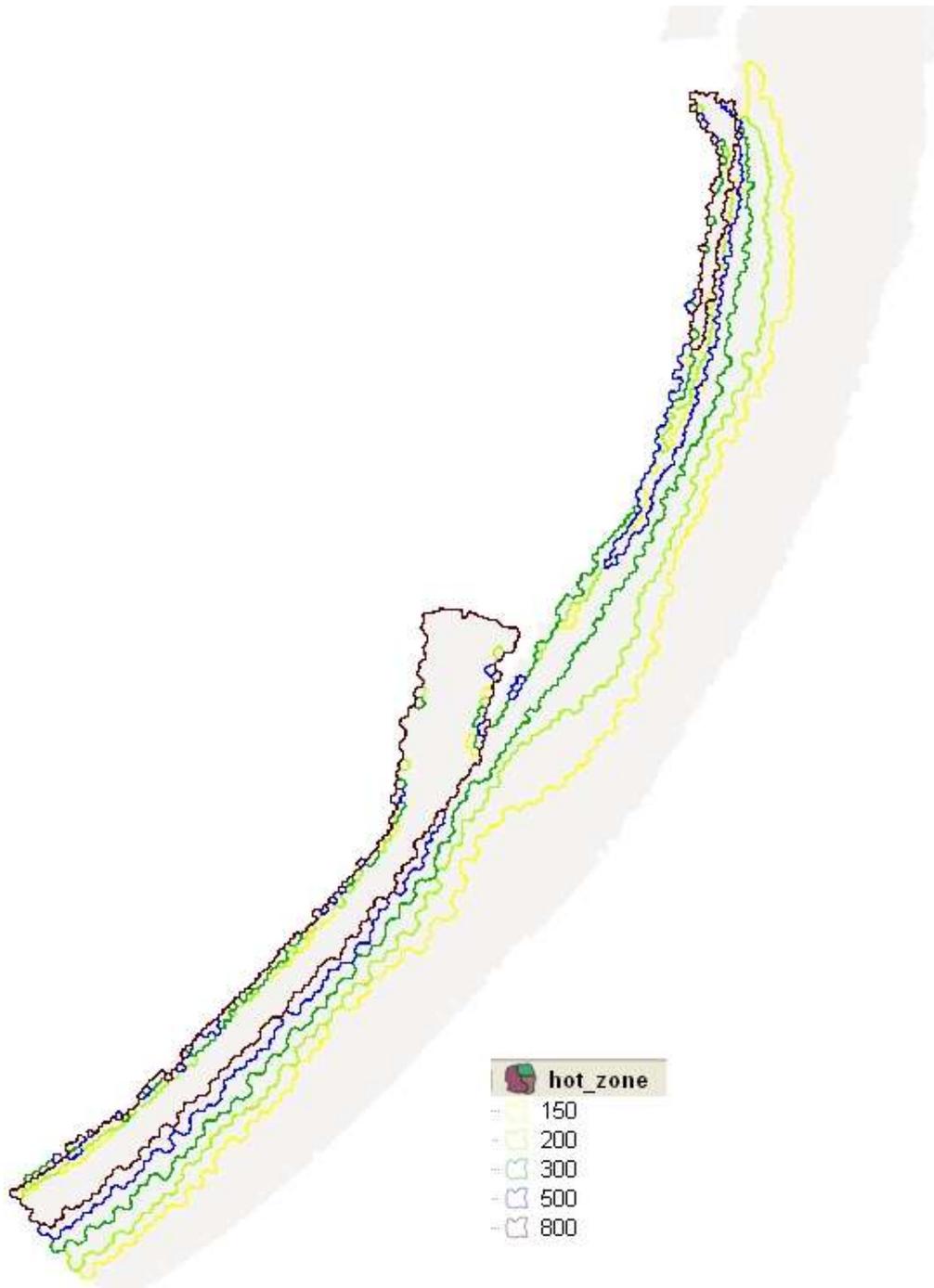


Figure 24 : contour du panache d'eau chaude simulé pour 150, 200, 300, 500 et 800 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Physiquement il n'existe pas de limite stricte, mais un gradient de température (diffusion) au contact entre les veines d'eau chaudes et froides. Nous avons choisi comme limite, les nœuds du maillage pour lesquels la température simulée était de 2°C plus élevées que la température à l'amont du site. Ce sont les contours des aires d'influence de ces nœuds ayant une température plus chaude de 2°C, qui forment les contours présentés sur cette figure.

Les valeurs des variables hydrauliques profondeur et vitesse du courant, en tout point du site d'étude et pour n'importe quel débit observé pendant l'expérimentation, sont obtenues via la modélisation hydrodynamique (cf. ci-dessous).

La modélisation hydrodynamique a donc permis de simuler en temps réel une température, une profondeur d'eau et une vitesse de courant pour toutes les localisations de poissons.

Enfin des événements assez communs pour le Rhône ont été observés au cours de l'été 2009 : les gouttes froides. Sous l'effet combiné du vent et des températures de l'eau, la masse d'eau du lac Léman peut se retourner en provoquant une remontée des eaux froides du fond du lac qui après être passées par l'exutoire du Seujet descendent le Rhône sur tout son cours. Pendant l'été 2009 trois gouttes froides ont été observées et caractérisées (voir plus loin).

Description des conditions hydrodynamiques du site d'étude

Pour décrire les conditions hydrodynamiques observées pendant les trois mois de l'étude 2009, nous avons utilisé la simulation en mode quasi-stationnaire, en se limitant à la gamme de débit observée (150 et $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ainsi pour chaque débit simulé nous connaissons les valeurs de profondeur et de vitesse d'écoulement (moyenne sur la profondeur) en chacun des nœuds en eau du maillage. Noter ici que les nœuds utiles pour l'étude sont ceux situés entre l'amont de la prise d'eau et la limite aval du secteur modélisé, i.e. la zone d'écoute des hydrophones. Cette sous partie aval du maillage comporte 4997 nœuds potentiellement en eau au cours de l'étude.

Un nœud est considéré en eau si la profondeur d'eau simulée est supérieure ou égale à 5 cm.

Nous avons déterminé des distributions de chaque paramètre en fonction du débit transitant à travers le site d'étude. Nous présentons ici l'évolution des distributions de profondeur et de vitesse en fonction du débit (Figure 25). Nous représentons aussi l'évolution en fonction du débit de la largeur moyenne en eau (calculée à partir des largeurs mouillées estimées sur un ensemble de transects positionnés perpendiculairement à l'axe principal d'écoulement tous les 5 m de l'amont à l'aval du secteur étudié), de la surface mouillée, de la profondeur moyenne et de la vitesse moyenne. Les distributions et les valeurs moyennes de profondeur et de vitesse moyennes sont calculées sur l'ensemble des nœuds en eau, pondérée par les surfaces de représentativité de chaque nœud (polygone de Thiessen).

Une représentation des valeurs de profondeur (Figure 26) et de vitesse d'écoulement (Figure 27) au nœud du maillage pour trois débits caractéristiques permet de visualiser la répartition spatiale de ces deux caractéristiques hydrauliques. A noter qu'à partir de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ le niveau d'eau atteint le pied de berge. Les zones calmes, avec des vitesses faibles, disparaissent alors progressivement (Figure 28).

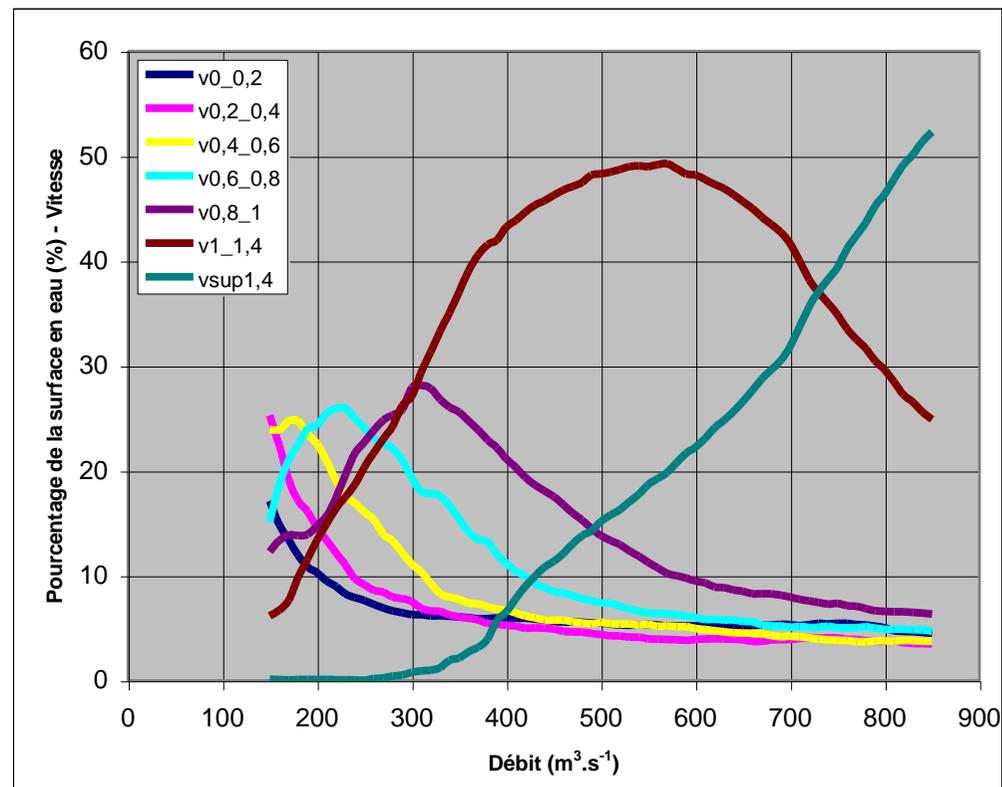
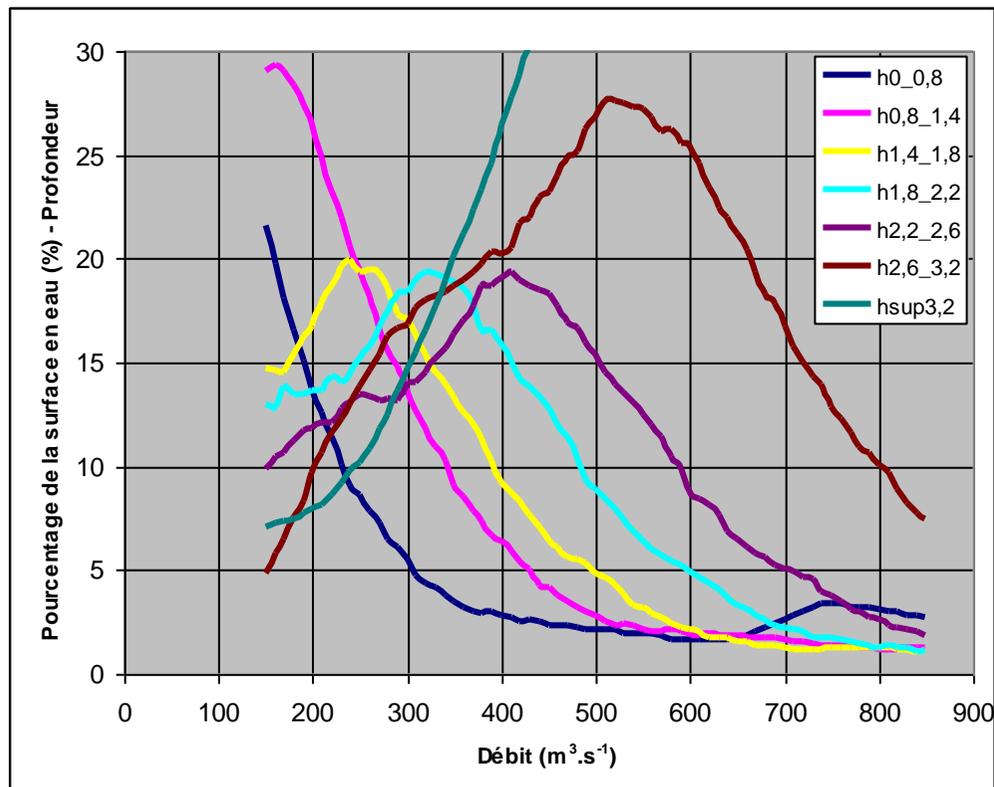


Figure 25 : représentations des conditions hydrauliques observées dans le site d'étude, sous forme de d'évolution des distribution de profondeur (à gauche) et de vitesse d'écoulement (à droite) entre 150 et 850 $m^3.s^{-1}$. Les limites des classes de profondeur sont : 0.8 ; 1.4 ; 1.8 ; 2.2 ; 2.6 ; 3.2 m et plus; les limites des classes de vitesse sont : 0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1.0 ; 1.4 $m.s^{-1}$ et plus. Chaque courbe est l'évolution en fonction du débit du pourcentage que représente la surface associée à cette classe sur la surface mouillée.

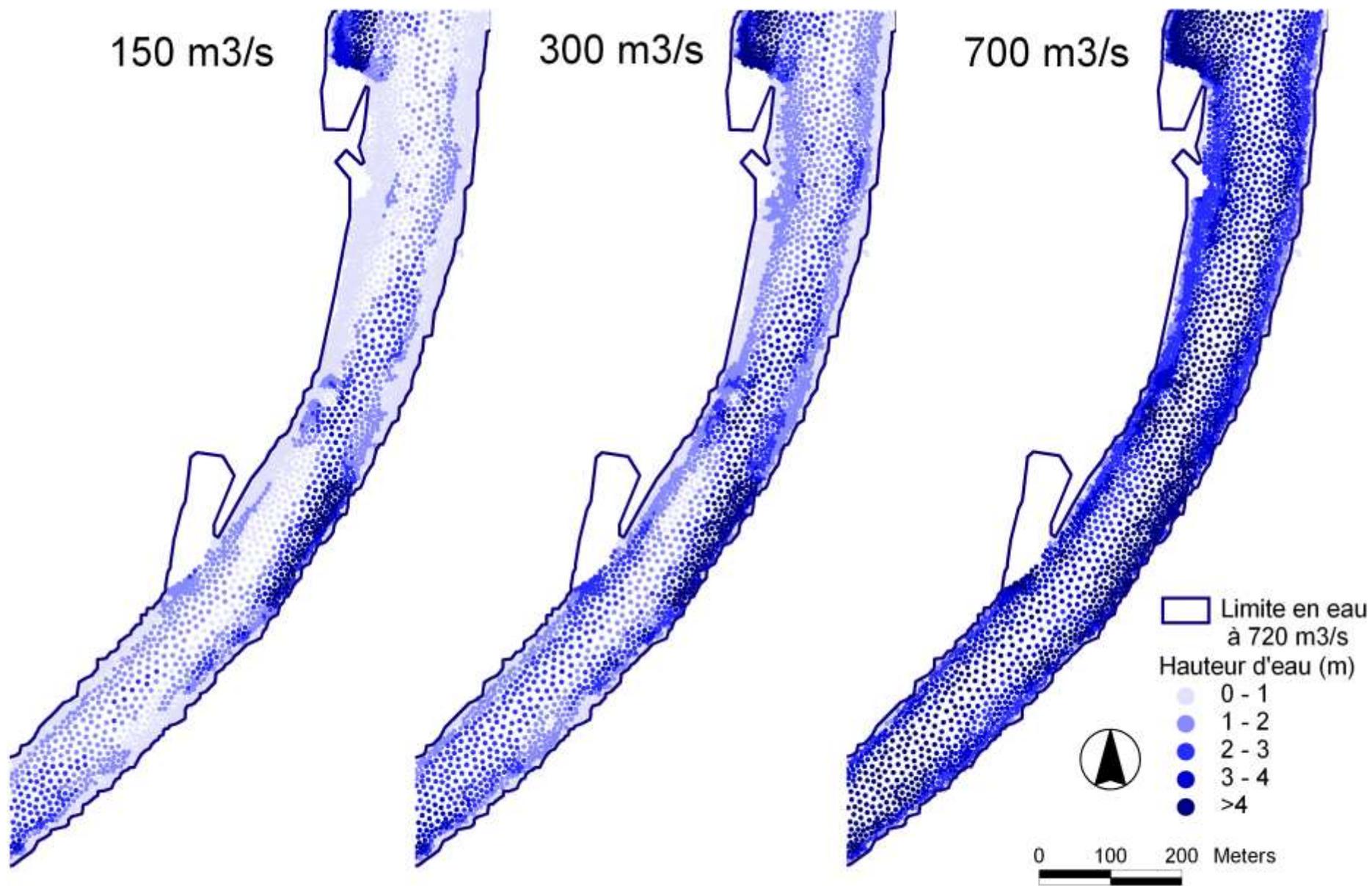


Figure 26 : Visualisation de la profondeur d'eau simulée pour chaque nœud dits « en eau » pour un débit de 150, 300 et 700 m³.s⁻¹. Les éléments du maillage situés dans la prise d'eau ou dans les rejets d'eau chaude ont été omis.

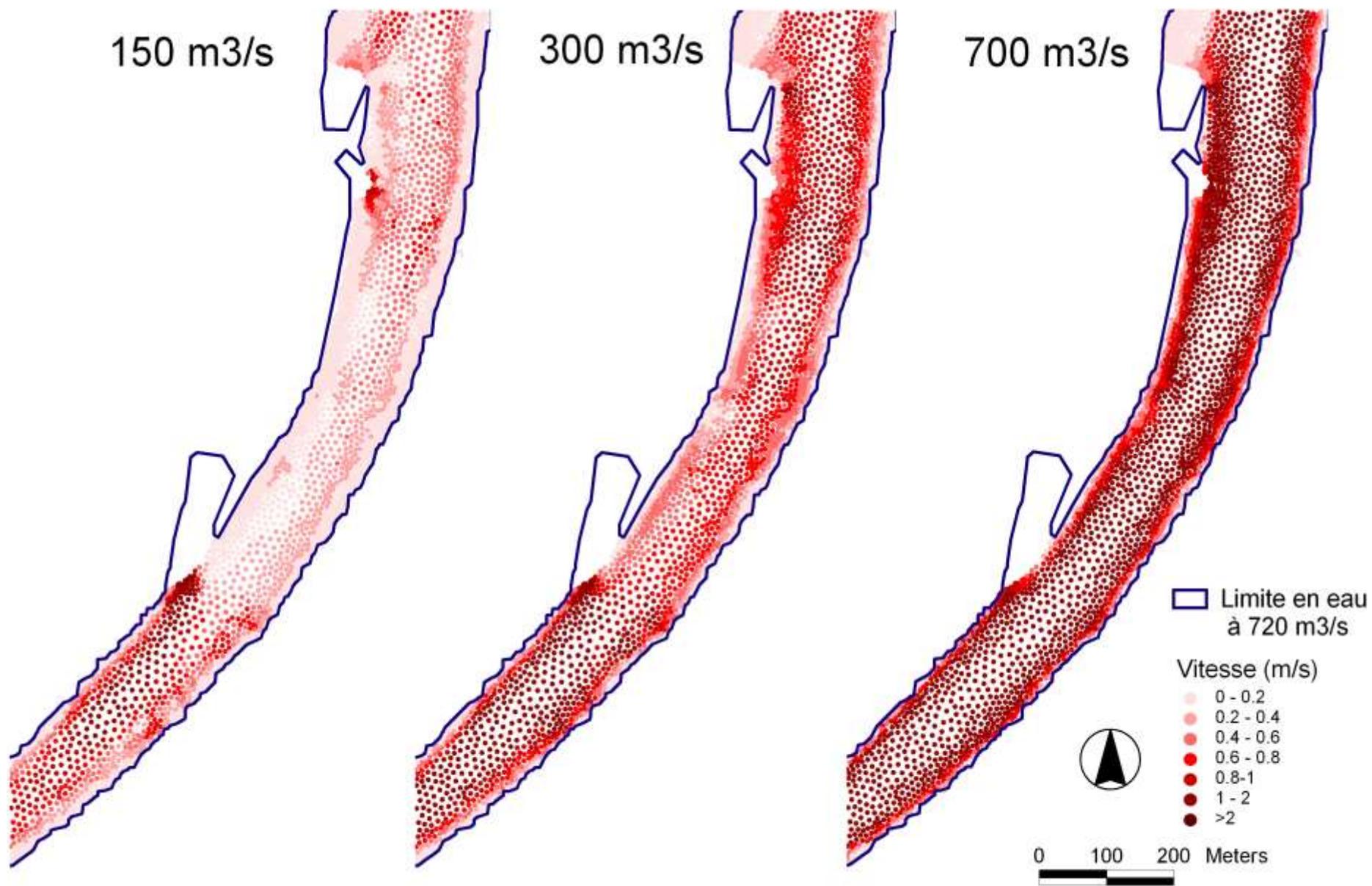


Figure 27 : Visualisation du scalaire de la vitesse d'écoulement (moyenne sur la profondeur) simulée pour chaque nœud dits « en eau » pour un débit de 150, 300 et 700 m³.s⁻¹. Les éléments du maillage situés dans la prise d'eau ou dans les rejets d'eau chaude ont été omis.

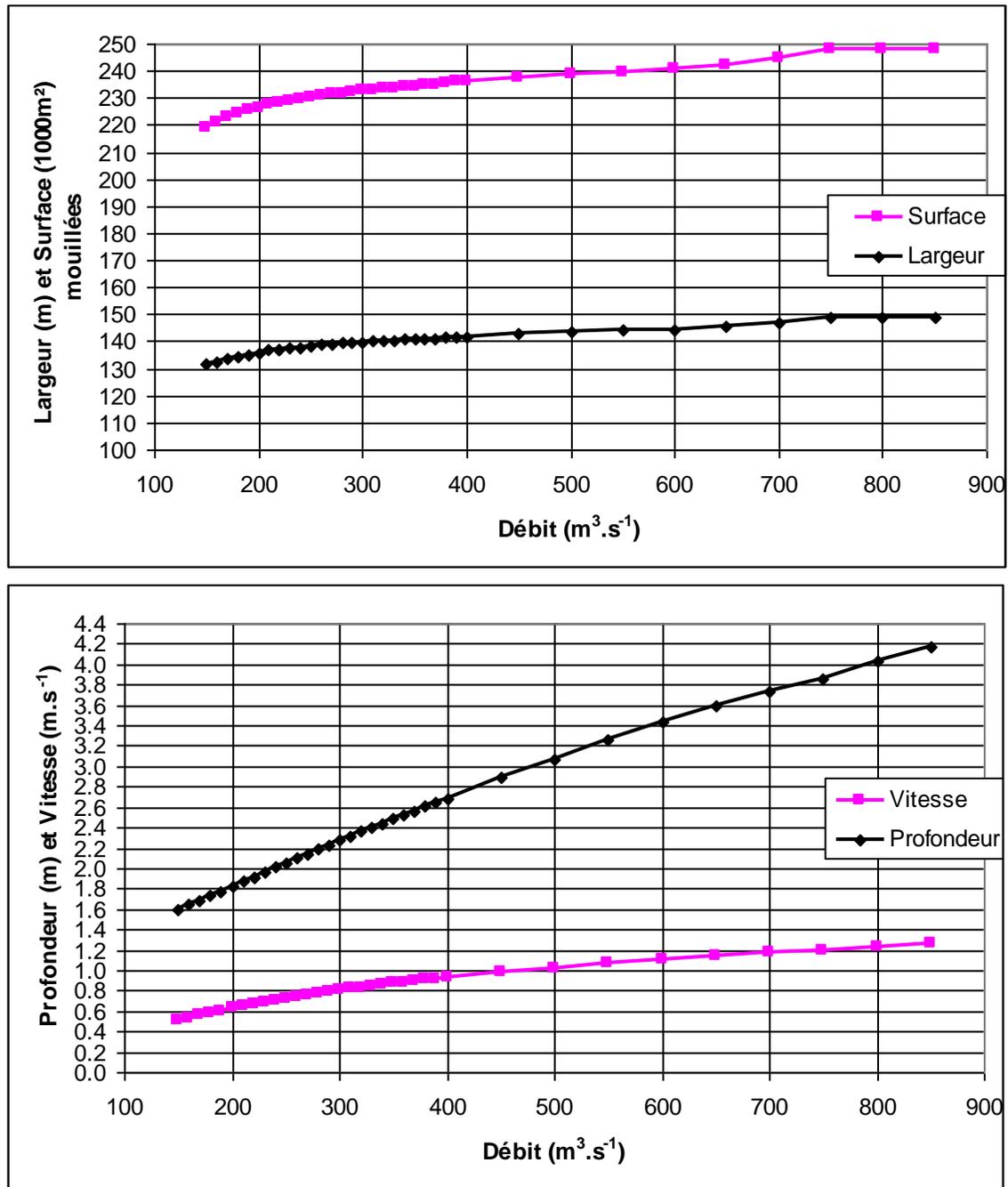


Figure 28 : Evolution en fonction du débit de la largeur moyenne en eau, de la surface mouillée, de la profondeur et de la vitesse moyennes.

Expérimentation de télémétrie acoustique fixe

Principe – intérêt

Le principe est celui de la télémétrie acoustique : une marque émet un son (307 kHz) toutes les 3 secondes en moyenne (chaque marque dispose de sa propre période). Des hydrophones installés dans l'eau captent des sons et les transfèrent à une centrale d'acquisition qui enregistre l'heure de réception du son. Ensuite un processus de post-traitement, dont une phase de triangulation, permet de localiser la position d'où a été émis un son si celui-ci a été entendu par au moins trois hydrophones.

L'intérêt du matériel utilisé était :

- fréquence de 307 kHz, qui devrait permettre de ne pas être trop influencé par les bruits ambiants, ou la turbidité ;
- codage des marques (répétitions à certaines fréquences de l'émission sonore) qui permet de suivre plusieurs centaines de poissons simultanément ;
- période d'émission des sons (en moyenne à 3sec) qui permet un suivi très précis des individus ;
- l'installation d'un système fixe permet un suivi en temps réel sur un laps de temps long (durée de vie des marques par exemple) et une localisation des poissons très précise ;

Déploiement

(Figure 29 et Figure 30)



Figure 29 : déploiement du matériel HTI sur le site d'étude (le Rhône au droit du CNPE de Bugéy). Des blocs béton de 300 kg sont déposés au fond du Rhône en des positions précises déterminées pour maximiser la surface d'écoute du système (A, B et C). Les hydrophones installés dans chaque bloc de béton sont reliés par des câbles (D) à une centrale d'acquisition implantée dans le CNPE (E).

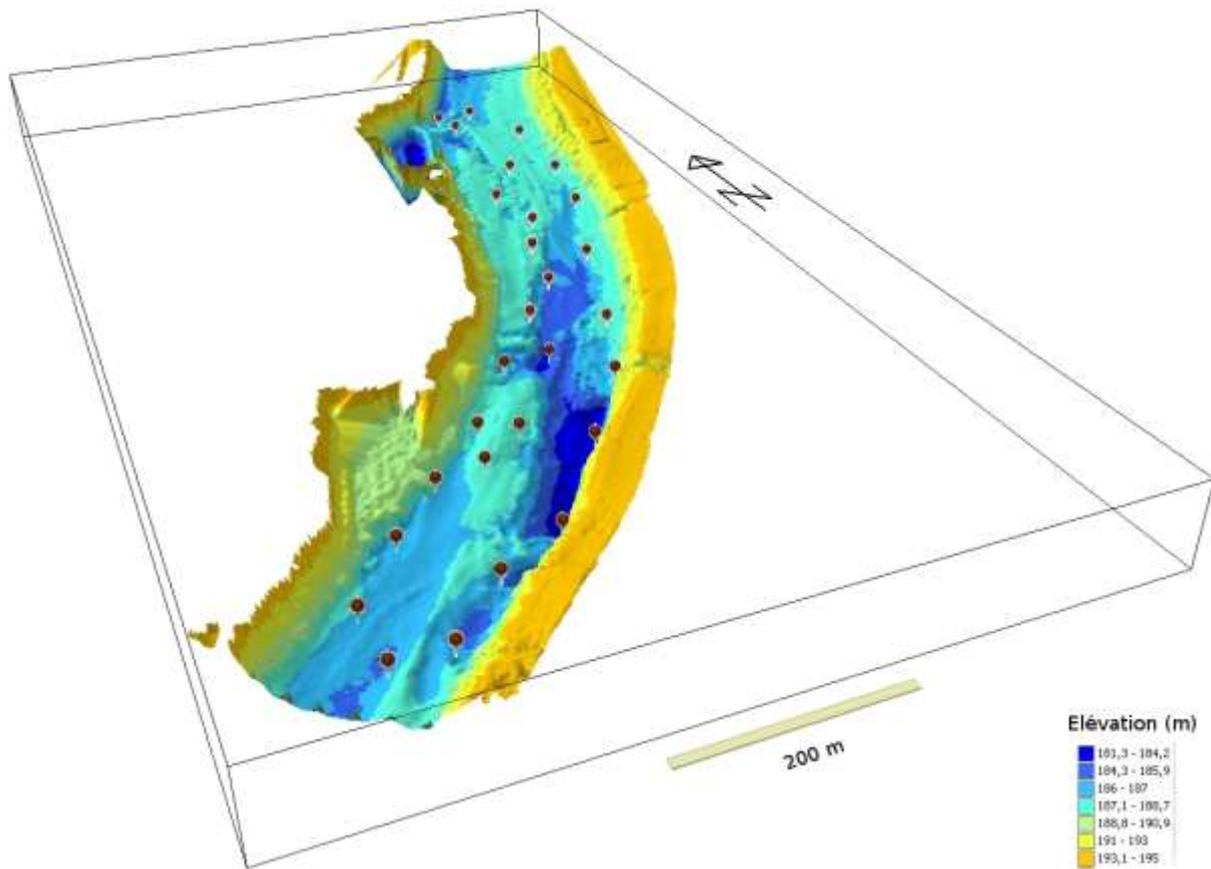


Figure 30 : positionnement (points rouges) de 28 des 32 hydrophones (les 4 plus aval ne sont pas visible sur cette vue) sur une vue en 3D représentant le modèle numérique de terrain du site d'étude (élévation en m). Noter que les positions des hydrophones ont été déterminées en partie pour maximiser la surface d'écoute (nombre maximum d'hydrophones qui se voient) en fonction de la morphologie du site.

Test de la probabilité de détection et de l'erreur de positionnement

La probabilité de détection de l'émission d'une marque varie de 0% à 80% en fonction de la configuration du système d'écoute (nombre d'hydrophones, position de la marque relativement aux hydrophones), diminue si la taille du substrat dominant augmente et si la vitesse d'écoulement augmente. La probabilité d'être détectée estimée pour une marque se déplaçant dans le chenal est de 40% à 50% (Figure 31-A).

L'erreur de positionnement est liée principalement à la qualité du paramétrage du logiciel de post-traitement (expert) et secondairement à la configuration du système d'écoute. L'erreur moyenne de positionnement d'une marque se déplaçant dans le chenal est de 3 à 5 m, et plutôt de l'ordre de 10 m en berge (Figure 31-B).

La méthode de post-traitement (combinaison des paramètres) retenue et appliquée aux données enregistrées lors du suivi des poissons était celle fournissant la meilleure probabilité de détection et l'erreur de positionnement la plus faible (Bergé *et al.*, 2012).

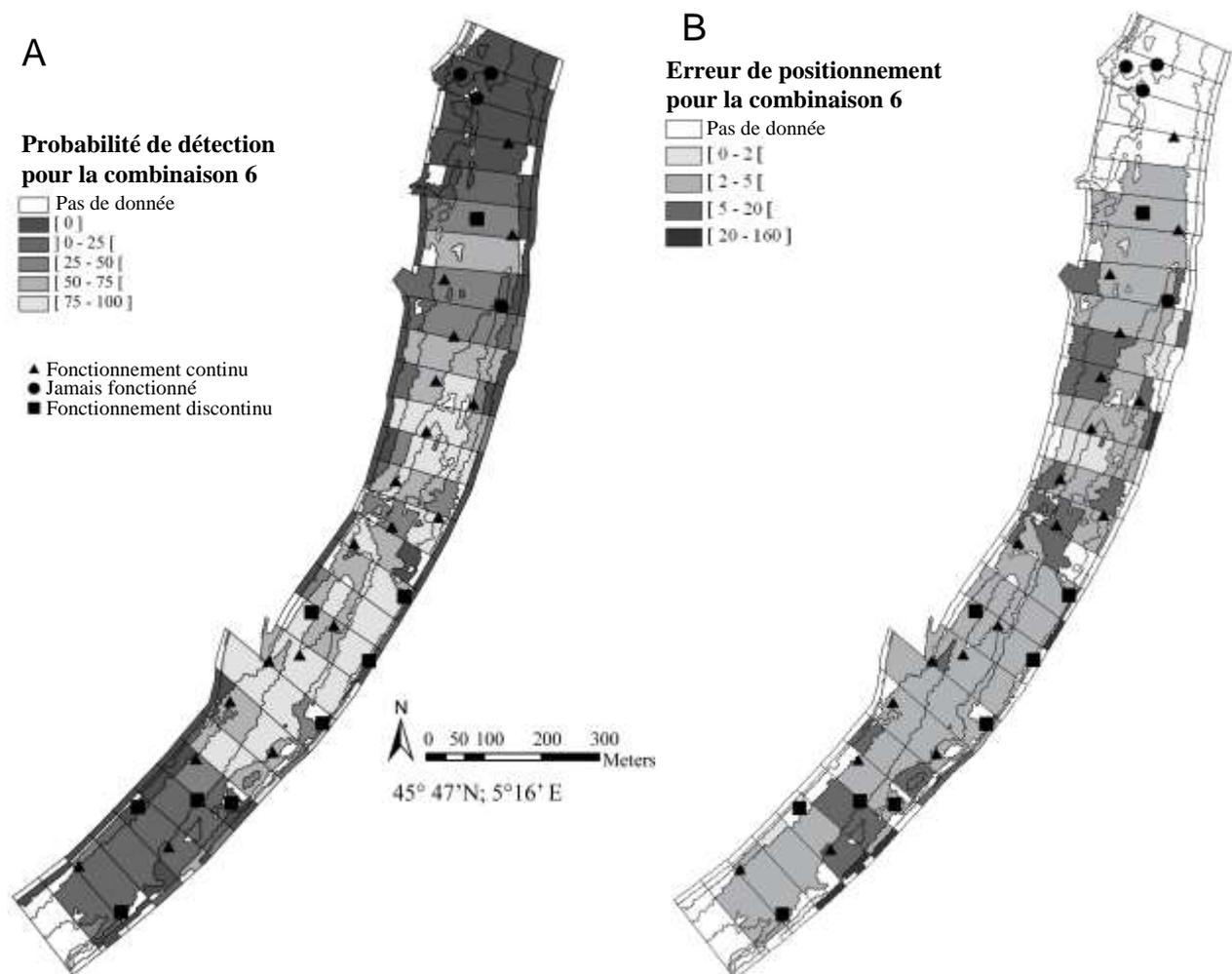


Figure 31 : Cartes de probabilité de détection et carte d'erreur de positionnement générées pour la combinaison de variables qui permet d'obtenir la meilleure précision. (d'après Bergé *et al.*, 2012).

Données poissons

Marquage

Fin juin 2009, après la période de reproduction des espèces étudiées, 99 poissons appartenant à 8 espèces ont été capturés par pêche électrique et pêche au filet, réparties sur la totalité du site, et placés dans des bacs de stabulation pour une durée minimale d'une heure. En suivant la technique décrite par Ovidio *et al.* (2009), nous avons implanté des marques acoustiques dans la cavité intra péritonéale des poissons. Nous avons anesthésié les poissons avec une solution d'AQUI-S® (Aqui-S, NZ Ltd.) à 0.08 ml.l-1 et nous avons injecté un antibiotique (Marbocyl 2%) dans le muscle dorsal pour limiter les risques d'infection post opératoire. La masse des marques utilisées (frequency of 307KHz; transmit power level of 155 dB relative to 1 μ Pa at a distance of 1 m, Hydroacoustic Technology Inc., Seattle, Wash. - www.htisonar.com/acoustic_tags.htm) était comprise entre 0.65 et 24 g en faisant en sorte qu'elle ne dépasse pas 2% de la masse de l'animal (Brown *et al.*, 1999). Les durées d'émission des marques variaient de 20 jours à 3 ans en fonction (1) des tailles des marques et (2) de la fréquence d'émission des marques qui était comprise entre 2995 à 3884 ms. Une heure après la fin de l'intervention chirurgicale, les poissons étaient relâchés précisément à leur point de capture, après s'être assuré qu'ils aient retrouvé leur équilibre. Cinq poissons sont morts avant d'être remis à l'eau.

Description générale des données de base

Les données de positionnement des poissons (issues du post-traitement) ont été filtrées (élimination des doublons et des données aberrantes), puis agencées dans une base de donnée spatialisée (PostgresSQL). Un total de 5 851 257 positions de poissons sont disponibles. Enfin, une procédure d'appel des données de la base de données (située sur un serveur) depuis un ordinateur avec le logiciel R a été mise en place pour les analyses des données.

Des informations très générales concernant les positionnements des 94 poissons marqués et relâchés dans le site d'étude peuvent être fournies (Tableau III) :

- 61 individus localisés au moins 100 fois sur une journée, avec un nombre total de positionnements par individu qui a varié de 242 à 662624;
- 29 poissons ont été très peu localisés (moins de 10000 localisations), 15 poissons ont été positionnés plus de 100000 fois;
- la durée de suivi varie de 1 jours à 87 jours ;
- 9 individus ont été localisés pendant environ 50 jours;
- 8 individus ont été entendus pendant plus de 80 jours;
- 20 poissons ont été entendus entre 35 et 80 jours ;
- trois espèces étaient très bien représentées : le barbeau, le chevaine et le silure ;
- trois espèces étaient localisées pendant une période de temps assez courte ou de manière moins intense (anguille, carpe commune et brème bordelière) et avec beaucoup moins d'individus suivis ;
- enfin les localisations pour la perche commune et le hotu sont anecdotiques.

Une des principales caractéristiques des données individuelles de positionnement est la discontinuité temporelle. Aucun poisson n'a été suivi en continu (i.e. une localisation toutes les 3 secondes sur l'ensemble du suivi).

La durée totale de suivi de chaque individu et le nombre moyen de positionnements par jour sont très différents entre les individus, y compris au sein d'une même espèce (Tableau III et Figure 35).

Le problème principal de nos données brutes est leur discontinuité temporelle et spatiale. Il fallait trouver un moyen de rendre les données homogènes : un lissage spatio-temporel.

Nous voulions avant tout conserver la notion de continuité des trajectoires (notion de déplacement des poissons). La première étape a donc été de recenser pour chaque individu les séquences continues (seqcont) de localisations. Pour cela nous avons concaténé les localisations successives avec un intervalle maximum de 5 min : si deux localisations successives d'un poisson étaient séparées de moins de 5 min, nous avons considéré que ces deux localisations étaient continues, et qu'elle représentaient 2 points d'une seqcont pour le poisson. Une description générales des seqconts par espèce et leur répartition dans les phases de débit et nycthémerales est donnée dans le Tableau IV.

Tableau III : Présentation générale des individus marqués et de leur localisations (nombre et durée) au cours du suivi de l'été 2009 (juillet – septembre).

Individu	longueur (mm)	masse (g)	Marque		total (nombre)	Localisations			Durée de suivi		
			periode (ms)	type		moyenne (nombre par jour)	minimum	maximum	début (jour julien)	fin	durée (jours)
Barbeau											
170	38	3233	Lm		681	227	49	342	184	186	2
170	44	3191	Lm		1397	699	326	1071	184	191	7
176	44	3051	Lm		21602	2400	256	5861	184	192	8
183	52	3317	S		21071	2634	87	7433	184	191	7
200	77	3611	E		14769	7385	7080	7689	184	185	1
206	70	3023	Lm		8617	2872	178	7413	185	192	7
210	87	3583	E		1235	1235	1235	1235	185	185	0
215	84	3569	E		13093	2182	26	8318	188	193	5
240	128	3555	E		9168	1310	70	7264	184	190	6
255	153	3597	E		3929	655	5	2792	184	190	6
302	244	3170	G		491757	9457	316	19510	184	235	51
311	254	3128	G		332874	6935	1	22789	184	234	50
336	330	3156	G		107580	2289	4	9843	185	235	50
368	599	3520	G		1024	1024	1024	1024	187	187	0
397	564	3100	G		305534	6642	45	24392	186	232	46
504	1168	3884	Z		3874	969	7	2395	184	187	3
523	1275	3646	X		5597	5597	5597	5597	184	184	0
526	1135	3814	Z		242	242	242	242	186	186	0
527	1142	3744	X		662624	8495	20	20740	185	266	81
530	1064	3688	X		683	683	683	683	265	265	0
531	1155	3674	X		61744	3859	60	10315	188	272	84
548	1247	3828	Z		31531	1051	4	8677	184	272	88
592	1290	3576	G		16129	672	1	3197	184	235	51
Chevaine											
152	41	3303	S		27922	4654	1215	7755	184	189	5
169	50	3121	Lm		83652	8365	1900	16489	184	193	9
182	72	3625	E		3749	625	6	1861	184	194	10
207	96	3079	Lm		5420	1807	46	4279	184	187	3
209	93	3639	E		2260	1130	41	2219	184	185	1
248	174	3352	G		388912	8839	105	16205	184	227	43
281	244	3394	G		31172	693	1	4958	184	237	53
281	271	3408	G		34263	3426	214	8874	184	195	11
301	318	3422	G		6560	298	1	2493	191	229	38
312	317	3226	G		2470	1235	666	1804	201	202	1
313	344	3212	G		475033	9695	668	19993	184	232	48
325	419	3240	G		538444	10768	492	16457	184	233	49
346	470	3590	G		4779	597	217	1199	184	208	24
435	716	3506	G		47596	1190	13	7437	187	233	46
437	959	3562	G		20558	1468	94	9109	187	228	41
454	898	3730	X		371908	5095	71	18741	184	266	82
455	1003	3758	X		119093	2481	1	8606	220	270	50
472	1016	3464	G		138628	8155	1161	13706	214	230	16
486	1302	3183	G		85682	2090	5	9842	184	228	44
Silure											
267	114	3387	S		6458	1292	161	2075	187	191	4
303	160	3415	E		4890	699	1	3294	184	193	9
350	219	3429	E		19119	2124	241	5614	184	192	8
367	253	3849	G		91817	1836	8	9771	184	233	49
496	741	3835	G		411178	7476	130	17202	184	238	54
620	1390	3786	Z		59943	2997	8	6065	184	236	52
720	1944	3632	X		96099	1525	1	18035	184	265	81
780	3800	3772	Z		6904	161	1	1302	185	269	84
1001		3856	Z		221832	3413	76	14029	184	270	86
1050	8000	3870	Z		206528	2550	25	13373	185	272	87
1360	27000	3800	Z		9705	809	106	2083	188	213	25
Anguille											
640	447	3380	G		195883	3918	13	19978	184	233	49
790	728	3366	G		275	69	28	114	190	198	8
820	1068	3716	X		1200	171	1	941	185	230	45
Carpe commune											
322	575	3478	G		5524	197	1	983	185	237	52
600	4200	3842	Z		926	185	4	319	185	199	14
Brème bordelière											
161	55	3275	S		5442	1088	342	1906	185	190	5
Perche commune											
134	220	3177	Lm		1563	782	98	1465	184	185	1
Hotu											
146	29	3163	Lm		1112	1112	1112	1112	184	184	0

Tableau IV : Caractéristiques générales des séquences continues (seqcont) déterminée pour chaque individu mais présentées ici par espèces. La répartition du nombre de seqcont par espèce et par couple de phase de débit et phase nycthémerale est aussi présenté. Le nombre de points est celui de la base de données à 5 minutes (cf. plus loin le lissage à 5 minutes)

SUIVI 2009	ESPECES							
	BAF	CHE	PER	BRB	ANG	SIL	CCO	HOT
Nb d'individus	23	19	1	1	3	11	2	1
Nb de séquences lissées (Total = 15855)	6139	9551	8	45	1236	5981	169	2
Nb min. de points	1	1	1	1	1	1	1	14
Nb moy. de points	12	11	9	7	5	8	3	25
Nb max. de points	679	616	27	53	131	371	21	35
Date min.	184.6528	184.6548	184.6633	185.3188	184.6576	184.6548	185.1360	184.6532
Date max.	272.4811	270.2832	185.2778	190.9023	233.7568	272.2516	237.6321	184.7175
Durée min. (sec)	3	3	16	4	3	3	3	1301 (0.36 h)
Durée moy. (sec)	2071.0 (0.57 h)	1648.0 (0.46 h)	1065.0 (0.30 h)	755.0 (0.21 h)	942.0 (0.26 h)	1391.0 (0.38 h)	370.0 (0.10 h)	2512.0 (0.70 h)
Durée max. (sec)	106383 (29.55 h)	61386 (17.00 h)	4944 (1.37 h)	3986 (1.10 h)	31150 (8.65 h)	49702 (13.80 h)	1777 (0.50 h)	3724 (1.03 h)
Distance totale min. (m)	0	0	9	0	0	0	1	24
Distance totale moy. (m)	107	125	138	102	31	68	52	55
Distance totale max. (m)	3687	7310	248	711	737	2833	523	86
Surface prospectée min. (m ²)	0	0	11	2	0	0	3	10
Surface prospectée moy. (m ²)	109	125	167	123	25	71	64	18
Surface prospectée max. (m ²)	2425	3527	317	849	348	1824	686	26
Nb de séquences par combinaison								
Jour / Monté	1521	2640	0	0	348	1159	44	0
Jour / Stable	1860	2871	5	6	368	1406	40	2
Jour / Descente	250	409	0	1	76	182	3	0
Crépuscule / Monté	57	91	0	0	9	75	0	0
Crépuscule / Stable	385	623	0	1	59	418	5	0
Crépuscule / Descente	223	424	0	11	38	234	5	0
Nuit / Monté	63	131	0	4	9	103	13	0
Nuit / Stable	760	850	0	1	92	938	13	0
Nuit / Descente	1029	1390	2	20	189	1234	14	0
Aurore / Monté	122	168	0	1	19	104	12	0
Aurore / Stable	391	514	0	1	66	410	13	0
Aurore / Descente	239	353	1	3	40	233	10	0
Nb de séquences possédant au moins un passage dans le chaud	675	756	5	37	66	3447	157	0
En pourcentage du nb de séquence de l'espèce (%)	11.0	7.9	62.5	82.2	5.3	57.6	92.9	0.0

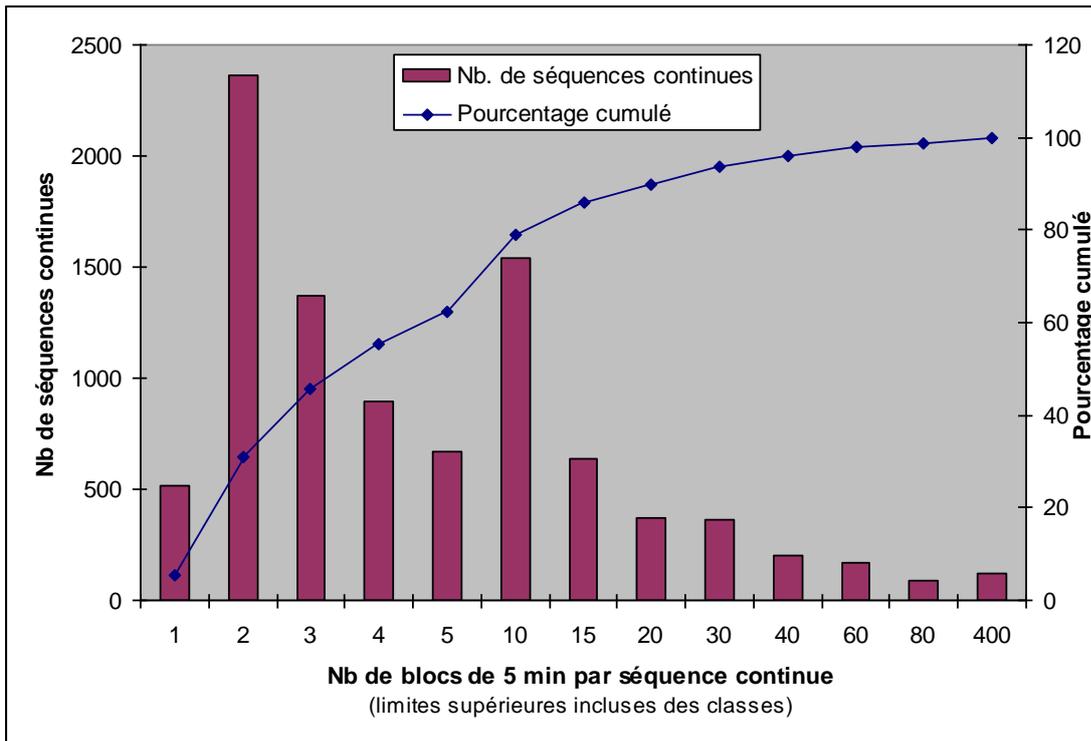


Figure 32 : Distribution du nombre de blocs de 5 min par séquence continue (seqcont).

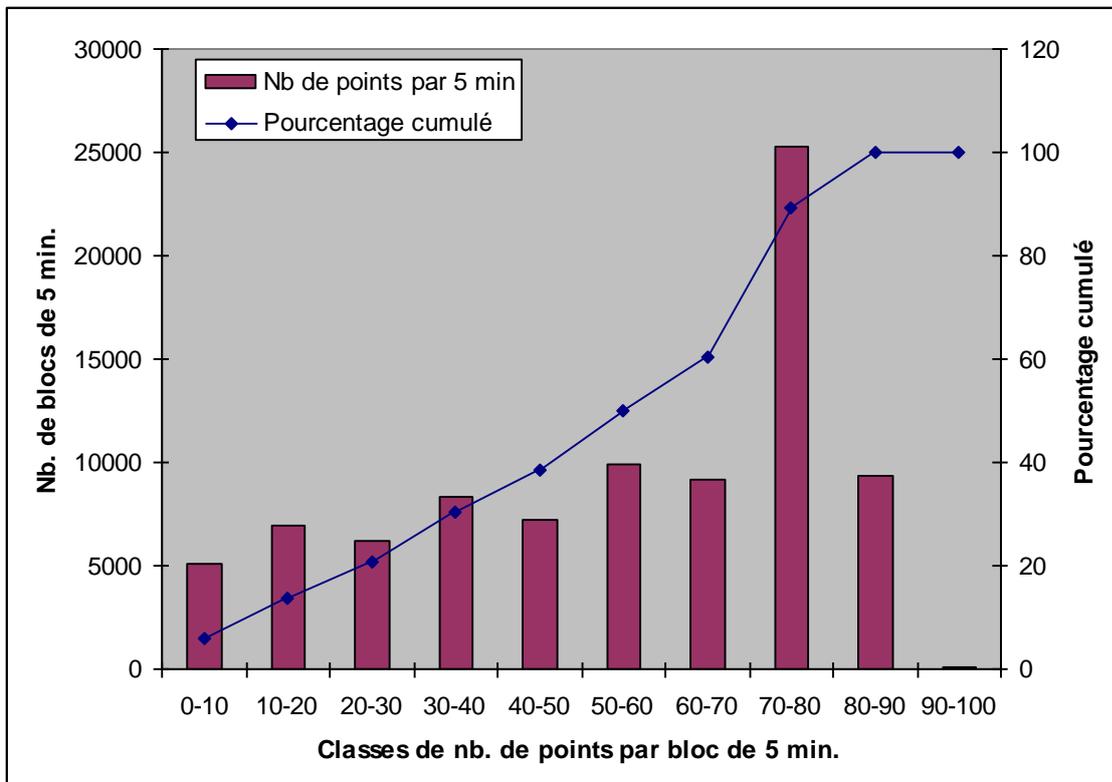


Figure 33 : distribution du nombre de localisations par bloc de 5 min, toutes seqcont confondues.

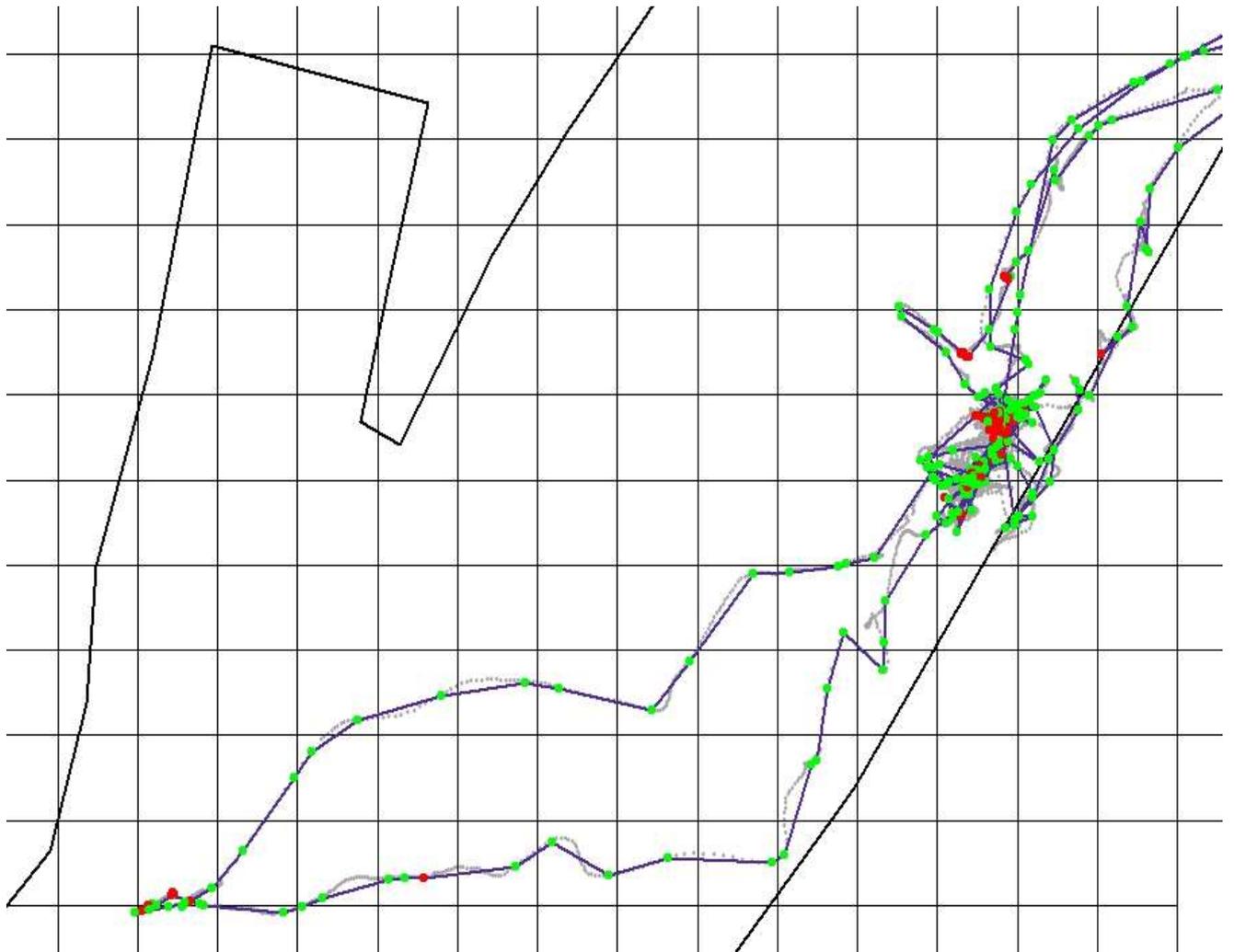


Figure 34 : visualisation de la seqcont n° 3231 (barbeau 3170) sur la grille fixe à 20 m. En gris sont représentés les données brutes, en vert (moving) et en rouge (resting) sont représentés les données après transformation par blocs de 5 min (cf. texte pour le détail de la transformation). Les points rouges et verts sont reliés pour visualiser la trajectoire résultante.

Le nb de blocs de 5 min dans les séquences continues (Figure 32) varie de 1 (5 min) à 354 (29h30 min) :

- 50 % des séquences ont au maximum 3 blocs de 5 min ;
- 90% des séquences ont au maximum 20 blocs de 5 min.

Le nombre total de localisations par bloc de 5 min est d'environ 100 (si la période d'émission de la marque est exactement de 3 sec.). La médiane du nombre de localisation par bloc de 5 min est de 60 (Figure 33). La classe regroupant de 70 à 80 localisations (sur 100 potentielles) pour 5 min est la plus importante des classes définies de 10 en 10 localisations.

*[ATTENTION : dans ces analyses seuls les blocs entiers de 5 min sont considérés
Certaines séquences ont une durée un petit peu plus grande qu'un multiple de 5 min.]*

Finalement les blocs de 5 min semblent assez homogènes entre eux concernant le nombre de localisations. Cela nous permet de poser l'hypothèse que n'importe quel bloc de 5 min peut être comparé à un autre bloc de 5 min, sans que la différence du nombre de localisations, au cours des 5 min, soit un biais important.

Ensuite nous souhaitons réduire le nombre de localisations en les rendant homogènes entre elles en terme de représentativité spatio-temporelle. L'objectif était de pouvoir rendre comparable l'information contenue dans 200 localisations consécutives d'un poisson immobile localisé toutes les 3 sec et dans 4 localisations consécutives sur 3 min d'un poisson qui se déplaçait. Dans le cadre des analyses de la sélection de l'habitat par les poissons cette homogénéisation spatio-temporelle était obligatoire.

Nous avons alors décidé de sous-échantillonner les seqcont à l'échelle des blocs de 5 min en ne conservant qu'une localisation par bloc de 5 min (cette localisation est prise au hasard parmi toutes les localisations incluses dans le bloc de 5 min). L'hypothèse faite pour ce choix est qu'à l'échelle de 5 min, toutes les localisations sont comparables entre elles. Cette hypothèse est vraie si les poissons sont immobiles ou s'ils se déplacent très lentement. Pour les déplacements plus rapides nous devons conserver plus de points dans le bloc de 5 min. Pour cela nous avons utilisé une grille de carreaux de 20 m de coté (ce qui correspond à deux fois l'erreur de localisation observée pour le post traitement réalisé ; Bergé *et al.*, 2012 ; 1050 carreaux au total). Un poisson était jugé en déplacement si pendant 5 min plus de 2 carreaux étaient parcourus. Dans cette situation nous identifions une localisation par carreau de la grille à 20 m pris au hasard parmi toutes les localisations du carreau. Lorsque le poisson est immobile (1 ou 2 carreaux en 5 min) il est considéré en Resting, sinon il est considéré en Moving (cf. exemple Figure 34). Ce sous-échantillonnage comporte 226 000 points.

Pour évaluer la qualité de ce sous échantillonnage, nous avons commencé par comparer les distributions des conditions hydrodynamiques et thermiques utilisées pour toutes les espèces (données obtenues par simulation hydrodynamique en temps réel pour chaque localisation de poisson) : il y a globalement très peu de différence entre les distributions d'utilisation de l'habitat élaborées à partir de l'ensemble des points ou à partir de la sous-sélection par bloc de 5 min (écart moyen entre 0.5 et 1.0 % en fonction des espèces ; écart maximum entre 4.2 et 6.2 % en fonction des espèces)

Ensuite nous avons effectué une comparaison de la répartition spatiale des localisations sous échantillonnées par rapport aux données brutes. Pour chaque espèce, toutes seqcont confondues, on estime le nombre de localisations dans chaque carreau à partir des données

brutes et à partir du sous échantillonnage à 5 min. Ensuite on représente graphiquement le nombre de points des données complètes vs le nombre de points du sous échantillonnage. La relation théorique optimum, sur une base de 100 localisations / 5 min (i.e. période de 3 s) a une pente de régression de 100. Pour les 3 espèces principales la pente observée est de 66 pour le barbeau, 54 pour le chevine et 53 pour le silure. Globalement la régression est très correcte et nous pouvons conclure que la répartition spatiale des points par blocs de 5 min est équivalente, par espèce, à celle des données complètes.

En conclusion : le sous échantillonnage à 5 min nous permet :

- de représenter correctement l'utilisation de l'habitat par les poissons marqués ;
- d'avoir une très bonne représentation de la répartition spatiale ;
- de conserver une bonne représentation de la trajectoire ;
- d'homogénéiser les trajectoires sur le plan temporel.

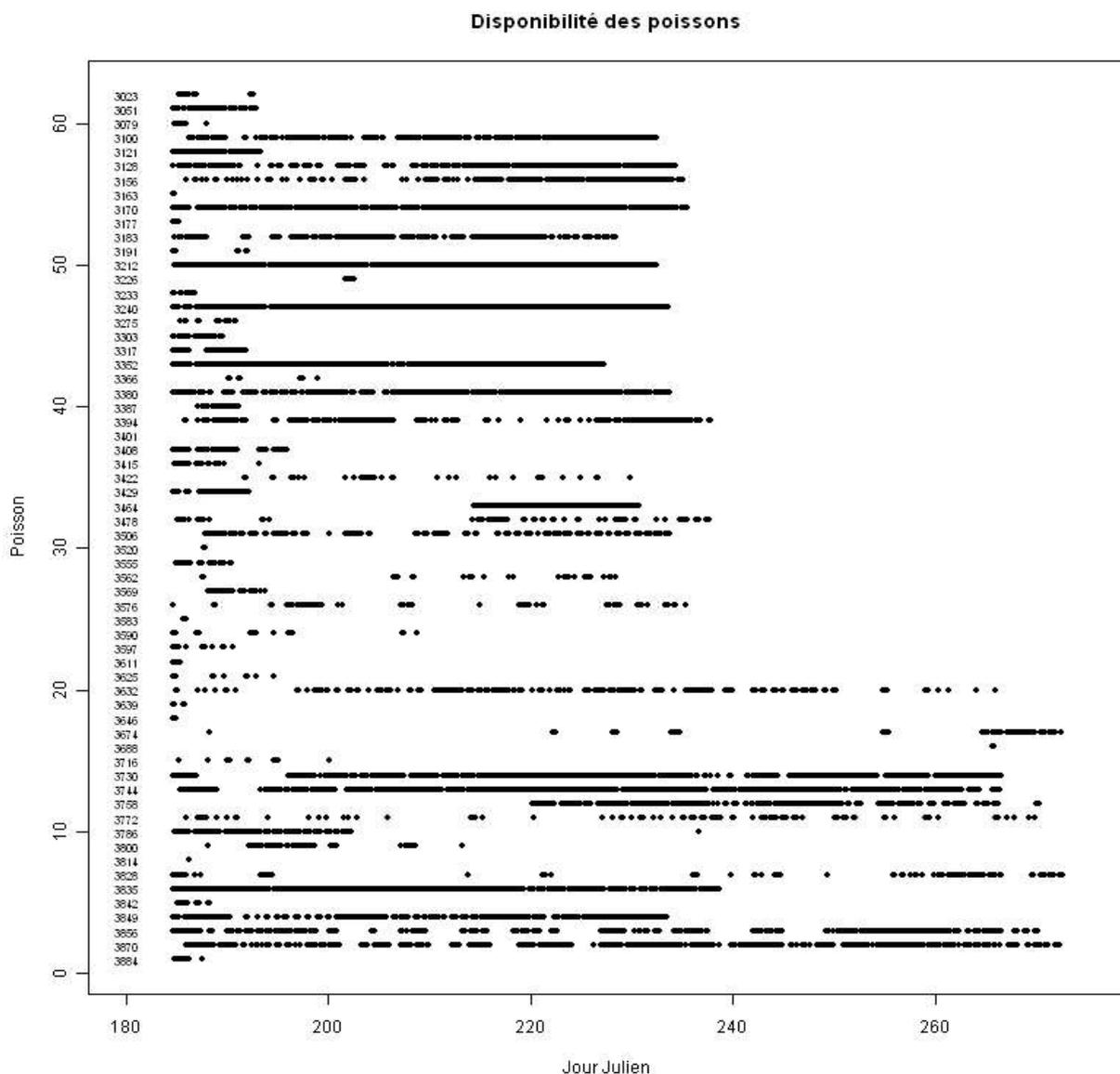


Figure 35 : répartition temporelle des localisations pour chaque individus suivi. Les individus sont représentés par la période de leur marque (cf. Tableau III) en ligne. Le temps de suivi est représenté en abscisse et lorsqu'un poisson donné était localisé à un pas de temps un point noir était ajouté sur la ligne correspondant à sa période.

Données hydrodynamiques et thermiques associées aux positionnements des poissons

Le développement d'une routine de calcul dans le logiciel Télémac 2D a permis d'estimer, à partir de la simulation non stationnaire (i.e. variable dans le temps en fonction du débit transitant dans le site d'étude) courant sur l'ensemble de la période d'étude (3 juillet au 29 septembre 2009), les valeurs des variables abiotiques (profondeur, élévation de la surface libre, vitesse d'écoulement, nombre de Froude et température) qui prévalaient en chacune des localisations des poissons. Cette estimation résulte d'une interpolation spatiale des valeurs des différentes variables simulées aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique situés autour de la localisation d'un poisson.

Analyses des données de localisation des poissons et résultats

La quantité d'informations disponibles dans la base de données, obtenues après les différentes étapes de traitement, est conséquente. L'objectif du lot 4 de l'étude Rhône thermie - phase IV était de connaître « l'utilisation de l'habitat hydraulique et thermique » des poissons du Rhône dans le secteur du Bugey. Nous avons pour cela choisi d'analyser les données des trois espèces principales (barbeau, chevaine et silure) avec trois approches différentes.

Une première approche, nous a permis d'évaluer la sélection de l'habitat par les poissons. Il s'agit de quantifier les choix (sélection) de positionnement des poissons (localisation) au sein du site d'étude (disponibilité). Cette sélection de l'habitat est représentée par des courbes de préférence (univariées) établies pour : (1) l'ensemble des individus de chacune des espèces (courbes globales); (2) chacun des individus les mieux suivis de chaque espèce (courbes individuelles); (3) ces mêmes individus, les mieux suivis, lorsqu'ils se déplaçaient (moving) ou lorsqu'ils étaient immobiles (resting). Les courbes individuelles nous ont permis d'évaluer la variabilité interindividuelle de la sélection de l'habitat. La sélection de l'habitat peut aussi être représentée par une hydrosignature de préférence (Scharl & Le Coarer, 2005). Il s'agit d'une représentation bi-variée (deux variables analyser simultanément) de la sélection de l'habitat. Nous avons établi et analysé, comme pour les courbes de préférence globales, les hydrosignatures de préférence globales (les différents couples de variables étudiées étaient profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) des poissons et l'évolution de ces hydrosignatures en fonction du débit. Ensuite une analyse plus précise de l'hydrosignature profondeur*vitesse dans différentes situations (dans l'eau échauffée ou non, en déplacement ou immobile, ou lors des différentes phases de débit) nous permettait de mieux illustrer l'interaction entre l'hydraulique et la température de l'eau. Enfin, pour compléter l'analyse de la sélection de l'habitat nous avons réalisé une comparaison entre des cartes de simulation d'habitat, réalisées pour une gamme de débit donnée avec les modèles de préférences disponibles (courbes ou hydrosignatures de préférence), et des cartes de répartition des localisations des individus des trois espèces, obtenues pour la même gamme de débit. Il s'agissait d'une évaluation du taux d'occupation des habitats jugés favorables grâce aux modèles de préférence disponibles par les poissons suivis.

Une seconde approche visait plus particulièrement à décrire la répartition spatiale des individus (localisations). Les premières représentations cartographiques, globales, illustraient par phase nyctémérale (aurore/crépuscule, jour, nuit) et pour l'ensemble du suivi (1) les localisations de tous les individus de chaque espèce et (2) le nombre d'individus différents de chaque espèce ayant occupé le même habitat (carreaux de la grille de 20 m de côté). Nous avons également évalué pour chaque espèce le pourcentage de localisations recensées dans le

panache d'eau échauffée et nous avons regardé comment les localisations des poissons se positionnaient en fonction du débit et des phases nycthémerales par rapport aux limites simulées du panache. Ensuite, en ne s'intéressant qu'aux individus les mieux suivis pour chacune des trois espèces nous avons voulu connaître l'utilisation de l'espace à l'échelle individuelle en fonction des phases nycthémerales (aurore/crépuscule, jour, nuit) et en fonction des phases de débit (monté, stable, descente). L'utilisation des hydrosignatures de disponibilité hydraulique (profondeur et vitesse) et thermique de ces habitats utilisés principalement par rapport aux mêmes conditions dans le reste du site d'étude (i.e. non utilisé) illustre comment cette disponibilité hydraulique évoluait en fonction du débit dans les deux types d'habitat (utilisé versus non utilisé). Nous nous sommes ensuite attachés à décrire plus finement la disponibilité hydraulique et thermique du panache d'eau échauffée (avec des hydrosignatures de disponibilité) en comparaison avec une surface équivalente en rive gauche (non échauffée). Enfin une analyse des utilisations individuelles conjointes de l'habitat (des individus les mieux suivis par espèce) permettait d'évaluer le degré de superposition des habitats utilisés par les différents congénères en fonction des phases nycthémerales pour l'ensemble du suivi et pour chaque heure du suivi, approchant ainsi la notion de grégarité (plusieurs congénères utilisant simultanément le même habitat).

Une troisième approche, l'analyse des déplacements individuels, qui reste exploratoire et descriptive, avait pour objectif d'évaluer le comportement individuel des poissons. Une des hypothèses de départ était que lors des changements de débits, lors des baisses ou des montées de température de l'eau du Rhône, lors des différentes phases nycthémerales, les trajectoires ou les déplacements des poissons pouvaient se modifier significativement, et qu'il était donc possible de l'évaluer. Pour cela nous avons successivement étudié (1) les proportions de localisations des poissons en mouvement (moving) et immobiles (resting) ; (2) les directions / orientations des déplacements des individus ; (3) les distances parcourues ; et (4) les trajectoires, déplacements en continu d'un individu dans le plan de la station d'étude matérialisés par une succession de localisations.

Sélection de l'habitat

L'analyse préalable des données (présentée ci-dessus) a été nécessaire pour rendre le jeu de données compatible avec l'estimation des préférences d'habitat des poissons tout en respectant le plus possible les données brutes. L'objectif principal était de rendre « homogènes » dans le temps et dans l'espace les localisations, pour éviter par exemple de sur-représenter une classe d'habitat utilisée. Ce biais serait apparu si un poisson était très bien localisé pendant plusieurs heures au même endroit (une localisation toutes les 3 sec.) par rapport à un déplacement ou chaque localisation peut être caractérisée par des variables d'habitat ayant des valeurs différentes. Enfin nous tenons à préciser ici que **les modèles de préférence d'habitat développés dans cette partie sont des outils de description quantitative de la sélection de l'habitat par les poissons suivis. Il n'est pas question de développer des modèles utilisables pour des simulations d'habitat dans d'autres études.**

Courbes de préférence

Des courbes de préférences ont été établies en calculant le rapport des distributions (en % d'observations) des classes d'habitat utilisées sur les distributions (en % d'observations) de ces mêmes classes d'habitat disponibles dans le site d'étude. Nous faisons ici implicitement

l'hypothèse que les individus connaissent parfaitement le milieu et que ce qui est disponible pour leur sélection d'habitat peut être représenté par l'ensemble du site étudié.

Chaque localisation de poisson est caractérisée par une date (jour, heure, min, seconde) et par une valeur pour chaque variable d'habitat simulée. Les variables d'habitat retenues sont :

- la profondeur d'eau (P en m) ; la profondeur d'eau correspond à l'épaisseur totale de la lame d'eau ; ainsi au droit de la localisation du poisson, ce n'est pas l'épaisseur d'eau qu'il a au dessus de lui, mais bien la hauteur d'eau totale de la lame d'eau ;
- la vitesse d'écoulement (V en m.s⁻¹) ; la vitesse du courant est la vitesse moyenne sur la colonne d'eau, qui sera de fait plus forte que la vitesse au fond et plus faible que la vitesse de surface, dans le cadre théorique d'un profil logarithmique de répartition des vitesses d'écoulement sur la dimension verticale ;
- le substrat dominant (S codé entre 3 et 7) ;
- la température de l'eau (T en °C).

Nous rappelons ici que nous n'avons utilisé que les localisations obtenues dans 0.05 m de profondeur et plus.

Chaque variable d'habitat est divisée en classes. Les limites des classes ont été définies pour que les pourcentages d'occurrence des classes en disponibilité soient comparables. Les limites des classes sont :

Profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2 ;

Vitesse (m.s⁻¹) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 ;

Substrat dominant (code) : sable (3), gravier (4), caillou (5), pierre (6), bloc (7)

Température (°C) – T1 à T7 : 18[, 20[, 21[, 22[, 23[, 25[et ≥ 25

Pour chaque localisation de poisson la date et l'heure permettent de définir le débit transitant dans le site d'étude à ce moment là (considéré ici comme stationnaire). Pour ce débit là (on retient en fait la valeur entière à 10 m³s la plus proche) le modèle hydrodynamique fournit une valeur de chaque variable d'habitat pour chaque nœud du maillage. Les valeurs aux nœuds sont pondérées par la surface d'influence du nœud (polygone de Thiessen).

Le pourcentage d'observations de chaque classe de la distribution d'habitat « utilisé » est le nombre de localisations de poisson caractérisées par cette classe de la variable d'habitat divisée par le nombre total de localisations étudiées.

Le pourcentage d'observations de chaque classe de la distribution d'habitat « disponible » est la surface totale des polygones de Thiessen des nœuds pour lesquels la variable d'habitat appartient à cette classe divisée par la surface totale en eau du site d'étude au débit étudié.

La courbe de préférence est obtenue en faisant (1) pour chaque classe le rapport du pourcentage « utilisé » sur le pourcentage « disponible », et (2) en divisant tous ces ratios par la valeur maximum pour obtenir des valeurs comprises entre 0 et 1.

Les courbes de préférences ont été estimées :

- pour chaque espèce (tous les individus confondus ; courbes globales)
- par individu (les mieux localisés ; courbes individuelles)
- par individu (les mieux localisés), en Resting (le poisson ne se déplace pas) ou en Moving (le poisson se déplace)

Une analyse des histogrammes d'utilisation obtenus à partir de différentes techniques de lissage spatio-temporel des données a montré une relative stabilité des distributions au lissage.

De ce fait l'importance du résultat est lié essentiellement à la définition des classes. Nos limites de classes pour les variables étudiées assurent une bonne répartition de la disponibilité entre les différentes classes.

L'intérêt de notre technique de lissage par bloc de 5 min est de pouvoir retranscrire le plus précisément possible les trajectoires, et en cela donner un poids plus juste aux localisations de type Moving relativement aux localisations de type Resting.

Courbes de préférences pour chaque espèce (globales)

Les trois espèces ont des préférences plus fortes pour les classes de profondeur (< 0.8 m) et de vitesse ($< 0.4 \text{ cm.s}^{-1}$) faibles (relativement aux conditions disponibles ; Figure 36).

Les barbeaux et les chevaines préfèrent les cailloux et les blocs, alors que les silures préfèrent le sable (très peu disponible) et les pierres. Les barbeaux semblent indifférents à la température tant qu'elle reste inférieure à 25°C , car au delà de ce seuil la préférence chute très nettement. Pour les chevaines c'est une forme de courbe de préférence identique mais avec un seuil à 23°C . Pour les silures au contraire la préférence est très nette pour des températures supérieures à 23°C .

Courbes de préférences individuelles

La variabilité interindividuelle des courbes de préférences est très forte pour les barbeaux ($n=5$), assez forte pour les silures ($n=6$; sauf pour la vitesse de courant) et faible pour les chevaines ($n=7$). Pour les trois espèces les courbes de préférences individuelles pour le substrat sont très variables entre individus.

Pour les barbeaux (Figure 37), il y a un groupe de 3 individus (3744, 3170, 3100) qui ont des préférences assez proches, mais les deux autres individus ont des préférences différentes du groupe de 3 et différentes entre elles (3128 vitesse moyenne ; 3156 vitesse forte). Les trois individus proches ont des préférences assez similaires aux préférences calculées avec tous les individus ensemble. Parmi les deux autres individus l'un préfère les profondeurs entre 0.8 et 1.4 m alors que l'autre préfère les profondeurs > 3.2 m. Idem pour les vitesses, l'un préfère les vitesses entre 0.4 et 0.6 m.s^{-1} et l'autre les vitesses entre 0.6 et 1.0 m.s^{-1} . Pour le substrat les préférences sont très variables entre les cinq individus. Pour la température au contraire, les préférences s'harmonisent un peu et sont très proches du patron commun à l'espèce pour cette variable, avec un seuil critique à 25°C .

Pour les chevaines (Figure 38) il y a une très faible variabilité interindividuelle pour la profondeur, la vitesse de courant et la température. Les courbes individuelles sont chacune très proches des courbes générales pour l'espèce. La variabilité interindividuelle se limite à un seul individu qui ne préfère pas les températures de l'eau $< 20^{\circ}\text{C}$, à un individu qui préfère plus que les autres les profondeurs moyennes à fortes, et à un individu qui préfère moins les vitesses $< 0.2 \text{ m.s}^{-1}$.

Pour les silures (Figure 39), cinq individus sur six ont une préférence pour des profondeurs < 0.8 m, mais le reste des courbes de préférences pour la profondeur est très variable entre les individus (depuis des préférences pour de très faibles profondeurs (< 0.8 m) jusqu'à des préférences pour de très forte profondeurs (2.5 – 3.2 m), notamment pour les deux plus grands individus (3856 et 3870), sans qu'un effet taille soit évident. La préférence pour des vitesses faibles ($< 0.4 \text{ m.s}^{-1}$) se retrouve pour chaque individu avec ensuite une décroissance des préférences pour des vitesses de plus en plus importantes, excepté pour 3632 qui a une

préférence moyenne pour les faibles vitesses et une préférence maximum pour des vitesses entre 0.8 et 1.0 m.s⁻¹. Enfin, la majorité des silures préfèrent des températures > 23°C sauf un individu qui préfère clairement les températures entre 14 et 18°C, et un autre qui ne préfère pas les températures > 25°C.

Courbes de préférences individuelles en Resting et en Moving

Pour les barbeaux, les courbes resting et moving sont pratiquement identiques entre elles, et identiques aussi aux courbes individuelles complètes (i.e. resting + moving).

Pour les chevaines, les courbes resting et moving sont pratiquement identiques entre elles, et identiques aussi aux courbes individuelles complètes (i.e. resting + moving). Mais à la différence des barbeaux les courbes individuelles sont aussi très proche des courbes globales pour l'espèce.

Pour les silures, les courbes resting et moving sont pratiquement identiques entre elles, et identiques aussi aux courbes individuelles complètes (i.e. resting + moving), excepté que la préférence d'un individu pour des vitesses entre 0.8 et 1.0 m.s⁻¹ n'est plus visible pour les courbes en moving.

En conclusion relativement aux conditions hydrodynamiques disponibles les trois espèces préfèrent globalement des profondeurs et vitesses faibles (le barbeau préfère des vitesses un peu supérieures). Les chevaines sont moins thermophiles que les barbeaux et que les silures. Enfin, les courbes de préférences construites pour les phases de moving ou de resting ne sont jamais nettement différentes entre elles, ni différentes des courbes globales.

Les courbes de préférences du barbeau et du chevaine de Lamouroux *et al.* (1999) sont issues d'échantillonnages de cours d'eau de gabarit bien inférieur au Rhône à Bugey (e.g. Ain, Ardèche, RCCs...). La préférence maximum (valeur = 1) de nos courbes de préférences (barbeau et chevaine) pour la profondeur est pour la classe [0.05 – 0.8 m] et pour Lamouroux *et al.* (1999) les barbeaux et chevaines adultes ont une préférence maximum pour les profondeurs de la classe > 0.8 m. Pour la vitesse de courant les préférences maximum de nos courbes sont pour des vitesses < 0.4 m.s⁻¹ pour les barbeaux et < 0.2 m.s⁻¹ pour les chevaines, alors que pour Lamouroux *et al.* (1999) les préférences maximum étaient pour des vitesses >0.8 m.s⁻¹ pour les barbeaux adultes et pour des vitesses < 0.2 m.s⁻¹ pour les chevaines adultes.

Notons ici que les données utilisées par Lamouroux et al., (1999) étaient des densités de poissons par point de pêche. Les densités sont alors utilisées pour rendre compte de l'intensité de la sélection de l'habitat échantillonné, ce qui remplace notre ratio utilisation / disponibilité utilisé pour les observations individuelles. Les courbes, et notamment les gammes de paramètre sélectionnées sont donc comparables.

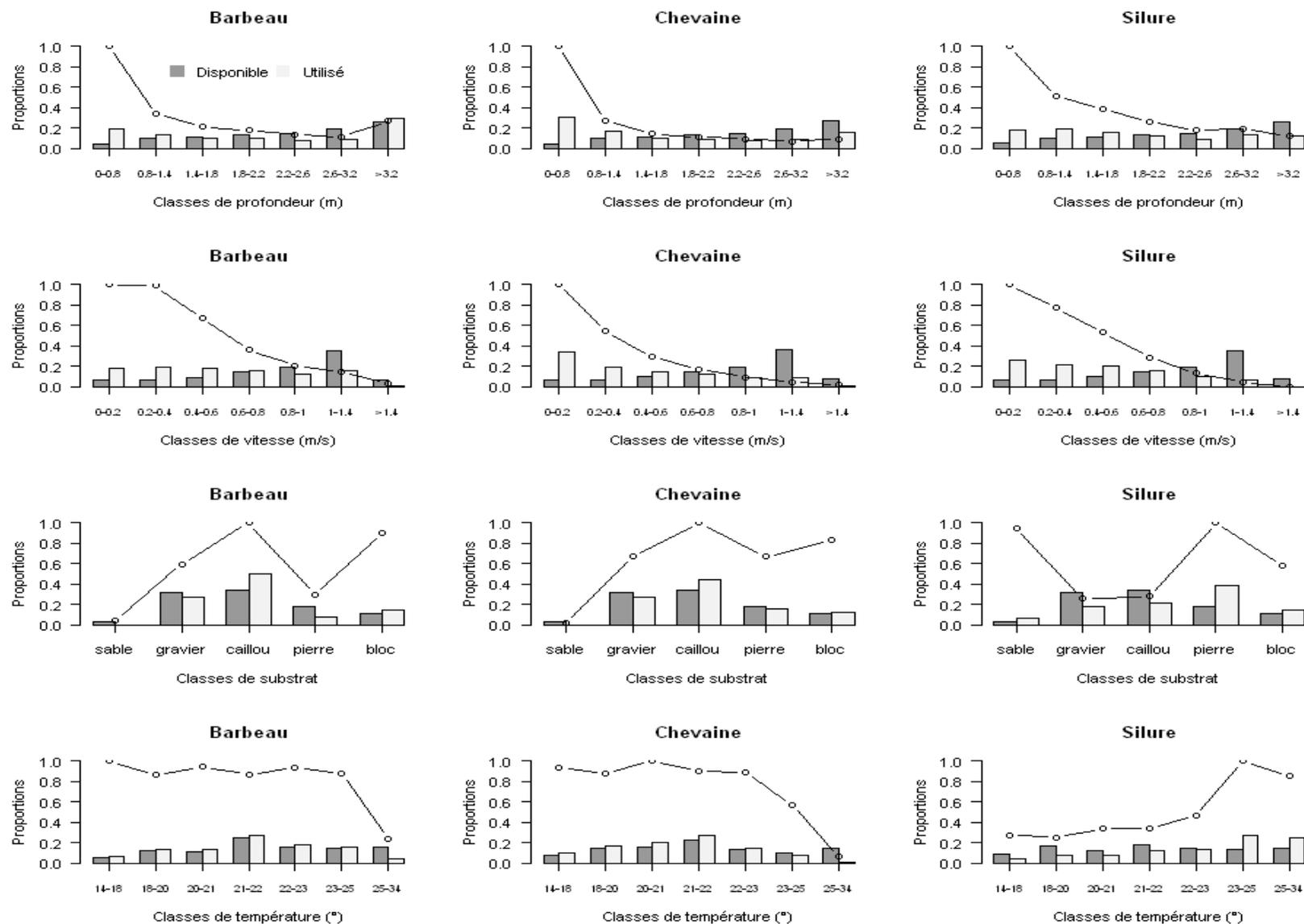


Figure 36 : courbes de préférences spécifiques (incluant par espèces toutes les localisations de tous les individus) pour chacune des 4 variables (en ligne) physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau) et chacune des trois espèces principales (colonnes). Pour chaque graphe sont représentées les distributions utilisées (gris) et disponibles (noir). Attention les axes des abscisses sont discrétisés (classes).

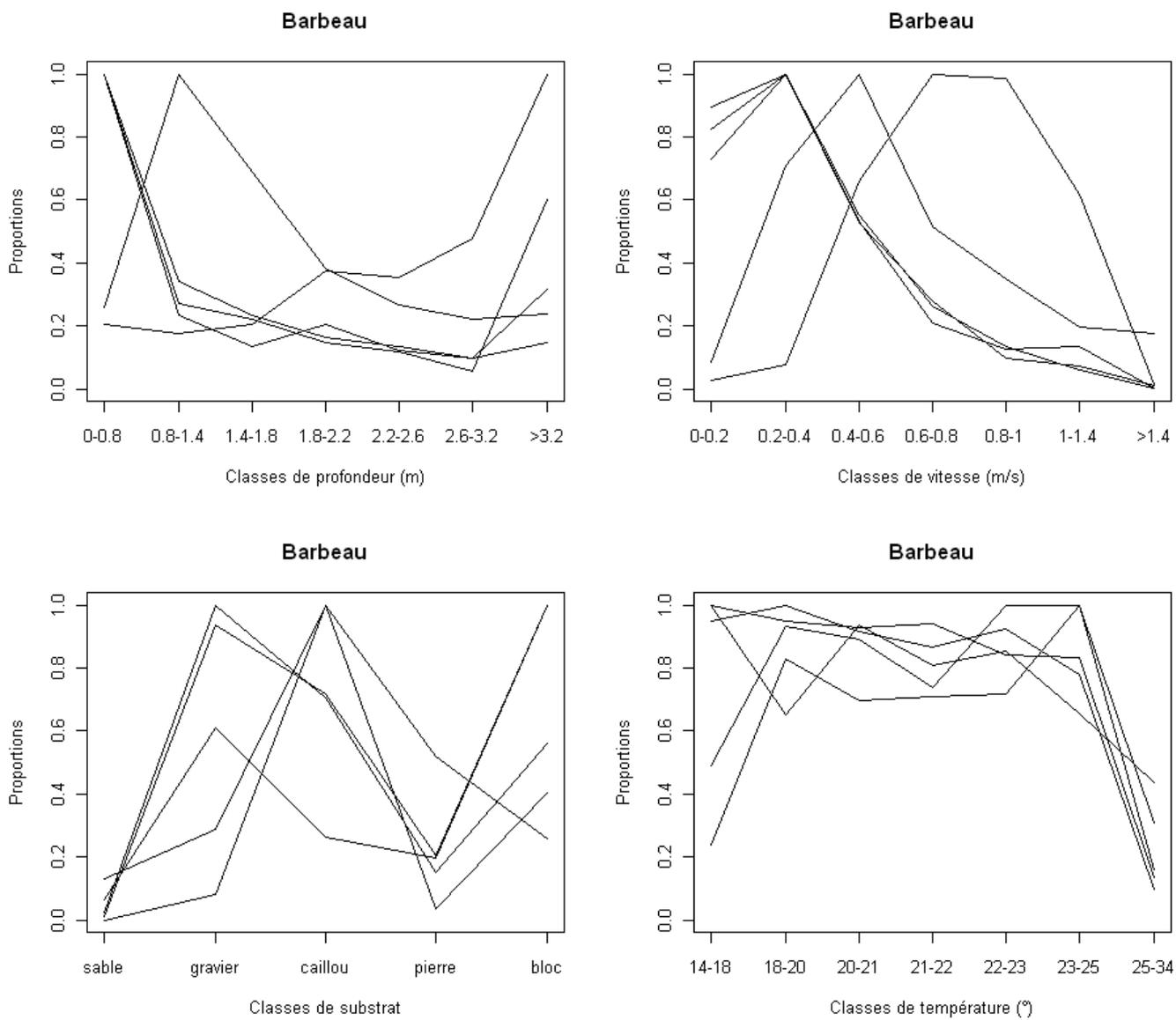


Figure 37 : courbes de préférences des 5 barbeaux les mieux suivis pour chacune des 4 variables physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau).

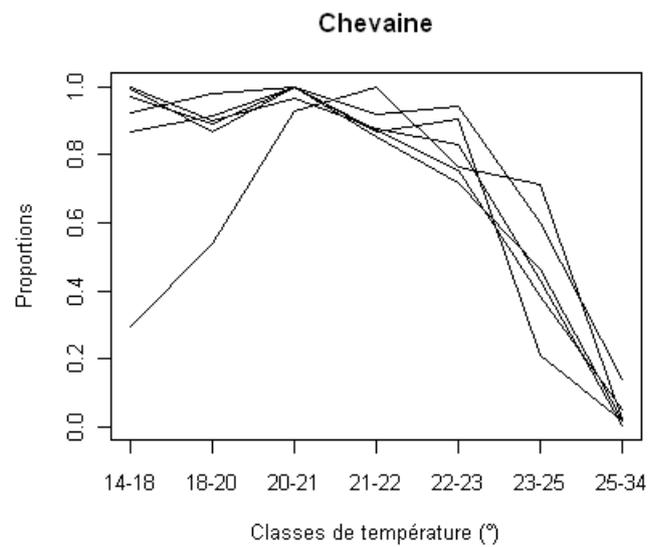
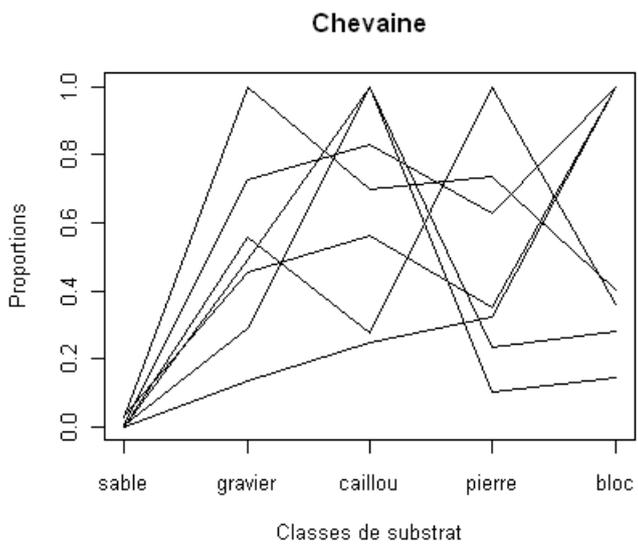
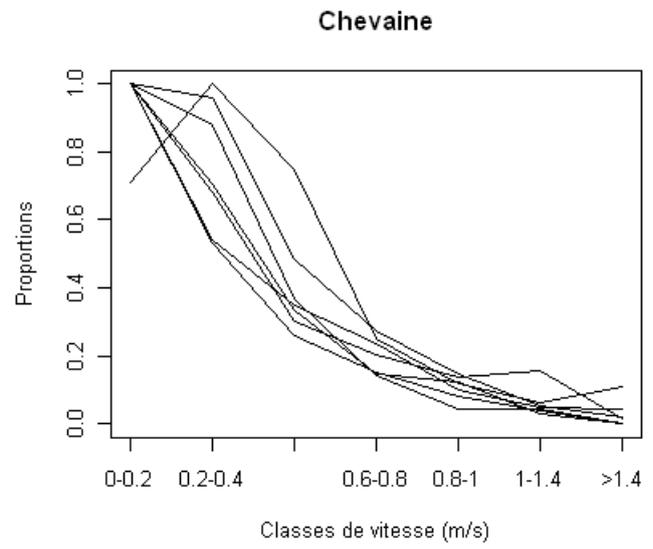
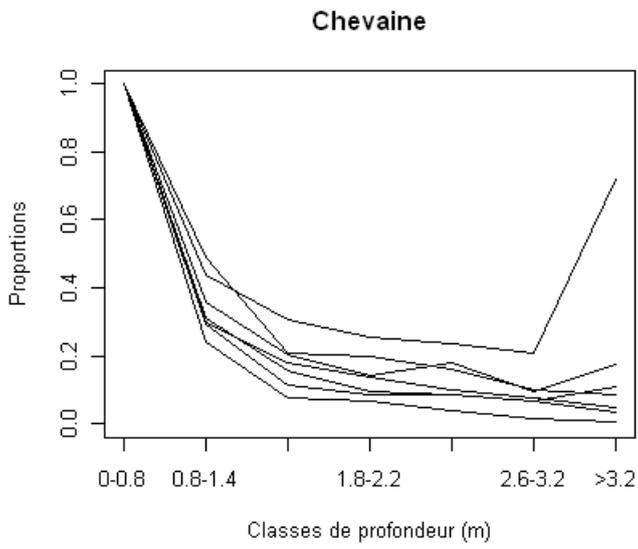


Figure 38 : courbes de préférences des 7 chevaines les mieux suivis pour chacune des 4 variables physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau).

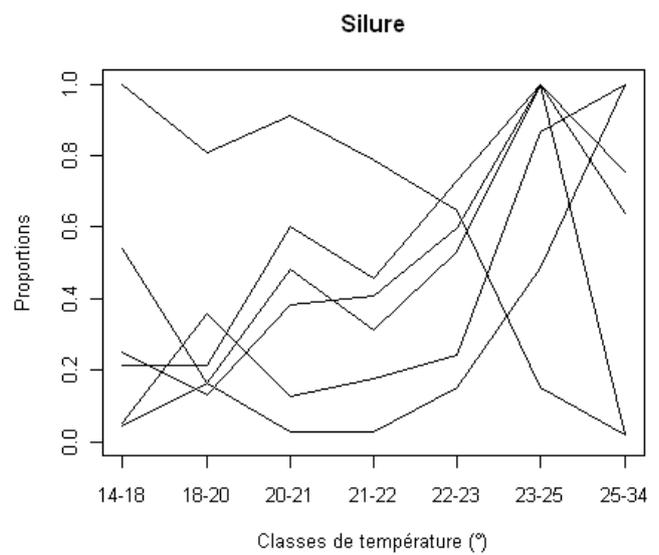
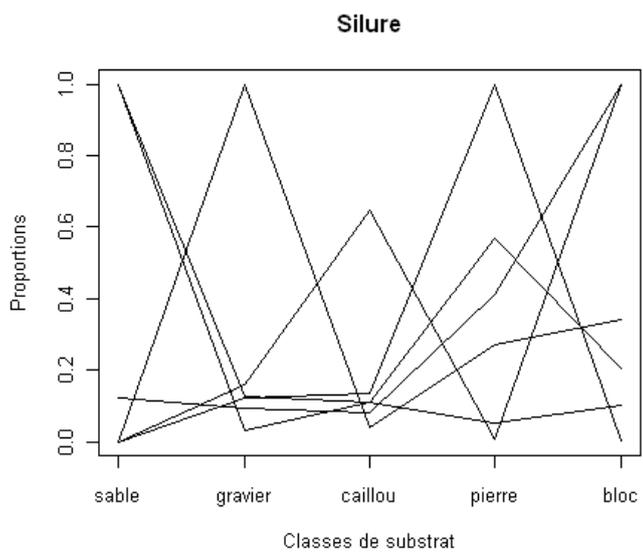
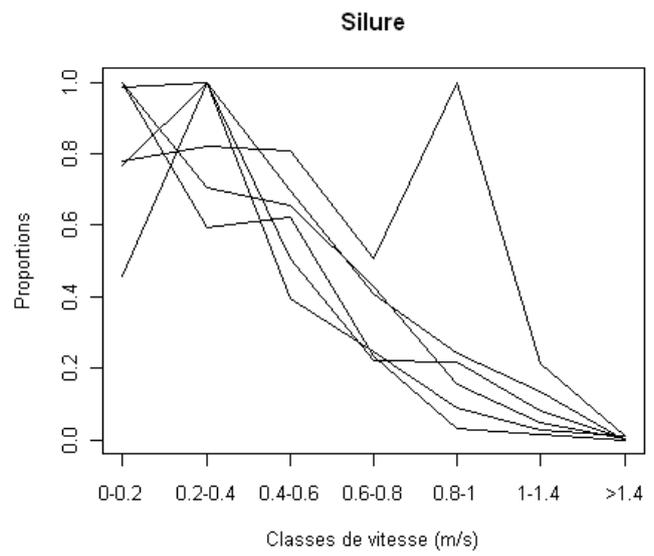
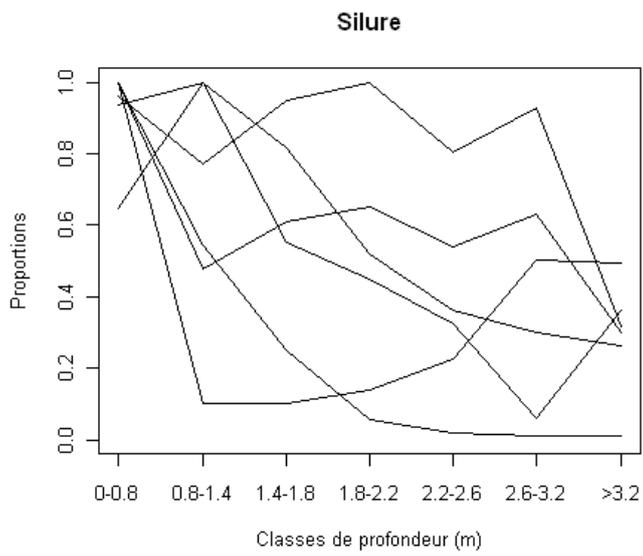


Figure 39 : courbes de préférences des 6 silures les mieux suivis pour chacune des 4 variables physiques retenues (profondeur, vitesse du courant, substrat et température de l'eau).

Hydrosignature de préférence

Le principe de l'hydrosignature est le même que celui des courbes de préférences, mais le travail ne se fait plus variable par variable, mais par combinaison de deux variables. Ce sont de préférences d'habitat bi-variées qui sont représentées par un tableau (croisement des classes des deux variables) appelé hydrosignature (Scharl & Le Coarer, 2005).

Les variables sont les mêmes que pour les courbes de préférences (profondeur, vitesse du courant, substrat et température) et les classes pour chacune de ces variables sont également les mêmes que pour les courbes de préférences.

Les calculs de l'utilisation et de la disponibilité des différentes classes bi-variées en pourcentage des observations se réalise selon la même démarche que celle employée pour les courbes de préférence, mais s'applique à chaque classe bi-variée (croisement d'une classe de chacune des deux variables de l'hydrosignature. De la même manière tous les ratios utilisé / disponible sont divisés par la valeur maximum pour obtenir des valeurs de préférence d'hydrosignature variant entre 0 et 1.

Ainsi nous avons construit des hydrosignatures de préférence globales pour chaque espèce (tous les individus confondus) pour les couples de variables: profondeur * vitesse ; profondeur * température ; vitesse * température ; substrat * température. Nous avons ensuite analysé la variation de ces hydrosignatures globales en fonction du débit (3 classes de débit ; faible (< 300 m³.s⁻¹), moyen (300-500 m³.s⁻¹) et fort (> 500 m³.s⁻¹)) sauf pour le couple substrat*température.

Les hydrosignatures de préférences hydrauliques (profondeur * vitesse) ont également été estimées :

- pour chaque espèce (tous les individus confondus) et pour les localisations situées dans de l'eau échauffée (chaud) ou non (froid) ;
- pour chaque espèce (tous les individus confondus) en Resting ou en Moving ;
- pour chaque espèce (tous les individus confondus) et pour chaque phase de débit (montée, descente et stable)

Hydrosignatures de préférences pour chaque espèce (globales)

Les hydrosignatures de préférences globales profondeur * vitesse, profondeur * température, vitesse * température et substrat * température sont présentées pour les trois espèces dans les Figure 40 à Figure 42. Une synthèse des principales classes hydrauliques et thermiques sélectionnées (indice de préférence > 0.66) est présentée dans le Tableau V.

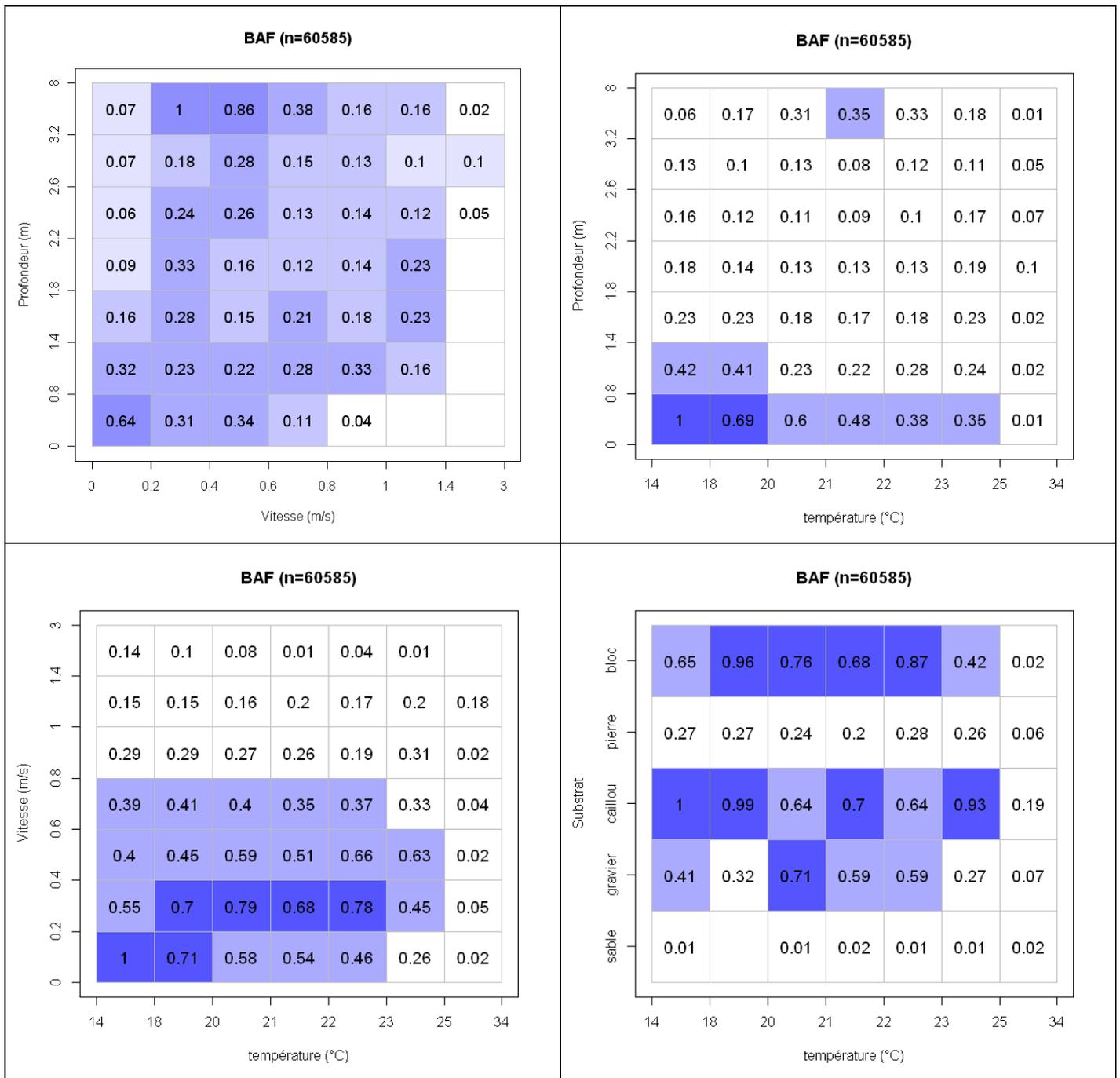


Figure 40 : Hydrosignatures de préférences (profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) pour les barbeaux (tous les individus). Le n entre parenthèse est le nombre de localisations concernées. Pour faciliter la lecture des hydrosignatures nous avons ajouté un dégradé de couleur pour différents seuils de préférence. Il n'ont pas de signification autre que de séparer les carreaux les uns des autres en fonction de la valeur de préférence qu'ils contiennent. Les limites de classes de préférence pour les couleurs de plus en plus foncées sont : [0-0.05]; [0.05-0.1]; [0.1-0.2]; [0.2-0.5]; [0.5-1.0] pour profondeur * vitesse, et [0-0.34]; [0.34-0.67]; [0.67-1.0] pour les autres hydrosignatures.

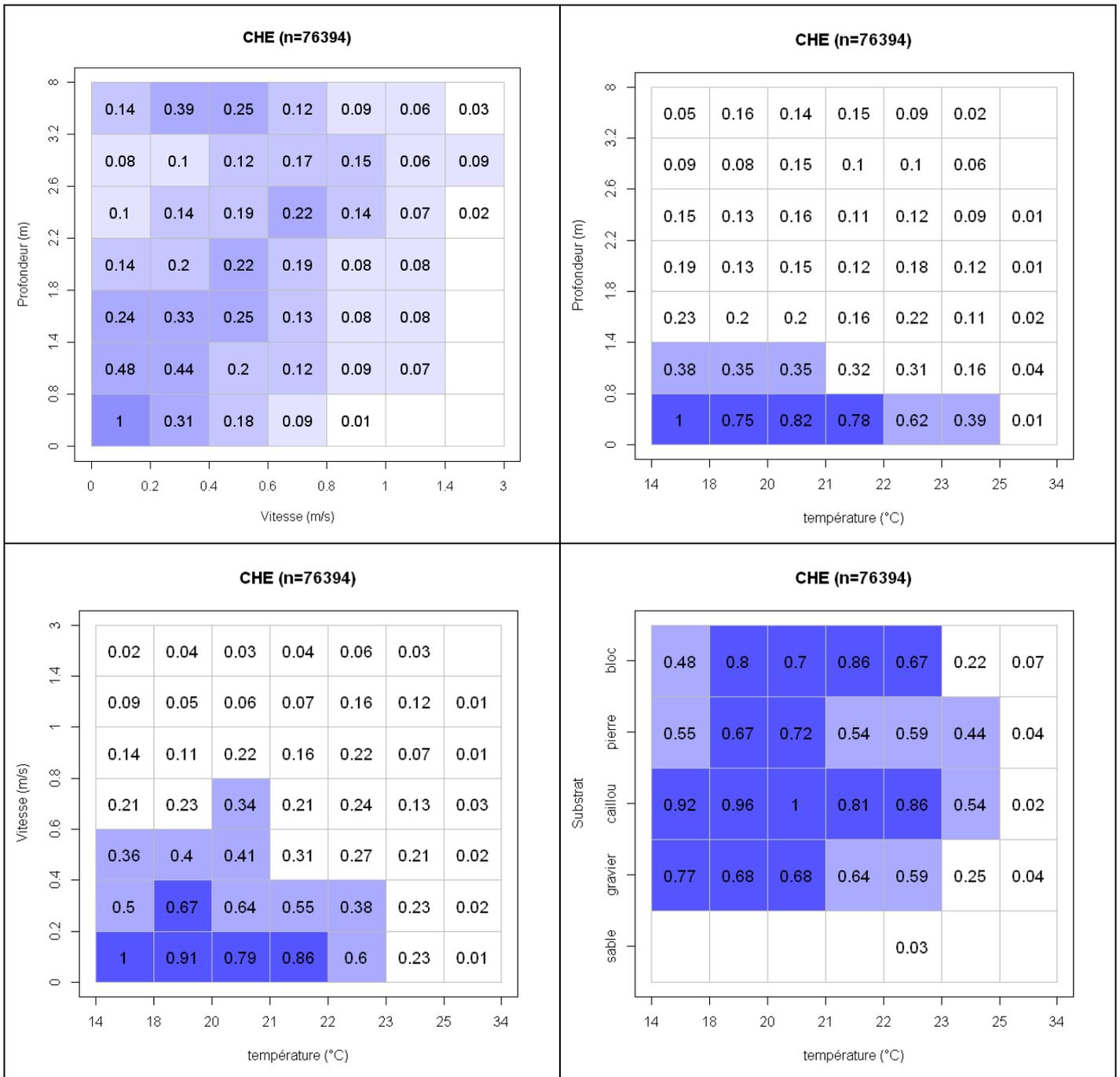


Figure 41 : Hydrosignatures de préférences (profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) pour les chevaines (tous les individus). Le n entre parenthèse est le nombre de localisations concernées. Pour faciliter la lecture des hydrosignatures nous avons ajouté un dégradé de couleur pour différents seuils de préférence. Il n'ont pas de signification autre que de séparer les carreaux les uns des autres en fonction de la valeur de préférence qu'ils contiennent. Les limites de classes de préférence pour les couleurs de plus en plus foncées sont : [0-0.05]; [0.05-0.1]; [0.1-0.2]; [0.2-0.5]; [0.5-1.0] pour profondeur * vitesse, et [0-0.34]; [0.34-0.67]; [0.67-1.0] pour les autres hydrosignatures.

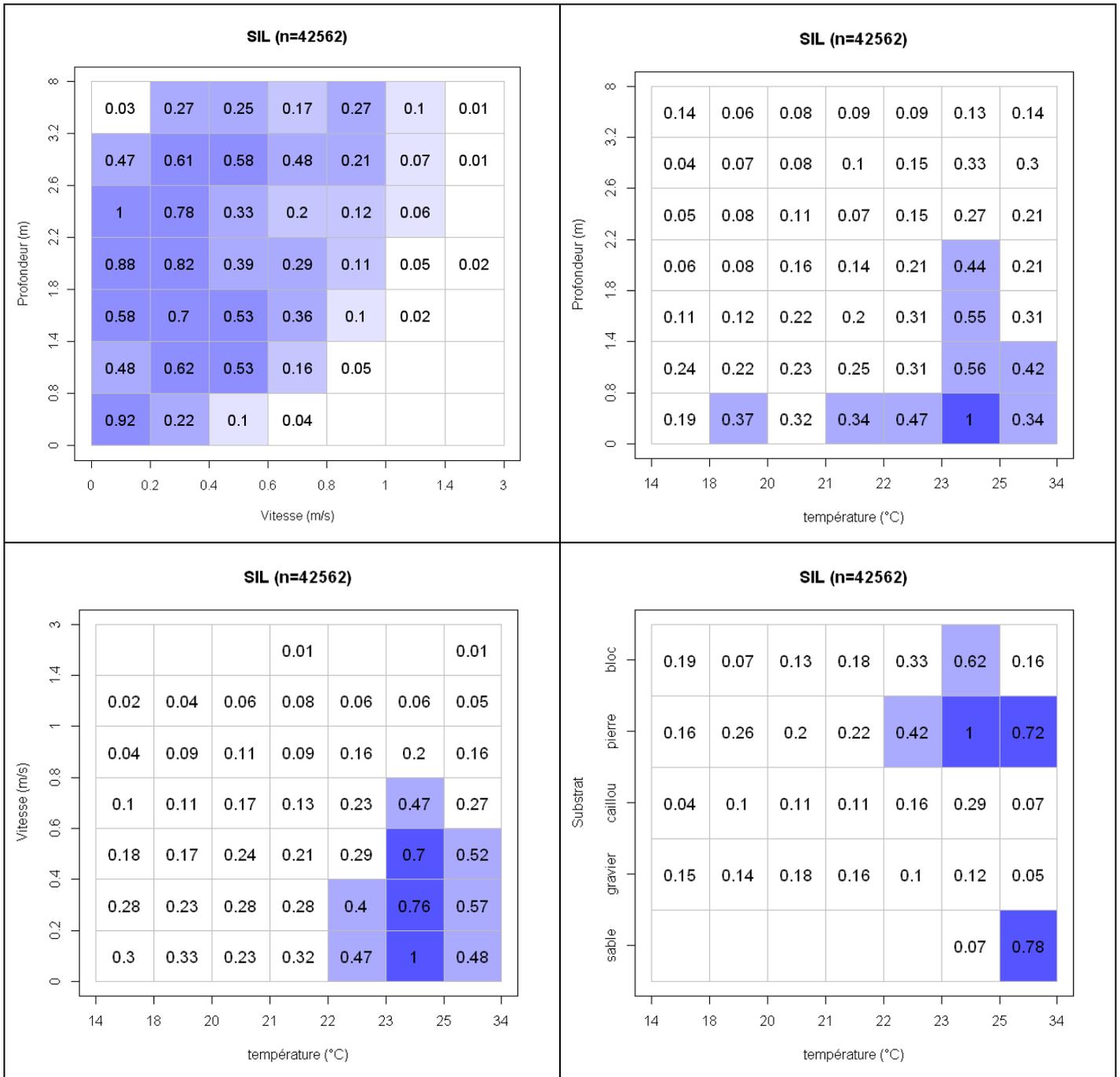


Figure 42 : Hydrosignatures de préférences (profondeur*vitesse, profondeur*température, vitesse*température et substrat*température) pour les silures (tous les individus). Le n entre parenthèse est le nombre de localisations concernées. Pour faciliter la lecture des hydrosignatures nous avons ajouté un dégradé de couleur pour différents seuils de préférence. Il n'ont pas de signification autre que de séparer les carreaux les uns des autres en fonction de la valeur de préférence qu'ils contiennent. Les limites de classes de préférence pour les couleurs de plus en plus foncées sont : [0-0.05]; [0.05-0.1]; [0.1-0.2]; [0.2-0.5]; [0.5-1.0] pour profondeur * vitesse, et [0-0.34]; [0.34-0.67]; [0.67-1.0] pour les autres hydrosignatures.

Tableau V : synthèse des hydrosignatures de préférences globales pour profondeur * vitesse, profondeur * température, vitesse * température et substrat * température pour chaque espèce (tous les individus confondus). Les limites des classes sont pour la profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2 , pour la vitesse (m.s-1) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 et pour la température (°C) – T1 à T7 : 18[, 20[, 21[, 22[, 23[, 25[et ≥ 25 . Les couples en gras représentent une préférence de 1. Les autres couples ont été sélectionnés si la préférence était > 0.6 .

	Profondeur Vitesse	Profondeur Température	Vitesse Température	Substrat Température
Barbeau	H7V2 H1V1 H7V3	H1T1 H1T3	V1T1 V1T2 V2T2-5	CaillouT1 GravierT3 CaillouT2-6 BlocsT1-5
Chevaine	H1V1	H1T1 H1T2-5	V1T1 V1T2-5 V2T2&3	CaillouT3 GravierT1-4 CaillouT1-2&4-5 PierreT2&3 BlocT2-5
Silure	H5V1 H1&4V1 H2&4-6V2	H1T6	V1T6 V3T6	PierreT6 SableT7 PierreT7 BlocT6

L'hydrosignature de préférence profondeur * vitesse globale pour les barbeaux se caractérise par la forte préférence de 2 types d'habitats différents : un premier très profond (H7) et lent (V2 et V3) et un second très peu profond (H1) et très lent (V1). Les faibles profondeurs et les faibles vitesses sont associées dans une forte préférence avec des températures comprises entre 18 et 23°C. Le substrat utilisé préférentiellement est le caillou, puis le gravier et le bloc associé à des températures inférieures à 25°C. Pour le couple substrat * température la préférence pour une classe en particulier est moins marquée.

Pour les chevaines, la préférence profondeur * vitesse globale est très nettement pour le couple H1V1, donc les profondeurs et vitesses les plus faibles. Les faibles profondeurs et faibles vitesses sont associées à des températures de l'eau inférieures à 23°C. Enfin la préférence pour substrat * température est assez large (gravier à bloc et moins de 18°C à moins de 25°C).

Pour les silures, la préférence profondeur * vitesse globale se caractérise par une sélection plus stricte des vitesses faibles ($< 0.4 \text{ m.s}^{-1}$) pour pratiquement toutes les classes de profondeur. En revanche, associées à une température de l'eau entre 23°C et 25°C seules les faibles profondeurs sont préférentiellement sélectionnées ainsi que des vitesses faibles à moyennes ($< 0.6 \text{ m.s}^{-1}$). La préférence pour substrat * température se caractérise par une association entre des températures de l'eau supérieures à 23°C et des substrats fin (sable) ou grossier (pierre et bloc).

Variation des hydrosignatures de préférences globales en fonction du débit

Pour appréhender plus finement l'effet du débit sur la sélection de l'habitat hydraulique et thermique des poissons suivis, nous avons analysé les hydrosignatures de préférences pour les couples de variables profondeur * vitesse, profondeur*température et vitesse*température pour chaque espèce (tous les individus confondus) dans 3 gammes de débit différentes : faible (< 300 m³.s⁻¹), moyen (300-500 m³.s⁻¹) et fort (> 500 m³.s⁻¹). Le Tableau VI synthétise les 27 hydrosignatures produites.

Barbeaux

Lorsque le débit est faible et moyen, les barbeaux sélectionnent principalement des habitats plutôt profonds et peu courants (H7 et V2 ou V3), caractérisés par des températures assez hétérogènes (entre T1 et T6). En revanche lorsque le débit est fort, ils sélectionnent principalement des habitats moins profonds (H1 et H3), avec une gamme de vitesse plus étendue (entre V1 et V6) et des températures plutôt fraîches (T1).

Tableau VI : synthèse des hydrosignatures de préférences pour profondeur*vitesse, profondeur*température et vitesse*température pour chaque espèce (tous les individus confondus) dans 3 gammes de débit différentes : faible (< 300 m³.s⁻¹), moyen (300-500 m³.s⁻¹) et fort (> 500 m³.s⁻¹). Les limites des classes sont pour la profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2, pour la vitesse (m.s⁻¹) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 et pour la température (°C) – T1 à T7 : 18[, 20[, 21[, 22[, 23[, 25[et ≥ 25. Les couples en gras représentent une préférence de 1. Les autres couples ont été sélectionnés si la préférence était > 0.6.

	Profondeur*Vitesse			Profondeur*Température			Vitesse*Température		
	faible	moyen	fort	faible	moyen	fort	faible	moyen	fort
Barbeau	H7V2	H7V3 H7V2	H1V1 H3V6	H7T3 H7T5 H2T2	H1T1	H1T1	V3T6 V2T2,3&5 V1T2 V4T1 V3T5	V1T1 V2T3-5 V3T3-4	V1T1
Chevaine	H7V2 H1-2V1	H1V1	H1V1	H1T2 H1T1-5 H7T3-4	H1T1 H1T2&4	H1T3 H1T1-5	V1T1 V1T2-4 V2T3	V1T1 V1T2&4 V2T2	V1T4 V1T1-5
Silure	H4V1 H5V1 H4-6V2	H1V1 H2&6V2	H1V1	H4T6 / H6T7 H3T6 H5T7	H1T2 H1T6	H1T6	V2T6 V1T6 V2T7	V3T6 V1T2&6 V2T2 V3T7 V4T6	V1T6

Chevaines

A faible débit les chevaines sélectionnent principalement des habitats profonds (H7) et peu profonds (H1), lents (< V3) et avec des températures assez diverses (T1 à T5). Ils

sélectionnent presque exclusivement des habitats peu profonds (H1) et lents (V1) quand le débit est moyen ou fort, caractérisés par une gamme toujours large de température (T1 à T5).

Silures

Les silures sélectionnent principalement des habitats profonds et lents à faible débit associés à des températures élevées (T6 et T7) et des habitats peu profonds et plutôt lents (H1 et V1 à V4) à moyen et fort débit associés aussi à des températures élevées (T2, T6 et T7).

Analyse des hydrosignatures de préférence hydraulique

Enfin, l'analyse plus spécifique des hydrosignatures de préférence hydraulique (profondeur * vitesse) pour différentes situations (dans le panache ou hors du panache; en déplacement (moving) ou immobile (resting) et en fonction des différentes phases de débit (monté, stable et descente) est synthétisée dans le Tableau VII.

Tableau VII : synthèse des hydrosignatures de préférences pour profondeur * vitesse pour chaque espèce (tous les individus confondus) dans différentes situations : dans le panache (échauffé) ou hors du panache (non-échauffé); en déplacement (moving) ou immobile (resting) et en fonction des différentes phases de débit (monté, stable et descente). Les classes des variables profondeur et vitesse sont pour la profondeur (m) – H1 à H7 : 0.8[, 1.4[, 1.8[, 2.2[, 2.6[, 3.2[et ≥ 3.2 et pour la vitesse (m.s-1) – V1 à V7 : 0.2[, 0.4[, 0.6[, 0.8[, 1.0[, 1.4[et ≥ 1.4 ; Les couples en gras représentent une préférence de 1. Les autres couples ont été sélectionnés si la préférence était > 0.6 . Les effectifs de localisations ayant permis la construction de l'hydrosignature est indiqué en tête de colonne.

	<u>Echauffé</u>	<u>Non-échauffé</u>	<u>Moving</u>	<u>Resting</u>	<u>Monté</u>	<u>stable</u>	<u>Descente</u>
Barbeau	4616 H4V6	55969 H7V2 H1V1 H7V3	27833 H7V2 H1V1 H7V3	32752 H7V2 H7V3	16739 H7V2 H1V1 H7V3	30178 H7V2 H7V3	13668 H1V1 H7V3 H2V5 H3&4V2 H7V2
Chevaine	3580 H2V1 H2V4	72814 H1V1	43649 H1V1	32745 H1V1	25539 H1V1	36187 H1V1 H2V1 H7V2	14668 H1V1
Silure	23544 H5V1 H4V1&2 H5V2	19018 H1V1 H6V3&4	19612 H4V2 H1&4-5V1 H2&3V2&3 H5V2	22950 H5V1 H1&4V1 H5V2	9989 H1V1 H5V1&2	19808 H5V1 H3V1&2 H4V1&2 H5&6V2	12765 H1V1 H2V3

Barbeaux

L'organisation de l'hydrosignature profondeur * vitesse générale se retrouve pour l'hydrosignature établie à partir des localisations dans l'eau non échauffée du fait de leur proportion très importante. Dans l'eau échauffée par les rejets du CNPE, les barbeaux utilisent préférentiellement des profondeurs moyennes à fortes (H4) et des vitesses fortes (V6), donc des conditions hydrauliques différentes de celles sélectionnées dans l'eau non échauffées.

Les localisations en moving ou en resting ne génèrent pas des hydrosignatures profondeur * vitesse très différentes, les deux étant proches de l'hydrosignature globale. La sélection des conditions hydrauliques ne semble pas très différente quand les barbeaux se déplacent ou lorsqu'ils sont immobiles. Les situations de débit montant ou stable conduisent aux mêmes conclusions. Seule l'hydrosignature relative à des conditions de débit descendant diffère légèrement en montrant une gamme de valeur de forte préférence plus large (H1 à H7 et V1 à V5).

En conclusion les barbeaux utilisent une gamme de vitesses d'écoulement assez large et se situent dans des profondeurs soit très faibles (< 1 m), soit très fortes (> 3 m). Globalement deux types d'habitat sont préférés : des zones de faible profondeur (< 1 m) et faible vitesse ($< 0.6 \text{ m.s}^{-1}$) et des zones de très forte profondeur (> 3 m) et de vitesse faible ($< 0.6 \text{ m.s}^{-1}$). En revanche dans les veines d'eau échauffées à l'aval des rejets du CNPE les profondeurs préférées sont plutôt entre 1 et 3 m pour une gamme de vitesse plus forte (1.0 à 1.4 m.s^{-1}).

Chevaines

L'hydrosignature de préférences profondeur * vitesse des chevaines se caractérisent par une constante sélection majoritaire du couple H1V1 (profondeur < 0.8 m et vitesse $< 0.2 \text{ m.s}^{-1}$) dans la plupart des situations étudiées, remplacé par H2V1 et H2V4 dans le panache d'eau échauffée et par H2V1 et H7V2 lorsque le débit est stable.

En conclusion l'hydrosignature de préférence profondeur * vitesse globale des chevaines est maintenue dans la plupart des situations étudiées. Dans le panache d'eau échauffée la chevaine sélectionne principalement des profondeurs et vitesse un peu plus importantes (H2V4). Le spectre de préférences est un peu plus large lorsque le débit est stable.

Silures

L'hydrosignature de préférences profondeur * vitesse des silures est beaucoup plus variable que celle des chevaines, même si la classe V1 est toujours associée à la préférence maximum, excepté pour les déplacements (V2). Dans le panache d'eau échauffée les silures sélectionnent plutôt des habitats assez profonds (H4 et H5) et assez lents (V1 et V2) et hors du panache les habitats sélectionnés principalement sont soit lents et peu profonds (H1V1) soit plus profonds (H6) et plus rapides (V3 et V4). Les habitats sélectionnés pendant les déplacements sont peu à moyennement profonds (H1 à H5) et plutôt lents (V1 à V3) ; le même type d'habitat est sélectionné lorsque les silures sont immobiles, avec un spectre légèrement moins large pour la vitesse (V1 à V2). Enfin quand le débit monte ou descend les silures sélectionnent principalement des habitats soit peu profonds et lents (H1V1) soit profonds et lents (H2-5V1-3). Quand le débit est stable le spectre de sélection est plus centré sur des habitats profonds et lents (H3-6V1-2).

En conclusion les silures ne sélectionnent que très rarement des vitesses $> 1 \text{ m.s}^{-1}$. En revanche ils sélectionnent une gamme plus large de profondeurs, avec majoritairement des profondeurs faibles $< 0.8 \text{ m}$ ou fortes $> 2.0 \text{ m}$.

Pourcentage de temps passé dans les habitats sélectionnés

Les hydrosignatures d'utilisation de l'habitat représentent pour chaque classe de l'hydrosignature le pourcentage de localisations situées dans cet habitat (correspondant à la classe = une case de l'hydrosignature). Ce pourcentage de localisations peut, dans notre cas, être assimilé (grossièrement) à un pourcentage de temps passé dans cet habitat. Les proportions de localisations en resting et en moving sont assez homogènes dans chaque combinaison, ce qui ne peut pas biaiser significativement cette extrapolation entre le pourcentage de localisations et le pourcentage de temps passé dans un habitat (une case) donné. L'intérêt de regarder les hydrosignatures d'utilisation avec une vision temporelle est de pouvoir analyser la répartition des localisations dans les différents types d'habitats en proportion du temps total de localisation.

Ainsi on constate que les habitats de type HIV1 sont majoritairement utilisés par les trois espèces (barbeau 23%, chevaîne 40% et silure 21%). Ainsi ces habitats sont souvent sélectionnés par les poissons suivis, et plus de 20% de leur localisations sont situées dans ce type d'habitat. Aucun autre couple profondeur * vitesse n'a un pourcentage supérieur à 10% pour les trois espèces, et aucun autre couple de variables n'a un pourcentage supérieur. En terme de disponibilité seulement 15% de la surface totale en eau à $150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ est associée à l'habitat de type HIV1. Cette proportion n'est plus que de 4.3% à $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et 2.1% à $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. C'est donc un habitat fortement sélectionné relativement à sa disponibilité.

Localisation des poissons versus habitat disponible

L'objectif ici était de comparer à partir d'une représentation cartographique commune la disponibilité en habitat (valeur d'habitat, VH) sur le site d'étude et la répartition spatiale des localisations des poissons.

La valeur d'habitat au nœud est calculée à partir des valeurs de profondeur et de vitesse simulées pour un débit donné transformées en indice d'habitat (entre 0 et 1) grâce à un modèle biologique. Nous avons ici utilisé deux modèles biologiques :

- les courbes de préférences de Lamouroux *et al.* (1999) pour le barbeau et le chevaîne adultes (pour le silure il n'y a pas de courbes) ; ces courbes sont les seules disponibles actuellement ;
- les hydrosignatures de préférences pour profondeur * vitesse décrites ci-dessus pour les trois espèces barbeau, chevaîne et silure.

Les calculs de disponibilité ne peuvent se faire que pour un débit donné. Il n'est cependant pas possible de visualiser une carte pour chaque débit entre 150 et $700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Nous avons donc déterminé 3 classes de débit : petit (150 à $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), moyen (350 à $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) et fort

(550 à 700 m³.s⁻¹). Ainsi pour chaque classe de débit on estime la disponibilité moyenne en calculant pour chaque nœud la moyenne des valeurs d'habitat estimées pour ce nœud pour 4 débits appartenant à la classe de débit (calcul fait tout les 50 m³.s⁻¹).

Les localisations des poissons, dont une des caractéristiques est le débit transitant dans le site d'étude au moment de la localisation, sont également regroupées selon les mêmes classes de débit. Pour une classe de débit les localisations sont réparties selon les principales phases nyctémérales aurore / crépuscule, jour et nuit. Les localisations sont ensuite regroupées par carreau de la grille à 20 m et le nombre de localisations par carreau est représentés par des cercles dont le centre est celui du carreau et dont le diamètre est proportionnel au nombre de localisations réparties en 4 classes : 20] ; 200] ; 1000] et 10000]. Si moins de 10 localisations sont recensées pour un carreau elles ne sont pas représentées sur la carte.

Le but ici n'est pas de valider ou non un des deux modèles biologiques. Il s'agit de voir où sont localisés les poissons par rapport aux habitats évalués comme les plus favorables. Avec les courbes de Lamouroux *et al.* (1999) il s'agit de voir comment les modèles utilisés par ailleurs se comportent sur le Rhône à Bugey. Avec les hydrosignatures il s'agit d'utiliser pour la première fois un modèle bivarié et d'autre part d'évaluer comment les poissons colonisent les habitats qui ont été jugés préférés lors du calcul de l'hydrosignature.

Lorsque l'habitat est estimé à partir des courbes de préférences de Lamouroux *et al.* (1999) pour le barbeau, c'est au débit moyen que la disponibilité est la plus importante (surtout en habitat avec VH > 0.66) mais il y a peu de superposition avec les localisations des barbeaux, quelque soit la phase nyctémérale (Figure 43), excepté en amont rive droite et dans le chenal (à hauteur de la prise d'eau). A faible débit la disponibilité est moindre (excepté en amont à hauteur de la prise d'eau) et à fort débit elle est très faible et concentrée en berge. Dans ces deux dernières situations de débit il n'y a que très peu de superpositions des localisations et des VH fortes.

Pour le chevaine c'est pour les plus faibles débits que la quantité d'habitat avec un VH > 0.33 est la plus importante, notamment le long de la rive gauche (Figure 44). Il existe aussi des petits spots en rive droite avec une VH > 0.66, entre les deux rejets, mais ils ne sont pas colonisés. En rive gauche au contraire, les habitat avec des VH > 0.66 sont bien colonisés pour toutes les phases nyctémérales. Il y a aussi des localisations dans des habitats avec des VH de 0.33 à 0.66. Pour des débits moyens et forts la quantité d'habitat avec une VH > 0.33 se réduit fortement en se concentrant le long des berges. Il y a des localisations de chevaines sur les habitats avec VH > 0.66 en rive gauche, mais très peu en rive droite.

En conclusion, pour le chevaine la correspondance entre l'habitat simulé avec les courbes de Lamouroux *et al.* (1999) est assez cohérent avec les localisations des chevaines en 2009. L'évolution de la répartition spatiale de l'habitat jugé le plus favorable a priori (VH > 0.33) en fonction du débit expliquerait très bien les localisations des chevaines fortement concentrées en berge, et notamment en rive gauche. En rive droite, échauffée dès l'aval du rejet 4-5, les habitats favorables (VH>0.33) sont très peu utilisés, quelque soit la phase nyctémérale. Les conditions de « retenue » d'eau dans la zone de prise d'eau du CNPE offrent des habitats jugés très favorables, mais aucune localisation de poisson ne pouvait être faite dans cette zone. Pour le barbeau la superposition entre les habitats favorables et les localisations des individus suivis en 2009 ne sont pas très satisfaisantes, surtout à fort débit (le jour en particulier), et même pour un débit moyen pour lequel l'habitat est jugé le plus favorable pour le barbeau avec ce modèle biologique..

Lorsque l'habitat est estimé à partir des hydrosignatures développées dans notre étude la quantité d'habitat jugé a priori favorable ($VH > 0.33$) décroît en fonction du débit pour les trois espèces étudiées. Pour le barbeau l'habitat disponible favorable est encore moins abondant qu'avec le modèle biologique de Lamouroux *et al.* (1999). Les habitats favorables sont éparpillés et majoritairement le long des berges pour les trois classes de débit. A fort débit par exemple, il y a très peu de recouvrement entre habitat favorable et localisations de barbeaux (seulement dans la confluence du rejet 2-3 et à hauteur du banc de galets (cf. Figure 6) en rive gauche, la fosse). A débit moyen et faible (Figure 43) les spots de localisations chevauchent les habitats avec des $VH > 0.66$ (fosse en rive gauche essentiellement) mais pas le petit spot en rive droite (présent uniquement à débit moyen).

Pour le chevaie, l'habitat favorable simulé ($VH > 0.33$) est peu abondant quelque soit la classe de débit. Les habitats favorables sont uniquement le long des berges, comme la plupart des localisations. C'est à bas débit que l'habitat favorable est le plus abondant et il est bien colonisé en rive gauche (Figure 44). En revanche en rive droite il est peu colonisé, excepté à hauteur du banc de galets.

La disponibilité en habitat favorable ($VH > 0.33$) pour le silure est aussi très restreinte à débit fort comme à débit moyen, et se situe aussi uniquement en berge. Pour les débits forts, les localisations ne sont pas forcément sur des spots d'habitat avec des $VH > 0.66$ (Figure 45). A débit moyen et surtout à débit faible le chevauchement est plus net, en rive droite comme en rive gauche (Figure 45).

En conclusion quand le débit devient fort, supérieur à $550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, l'habitat favorable estimé avec les hydrosignatures hydrauliques issues du suivi par télémétrie de 2009 est très peu abondant et se limite aux berges. Il y a pour le barbeau et le chevaie un peu d'habitats avec une $VH > 0.33$ en rive droite mais très peu de localisations de poissons se superposent à ces habitats. Le silure utilise les habitats hydrauliques favorables aussi bien en rive droite qu'en rive gauche.

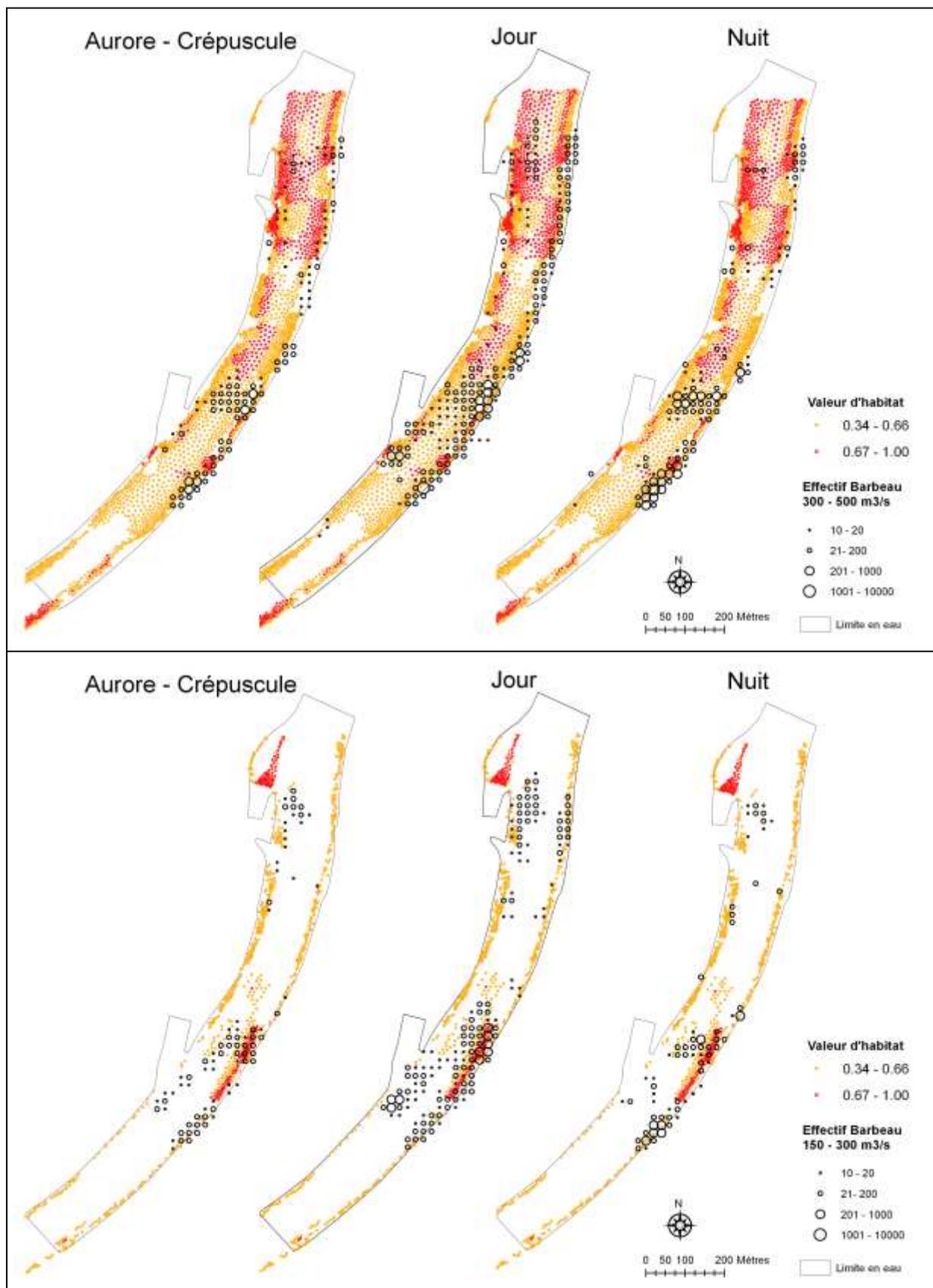


Figure 43 : Cartographie des VH aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique calculées avec les courbes de préférence du barbeau adulte de Lamouroux *et al.* (1999) en haut (à débit moyen) et avec les hydrosignatures de préférence (profondeur * vitesse) de notre étude de 2009 en bas (à débit faible). Les localisations des barbeaux suivis en 2009 sont superposées en fonction des phases nyctémérales et représentées en 4 classes de nombre de localisation par carreau de la grille à 20 m. (les simulations ont été réalisées pour les trois classes de débit, mais seuls deux exemples sont montrés ici).

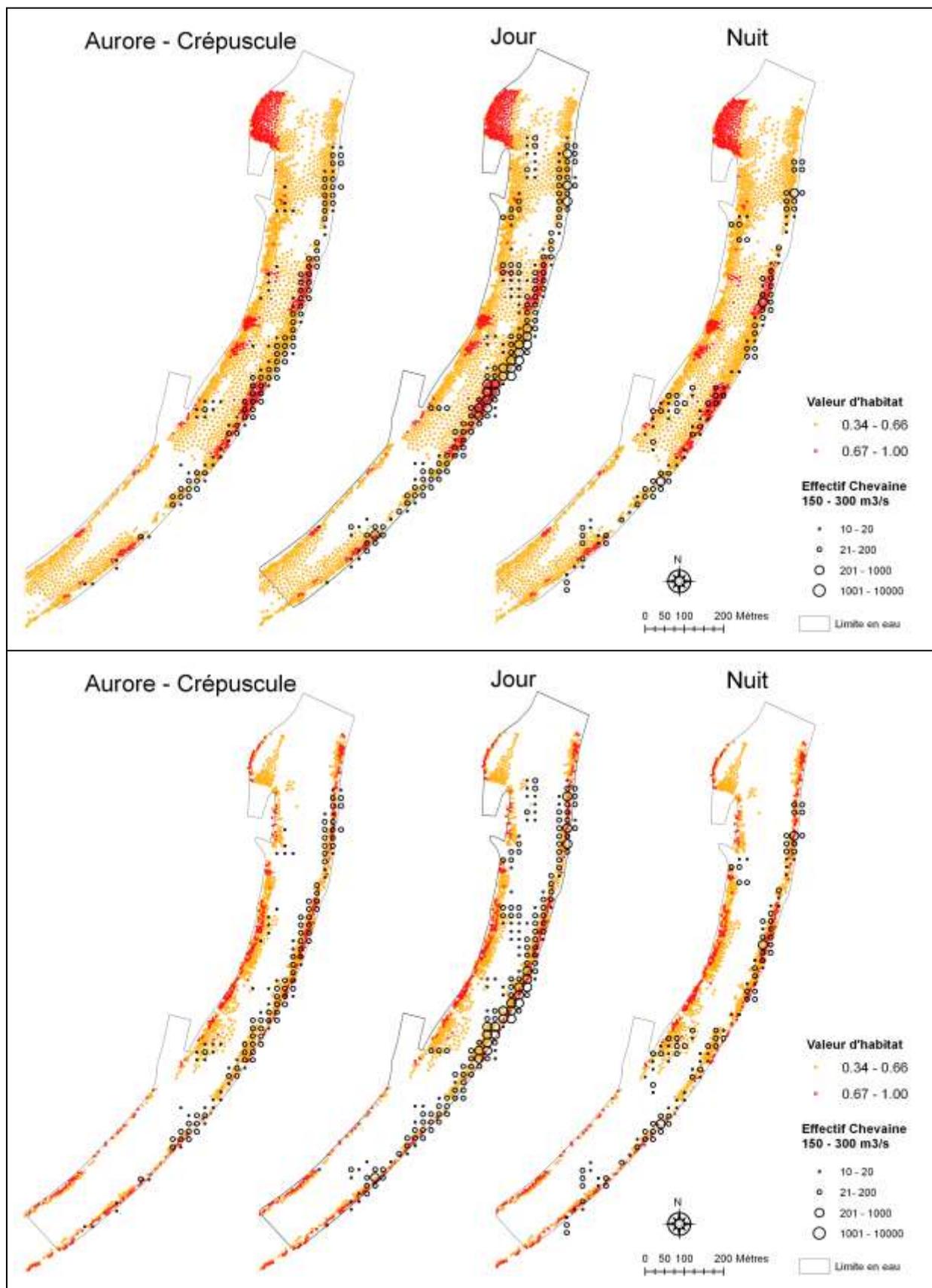


Figure 44 : Cartographie des VH aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique calculées avec les courbes de préférence du chevaîne adulte de Lamouroux *et al.* (1999) en haut (à débit faible) et avec les hydrosignatures de préférence (profondeur * vitesse) de notre étude de 2009 en bas (à débit faible). Les localisations des chevaines suivies en 2009 sont superposées en fonction des phases nyctémérales et représentées en 4 classes de nombre de localisation par carreau de la grille à 20 m. (les simulations ont été réalisées pour les trois classes de débit, mais seuls deux exemples sont montrés ici).

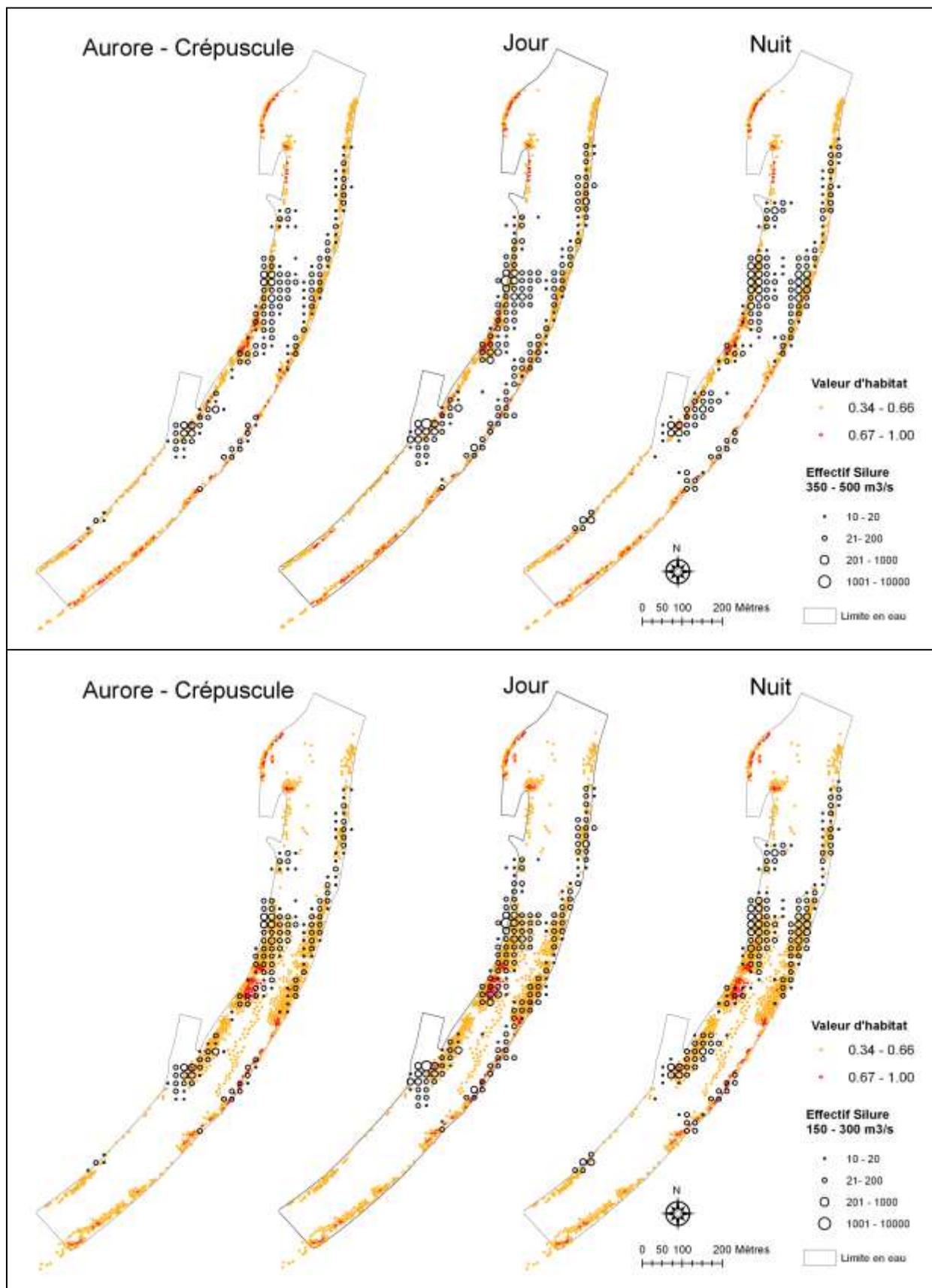


Figure 45 : Cartographie des VH aux nœuds du maillage du modèle hydrodynamique calculées avec les hydrosignatures de préférence (profondeur * vitesse) du silure issues de notre étude de 2009 à débit moyen (en haut) et à débit faible (en bas). Les localisations des silures suivis en 2009 sont superposées en fonction des phases nyctémérales et représentées en 4 classes de nombre de localisation par carreau de la grille à 20 m.

Les barbeaux adultes suivis en 2009 dans le Rhône au droit du CNPE de Bugey sélectionnent des habitats hydrauliques plus lenticques et moins profonds que ceux sélectionnés par les barbeaux adultes observés lors des échantillonnages analysés par Lamouroux *et al.* (1999). Le Rhône à Bugey est pourtant d'un gabarit nettement supérieur à celui des rivières étudiées (e.g. Ardèche, Ain, Rhône court-circuité) par Lamouroux *et al.* (1999) et offre ainsi des surfaces d'habitat ayant de vitesses de courant et des profondeurs élevées beaucoup plus importantes. Il est donc surprenant que les barbeaux suivis en 2009 sélectionnent principalement les habitats peu profonds et lents. Les variations journalières de débit, et donc de disponibilité, pourraient expliquer ce résultat. En effet, le fait d'observer majoritairement les poissons en berge laisse penser que ceux-ci recherchent plutôt les habitats qui évoluent le moins (le moins vite) en fonction du débit. Les chevaines adultes suivis en 2009 ont quant à eux des préférences très proches des celles présentées par Lamouroux *et al.* (1999), notamment pour la vitesse de courant. Des habitats favorables sont disponibles en rive droite pour les deux espèces de cyprinidés, mais ces habitats sont peu utilisés, sans doute à cause de la température de l'eau échauffée.

Répartition spatiale des individus

Répartition spatiale par espèce

L'objectif ici est de visualiser la répartition spatiale des 226 000 localisations.

Une première approche très globale des données consiste à représenter les localisations par espèce (tous les individus confondus) pour l'ensemble du suivi. Pour cela nous avons utilisé la grille à 20 m, en calculant le nombre de localisations de l'espèce dans chaque carreau de la grille. Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ;]12-120] ;]120-580] ;]580-5000]). Ainsi pour la représentation graphique, pour chaque carreau de la grille on trace un cercle, dont le centre est au centre du carreau et dont la taille est proportionnelle à la classe de densité (pour des densités < 3 localisations sur l'ensemble du suivi on ne représente rien). Enfin, pour augmenter le nombre d'informations contenues dans les graphes, nous avons représenté par espèces ces densités de localisation par phase nyctémérales (aurore / crépuscule, jour et nuit).

On observe que les différents individus des trois espèces barbeau, chevaine et silure ont utilisé une très grande surface de l'habitat disponible au cours du suivi.

Il apparaît que les barbeaux sont détectés de manière moins éparse la nuit et que le jour et à l'aurore/crépuscule les détections sont plus fortes dans certaines zones (spots). Ces spots se répartissent principalement en rive gauche (6 spots), puis en rive droite en amont du rejet 4-5 et dans le rejet 2-3 et enfin autour du banc de galet (Figure 49).

Les chevaines sont quant à eux fortement inféodés à la rive gauche (un spot continu tout le long de la rive gauche le jour, 3 spots principaux pendant aurore/crépuscule et 7 spots un peu plus espacés la nuit), avec quelques spots le jour et la nuit en rive droite (Figure 50).

Les silures sont plus densément localisés en rive droite (3 spots à l'aurore/crépuscule et 4 spots le jour) mais également en rive gauche (2 petits spots le jour et 1 spot plus important la nuit, en amont de la règle limnimétrique de la CNR au PK44.5 ; Figure 51).

Soulignons ici que cette répartition de l'ensemble des localisations disponibles cache une variabilité individuelle forte dans le nombre de localisations et les habitats utilisés que nous détaillerons après, et les représentations graphiques intègrent la durée total du suivi.

Proportions des localisations des poissons dans l'eau échauffée ou non échauffée

La température de l'eau est jugée échauffée si elle est 2°C plus élevée que la température de l'eau en amont du site d'étude. Le calcul des proportions des localisations de chaque espèce dans le « chaud » et dans le « froid » a montré que les barbeaux étaient localisés 7% du temps dans l'eau échauffée, le chevaine 4% et le silure 53% (56% sans le silure 3849 qui est resté uniquement en rive gauche).

(une comparaison avec les données brutes montre qu'il n'y a pas de grosses différences dans ces proportions)

Le silure est majoritairement localisé dans l'eau échauffée, mais pour à peine plus que la moitié des localisations. Pourtant l'optimum thermique (12-27°C dans Tissot & Souchon, 2010 ; 25-27°C dans Copp et al, 2009) est loin d'être atteint dans le Rhône non échauffé ; peut être est ce quand même le fait de l'été, puisque les températures du Rhône sont tout de même entre 15°C et 23°C pendant le suivi.

Une analyse cartographique permet de valider un peu plus l'hypothèse d'évitement du panache d'eau échauffée pour le barbeau et le chevaine. Nous avons représenté pour trois gammes de débit différentes (faibles : 150-300 m³.s⁻¹; moyens : 300-500 m³.s⁻¹ et forts : > 500 m³.s⁻¹) les localisations des poissons pour chacune des trois espèces, lors des différentes phases nyctémérales (aurore-crêpuscule, jour et nuit). Pour chaque classe de débit nous avons superposé les panaches thermiques modélisés pour les débits minimum et maximum de la classe de débit et les densités de localisations des poissons sur la grille à 20m (Figure 46, Figure 47 et Figure 48).

Barbeaux

Pour les faibles débits, des localisations sont présentes dans le panache d'eau échauffée, pendant les trois phases nyctémérales (principalement le jour), et ces localisations sont dans la frange du panache simulé entre 300 et 150 m³.s⁻¹ (Figure 46). Dès 300 m³.s⁻¹ il y a peu de localisations dans le panache d'eau échauffée.

Pour des débits moyens les localisations de l'aurore-crêpuscule et de la nuit sont principalement hors du panache. Quelques localisations sont matérialisées le long du panache et quelques centaines de localisations sont localisées dans le panache simulé. En revanche le jour un certain nombre de localisations sont dans le panache d'eau échauffée et principalement à la confluence du rejet 2-3.

Pour les forts débits les localisations sont très rarement dans le panache d'eau échauffée la nuit, à l'aurore et au crépuscule. Le jour quelques dizaines à quelques centaines de localisations sont situées dans le panache d'eau échauffée simulé, principalement en amont immédiat et dans la confluence du rejet 2-3.

Chevaines

A faible débit des localisations de chevaines sont observées dans le panache d'eau échauffée (Figure 47), principalement en aval immédiat du rejet 4-5, et juste en amont de la confluence du rejet 2-3 (entre la rive droite et le banc de galet). Ces localisations restent bien moins denses que celles observées hors du panache simulé.

Pour des débits moyens les localisations proches de la rive droite se densifient, et les localisations dans le panache simulé restent principalement situées entre l'aval du rejet 4-5 et l'amont de la confluence du rejet 2-3.

Pour les forts débits, très peu de localisations sont situées dans le panache simulé la nuit. En revanche le jour, et dans une moindre mesure à l'aurore et au crépuscule, des localisations sont nettement situées dans le panache simulé d'eau échauffée, et toujours entre les deux rejets (comme pour les débits moyens).

Silures

Quelque soit la classe de débit et la phase nyctémérale, les silures sont principalement localisés dans le panache d'eau échauffée simulé (Figure 48). Cependant un nombre non négligeable de localisations sont situées en rive gauche, non échauffée.

En conclusion, l'analyse cartographique des densités de localisation en fonction du débit et relativement au panache d'eau échauffée, confirme que seule l'espèce silure est majoritairement localisée en rive droite, et clairement dans le panache d'eau échauffée simulé. Ces localisations sont principalement situées à l'aval du rejet 4-5 et au niveau de la confluence du rejet 2-3. En revanche les barbeaux et les chevaines sont rarement localisés dans le panache d'eau échauffée simulé. Lorsque des localisations sont situées dans le panache, il s'agit surtout de l'aval du rejet 4-5 pour le chevaine et de la confluence du rejet 2-3 pour le barbeau.

Enfin, une dernière analyse a permis de confirmer un possible évitement du panache d'eau échauffée par le barbeau et le chevaine. Cette analyse s'intéressait aux trajectoires continues (seqcont) des barbeaux et des chevaines qui ont au moins une localisation dans le panache, et son objectif était d'évaluer le temps passé (à partir du nombre de localisations recensées) dans le panache pendant chacune des seqconts recensée.

Globalement les résultats montrent que certains barbeaux pouvaient passer plusieurs heures sur une journée dans le panache (jusqu'à 9h), mais que cette situation est extrêmement rare puisque pour 95% des 472 trajectoires étudiées les barbeaux restaient moins de 2h dans le panache (soit entre 100% et 1% de la durée des seqcont). Le nombre de seqconts par jour et par individu variait de 1 à 22 et le nombre de jours total sur l'ensemble du suivi pendant lesquels un individu a été localisé au moins une fois dans le panache variait de 1 à 29 (le nombre de jours total de localisation par individu variait de 1 à 88 ; Tableau III). Pour seulement deux barbeaux (sur 23 au total) ce nombre de jour avec au moins une localisation dans le panache était supérieur à 20, pour 4 autres le nombre de jours était compris entre 10 et 20.

Pour le chevaine 96% des 571 trajectoires recensées, compte moins d'une heure de localisation dans le panache (soit entre 100% et 1% de la durée des seqcont). Le nombre de seqconts par jour variait de 1 à 16 et le nombre de jours total sur l'ensemble du suivi pendant lesquels un individu a été localisé au moins une fois dans le panache variait de 1 à 33 (le nombre de jours total de localisation par individu variait de 1 à 82 ; Tableau III). Pour seulement quatre individus (sur 19 au total) ce nombre de jour avec au moins une localisation

dans le panache était supérieur à 20, pour 4 autres le nombre de jours était compris entre 10 et 20.

Les barbeaux et les chevaines utilisent régulièrement des habitats dans le panache d'eau échauffée, mais ces utilisations sont très courtes et très peu nombreuses. Ce faible nombre de localisations dans le panache d'eau échauffée concerne cependant 19 barbeaux sur 23 suivis, et 18 chevaines sur 19 suivis, ce qui signifie que presque tous les individus marqués sont passé au moins une fois dans le panache d'eau échauffée.

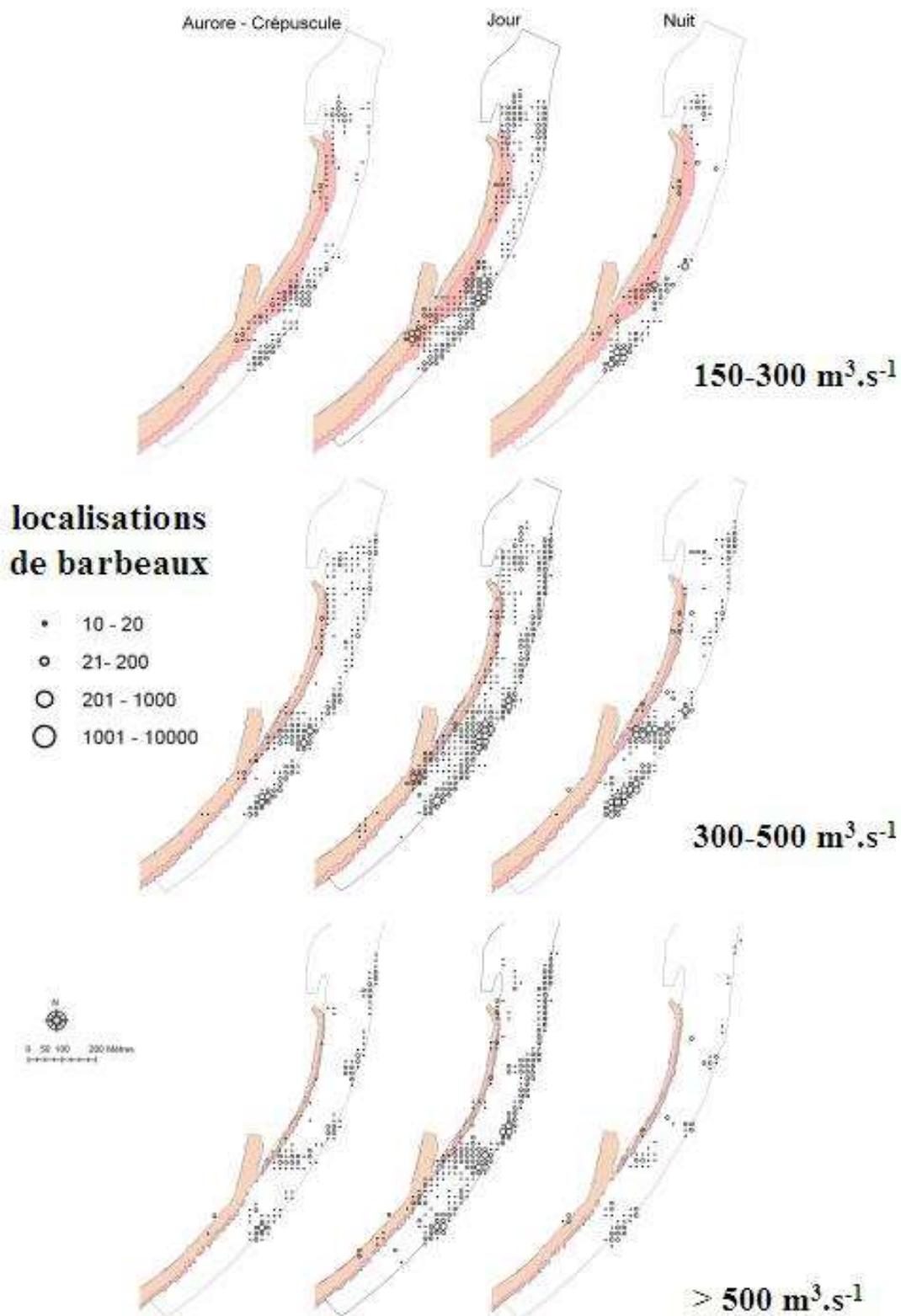


Figure 46 : Densités de localisations (réparties sur la grille à 20 m) des barbeaux sur le site d'étude pour trois classes de débit. Les limites du panache d'eau échauffées simulées pour chaque borne des classes de débit sont représentées en rose sombre pour la borne inférieure et en rose claire pour la borne supérieure. Pour chaque classe de débit, les densités de localisation sont réparties en fonction des phases nyctémérales.

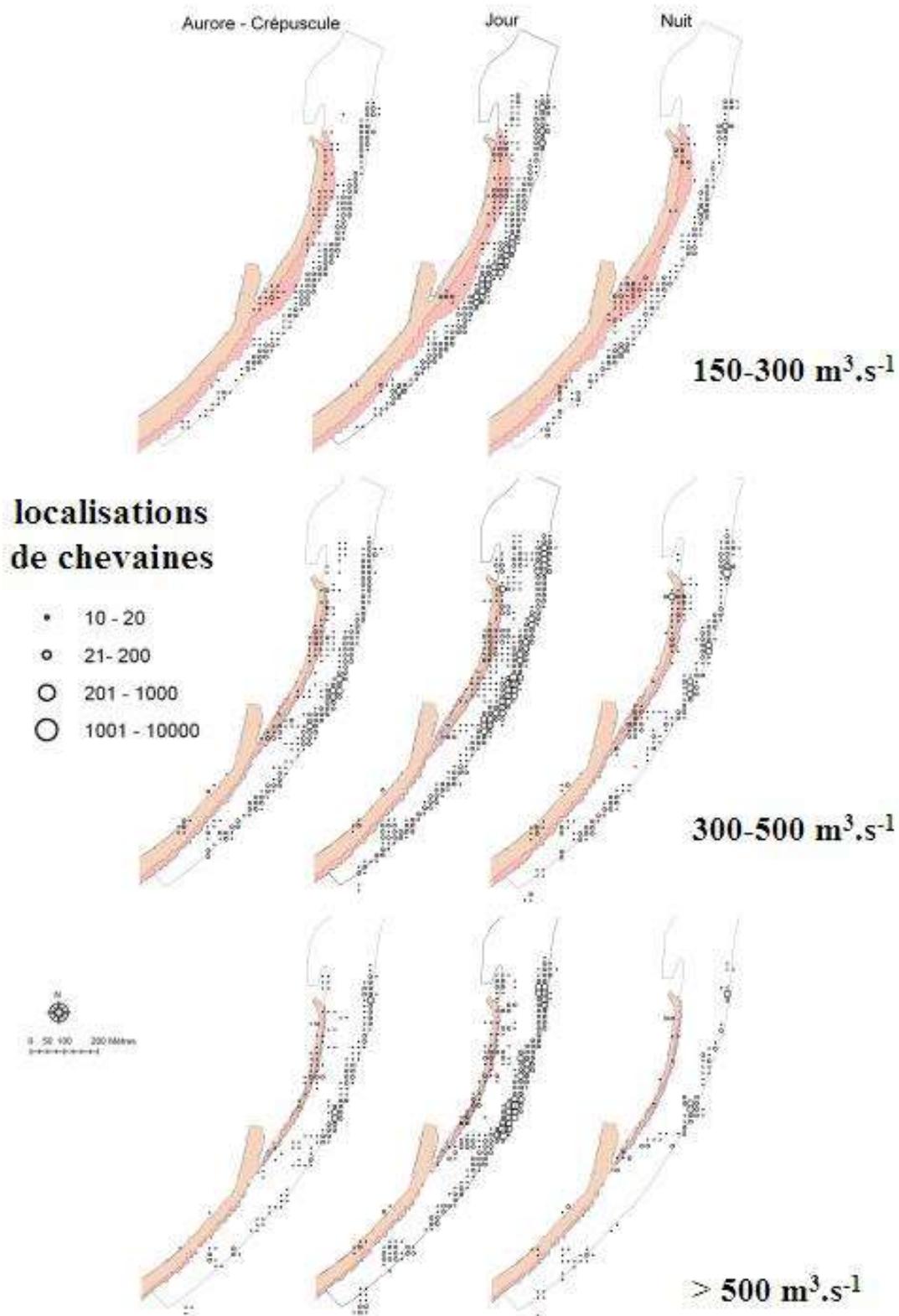


Figure 47 : Densités de localisations (réparties sur la grille à 20 m) des chevaines sur le site d'étude pour trois classes de débit. Les limites du panache d'eau échauffées simulées pour chaque borne des classes de débit sont représentées en rose sombre pour la borne inférieure et en rose claire pour la borne supérieure. Pour chaque classe de débit, les densités de localisation sont réparties en fonction des phases nyctémérales.

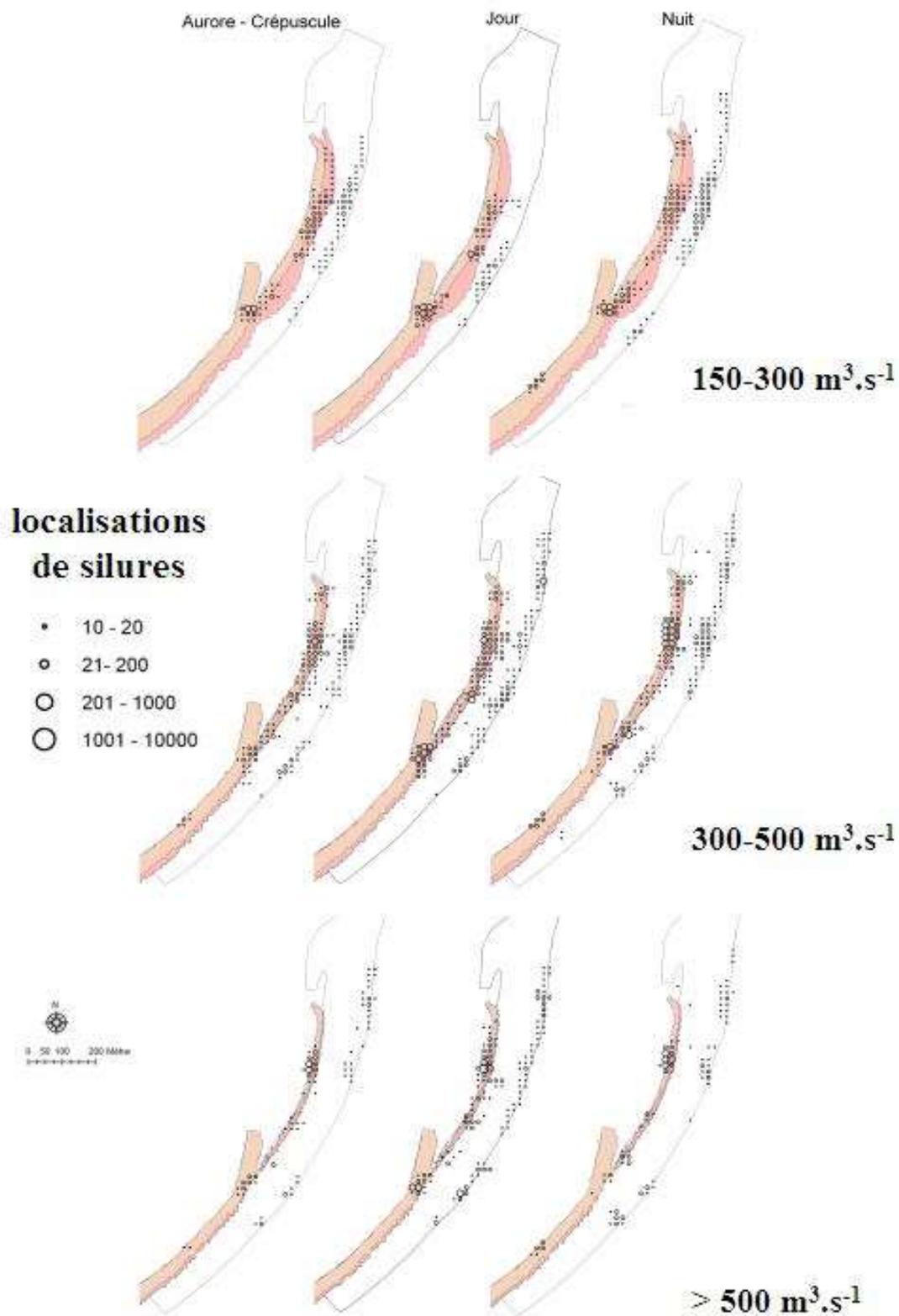


Figure 48 : Densités de localisations (réparties sur la grille à 20 m) des silures sur le site d'étude pour trois classes de débit. Les limites du panache d'eau échauffées simulées pour chaque borne des classes de débit sont représentées en rose sombre pour la borne inférieure et en rose claire pour la borne supérieure. Pour chaque classe de débit, les densités de localisation sont réparties en fonction des phases nyctémérales.

Pour mieux évaluer le probable rôle de la température dans la faible utilisation des habitats échauffés de la rive droite pour le barbeau et le chevaine nous avons comparé les disponibilités en habitat hydraulique (profondeur * vitesse), en fonction du débit, entre la surface concernée par le panache d'eau échauffée et une surface équivalente en rive gauche (non échauffée). Cette comparaison a montré que :

- à $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ la disponibilité en H1&2-V1&2 est supérieure en rive droite dans le panache (34%) par rapport à la rive gauche (26%) ; les vitesses fortes ($> 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) sont plus abondantes en rive droite (20%, contre 2% en rive gauche) et les profondeurs fortes ($> 2.2 \text{ m}$) sont plus abondantes en rive gauche (36%, contre 11% en rive droite) ;
- ces différences s'estompent lorsque le débit augmente du fait de l'homogénéisation des conditions hydrauliques dans le secteur d'étude, mais signalons que les proportions de H1&2-V1&2 restent toujours supérieures dans le panache d'eau échauffée par rapport à la rive gauche.

Les conditions hydrodynamiques principalement sélectionnées par les poissons (vitesse et profondeur faibles ; cf. Tableau V et Tableau VII) sont disponibles en rive droite dans le panache mais sont très peu utilisées.

Repérage d'habitats utilisés par plusieurs individus de la même espèce

Des cartographies montrent pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères, pour une espèce donnée, qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents. Ces cartes permettent de repérer et de quantifier les habitats utilisés par plusieurs congénères au cours du suivi.

Barbeaux

A l'aurore/crépuscule beaucoup de carreaux 1-2 et 3-4 individus sont répartis sur le sites d'étude, et des carreaux avec plus de 5 individus différents localisés au cours du suivi sont présents (1) en amont en rive gauche (le long de la berge), dans le chenal et en rive droite (pas le long de la berge), (2) en aval autour du banc de galets et à la confluence du rejet 2-3 (Figure 52). Le jour, la répartition spatiale des carreaux dans lesquels au moins 5 individus ont été localisés est voisine de celle de l'aurore / crépuscule, un peu plus étalée spatialement et ils sont nettement plus nombreux. Enfin la nuit très peu de carreaux sont utilisés sur l'ensemble du suivi par 5 congénères ou plus.

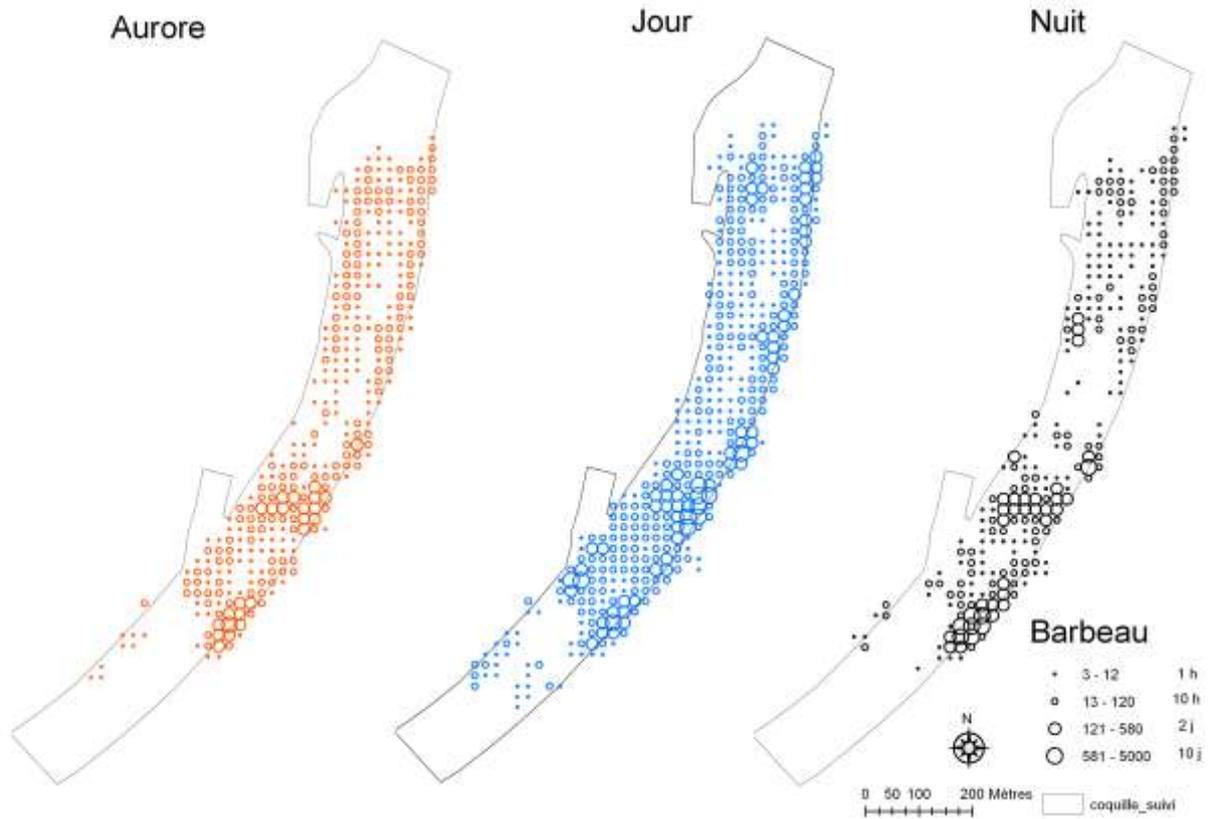


Figure 49 : Nombre de localisations pour le barbeau dans chaque carreau de la grille à 20 m pour l'ensemble du suivi et par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis). Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ; [12-120] ; [120-580] ; [580-5000]).

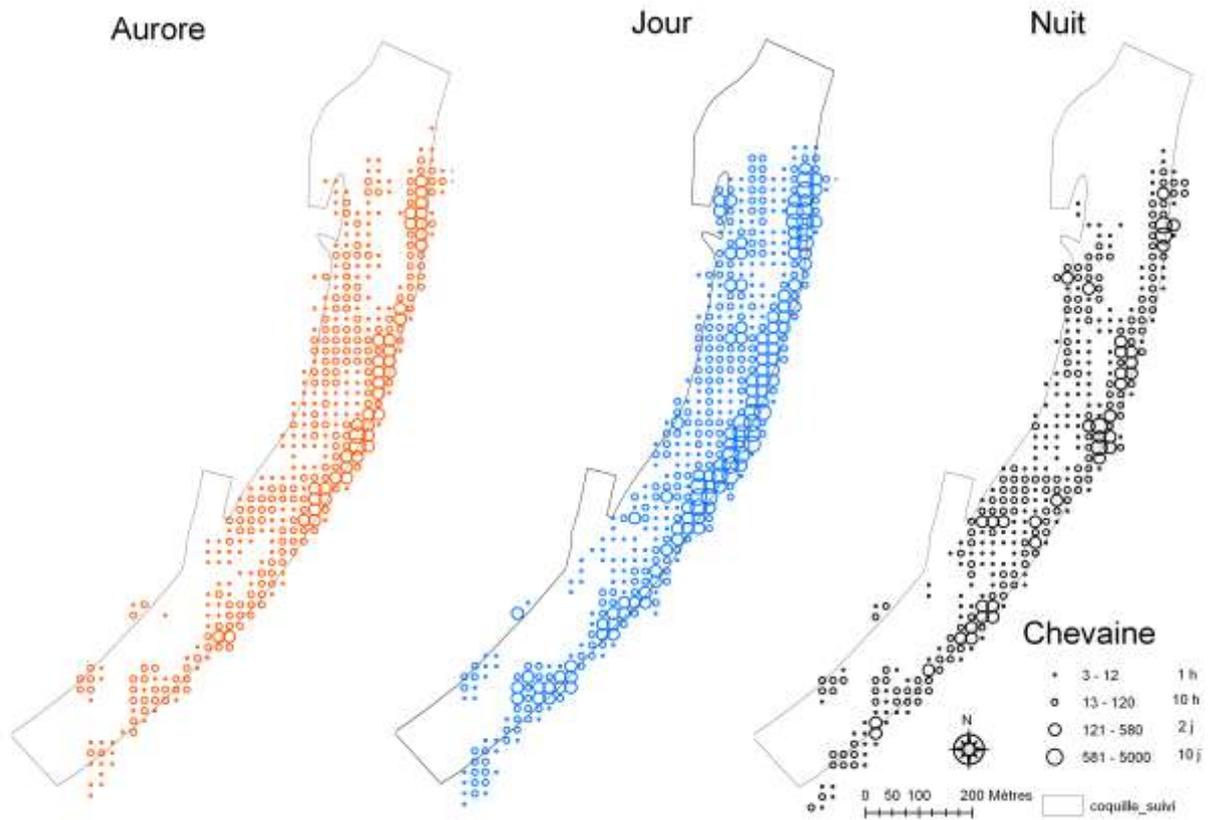


Figure 50 : Nombre de localisations pour le chevaie dans chaque carreau de la grille à 20 m pour l'ensemble du suivi et par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis). Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ; [12-120] ; [120-580] ; [580-5000]).

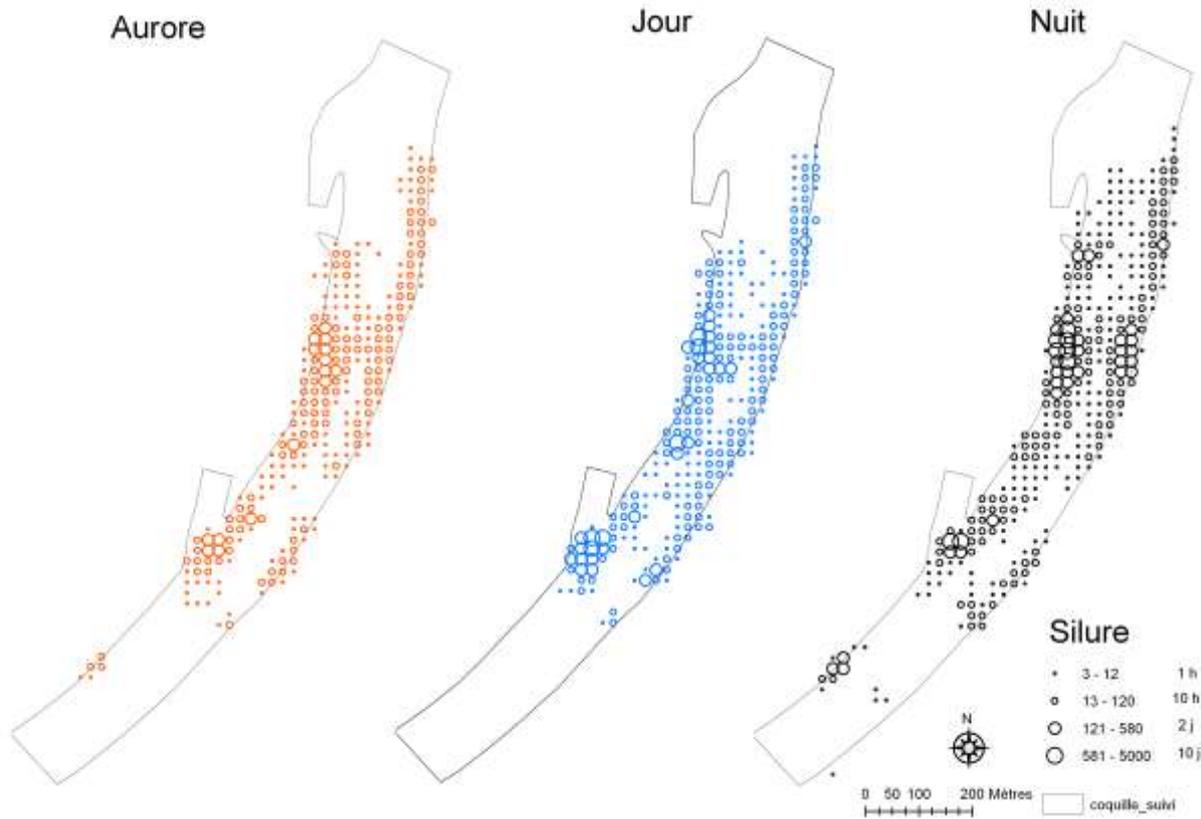


Figure 51 : Nombre de localisations pour le silure dans chaque carreau de la grille à 20 m pour l'ensemble du suivi et par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis). Cette densité de localisations est réparties en 4 classes de densité ([3-12] ; [12-120] ; [120-580] ; [580-5000]).

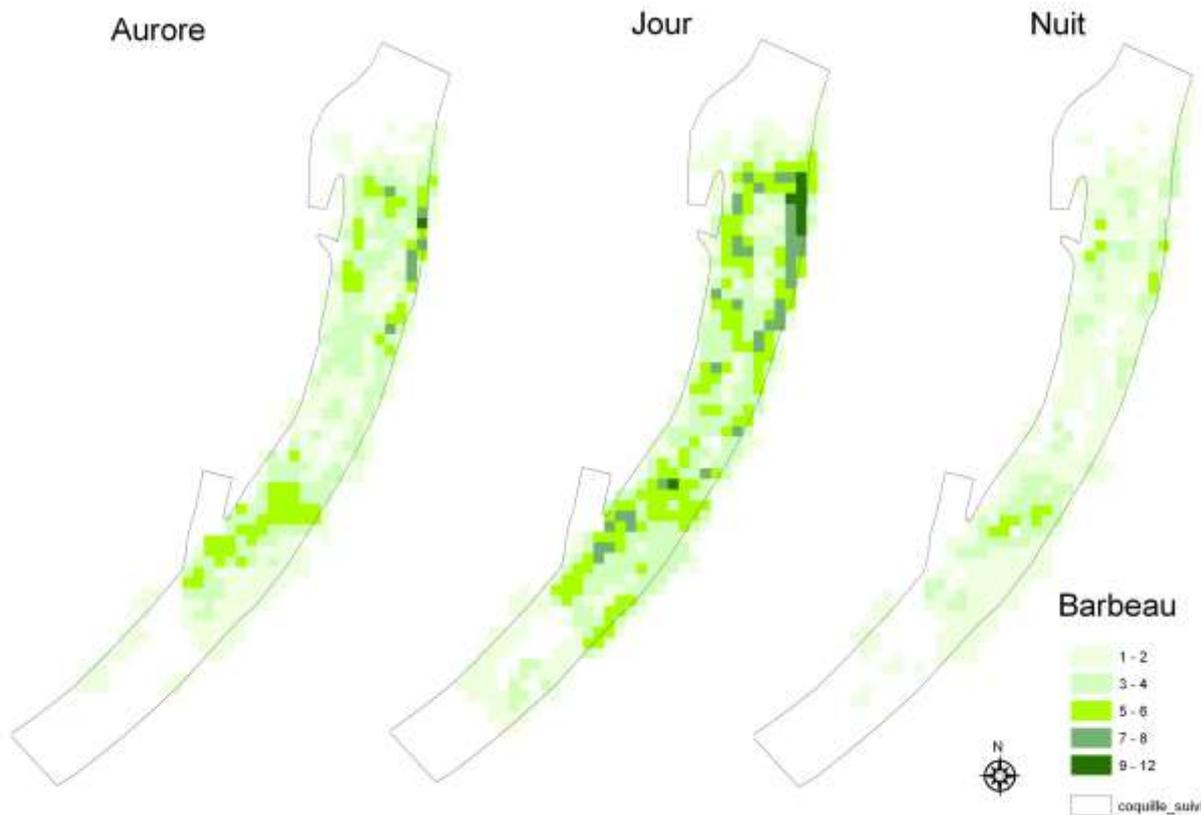


Figure 52 : Cartographies montrant pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères de barbeau qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis) et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents.

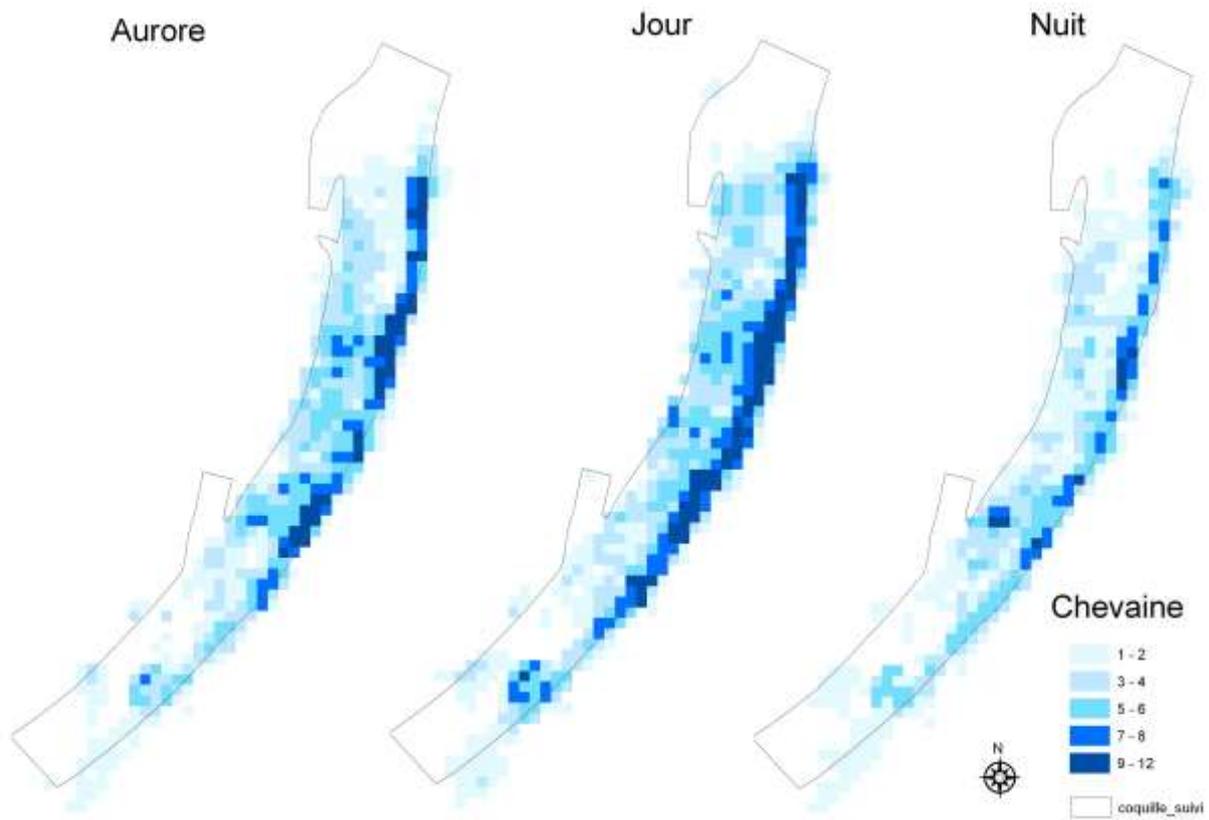


Figure 53 : Cartographies montrant pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères de chevaine qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis) et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents.

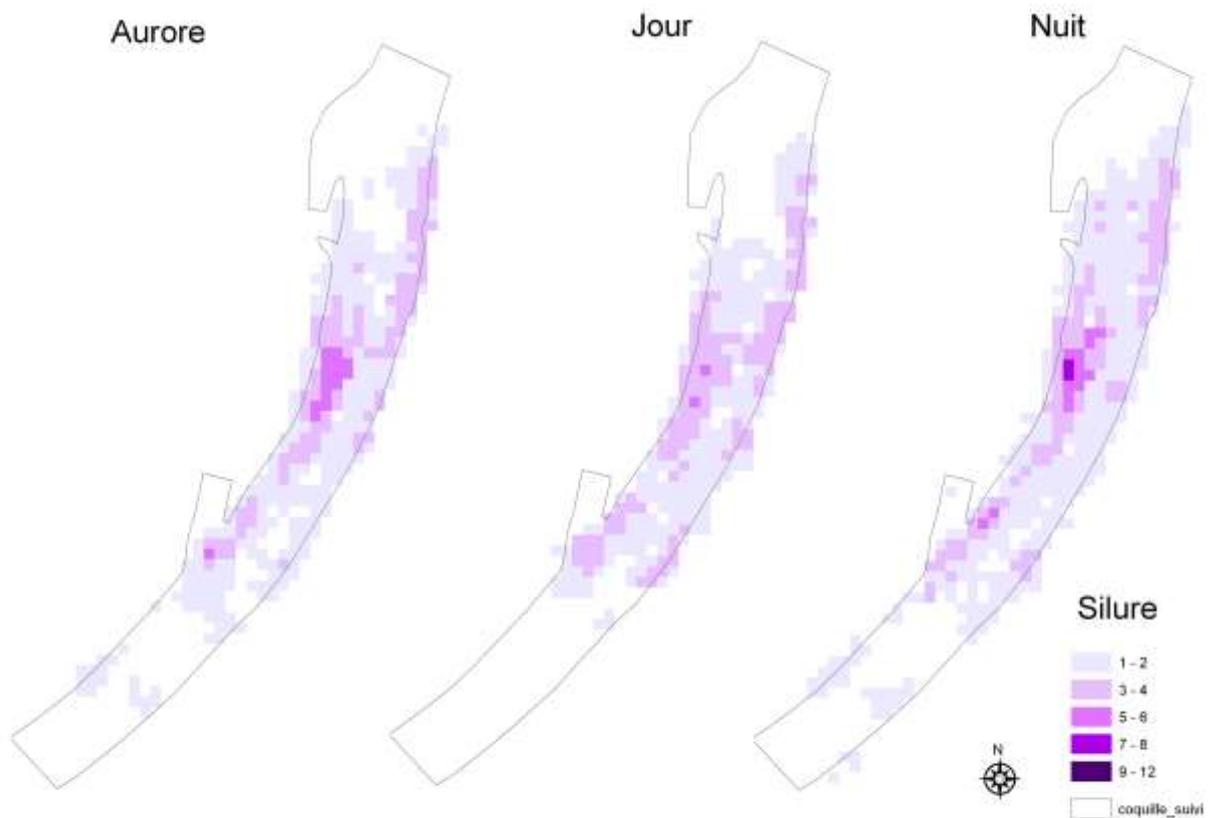


Figure 54 : Cartographies montrant pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre de congénères de silure qui ont été localisés dans ce carreau par phase nyctémérale (aurore et crépuscule sont réunis) et sur l'ensemble du suivi. Le nombre de congénères est réparti en 5 classes : 1-2 ; 3-4 ; 5-6 ; 7-8 et >8 individus différents.

Donc plusieurs barbeaux utilisent principalement l'amont du site d'étude en rive gauche et en rive droite (entre prise d'eau et rejet 4-5), le banc de galets et sa périphérie et la sortie du rejet 2-3, le jour et lors des changements de luminosité. En revanche la nuit les barbeaux utilisent des habitats nettement moins recouvrant.

Chevaines

Pour le chevaine c'est surtout en rive gauche que les carreaux ont été utilisés par 7 congénères et plus, et ce sur toute la longueur du site étudié (Figure 53). Ce résultat est très net le jour, à l'aurore/crépuscule, et légèrement moins dense la nuit. Il y a également quelques carreaux utilisés par 7 congénères et plus autour du banc de galets ou au centre du chenal.

Donc les chevaines colonisent fortement la rive gauche avec un très fort chevauchement des localisations des différents individus suivis, principalement le jour et lors des changements de luminosité.

Silures

Les seuls carreaux utilisés par 7 congénères et plus sont localisés le long de la rive droite, avec un spot assez intense entre les deux rejets (aurore/crépuscule et nuit), mais également le long de la partie amont de la rive gauche, ainsi qu'un petit spot dans la partie aval de la rive gauche en face du rejet 2-3 (Figure 54).

Donc les carreaux les plus utilisés par les différents silures sont majoritairement en rive droite, mais il y en a un nombre non négligeable en rive gauche, notamment sur la moitié amont du site d'étude. A l'inverse du barbeau et du chevaine, la carte avec les plus forte densité de recouvrement des localisations est celle de la nuit, suivie de la carte aurore/crépuscule.

Répartition spatiale individuelle

Pour mieux appréhender la répartition spatiale des localisations disponibles, nous avons réalisé pour chaque individu des cartographies représentant l'ensemble de ses localisations, pour l'ensemble du suivi et pour différentes phases. Nous avons distingué dans un premier temps les quatre phases nyctémérales et ensuite les trois phases de débit.

Il n'est pas possible de savoir sur ces cartographies si l'intensité de détection de l'individu était homogène entre toutes les phases d'une journée. En revanche l'histogramme inséré sur le graphe rappelle le nombre de localisations par phase et par jour de suivi pour l'individu étudié. Un exemple de ces cartographies est donné pour les localisations du barbeau 3100 pour chacune des 4 phases nyctémérales (Figure 55).

Sur 23 barbeaux localisés : 13 ont très peu de localisations (3022, 3191, 3233, 3520, 3555, 3569, 3583, 3597, 3611, 3646, 3688, 3814, 3884), 5 ont peu de localisations (3051, 3317, 3576, 3674, 3828), et 5 ont été correctement suivis (3100, 3128, 3156, 3170, 3744).

Sur 19 chevaines localisés : 5 ont très peu de localisations (3079, 3226, 3303, 3625, 3639), 7 ont peu de localisations (3121, 3394, 3408, 3422, 3506, 3562, 3590), et 7 ont été correctement suivis (3183, 3212, 3240, 3352, 3464, 3730, 3758).

Sur 11 silures localisés : 3 ont très peu de localisations (3387, 3415, 3429), 2 ont peu de localisations (3772, 3800), et 6 ont été correctement suivis (3632, 3786, 3835, 3849, 3856, 3870).

Répartition des localisations des poissons au cours des phases nycthémérales
(aurore, jour, crépuscule, nuit)

Globalement les individus ne sont pas localisés uniformément dans l'ensemble du site, mais plutôt dans quelques zones définies comme des spots. Ces spots sont reconnaissables, pour un individu, quelque soit la phase nycthémérale, par des densités de localisations plus ou moins importantes. Les spots ne sont pas les mêmes d'un individu à l'autre, mais certains sont communs à plusieurs individus. Il y a évidemment moins de localisations pendant l'aurore et le crépuscule du fait des durées plus courtes de ces deux phases. Nous présentons maintenant les analyses des cartographies des individus les mieux localisés.

Barbeaux

3100

Ce barbeau occupe majoritairement 2 spots : un entre le banc de galets et la rive gauche (plus un peu la rive droite en face) et un spot en amont du site en rive gauche. Cependant, quelques localisations sont faites dans le chenal le long du rejet principal (aurore et nuit) et en amont rive droite. Les fortes densités de localisations sont en berge. Les localisations du jour sont plus éparées que celles de la nuit, avec des localisations dans le chenal. Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées.

3128

Ce barbeau occupe majoritairement 1 spot : autour du banc de galets. Ce poisson n'utilise pas majoritairement les berges. Les localisations du jour sont plus éparées que celles de la nuit, avec des localisations dans le chenal, et en aval du rejet 2-3. Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées.

3156

Ce barbeau occupe majoritairement 1 spot : autour du banc de galets, et se trouve souvent entre le banc de galet et la prise d'eau, plutôt du côté de la rive droite, mais sans doute à l'extérieur du panache du rejet 4-5. Les localisations sont très rarement en berge. Les localisations du jour sont plus éparées que celles de la nuit, avec des localisations plutôt dans le chenal, et même à l'aval du rejet 2-3. Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées.

3170

Ce barbeau colonise fortement la rive gauche et l'aval du banc de galets jusqu'à la sortie du rejet 2-3. Il y a des localisations également à la sortie du rejet 4-5. Les spots principaux sont majoritairement en berge. Les localisations sont nettement plus diffuses le jour par rapport à la nuit. Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées.

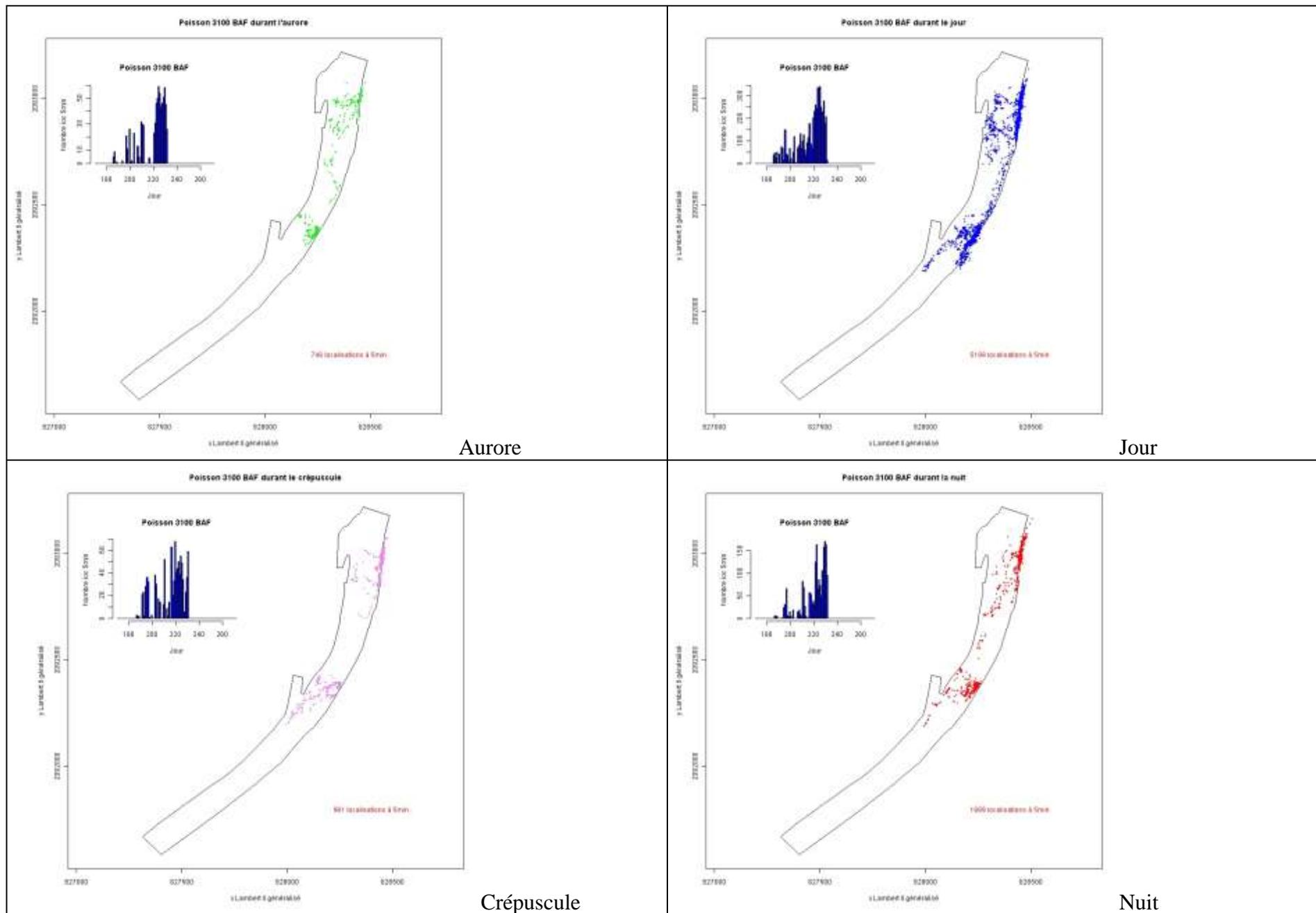


Figure 55 : Distribution du nombre de localisations du barbeau 3100 par jour de suivi (histogrammes bleus) et visualisation de leur répartition spatiale par phase nyctémérale (cartes)..

3744

Ce barbeau colonise fortement la rive gauche en face de la sortie du rejet 2-3. Il est aussi localisé le long de la rive gauche entre son spot principal et l'amont du site (surtout aurore et jour), et dans le chenal entre l'aval du banc de galet et la sortie du rejet 2-3. Le spot principal est très nettement en berge. Les localisations sont nettement plus diffuses le jour par rapport à la nuit. Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées (peu).

Pour la plupart des barbeaux, les localisations sont plus diffuses le jour et plus concentrées autour des spots la nuit. La majorité des spots les plus importants sont répartis le long de la rive gauche, sans qu'une importante superposition ne soit observée. Il y a souvent des localisations qui laissent penser à des traversées du chenal.

Chevaines

3183

Plusieurs spots sont nettement en rive gauche (de l'aval rejet 2-3 à l'amont du site) ; Il y a cependant quelques localisations en rive droite entre les deux rejets. La nuit les localisations sont plus concentrées (2 spots en RG : amont site ; aval rejet 2-3). Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées (peu).

3212

Les localisations sont centrées entre les deux rejets, principalement en rive gauche mais aussi dans le chenal et en rive droite (surtout aurore et jour). Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées (peu, mais utilisent toute la largeur).

3240

Les localisations sont majoritairement en rive gauche, sur toute la rive entre l'amont et l'aval ; quelques localisations sont dans le chenal le jour et au crépuscule (entre les deux rejets), et la nuit (banc de galets). Ce poisson est localisé sur toute la rive gauche l'aurore et le jour mais au crépuscule et la nuit, majoritairement sur la moitié amont de la rive gauche.

3352

un peu comme 3212 : les localisations sont globalement entre les deux rejets, principalement en rive gauche, mais un spot est situé en rive droite à l'aval du rejet 4-5 pour l'aurore et le jour ; il y a un peu de localisations autour du banc de galets la nuit. Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées.

3730

Les localisations sont majoritairement en rive gauche, réparties de l'amont à l'aval. La journée, pratiquement de l'amont à l'aval, et 3 spots principaux pour les autres phases. Quelques localisations sont dans le chenal (amont et vers le banc de galets), et en rive droite entre rejet 4-5 et la pointe de la prise d'eau.

3758

Les localisations sont majoritairement en rive gauche, réparties de l'amont à l'aval. La journée, pratiquement de l'amont à l'aval. Quelques localisations sont dans le chenal (amont le jour), et en rive droite juste en amont du rejet 2-3.

Pour les chevaines, on observe qu'au crépuscule et surtout la nuit, les localisations sont plus concentrées. Le jour il y a souvent beaucoup de localisations, et pour l'ensemble des

chevaines bien suivies il y a une forte répartition des localisations le long de la rive gauche. Il y a aussi des localisations, dans une moindre abondance, dans le chenal ou en rive droite, en amont et autour du rejet 2-3 et du banc de galets. Il semble y avoir plus de chevauchement entre les localisations des différentes chevaines qu'entre celles des différents barbeaux. Enfin comme pour les barbeaux des traversées semblent se dessiner à cette échelle d'observation.

Silures

3632

On observe 3 spots principaux, sortie du rejet 2-3, en face en rive gauche et à l'aval du rejet 2-3 en rive droite (sauf le jour) et un petit spot en rive gauche en aval du spot en face du rejet 2-3. Les localisations sont plus diffuses au crépuscule et la nuit.

3786

Les localisations sont majoritairement en rive gauche. On observe 3 spots distincts en rive gauche : un en amont (surtout la nuit), un en amont de l'échelle limnimétrique CNR (pk=44.5), et deux moins denses vers l'aval (surtout le jour et à l'aurore). Quelques localisations sont situées vers le banc de galet (le jour) ou en rive droite en face de l'échelle limnimétrique CNR (pk=44.5).

3835

Ce silure est majoritairement localisé dans un seul spot, quelle que soit la phase : entre les deux rejets en rive droite.

3849

On observe 2 petits spots : entre rive droite et banc de galets et en rive gauche à la même hauteur.

3856

On observe 2 spots principaux quelle que soit la phase : 1 à la sortie du rejet 2-3 (et un peu en amont) et une bande le long de la rive gauche entre l'amont et le rejet 2-3. Il y a aussi quelques localisations dans le chenal, surtout la nuit.

3870

On observe une répartition majoritaire des localisations en rive droite entre le rejet 4-5 et la sortie du rejet 2-3 ; il y a aussi une bande de localisations en amont et en rive gauche (sauf à l'aurore). Il y a quelques localisations alignées qui laissent penser à des traversées.

Les localisations des silures semblent plus concentrées que celles des deux autres espèces. Si la majorité d'entre elles sont situées en rive droite, beaucoup sont situées en rive gauche. Il y a aussi pour cette espèce des localisations qui laissent penser que certains individus traversent le chenal de manière assez directe.

Répartition des localisations des poissons au cours des phases de débit
(montée, descente, stable)

Ici nous étudions les mêmes données (localisations par individu pour les individus les mieux suivis par espèce), mais nous recherchons si pendant chacune des trois phases de débit (montée, descente et stable) les localisations se répartissent différemment.

Barbeaux

La répartition des localisations vue à travers les trois phases de débit sont légèrement différentes des répartitions dans les quatre phases nyctémérales. Les principales différences entre les trois phases de débit sont qu'il y a plus de localisations éparpillées (en plus des spots) et qu'il y a plus de localisations dans le chenal quand le débit est stable et dans une moindre mesure quand le débit augmente.

Chevaines

Un peu comme pour les barbeaux, lorsque le débit est stable il semble y avoir plus de localisations éparpillées, et plus dans le chenal. En revanche en fonction des individus c'est quand le débit augmente (3758, 3352, 3183) ou diminue (3730, 3240, 3212) qu'il y a aussi plus de localisations éparpillées. Il semble y avoir moins d'hétérogénéité dans la répartition des localisations entre les phases de débit qu'entre les phases nyctémérales.

Silures

Pour les silures les localisations sont plus abondantes et plus éparpillées quand le débit diminue et/ou quand il est stable.

Globalement les spots des localisations individuelles ne sont pas redistribués lorsque les localisations sont regroupées par phase de débit. En revanche il semble que lorsque le débit demeure stable il y ait plus de localisations éparpillées, et notamment dans le chenal. Selon les espèces et les individus c'est plutôt lorsque le débit monte (barbeau, chevaine, silure) ou descend (chevaine) que les localisations sont les plus regroupées.

Utilisation conjointe de l'habitat

Descriptif par individu avec superposition des individus principaux

L'analyse précédente peut être retranscrite sur un seul graphe, en superposant les localisations des individus les mieux localisés pour une même espèce (barbeau n=5, chevaine n=7 et silure n=6). Pour ce faire il est obligatoire de trouver un seuil du nombre de localisations à représenter pour ne pas saturer la carte. Pour cela nous avons utilisé la grille de carreaux de 20 m de côté. Dans chaque carreaux de cette grille nous avons calculé le nombre de localisations par poisson. Ainsi une représentation de ce nombre de points peut être faite avec un cercle de taille proportionnelle au nombre de localisations. Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.

Une carte a été établie pour chaque phase nyctémérale par espèce.

Barbeaux (Figure 56)

A l'aurore et au crépuscule les spots des 5 barbeaux les mieux localisés sont répartis le long de la rive gauche et autour du banc de galets, avec peu de chevauchement des spots. Les barbeaux 3170 (aurore et crépuscule) et 3100 (crépuscule) utilisent plusieurs spots très distincts pendant ces deux phases.

Le jour les spots des 5 barbeaux les mieux localisés sont beaucoup plus étendus spatialement alors qu'ils sont significativement plus concentrés la nuit. Le jour comme la nuit, les spots des 5 individus restent quand même nettement distincts les uns des autres (peu de chevauchement si ce n'est autour du banc de galets et dans le rejet 2-3)

La répartition des 5 barbeaux les mieux suivis montre un faible chevauchement des localisations individuelles, notamment en rive gauche.. Les seuls spots où des localisations des cinq individus sont superposées sont le banc de galets et le rejet 2-3, le jour uniquement.

Chevaines (Figure 57)

Les spots des 7 chevaines les mieux localisés sont répartis exclusivement le long de la rive gauche à l'aurore et au crépuscule, excepté des petits spots pour 3212, 3352 et 3730 en rive droite.

Le jour les spots sont encore très majoritairement localisés en rive gauche, mais tous les individus ont un ou plusieurs spots entre le banc de galet et la pointe de la prise d'eau, plutôt en rive droite mais pas le long de la berge. Les spots sont assez diffus le jour.

Les spots des chevaines la nuit sont plus concentrés et se répartissent majoritairement en rive gauche, mais comme pour le jour, tous les individus ont des spots en rive droite. A la différence du jour les spots de la rive droite sont plus proches de la berge.

Silures (Figure 58)

Les spots des 6 silures les mieux localisés sont assez bien individualisés quelque soit la phase nyctémérale considérée. Les spots sont majoritairement en rive droite à l'aurore et au crépuscule (5 individus sur 6) excepté 3786 dont les spots sont uniquement en rive gauche.

Le jour les spots sont plus étalés aussi bien en rive droite (5 individus) qu'en rive gauche (6 individus).

La nuit on retrouve un peu la répartition des spots observée le jour, mais les spots sont un peu plus concentrés, et moins chevauchant, comme à l'aurore et au crépuscule, excepté au niveau du rejet 2-3 (4 individus).

Le silure 3835 est extrêmement sédentaire (en rive droite entre les deux rejets). Le silure 3786 est quant à lui moins sédentaire mais utilise uniquement la rive gauche.

Nous avons encerclé les spots de localisations des 6 silures les plus localisés, pour chaque phase nyctémérale, et reporté ces cercles sur les cartographies des barbeaux (Figure 59) et des chevaines. Nous observons très clairement, pour chaque phase nyctémérale, que l'ensemble des localisations des barbeaux sont majoritairement en dehors des cercles des localisations des silures, excepté le jour en rive gauche et dans le rejet 2-3. Les spots de localisations des chevaines sont plus chevauchant avec ceux des silures le jour et la nuit et moins chevauchant à l'aurore ou au crépuscule.

Caractérisation des habitats les plus utilisés

Nous avons analysé les hydrosignatures de disponibilité en profondeur, vitesse et température des habitats très fréquemment utilisés par les poissons suivis en comparaison avec les habitats non utilisés. Les habitats fréquemment utilisés sont ceux issus des cartographies des densités de localisations par individu les mieux suivis pour chaque espèce (Figure 56 à Figure 58). Ils sont délimités puis regroupés en un polygone dit utilisé. Le reste de la surface du secteur d'étude est dit non-utilisé. Pour chacune de ces sous-parties du secteur d'étude (utilisée et non-utilisée) nous avons construit les hydrosignatures de disponibilité (pourcentage de représentation de chaque classe ; la somme totale de l'hydrosignature = 100% de la surface étudiée) en habitat pour les couples de variables profondeur*vitesse, profondeur*température et vitesse*température. La construction des hydrosignatures a été faite pour 4 valeurs de débit transitant dans le site d'étude : 150, 300, 500 et 700 m³.s⁻¹. Nous avons donc représenté, par l'intermédiaire d'hydrosignatures, les conditions hydrauliques et thermiques disponibles pour 4 débits différents dans les habitats densément utilisés par les trois espèces principales de notre étude et dans les habitats non utilisés.

Les résultats principaux de la comparaison de ces hydrosignatures sont :

- profondeur * vitesse :
 - à 150 m³.s⁻¹ les conditions de faible vitesse et faible profondeur (H1&2-V1&2) sont nettement majoritaires pour les trois espèces dans les habitats utilisés (47% pour le barbeau, 52% pour la chevaine et 46% pour le silure) par rapport aux habitats non utilisés. (respectivement 27%, 22% et 27%). Ce constat est encore valable pour les faibles vitesses (V1&2) et forte profondeurs (H7). A bas débit, ce sont donc principalement les vitesses qui sont plus fortes dans les habitats non utilisés.
 - pour les débits supérieurs ou égaux à 300 m³.s⁻¹ les hydrosignatures sont très comparables, pour les trois espèces, entre les habitat utilisés et non utilisés.

- profondeur * température :
 - à bas débit, pour les barbeaux et les chevaines, les faibles profondeurs (H1&2) sont plus disponibles dans les faibles températures (T1&2) pour les habitats utilisés (respectivement 42% et 49%) que dans les habitats non utilisés (respectivement 25% et 20%) ; ces faibles profondeurs (H1&2) sont en revanche plus abondantes dans les fortes températures (T6&7) pour les habitats non utilisés (respectivement 16% et 18%) par rapport aux habitats utilisés (respectivement 3% et 1%). Pour le silure ces proportions sont plus équilibrées.
 - à bas débit, dans les habitats utilisés, 5% de la disponibilité est caractérisée par une température au delà de 23°C contre 30% dans les habitats non utilisés pour le barbeau ; dans les habitats utilisés, 2% de la disponibilité est caractérisée par une température au delà de 23°C (0% au delà de 25°C) contre 35% dans les

habitats non utilisés pour le chevaine ; dans les habitats utilisés, 22% de la disponibilité est caractérisée par une température au delà de 23°C contre 27% dans les habitats non utilisés pour le silure.

- pour les débits plus forts cette différence de disponibilité dans les températures au delà de 23°C entre les habitats utilisés et non utilisés se maintient pour les cyprinidés ;
 - le silure utilise des habitats qui ont des hydrosignatures de disponibilité profondeur * température assez proches des habitats non utilisés, et ce quelque soit le débit
- vitesse * température :
- pour les barbeaux et les chevaines les habitats utilisés se caractérisent par une disponibilité en vitesses faibles supérieure à ce qui est disponible dans les habitats non utilisés, et ce quelque soit le débit ;
 - au delà de 23°C il y a très peu d'habitat disponible dans les habitats utilisés
 - les chevaines évitent quasiment systématiquement les vitesses supérieures à 1 m.s⁻¹ et les fortes températures (> 25°C) ; les habitats utilisés par les chevaines se caractérisent par une disponibilité en V1&2 un peu plus importante encore que ceux utilisés par les barbeaux, et notamment à fort débit.
 - les silures utilisent des habitats caractérisés par des vitesses toujours < 1.4m.s⁻¹, quelque soit le débit ; Les distributions des vitesses dans les habitats utilisés se répartissent sur toute la gamme de température disponible et se caractérisent par des proportions de vitesses faibles plus élevées dans les habitats utilisés.

Les hydrosignatures de disponibilité des habitats utilisés et non utilisés en fonction du débit nous montrent que les conditions de faibles vitesses et de faibles profondeurs sont utilisées même à faible débit. Lorsque le débit augmente, les habitats utilisés deviennent plus « hydrauliquement » comparables à ceux non utilisés même si pour les chevaines les proportions d'habitats utilisés lents et peu profonds restent importantes. Les barbeaux et les chevaines utilisent très rarement des habitats avec des températures > 23°C, y compris pour des disponibilités en profondeur et en vitesse identiques à celles sélectionnées pour des températures plus fraîches. Les silures utilisent des habitats plutôt lents sur toute la gamme de température disponible, sans différence notable quant aux proportions des différentes classes de profondeur entre les habitats utilisés et non utilisés.

Analyse des cartographies des localisations conjointes et simultanées

Pour rendre sa dimension temporelle à la répartition spatiale des localisations nous avons établi des cartes d'utilisation conjointe et simultanée de l'habitat. L'habitat était discrétisé avec les carreaux de la grille à 20 m et le temps était discrétisé en heure de suivi. L'analyse a recensé, pour chaque carreau de la grille à 20 m le nombre d'heure du suivi pendant lesquelles plus de trois congénères étaient localisés dans ce carreau. Pour des raisons techniques ce recensement a été fait séparément pour chacun des trois mois de suivi (juillet, août et septembre). Enfin nous avons réalisé cette analyse pour chacune des quatre phases nyctémérales. Ainsi les résultats de cette analyse sont présentés sous forme de cartographies qui présentent par carreau de la grille à 20 m, pour un mois donné du suivi, pour une phase nyctémérale et pour une espèce donnée, le nombre d'heures pendant lesquelles au moins 3 congénères (non identifiés) étaient présents simultanément (à l'échelle de l'heure) dans ce carreau. A titre d'exemple, seules les cartographies pour le silure en juillet 2009 sont présentées Figure 60.

Barbeaux

Globalement peu d'heures dans peu de carreaux sont recensées pour le barbeau. Le plus grand nombre d'heures recensées par carreaux et le plus grand nombre de carreaux sont observés pour le mois d'août et dans une moindre mesure pour le mois de juillet.

En juillet les habitats utilisés conjointement sont surtout recensés le jour et dans la partie amont en rive gauche. Quelques carreaux, avec 1 à 5 heures recensées, se situent plus en aval le long de la rive gauche, mais aussi en amont dans le chenal, au niveau du banc de galet et à la confluence du rejet 2-3. Au crépuscule et surtout la nuit les barbeaux sont très rarement ensemble dans le même habitat pendant une heure donnée.

En août les habitats utilisés conjointement ont « glissé » et se sont concentrés en rive gauche face au rejet 2-3 à l'aurore et le jour (avec quelques carreaux autour du banc de galets et à la confluence du rejet 2-3) et autour du banc de galet au crépuscule et la nuit. Plus de 10 heures ont été recensées dans certains carreaux.

En septembre il n'y a que 4 carreaux au total pour lesquels 1 à 5 heures ont été recensées. La diminution du nombre d'individus localisables est sans doute à l'origine de ce résultat.

Chevaines

Il semble que pour la chevaine, plus de carreaux ont été recensés, surtout en août et juillet. En septembre seuls 6 carreaux au total, avec moins de 6h de recensées, sont identifiés toutes phases confondues.

L'utilisation conjointe de l'espace est surtout visible à l'aurore et le jour. Au crépuscule et plus nettement la nuit, très peu de carreaux ont été recensés.

Les carreaux comportant des localisations conjointes de chevaines (6h et plus) sont très majoritairement le long de la rive gauche et entre l'amont et le rejet 2-3.

Il y a aussi des carreaux avec 1 à 5 heures de présence commune de plus de 3 chevaines en rive gauche, mais aussi dans le chenal (partie amont du site) et en rive droite entre les deux rejets.

Globalement il y a très peu de carreaux pour lesquels des heures d'utilisation conjointe de l'habitat ont été recensées.

Silures

Pour les silures des carreaux avec plusieurs heures d'utilisation commune ont été recensés en juillet et août mais aussi un peu en septembre (différent en cela des barbeaux et chevaine)

En juillet les carreaux les plus denses en heures d'utilisation conjointe se situent principalement le long de la rive droite le jour (avec un spot important entre les deux rejets et à la confluence du rejet 2-3 ; Figure 60). Les deux spots observés le jour le sont aussi la nuit, mais avec un troisième spot recensé en rive gauche, en amont de la règle limnimétrique. Peu de carreaux sont recensés à l'aurore et au crépuscule.

En août, seuls les spots de la rive droite (entre les deux rejets) et de la confluence du rejet 2-3 sont encore détectés, quelque soit la phase nyctémérale, mais avec des nombres d'heures plus faible (< 5h), excepté la confluence du rejet 2-3 le jour (3 carreaux avec un nombre d'heures > 5).

En septembre, pour chaque phase nyctémérale il y a de 1 à 3 carreaux avec plus de 5 heures d'utilisation d'habitat conjointe qui ont été recensés. Il n'y a aucun autre carreau ailleurs dans le site d'étude, exceptés des carreaux avec moins de 5h en rive droite (entre les deux rejets) au crépuscule et la nuit.

Pour le silure il y a également très peu de carreaux avec un grand nombre d'heures d'utilisation conjointe de l'habitat, quelque soit la phase nyctémérale et le mois étudiés.

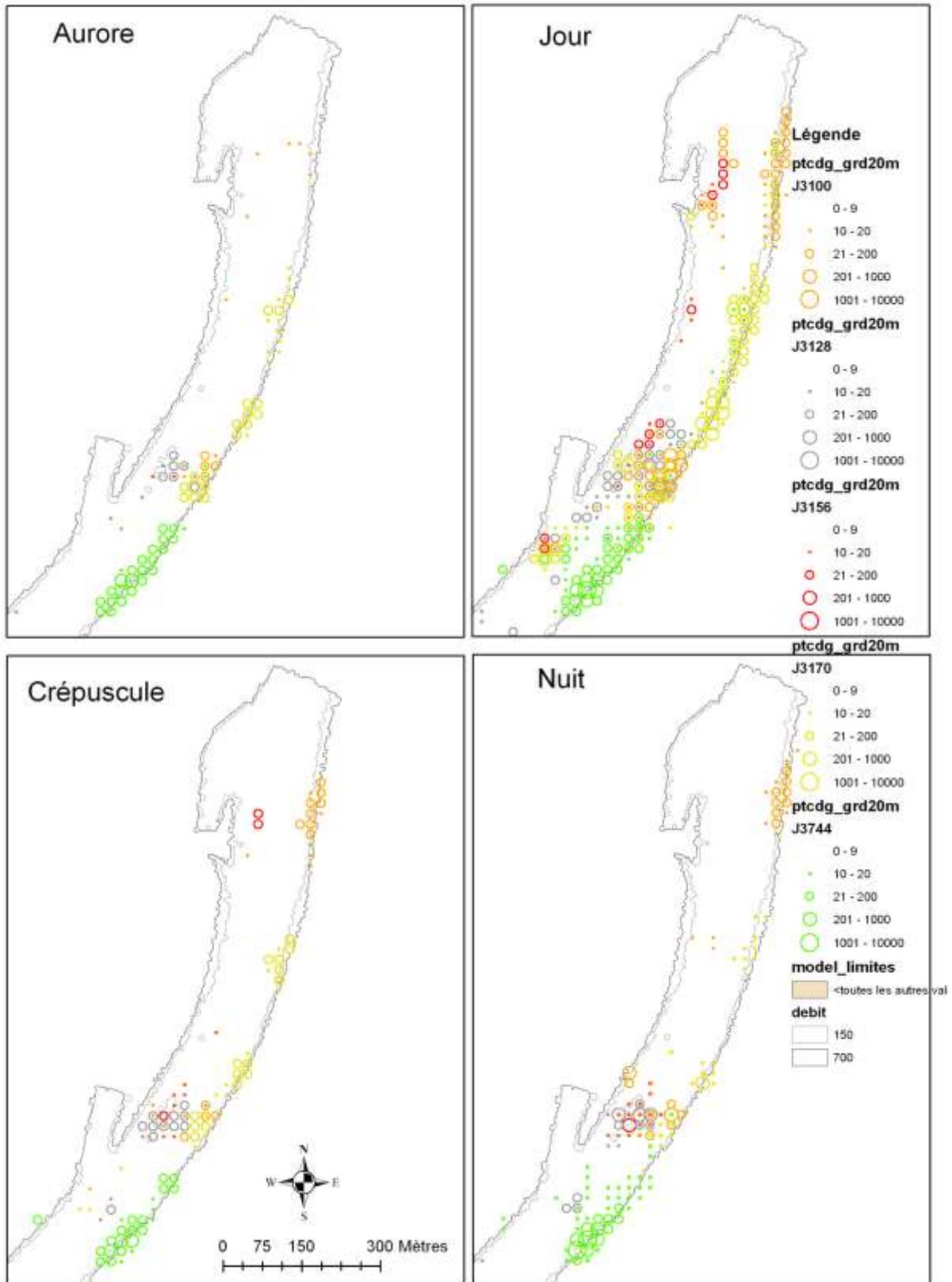


Figure 56 : Représentation du nombre de localisations des 5 barbeaux les mieux suivis sur la grille à 20 m par phase nyctémérale. Le nombre de localisations est répartie en 5 classe d'abondance et représenté par un cercle de taille proportionnelle à la classe (cf. légende à coté des cartes). Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.

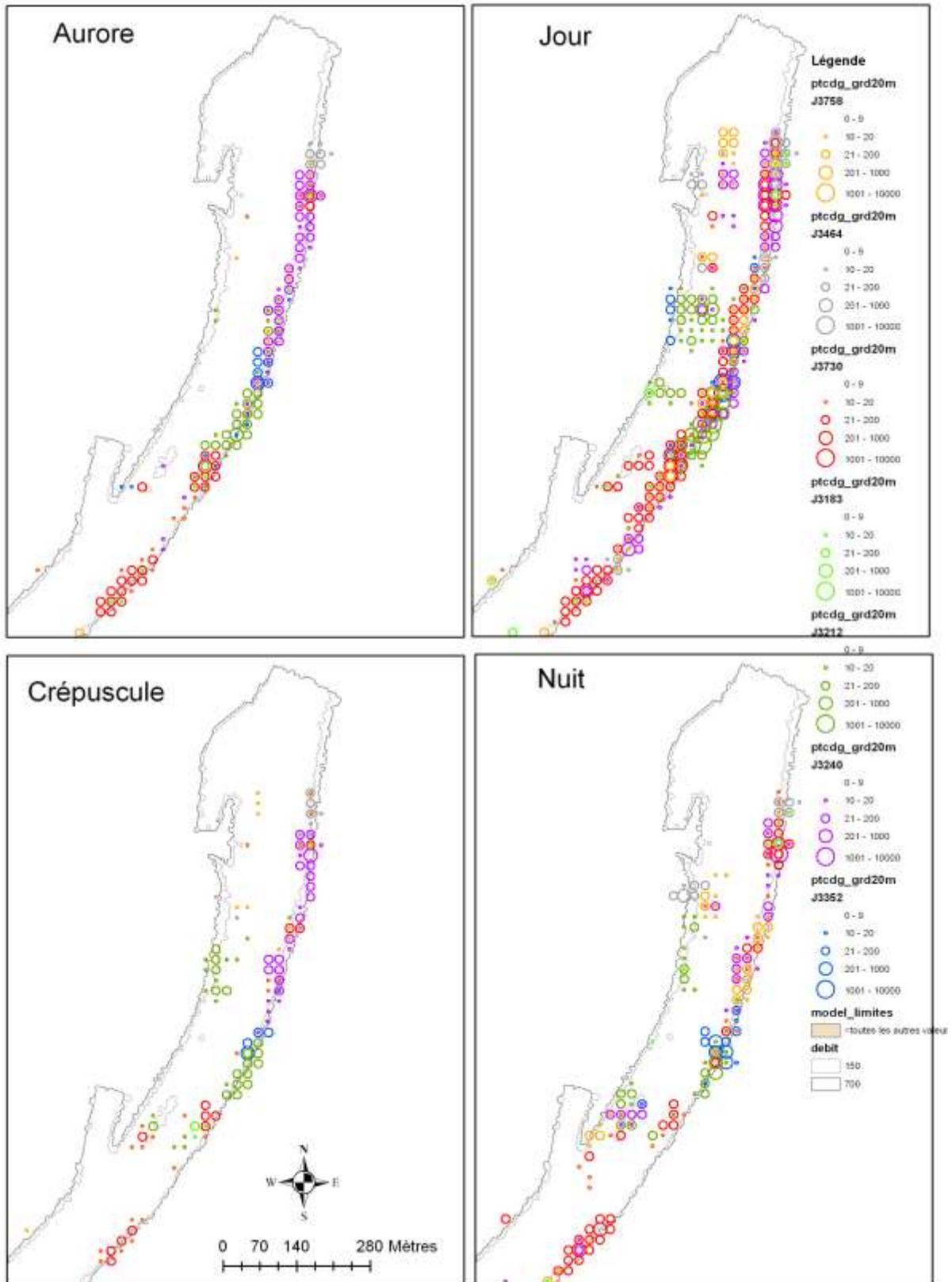


Figure 57 : Représentation du nombre de localisations des 7 chevaines les mieux suivis sur la grille à 20 m par phase nyctémérale. Le nombre de localisations est répartie en 5 classe d'abondance et représenté par un cercle de taille proportionnelle à la classe (cf. légende à coté des cartes). Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.

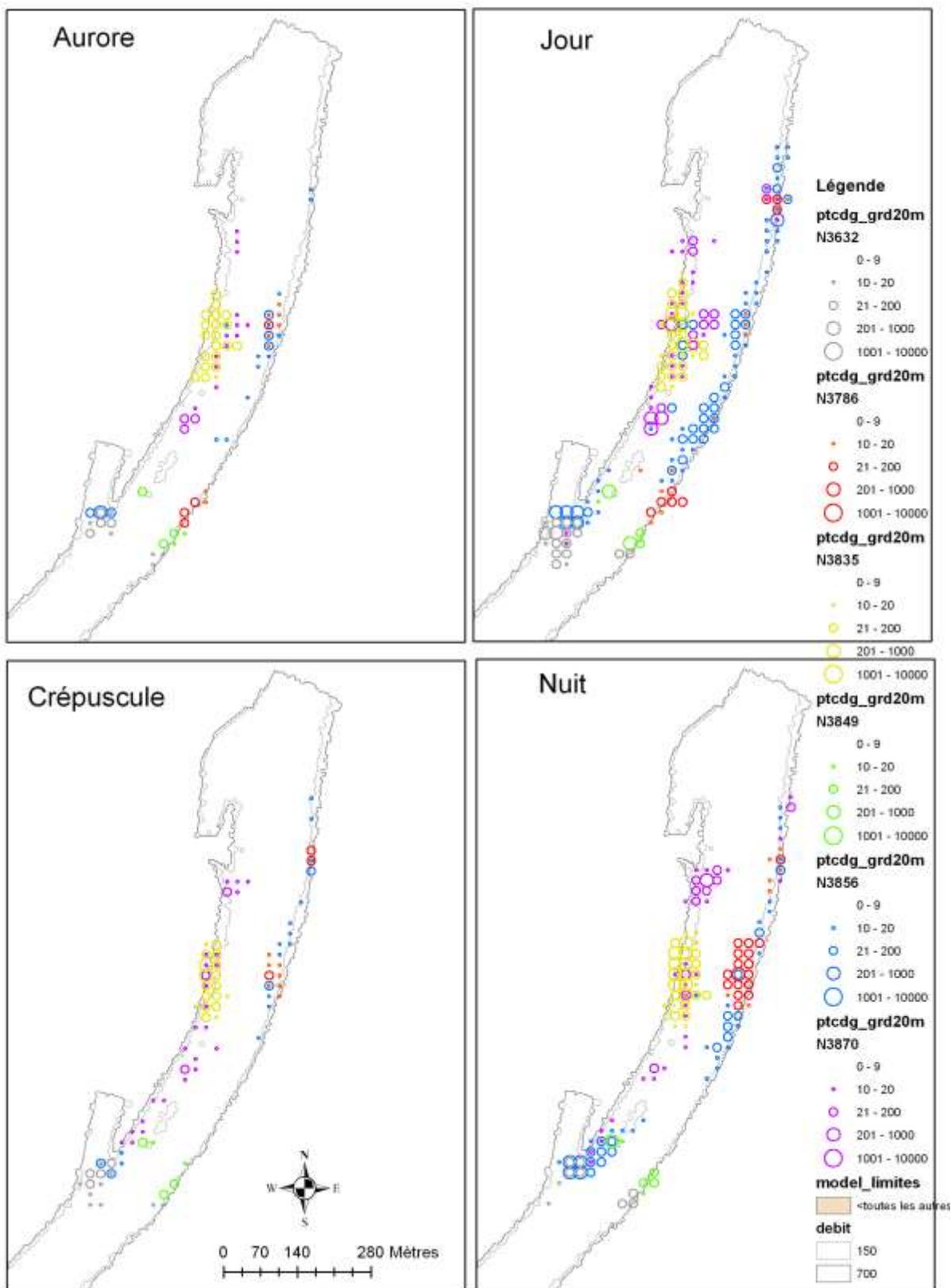


Figure 58 : Représentation du nombre de localisations des 6 silures les mieux suivis sur la grille à 20 m par phase nyctémérale. Le nombre de localisations est répartie en 5 classe d'abondance et représenté par un cercle de taille proportionnelle à la classe (cf. légende à coté des cartes). Seuls les carreaux avec plus de 10 localisations sont représentés sur la carte pour faciliter sa lecture.

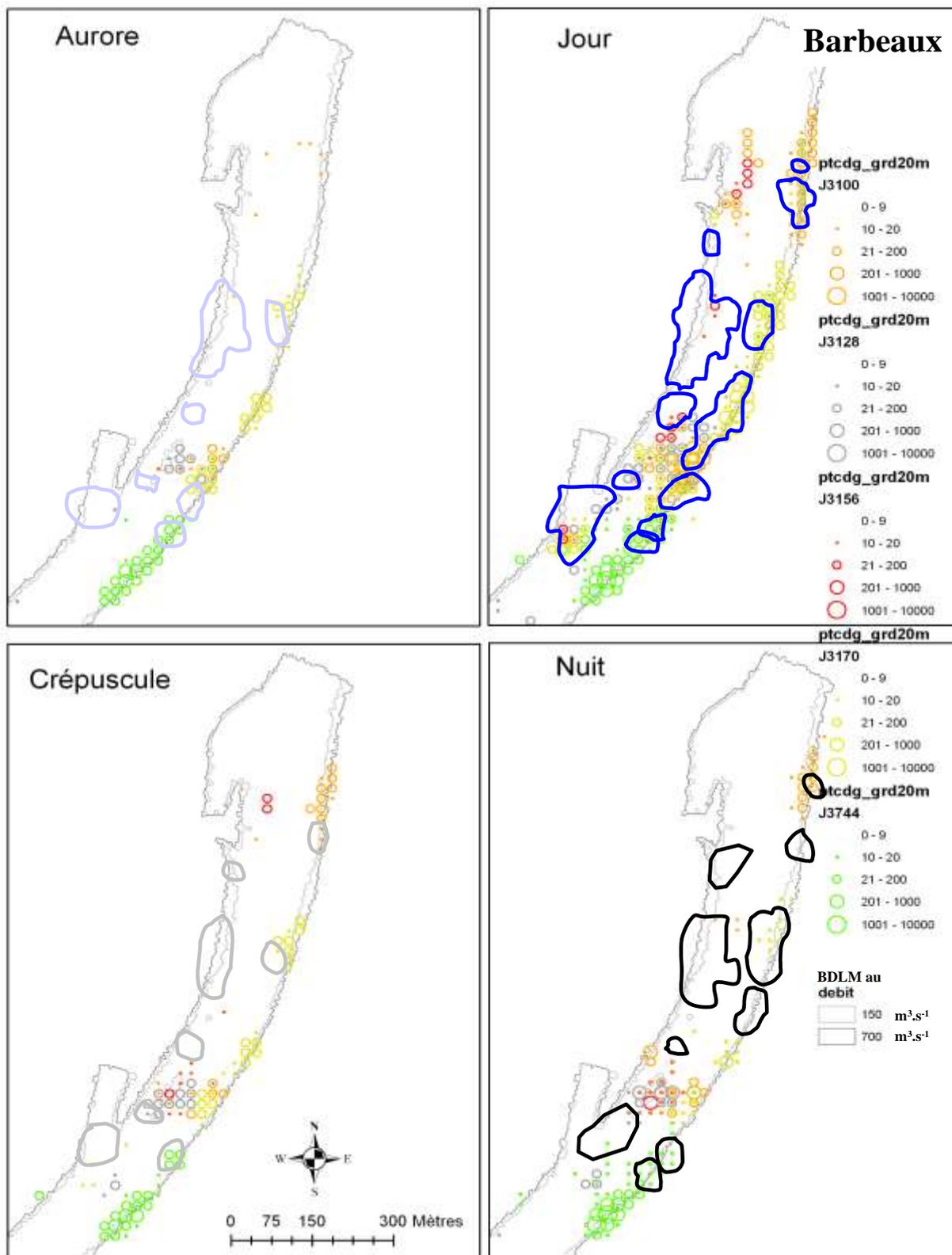


Figure 59 : Figure 49 (barbeaux) sur laquelle nous avons reporté les spots des 6 silures pour chaque phase nyctémérale.

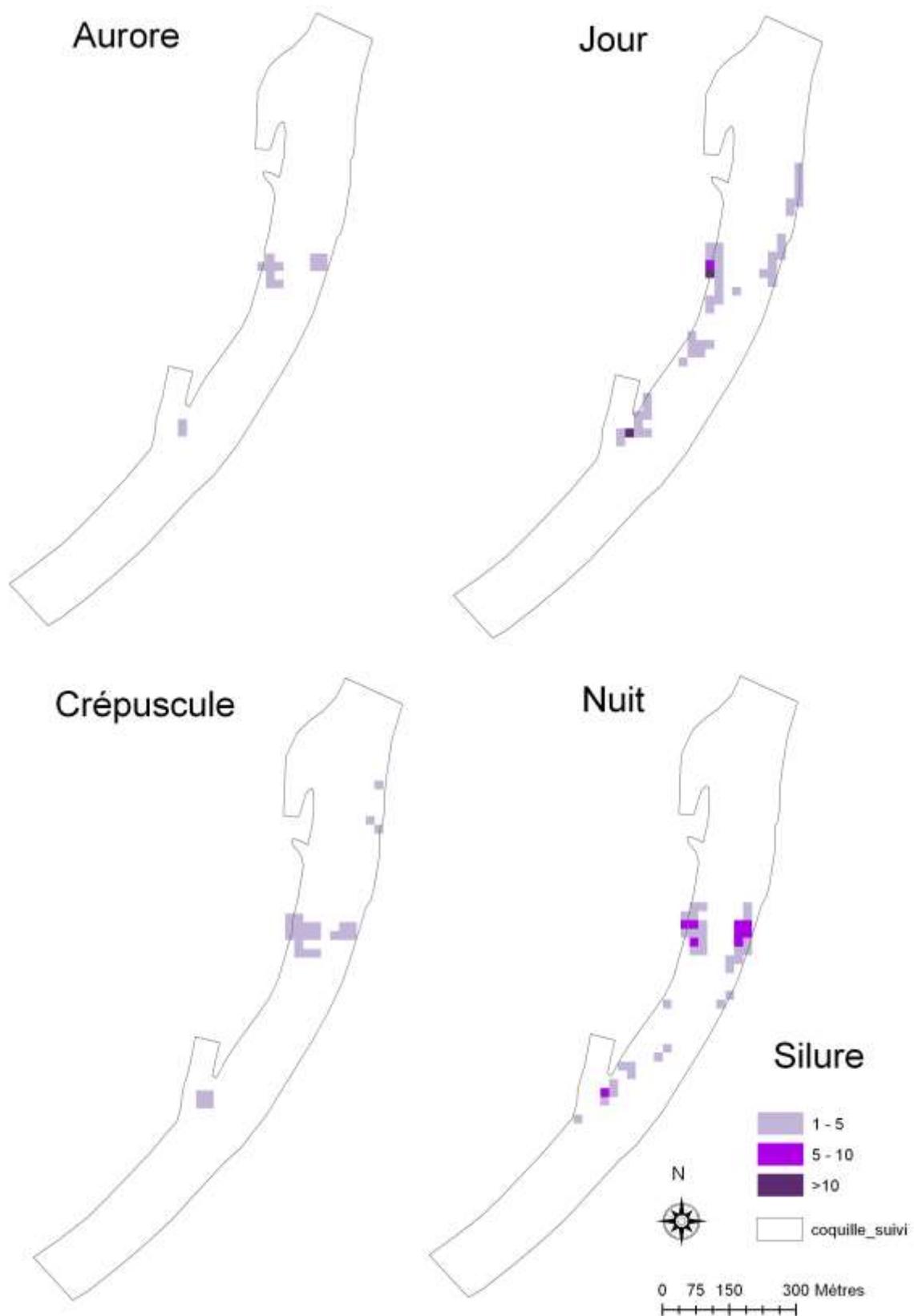


Figure 60 : Cartographies qui présentent par carreau de la grille à 20 m, pour un mois donné du suivi (juillet 2009), par phase nyctémérale et pour une espèce données (silure), le nombre d'heures pendant lesquelles au moins 3 congénères (non identifiés) étaient présents simultanément (à l'échelle de l'heure) dans ce carreau. Le nombre d'heure est réparti en trois classes d'abondance (cf. légende sur le graphe).

Première approche des trajectoires lors des changements de l'environnement

Les proportions de resting et moving

Rappel : chaque localisation est qualifiée en moving (si plus de 2 carrés sont utilisés dans le bloc de 5 min) ou en resting (si un ou deux carrés sont utilisés dans le bloc de 5 min).

Globalement barbeaux et silures sont plus régulièrement localisés en resting tandis que les chevaines sont plus souvent localisés en moving (les pourcentages de localisation en moving sont respectivement 47%, 45% et 57%). Concernant les autres espèces, moins bien localisées, l'anguille est pratiquement uniquement resting (87%), tandis que la carpe, la brème bordelière, le hotu et la perche sont essentiellement localisés en moving (52%, 64%, 78% et 65%, respectivement).

Le décompte des localisations qualifiées en moving ou en resting étendu aux quatre phases nyctémérales montre pour les trois espèces principales que :

- les barbeaux sont un peu plus localisés en resting le jour (56%) alors que pendant les trois autres phases les proportions de localisations en resting et en moving sont plus comparables ;
- les chevaines sont nettement plus localisés en moving à l'aurore (67%) et le jour (61%) et en resting la nuit (65%) ;
- les silures sont nettement plus localisés en resting le jour (68%) et sont plus localisés en moving la nuit (57%).

Le décompte des localisations qualifiées en moving ou en resting étendu aux trois phases de débit est réalisé de manière un peu différente. Ici on a cherché à déterminer le nombre de phases (montée ou descente) pendant lesquelles le nombre de localisations en moving était inférieur, identique ou supérieur au nombre de localisations en resting. (rappel : une montée (descente) de débit est considérée dès que la différence de débit entre deux heures consécutives est au minimum de $\pm 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). La comparaison a été faite pour les localisations de la première heure de chaque montée (n=83) et de chaque descente (n=86) de débit et pour la première heure des plus fortes montées (n=17) et des plus fortes descentes (n=11) de débit. Pour les plus fortes variations de débit, le gradient minimum est de $\pm 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette analyse montre que (Tableau VIII) :

- pour les barbeaux, le nombre de montées de débit avec $M < R$ (39%) est équivalent au nombre de montées de débit avec $M > R$ (41%), ce qui n'est pas le cas pour les 17 plus fortes montées où $M > R$ représente 65% et $M < R$ représente 30% des montées. Pour les premières heures des 86 descentes les pourcentages ne changent pas beaucoup (45% de $M < R$ et 38% de $M > R$). Cette tendance est toutefois accentuée pour les 11 plus fortes descentes de débit (55% de $M < R$ et 27% de $M > R$) ;
- pour les chevaines une tendance nette se dégage avec 60% des montées (76% des plus fortes montées) pour lesquelles $M > R$. En revanche pour toutes les descentes de débit ou seulement les plus fortes descentes de débit, les pourcentages de $M > R$ et $M < R$ sont équivalents (entre 36% et 38%) ;
- pour les silures, 43% des montées de débit se caractérisent par $M < R$ (53% pour les plus fortes montées de débit) et 27% par $M > R$ (29% pour les plus fortes montées de débit). Pour l'ensemble des descentes de débit, les pourcentages entre $M < R$ et $M > R$

sont équivalents (respectivement 38% et 37%) alors que pour les plus fortes descentes M>R représente 45%.

Tableau VIII : nombre de phases (montée ou descente) pendant lesquelles le nombre de localisations en moving était inférieur, identique ou supérieur au nombre de localisations en resting. Les localisations sont analysées pendant la première heure de chaque montée (n=83) et de chaque descente (n=86) de débit (1^o heure) et pour la première heure des plus fortes montées (n=17) et des plus fortes descentes (n=11) de débit (fortes).

	Barbeau		Chevaine		Silure	
	1 ^o heure	fortes	1 ^o heure	fortes	1 ^o heure	fortes
<i>83 montées de débit</i>						
Moving < Resting	32	5	16	4	36	9
Rien ou idem	17	1	18	0	25	3
Moving > Resting	34	11	49	13	22	5
<i>86 descentes de débit</i>						
Moving < Resting	39	6	33	4	33	4
Rien ou idem	14	2	22	3	21	2
Moving > Resting	33	3	31	4	32	5

En résumé pendant les montées de débit les chevaines et les barbeaux (surtout pour les plus fortes montées) sont plus souvent localisés en moving alors que les silures sont plus souvent localisés en resting. Pendant les descentes de débit seuls les barbeaux sont légèrement plus souvent localisés en resting, les chevaines et les silures ne sont pas plus en resting qu'en moving. Dans ces phases de changement de débit, la principale différence de proportions entre moving et resting par rapport aux proportions pour l'ensemble du suivi est que les barbeaux sont plus souvent localisés en moving pendant les montées de débit (surtout les plus importantes). Ceci est d'autant plus fort si on considère que pendant la journée les barbeaux sont localisés à 56% en resting et que les montées de débit interviennent principalement le jour.

Enfin, nous avons analysé les proportions de localisations de type resting et moving au cours des 3 gouttes froides, et plus particulièrement pendant les phases de descente et de remonté de la température de l'eau (Tableau IX). Pour les deux premières gouttes froide, les écarts de température étaient de $\pm 5-7^{\circ}\text{C}$ et pour la troisième goutte froide les écarts de température étaient de $\pm 3-5^{\circ}\text{C}$. Les durées des baisses de température de l'eau étaient de 66h à 91h et les durées des remontées de température de l'eau étaient de 46h à 176h.

Tableau IX : proportions de localisations de type resting et moving au cours des 3 gouttes froides, pendant les phases de baisse et de remonté de la température de l'eau, pour chacune des trois espèces principales. Les gouttes froides sont décrites par l'amplitude des variations de la température de l'eau et par les durées des descente et des remontés de température de l'eau.

	Barbeau		Chevaine		Silure	
	baisse	remontée	baisse	remontée	baisse	remontée
<i>1° GF - 08 juillet - 16h</i>						
<i>[-5.6°C ; +5.1°C]</i>	<i>(91h)</i>	<i>(107h)</i>				
Moving	32	23	58	61	20	0
Resting	68	77	42	39	80	100
<i>2° GF - 20 juillet - 00h</i>						
<i>[-5.5°C ; +6.7°C]</i>	<i>(83h)</i>	<i>(176h)</i>				
Moving	14	30	51	78	71	12
Resting	86	70	49	22	29	88
<i>3° GF - 07 septembre - 17h</i>						
<i>[-4.5°C ; +3.2°C]</i>	<i>(66h)</i>	<i>(46h)</i>				
Moving	54	100	60	0	2	100
Resting	46	0	40	100	98	0

Pendant les baisses et remontées de température les barbeaux sont plus souvent localisés en resting qu'en moving (sauf pour la 3° goutte froide pour laquelle les proportions sont plus proches). Les chevaines sont toujours plus localisés en moving, sauf pendant la remontée de température de l'eau de la 3° goutte froide. Enfin les silures sont eux plus souvent localisés en resting sauf pendant la baisse de température de l'eau de la 2° goutte froide et pendant la remontée de température de l'eau de la 3° goutte froide. Les proportions des localisations en resting et en moving pendant le passage des gouttes froides ne contredisent pas les proportions de localisations en resting et en moving pendant l'ensemble du suivi (Tableau IX).

Déplacements des individus

Orientation entre deux localisations

L'objectif ici est d'analyser les directions des déplacements entre 2 localisations successives (à 5 min) pour tester si les poissons orientent préférentiellement leurs trajectoires lors des phases nycthémerales ou lors de changements important de débit.

Chaque déplacement est orienté dans le plan selon un degré d'angle en référence au cercle trigonométrique. L'ensemble de 360° est divisé en quatre quartiers égaux de 90° chacun, centrés sur les 4 directions principales 0°, 90°, 180° et 270°. Par souci de simplicité le nord est dirigé vers le haut de la page et correspond donc à la direction principale à 90°. Ainsi l'axe central du quartier représentant les déplacements en direction du haut du site d'étude, est l'axe vertical représentant l'angle de 90° dans le cercle trigonométrique. Donc tous les angles de déplacement entre 45° et 135° seront comptabilisés dans le quartier '« Nord », tous les angles de déplacement entre 135° et 225° seront comptabilisés dans le quartier '« Ouest », tous les angles de déplacement entre 225° et 315° seront comptabilisés dans le quartier '« Sud », et tous les angles de déplacement entre 315° et 45° seront comptabilisés dans le quartier « Est ».

Les résultats sont présentés sous forme de « Clocks », avec un cône proportionnel à la distance totale parcourue lors des mouvements enregistrés dans chaque direction principale. Pour chaque clock, les tailles des 4 rayons sont normalisées par rapport à la taille du plus grand rayon (cf. exemple Figure 61).

L'analyse est présentée par individu :

- pour l'ensemble de ses localisations
- pour l'ensemble de ses localisations, groupées par phases de photopériode
- pour l'ensemble de ses localisations, groupées pour les montées / descentes de débit.

L'analyse de l'ensemble des déplacements des individus les mieux suivis n'indique pas de direction vraiment privilégiée pour les barbeaux, même si 3100 et 3156 semblent se déplacer un peu moins transversalement. Pour les chevaines les directions longitudinales (vers l'amont et vers l'aval) semblent être privilégiées (seuls 3183 et 3364 ont des composantes transversales un peu plus importantes). Enfin pour les silures, deux individus ont des directions de déplacement assez homogènes dans les quatre directions (3632 et 3849) alors que pour les quatre autres individus (3786, 3835, 3856 et 3870), la direction longitudinale domine les déplacements.

L'idée de départ était de tester si les poissons se déplacent majoritairement du chenal vers les berges : ce n'est a priori pas le cas. S'ils sont globalement localisés le long des berges, les déplacements se font surtout en longeant les berges (chevaines et silures) ou dans toutes les directions (barbeaux). Les déplacements transversaux très nets observés lors des analyses des localisations individuelles, appelés alors « traversées », ne sont pas identifiables avec cette analyse des directions des déplacements.

Une analyse plus fine a consisté pour chaque individu à construire un diagramme clock pour chaque phase nycthémerale (pour l'ensemble du suivi). Pour les barbeaux il est intéressant de noter que pour tous les individus, la composante sud (vers l'aval) est toujours importante la nuit, mais globalement les répartitions des directions des mouvement est assez homogène dans les 4 directions principales (cf. exemple du barbeau 3744 ; Figure 61). Les chevaines ont une forte composante directionnelle longitudinale de leurs mouvements. La proportion de déplacements transversaux fluctue d'un individu à l'autre mais pour un individu donné ces proportions sont à peu près semblable d'une phase à l'autre. Enfin pour les silures 3 individus ont globalement des directions de déplacement réparties de manière homogène dans les 4 directions principales (3632, 3835 et 3849) quelque soit la phase nycthémerale. En revanche les trois autres individus démontrent des déplacements dans le site d'étude liés à la phase nycthémerale : 3786 descend vers l'aval à l'aurore, remonte la journée et ensuite se déplace dans le sens longitudinal au crépuscule et la nuit (à noter qu'au crépuscule, la dimension transversale vers la rive gauche est conséquente) ; 3856 et 3870 ont le même comportement en terme de direction de déplacement. Ils descendent vers l'aval à l'aurore, remontent vers l'amont le jour et au crépuscule et redescendent vers l'aval la nuit.

Les individus se déplacent soit de manière homogène dans les 4 directions principale (surtout barbeaux) soit principalement dans le sens longitudinal (surtout chevaines et quelques silures). Trois individus seulement, tous silures, ont un comportement de déplacement qui se révèle lié aux phases nycthémerale. Donc il semble y avoir plus de variabilité interindividuelle dans la direction des déplacements qu'entre les phases nycthémerales.

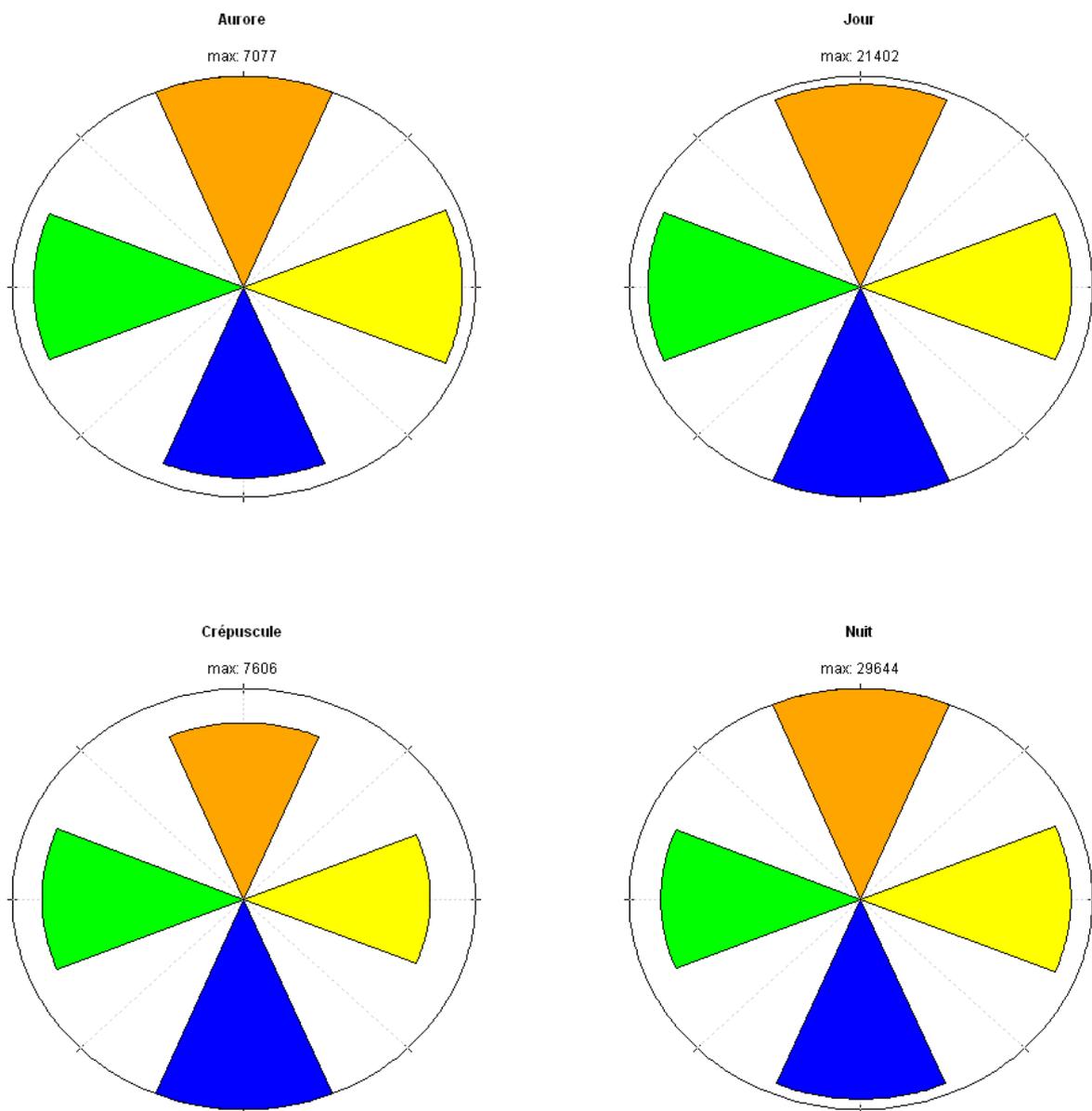


Figure 61 : représentations de type « clocks » des directions entre 2 localisations successives du barbeau 3744 sur l'ensemble du suivi pour chaque phase nyctémérale. Chaque rayon est proportionnel à la distance totale des déplacements correspondants (somme des distances entre chaque couple de localisations utilisé pour évaluer la direction du déplacement), et les quatre rayons sont normalisés par rapport à la taille du plus grand rayon (valeur max indiquée sur les clocks).

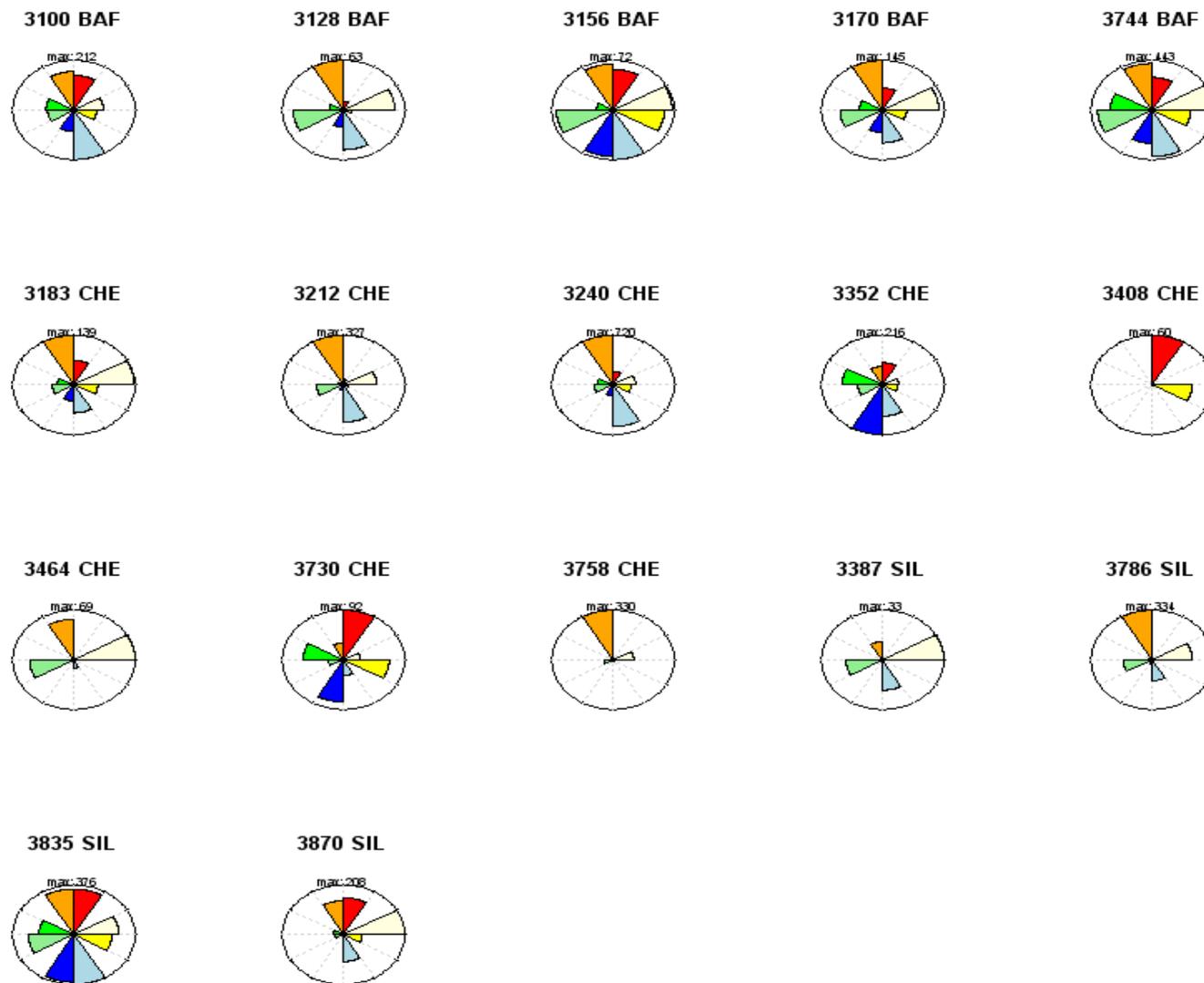


Figure 62 : Représentation de type « clock » pour les déplacements des individus (identifiés par le code espèce et la période de leur marque) localisés pendant les 11 plus fortes descentes de débit. Dans chaque quartier le premier rayon dans les sens trigonométrique correspond à la première heure des descentes de débit et le second rayon correspond à l'heure précédente.

Ce genre de représentation a enfin été utilisée pour caractériser les déplacements effectués pendant l'heure d'avant les montées (descentes) de débit et pendant la première heure de montée (descente) de débit. L'analyse est faite sur les 17 montées les plus fortes (min. + 30 m³.s⁻¹.h⁻¹), et sur les 11 plus fortes descentes (min. - 30 m³.s⁻¹.h⁻¹) et toujours pour les individus les mieux suivis.

Sur les 16 individus ayant été localisés pendant les 17 plus importantes montées de débit, seul le silure 3849 avait des déplacements nettement plus importants (en distance) sur l'axe transversal mais il ne semble toutefois pas y avoir de différence nette entre l'heure d'avant la montée et la première heure de montée.

Le barbeau 3170 montre une légère augmentation de ses déplacements en direction de l'est (rive gauche globalement) lors de la première heure de montée de débit.

La majorité des individus ne semblent pas montrer de différence nette dans la répartition des directions de leurs déplacements entre l'heure d'avant et la première heure de montée de débit.

Pour les 15 individus ayant été localisés pendant les 11 plus importantes montées de débit il est très difficile de mettre en évidence une tendance générale (Figure 62). Pour les barbeaux les déplacements s'orientent de manière équivalente dans les quatre directions principales aussi bien l'heure d'avant la descente de débit que pendant la première heure de descente de débit (excepté 3100 qui a une proportion plus importante de déplacements vers l'aval). Pour les chevaines il y a pratiquement autant de comportements différents que d'individus. Les seules tendances globales sont que la majorité de déplacements se font dans le sens longitudinal (excepté 3464 qui se déplace beaucoup transversalement) et que les distances parcourues soient plus importantes l'heure d'avant que pendant la première heure de descente de débit (excepté pour 3352 et 3730). Seuls trois silures (parmi les 6 bien suivis) ont été localisés pendant l'heure précédant les descentes de débit et la première heure de descente de débit (3786, 3835 et 3870). Le silure 3786 se déplaçait majoritairement vers l'amont avant la descente de débit et beaucoup moins pendant la première heure de descente ; 3870 se déplaçait beaucoup plus vers la rive droite (majorité des directions) et vers l'aval l'heure avant la descente de débit ; 3835 n'a pas changé de répartition des directions de déplacements (majoritairement longitudinales).

Globalement la répartition des directions des déplacements des individus les mieux suivis n'est pas différente entre l'heure d'avant les changements de débit et la première des changements de débit. D'autre part la variabilité individuelle de la répartition des directions des déplacements est très importante quelque soit l'espèce.

Distances parcourues

Cette analyse est réalisée avec les données réparties en séquences continues (seqcont) à 5 minutes des individus les mieux localisés pour les trois espèces principales.

Nous avons représenté la distribution des distances parcourues pour 10 min de seqcont lors des différentes phases nyctémérales et de débit par espèce (i.e. tous les individus les mieux localisés considérés ensembles) et pour chaque individu lors des différentes phases nyctémérales, à l'aide de boxplots. L'analyse de la variabilité interindividuelle permet d'évaluer la représentativité des résultats à l'échelle de l'espèce.

[Rappel : Pour les boxplots, le rectangle = des quartiles Q_{25} à Q_{75} , incluant la médiane (trait horizontal noir) ; les moustaches = $Q_{25}-1.5*(Q_{75}-Q_{25})$ et $Q_{75}+1.5*(Q_{75}-Q_{25})$]

Barbeaux

Les barbeaux se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min (Figure 63).

Les déplacements médians par individu varient de 21 à 58 m à l'aurore, de 28 à 40 m le jour, de 28 à 62 m au crépuscule et de 13 à 46 m la nuit. Les barbeaux se déplacent de manière équivalente lors des différentes phases nyctémérales (très légèrement moins le jour et la nuit par rapport à l'aurore et au crépuscule). Deux groupes d'individus semble avoir des déplacements différents : 3100 (397 mm) & 3128 (311 mm) qui ont toujours des déplacements légèrement moindres que les individus 3156 (336 mm), 3170 (302 mm) & 3744 (528 mm).

Les barbeaux ne montrent globalement pas de différence de distance parcourue entre les différentes phases de débit (Figure 66).

[Rappel des longueurs totales individuelles : 3100 (397 mm) ; 3128 (311 mm) ; 3156 (336 mm), 3170 (302 mm), 3744 (528 mm)]

Chevaines

Les chevaines se déplacent individuellement de 0 à 250 m en 10 min (Figure 64).

Les déplacements médians par individu varient de 32 à 90 m à l'aurore, de 29 à 76 m le jour, de 18 à 83 m au crépuscule et de 19 à 38 m la nuit. Les chevaines se déplacent moins la nuit, excepté pour 3370 qui se déplace aussi très peu le jour ; la variabilité interindividuelle est en tout cas nettement moindre la nuit (toutes les médianes sont inférieures à 50 m / 10 min). Les déplacements médians les plus élevés s'observent à l'aurore et au crépuscule.

Il ne semble pas y avoir de lien entre la taille des individus et leurs déplacements médians par phase nyctémérale.

Les chevaines ont tendance à se déplacer un peu moins lorsque le débit baisse (Figure 67).

[Rappel des longueurs totales individuelles : 3183 (486 mm), 3212 (313 mm), 3240 (325 mm), 3352 (248 mm), 3730 (454 mm), 3758 (455 mm), 3464 (472 mm)].

Silures

Les silures se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min (Figure 65).

Les déplacements médians par individu varient de 11 à 75 m à l'aurore, de 6 à 57 m le jour, de 5 à 52 m au crépuscule et de 3 à 94 m la nuit. Les deux plus grands individus (3856 et 3870) ont une grande variabilité de distance de déplacement (surtout la nuit et à l'aurore).

Globalement les silures se déplacent moins le jour et plus la nuit.

Les silures ont tendance à se déplacer moins quand le débit monte et plus quand le débit est stable (Figure 68).

[Rappel des longueurs totales individuelles : 3632 (720 mm), 3786 (620 mm), 3835 (496 mm), 3849 (367 mm), 3856 (1001 mm), 3870 (1050 mm)]

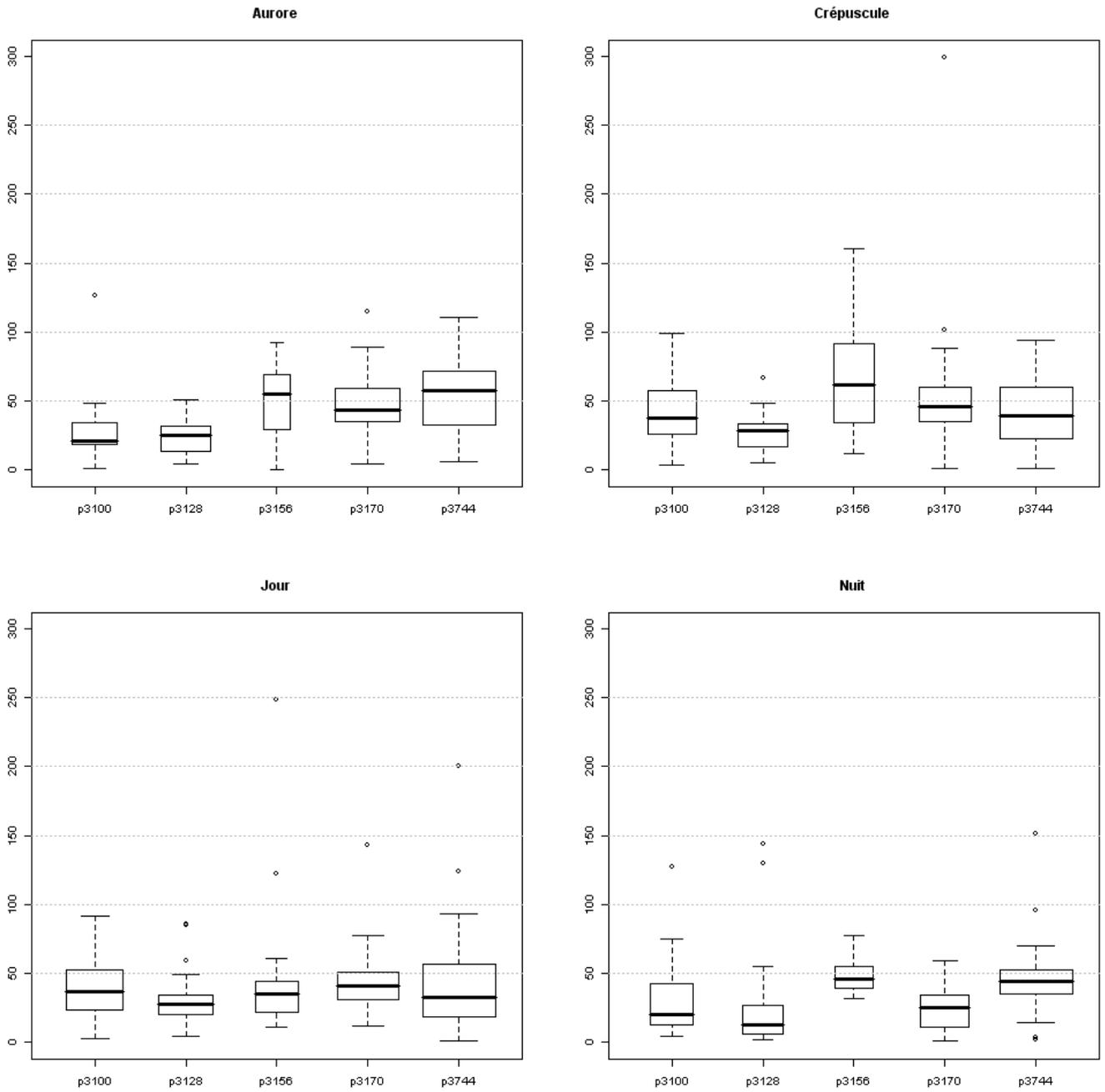


Figure 63 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les barbeaux les mieux suivis pendant chaque phase nyctémérale.

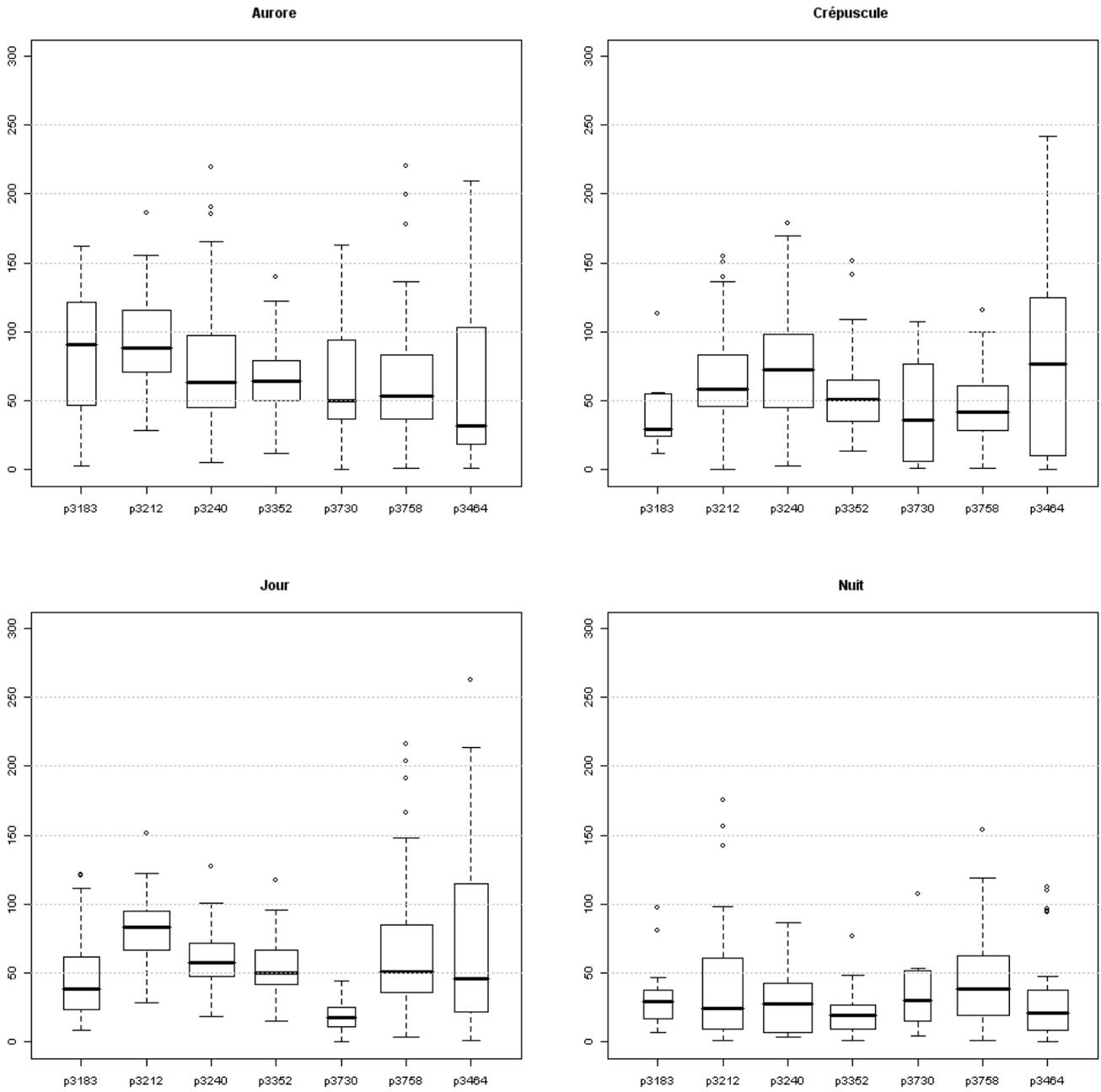


Figure 64 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les chevaines les mieux suivies pendant chaque phase nyctémérale.

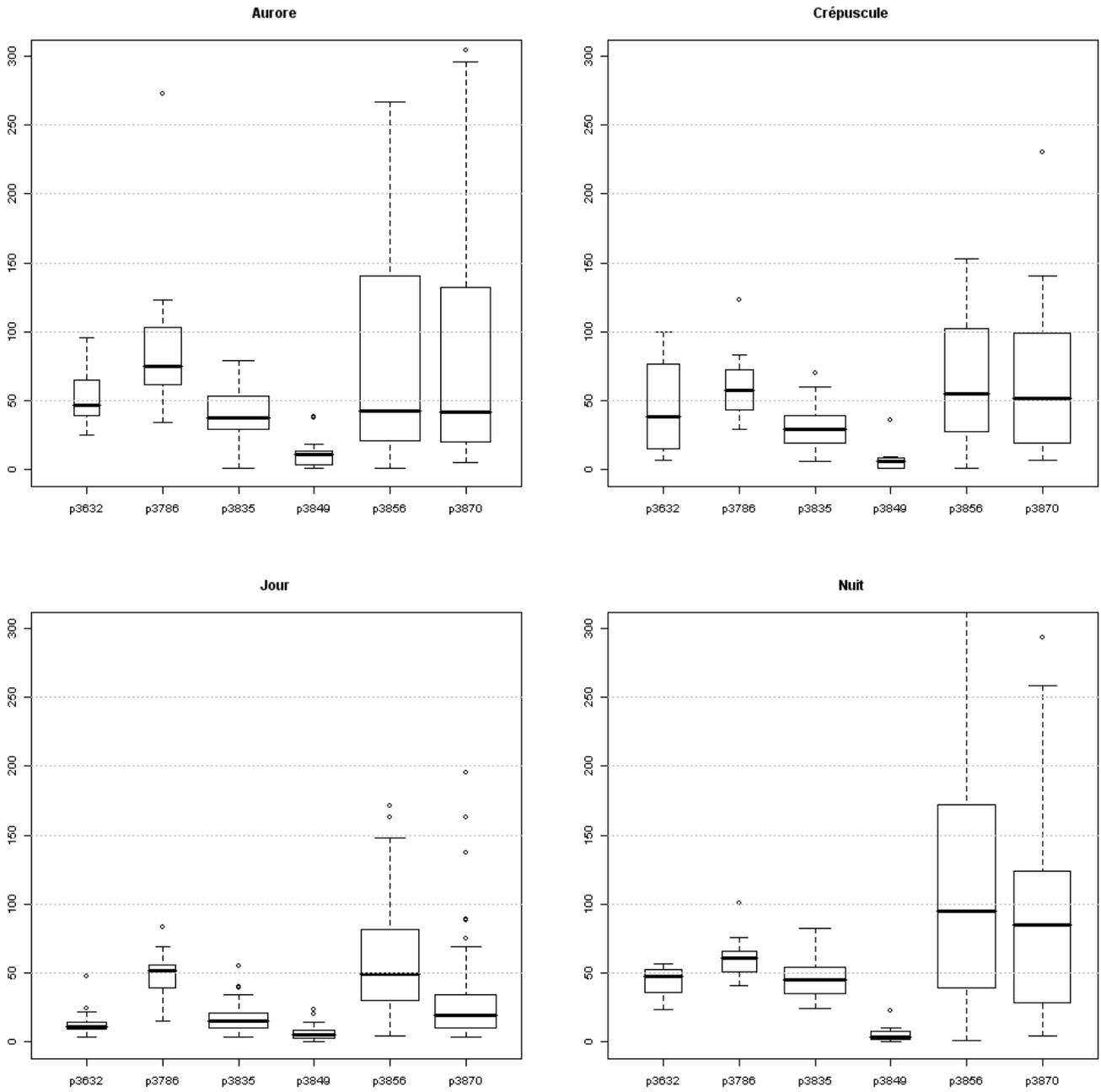


Figure 65 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en $m \cdot 10 \text{ min}^{-1}$) par les silures les mieux suivis pendant chaque phase nyctémérale.

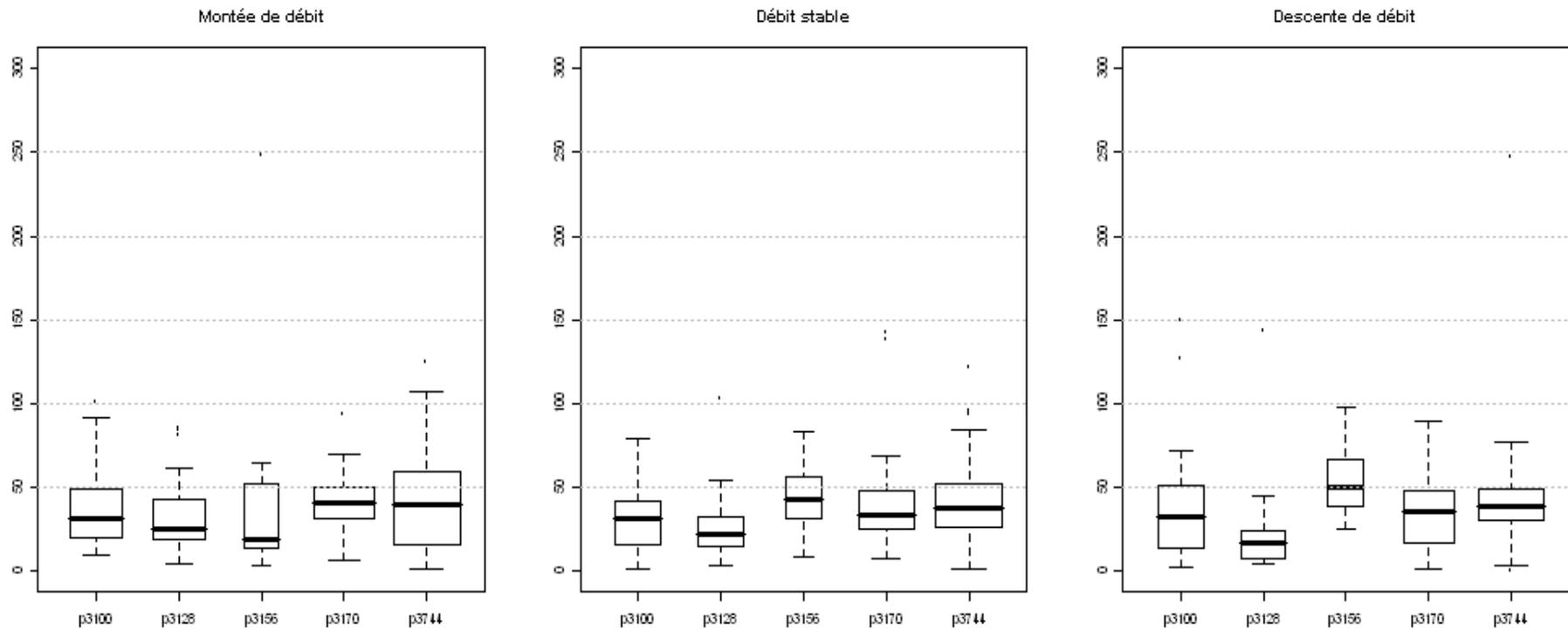


Figure 66 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les barbeaux les mieux suivis pendant chaque phase de débit (montées, stables, et descentes).

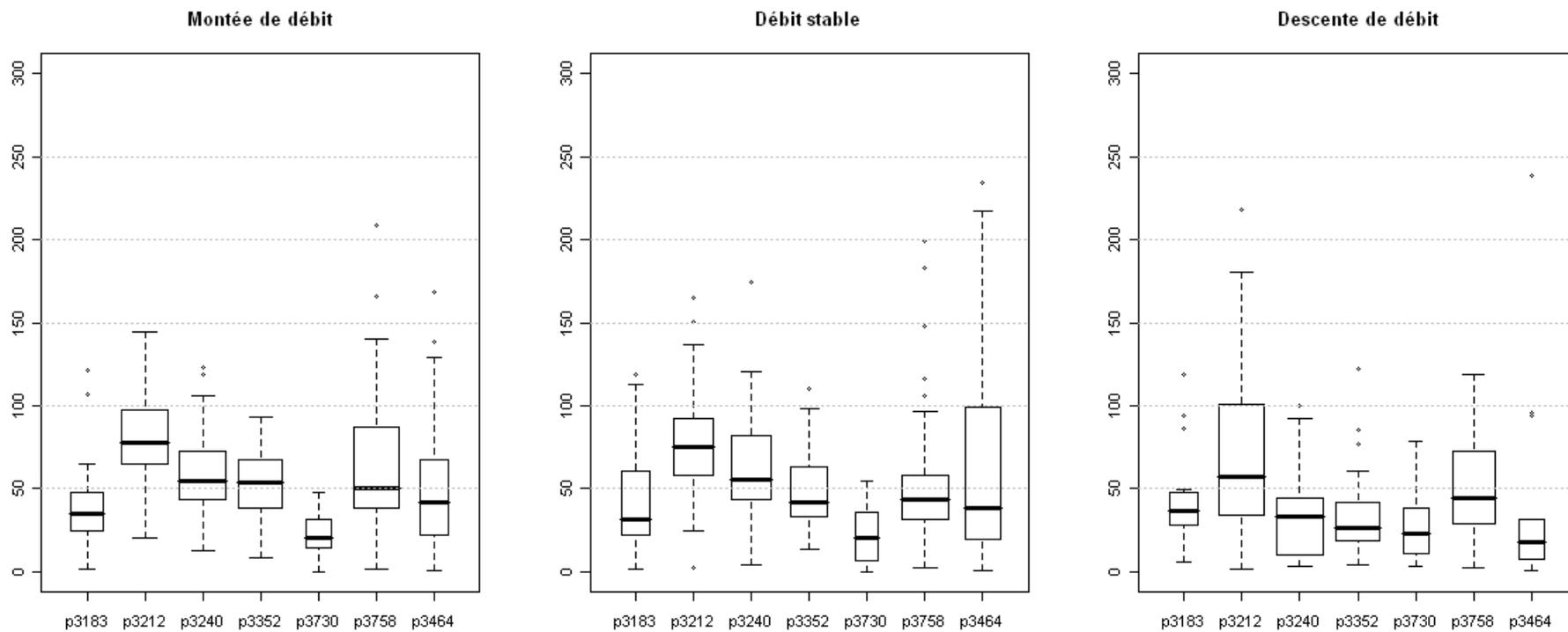


Figure 67 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les chevaines les mieux suivis pendant chaque phase de débit (montées, stables, et descentes).

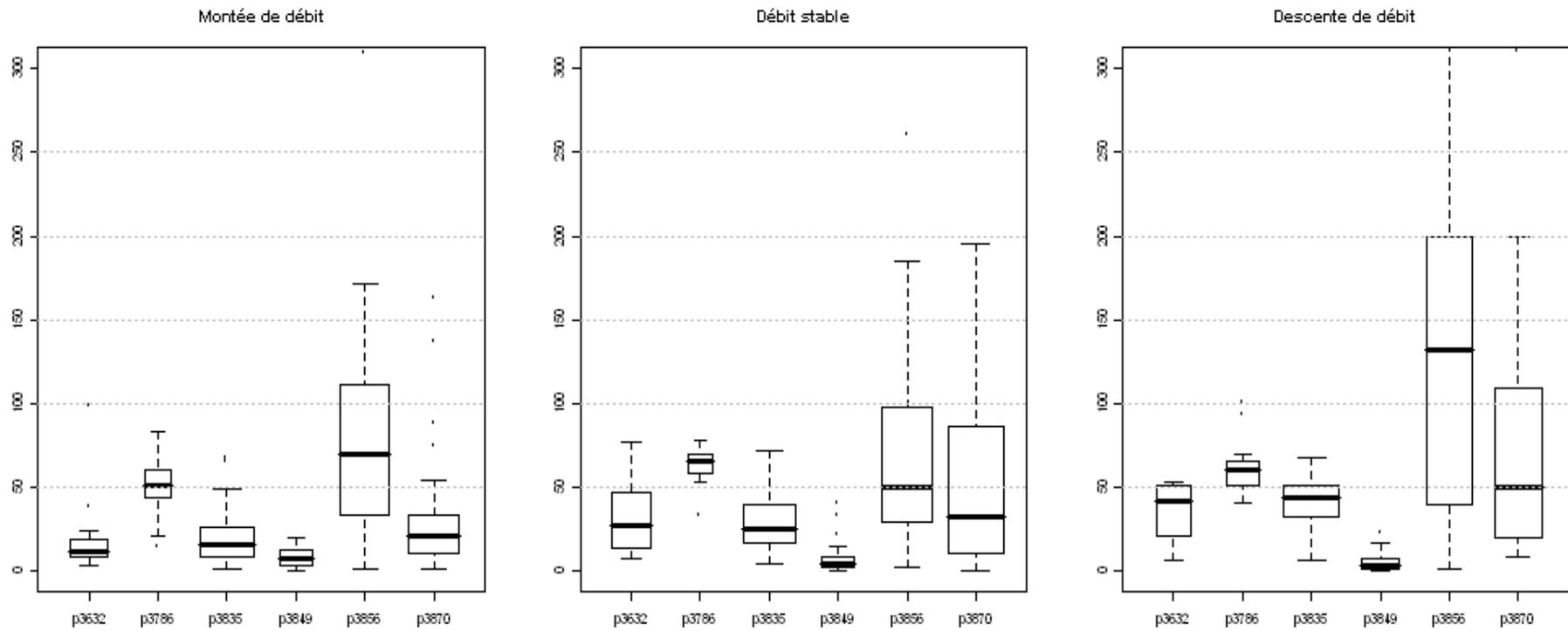


Figure 68 : Représentation sous forme de boxplots (résumé de distribution) des distances parcourues (en m.10 min⁻¹) par les silures les mieux suivis pendant chaque phase de débit (montées, stables, et descentes).

Analyse des trajectoires

Cartographies des trajectoires pendant les changements de débit

Pour essayer de comprendre encore plus finement le comportement des poissons lors des changements de débit (montées et descentes) nous avons analysé l'ensemble des trajectoires individuelles qui étaient enregistrées pendant les montées et les descentes de débit.

Nous avons utilisé les trajectoires continues (seqcont) de tous les individus (i.e. les mieux suivis et les autres) recensées dans les 83 montées et les 86 descentes de débit enregistrées au cours du suivi. Seules les seqcont de 4 points et plus sont considérées (notion de trajectoire).

Pour chaque montée (ou descente) de débit seules les seqcont ayant des points dans la première heure sont analysées. La première heure est supposée comme étant le moment principal de réponse des individus. Les trajectoires sont représentées sur une carte avec un point orange pour matérialiser la première localisation de la seqcont dans la montée ou la descente de débit. L'analyse consistait à décrire graphiquement chacune des trajectoires représentées sur les cartes en identifiant 4 grands types : vers l'amont, vers l'aval, transversales et mixtes.

Pendant les deux phases de changement de débit les chevaines sont plus souvent localisés en cours de déplacement que le barbeau et que le silure. Il n'est pas possible de faire des analyses quantitatives strictes mais globalement le nombre de trajectoires analysé pour chaque type de trajectoire est assez comparable entre les montées et les descentes de débit. La seule différence assez nette concerne les silures dont beaucoup de trajectoires sont dirigées vers l'aval lors des montées de débit en rapport à ce qui est observé lors des descentes de débit. D'autre part les barbeaux ont des trajectoires plutôt mixtes (enchaînant montées, descente et traversées) alors que les chevaines ont des trajectoires plutôt amont – aval, et aussi mixtes pendant les descentes de débit. Enfin l'hypothèse selon laquelle les poissons pourraient se déplacer majoritairement vers les berges lors des changements de débit (surtout montées de débit) paraît difficilement acceptable après cette analyse de trajectoires.

Tableau X : répartition des différents types de trajectoires individuelles (vers l'amont, vers l'aval, transversale et mixte) recensées dans la première heure de chaque montée (n=83) et de chaque descente (n=86) de débit.

	Montées			Descentes		
	Barbeaux	Chevaines	Silures	Barbeaux	Chevaines	Silures
Vers l'amont	3	10	4	6	10	5
Vers l'aval	4	16	11	4	13	1
Transversale	5	5	0	2	5	2
Mixte	11	9	4	16	11	5

Quelques trajectoires sont assez particulières. Par exemple pendant les montées de débit, nous avons observé le barbeau 3170 (montée 28) partant de la confluence du rejet 2-3, pour aller en rive gauche avant de revenir dans cette zone échauffée ; le chevaine 3352 (montée 12) se situe en rive droite au début de la montée de débit, traverse en rive gauche, remonte la rive gauche et retransverse en partie le chenal, avant de revenir en rive gauche ; le silure 3856 (montée 6) est

pratiquement en rive droite en début de trajectoire et au cours de la montée, il traverse en rive gauche et remonte cette rive gauche sur plusieurs centaines de mètres. De la même manière pendant les descentes de débit nous avons observé le barbeau 3100 (descente 37) partant du chenal pour venir en rive droite ou le barbeau 3170 (descente 51 et 71) partant de la confluence du rejet 2-3 pour aller en rive gauche avant de faire une ou plusieurs autres traversées (comme pendant les montées) ; le chevaîne 3212 (descente 25) part lui aussi de la rive droite pour aller en rive gauche et revenir par la suite vers la rive droite ; le silure 3856 (descente 52) a exactement le même comportement que lors de la montée 6 en partant du chenal coté rive droite, pour aller en berge rive gauche et remonter la rive gauche.

L'analyse descriptive des cartographies des trajectoires individuelles lors des montées et descentes de débit ne permet pas de détecter un comportement particulier laissant présager une réponse de type spécifique et systématique aux modifications de débit.

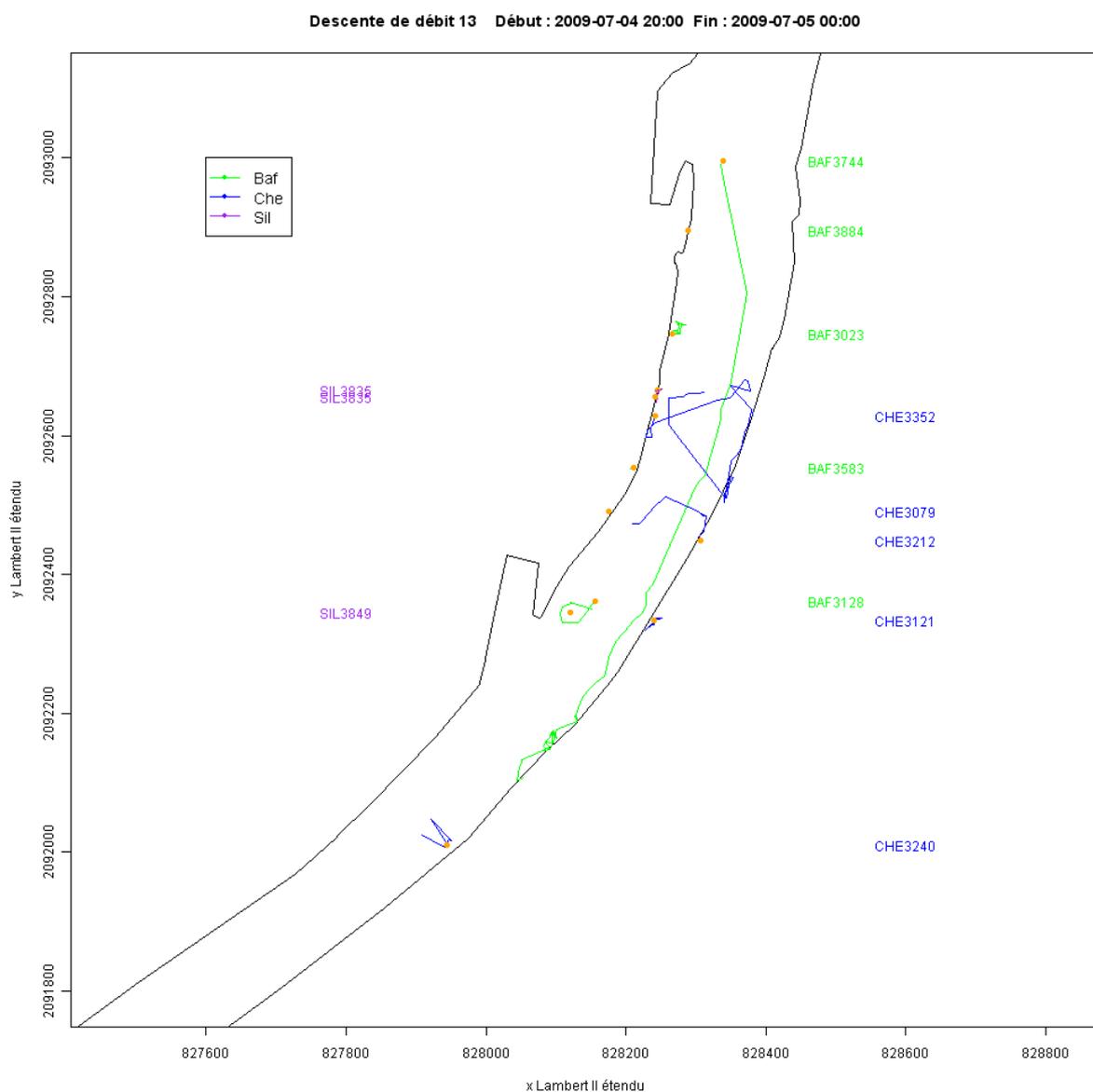


Figure 69 : trajectoires (seqconts) enregistrées pendant la descente de débit n° 13 qui a duré 4h. En violet sont représentées les trajectoires des silures, en bleu les trajectoires des chevaines et en vert les trajectoires des barbeaux. Le début des trajectoires sont matérialisés par les points orange, et le poisson correspondant est listé à droite ou à gauche de la carte en face du point. Ne sont représentées que les seqconts ayant des localisations pendant la première heure de changement de débit.

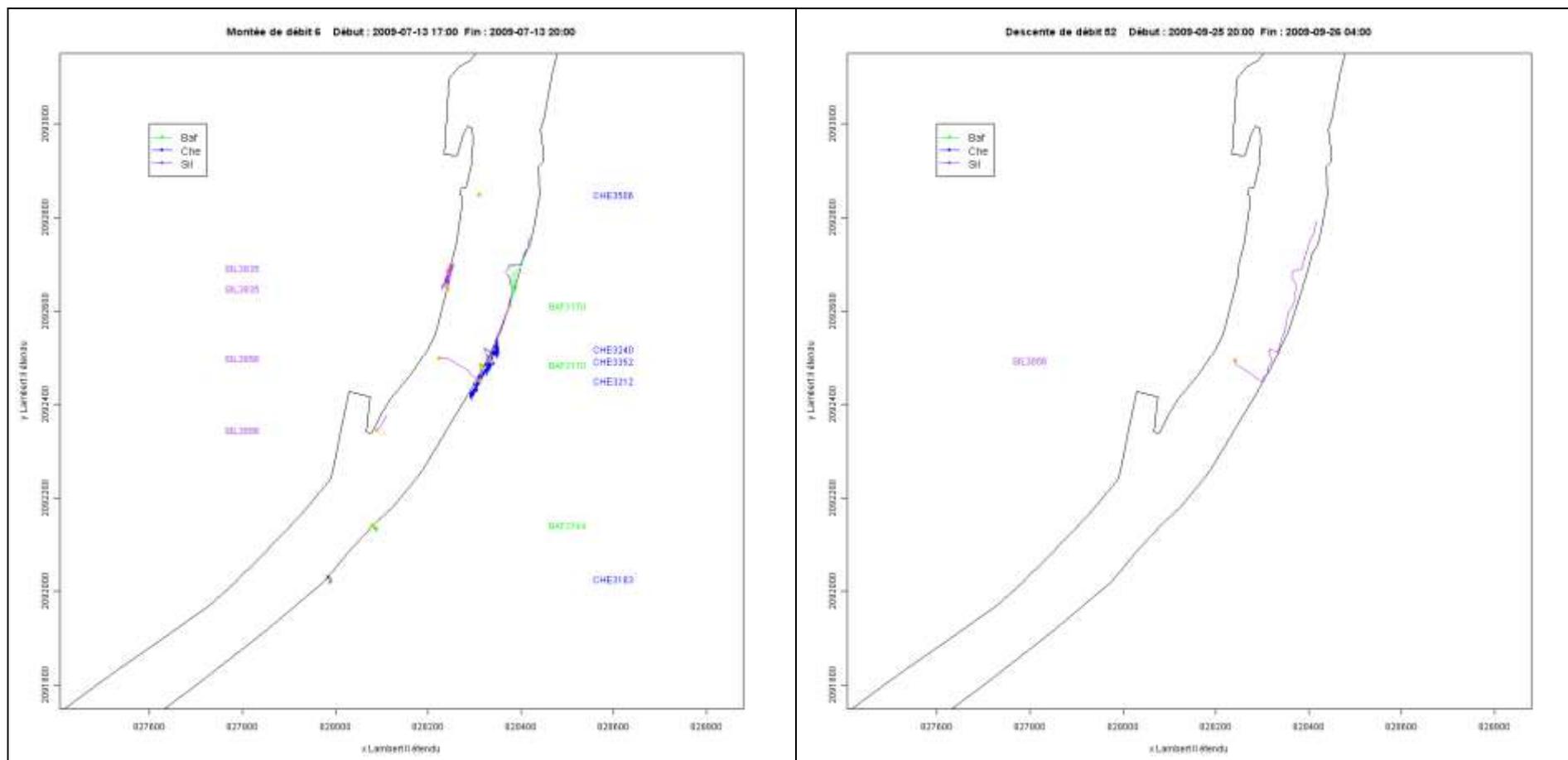


Figure 70 : comparaison de la trajectoire du silure 3856 (violet) lors d'une montée de débit (à gauche ; montée n° 6) et lors d'une descente de débit (à droite ; descente n° 52)

Visualisateur des déplacements et des chronogrammes d'utilisation de l'habitat

Un effort particulier a été mis dans le développement d'un outil de visualisation simultanée, pour une trajectoire continue donnée, du déplacement du poisson dans le site d'étude et des valeurs utilisées pour les principaux paramètres (profondeur, vitesse et température). Une indication du débit et de la température de l'eau en amont du site d'étude est fournie. Une coloration permet de reconstituer l'ensemble de la trajectoire après la visualisation dynamique (Figure 71).

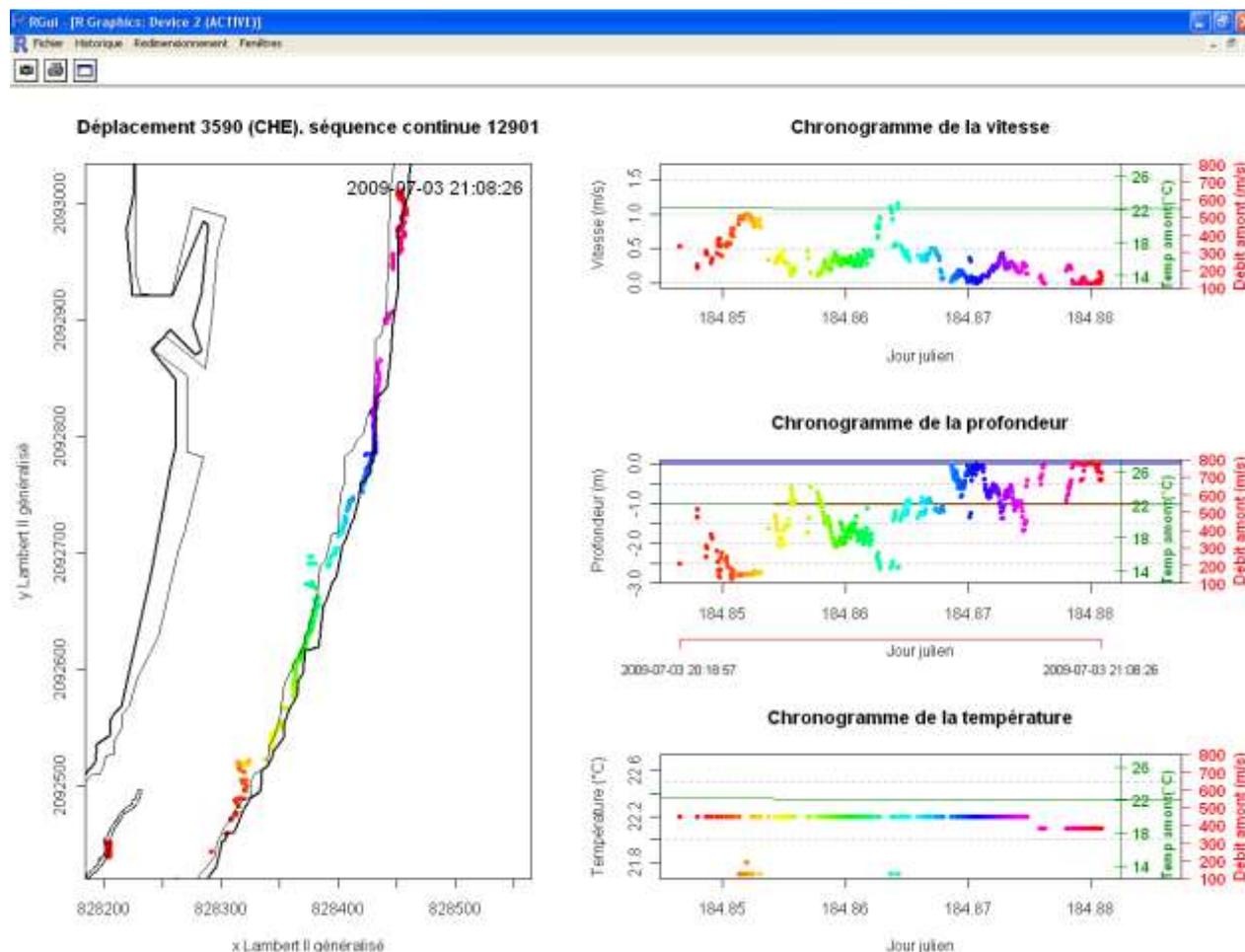


Figure 71 : visualisateur des déplacements (à gauche) et des chronogrammes (à droite) des variables utilisées (vitesse, profondeur, et température). Pour chaque chronogramme la valeur de la température de l'eau amont et du débit sont indiquées.

Pour résumer

Les préférences d'habitat

L'analyse des préférences d'habitat globales (courbes et hydrosignatures de préférences) a montré que les barbeaux sélectionnent préférentiellement des vitesses faibles ($<0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) associées à des profondeurs faibles ($<0.8 \text{ m}$) à fort débit ($> 500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) ou au contraire à des profondeurs très fortes ($>3.2 \text{ m}$) pour des débits faibles à moyens ($< 500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). Dans la

gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 (de 15°C à 24°C) ces préférences hydrauliques sont bien marquées. Dans les veines d'eau échauffées à l'aval des rejets du CNPE, les profondeurs préférées sont comprises entre 1 m et 3 m pour une gamme de vitesses plus fortes (de 1.0 m.s-1 à 1.4 m.s-1). Le substrat utilisé préférentiellement est le caillou, puis dans une moindre mesure le gravier et le bloc.

Les chevaines sélectionnent très fortement les profondeurs faibles (<0.8 m) associées à des vitesses faibles (<0.2 m.s-1) dans toute la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 (de 15°C à 24°C). Dans le panache d'eau échauffée les chevaines sélectionnent principalement des profondeurs (<1.4 m) et des vitesses un peu plus importantes (< 0.8 m.s-1). Ils sélectionnent plus particulièrement des habitats profonds (>3.2 m) uniquement à faible débit et leur spectre de préférences est sensiblement plus large lorsque le débit est stable. Enfin aucun type de substrat ne semble être particulièrement sélectionné.

Les silures sélectionnent toujours des vitesses faibles (< 0.4 m.s-1) à moyennes (<0.8 m.s-1) pour pratiquement toutes les classes de profondeur, et plus spécialement les faibles profondeurs à fort débit. La gamme de température préférentielle des silures suivis au cours de l'été 2009 s'étale au delà de 23°C. Le substrat sélectionné est fin (sable) ou grossier (pierre et bloc).

Pour les trois espèces étudiées, les préférences hydrauliques établies dans la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 se caractérisent par des habitats plutôt lents (< 0.2 m3.s-1) et majoritairement peu profonds (<0.8 m). Ce type d'habitat, d'autant plus sélectionné que le débit augmente, est utilisé plus de 20% du temps de localisation pour chacune des trois espèces (barbeaux, 23%, chevaines, 40% et silures, 21%) alors qu'il ne représente que 15% de la surface totale disponible à 150 m3.s-1, 4.3% à 300 m3.s-1 et 2.1% à 500 m3.s-1. Il s'agit bien d'un habitat hydraulique fortement sélectionné. Dans le panache d'eau échauffée à l'aval des rejets du CNPE de Bugey les préférences hydrauliques des cyprinidés, majoritairement localisés hors du panache, évoluent vers des habitats plus profonds et plus rapides.

Enfin, il existe une variabilité interindividuelle des préférences hydrauliques et thermiques très forte pour les barbeaux (n=5), assez forte pour les silures (n=6; sauf pour la vitesse de courant) et faible pour les chevaines (n=7). Cette variabilité individuelle n'est pas liée à la taille ni pour les barbeaux ni pour les silures. Pour les trois espèces les courbes de préférences individuelles pour le substrat sont très variables entre les individus.

L'analyse cartographique des simulations de disponibilité en habitat favorables obtenues à partir de nos hydrosignatures de préférences hydrauliques montre une décroissance de la quantité d'habitat favorable disponible en fonction du débit pour les trois espèces. L'habitat favorable est uniquement disponible en berge. Des habitats favorables sont disponibles en rive droite pour les deux espèces de cyprinidés, mais ces habitats sont peu utilisés, sans doute à cause de la température de l'eau échauffée.

Répartition spatiale des individus

Les principaux spots de localisation des barbeaux se répartissent en rive gauche (6 spots), avec un faible chevauchement des localisations individuelles, puis en rive droite en amont du rejet 4-5 et dans la confluence du rejet 2-3 (les barbeaux étaient localisés 7% du temps dans l'eau échauffée ; ces utilisations sont très courtes et très peu nombreuses pour chaque

individu) et enfin autour du banc de galet. Les seuls spots où des localisations de plusieurs individus sont superposées sont le banc de galets et le rejet 2-3, le jour uniquement. La nuit les barbeaux utilisent des habitats nettement moins recouvrant.

Les chevaines sont quant à eux fortement inféodés à la rive gauche, avec quelques spots le jour et la nuit en rive droite (surtout aval rejet 4-5 ; les chevaines étaient localisés 4% du temps dans l'eau échauffée ; ces utilisations sont très courtes et très peu nombreuses pour chaque individu), avec un très fort chevauchement des localisations des différents individus suivis, principalement le jour et lors des changements de luminosité.

Les silures sont plus densément localisés en rive droite (les silures étaient localisés 53% du temps dans l'eau échauffée), principalement situées à l'aval du rejet 4-5 et au niveau de la confluence du rejet 2-3 (3 spots à l'aurore/crépuscule et 4 spots le jour), mais également en rive gauche (2 petits spots le jour et 1 spot plus important la nuit). Les localisations des silures les mieux suivis (n=6) semblent plus concentrées que celles des deux autres espèces, suggérant une plus grande immobilité, et sont faiblement recouvrantes.

Les spots des localisations individuelles ne sont pas redistribués lorsque les localisations sont regroupées par phase de débit, signifiant ainsi que les changements de débit ne provoque pas de déplacements vers des habitats différents. En revanche il semble que lorsque le débit demeure stable il y ait plus de localisations éparpillées (mouvements), et notamment dans le chenal. Selon les espèces et les individus c'est plutôt lorsque le débit monte (barbeau, chevaine, silure) ou descend (chevaine) que les localisations sont les plus regroupées (immobiles).

Les barbeaux et les silures ont rarement été localisés pendant la même heure dans le même habitat (représenté par un carreau de la grille à 20 m). Les résultats pour les chevaines montrent plus de localisations conjointes, principalement en rive gauche. Les spots de localisations des barbeaux sont assez indépendants de ceux des silures (un peu de chevauchement le jour), alors que ceux des chevaines sont assez chevauchant le jour et la nuit.

Première approche des trajectoires lors des changements de l'environnement

Les barbeaux et les silures sont plus localisés en resting tandis que les chevaines sont plus souvent localisés en moving (les pourcentages de localisation en moving sont respectivement 47%, 45% et 57%).

Les barbeaux sont plus localisés en resting le jour (56%) alors que pendant les trois autres phases les proportions de localisations en resting et en moving sont comparables. Les chevaines sont plus localisés en moving à l'aurore (67%) et le jour (61%) et en resting la nuit (65%). Les silures sont plus localisés en resting le jour (68%) et sont plus localisés en moving la nuit (57%).

Pendant les phases de changement de débit, la principale différence de proportions entre localisations en moving et en resting par rapport aux proportions pour l'ensemble du suivi est que les barbeaux sont plus souvent localisés en moving pendant les montées de débit (surtout les plus importantes).

Le passage des gouttes froides ne modifient pas les proportions de localisations en resting et en moving observées pour l'ensemble du suivi.

L'analyse de l'orientation des déplacements entre deux localisations montre que les individus se déplacent soit de manière homogène dans les 4 directions principales (surtout barbeaux) soit principalement dans le sens longitudinal (surtout chevaines et quelques silures). Il faut souligner une forte variabilité interindividuelle dans la direction des déplacements.

Les barbeaux se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min. Les déplacements médians par individu varient de 21 à 58 m à l'aurore, de 28 à 40 m le jour, de 28 à 62 m au crépuscule et de 13 à 46 m la nuit. Les barbeaux ne montrent globalement pas de différence de distance parcourue entre les différentes phases de débit.

Les chevaines se déplacent individuellement de 0 à 250 m en 10 min. Les déplacements médians par individu varient de 32 à 90 m à l'aurore, de 29 à 76 m le jour, de 18 à 83 m au crépuscule et de 19 à 38 m la nuit. Les chevaines se déplacent moins la nuit (toutes les médianes individuelles sont inférieures à 50 m / 10 min). Les déplacements médians les plus élevés s'observent à l'aurore et au crépuscule. Il ne semble pas y avoir de lien entre la taille des individus et leurs déplacements médians par phase nyctémérale. Enfin, les chevaines ont tendance à se déplacer un peu moins lorsque le débit baisse.

Les silures se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min. Les déplacements médians par individu varient de 11 à 75 m à l'aurore, de 6 à 57 m le jour, de 5 à 52 m au crépuscule et de 3 à 94 m la nuit. Globalement les silures se déplacent moins le jour et plus la nuit. Enfin, les silures ont tendance à se déplacer moins quand le débit monte et plus quand le débit baisse.

L'analyse descriptive des trajectoires individuelles lors des montées et descentes de débit ne permet pas de détecter un comportement particulier laissant présager une réponse de type spécifique et systématique aux modifications de débit (e.g. échappement vers les berges lors des montées de débit)

Un effort particulier a été mis dans le développement d'un outil de visualisation simultanée, pour une trajectoire continue donnée, du déplacement du poisson dans le site d'étude et des valeurs utilisées pour les principaux paramètres (profondeur, vitesse et température) pour chaque localisation. Une indication du débit et de la température de l'eau en amont du site d'étude est fournie.

Quatrième partie : TELEMETRIE MOBILE - 2010

L'objectif de la seconde expérimentation, menée en 2010, avec une technique de télémétrie mobile était de compléter les connaissances à propos des déplacements des poissons du Rhône dans le secteur de Bugey. En 2009 la station d'étude était longue d'à peine 2 km, or les adultes des espèces étudiées peuvent parcourir des distances bien plus grande au cours de l'année, et notamment au moment de la reproduction (Baras et Philippart, 1999 (barbeau) ; Ovidio et Philippart, 2007 (Hotu)). C'est pourquoi nous avons voulu estimer les distances totales que pouvaient parcourir des poissons adultes et savoir si ces déplacements pouvaient être reliés à des variations de débit (variations hebdomadaires) ou de température de l'eau du Rhône. Ces données complèteront les connaissances acquises en 2009 sur le comportement individuel de certaines espèces pour mieux évaluer leurs exigences et sensibilités aux variations hydrodynamique et thermique du Rhône. Les échelles de temps et d'espace pour cet échantillonnage sont très différentes de celles de l'expérimentation de 2009. Ici, nous avons échantillonné le tronçon complet entre Sault-Brénaz et Jons à un rythme hebdomadaire pendant 9 mois.

Description des conditions environnementales

Une description du site d'étude (tronçon entre Sault Brénaz et Jons), des chroniques de débit et de température en 2010 ont déjà été présentés (Figure 1 à Figure 5)

Une description du modèle hydrodynamique 2D (développé sous Modeleur V1.8 – 2008 – INRS-ETE) permettant de simuler les conditions hydrauliques dans une large gamme de débit (150 à 1000 m³.s⁻¹) et une description des résultats généraux des simulations pour les conditions observées sont disponibles dans (Capra *et al.*, 2011a et 2011b). A cette échelle du tronçon complet la modélisation de la température de l'eau n'est pas disponible.

Expérimentation de télémétrie acoustique mobile

Principe – intérêt

Le suivi est fait par bateau de l'amont vers l'aval depuis Sault- Brénaz jusqu'à Jons (35 km de linéaire) en parcourant toute la zone y compris les lônes et l'intérieur des îles lorsque le débit le permet (Figure 72).

Il faut compter six à sept heures pour assurer l'inventaire complet du tronçon. Le suivi est fait à un rythme hebdomadaire, généralement le mardi.

Déploiement

Le matériel utilisé est composé de (Figure 73 et Figure 74):

- récepteur ATR (Acoustic Tag Receiver) sur lequel les hydrophones sont reliés,
- transformateur spécifique pour l'ATR,
- deux hydrophones directionnels (angle d'écoute de 30°),
- deux hydrophones omni-directionnels (angle d'écoute de 180°),
- ordinateur portable de terrain (et son alimentation)
- un compas (repérage du positionnement du bateau, et de l'angle entre les hydrophones et le nord). Le Compas est un double GPS qui permet de connaître la position du bateau (avec une

précision inférieure à 60 cm) et l'angle du bateau avec le Nord (avec une précision inférieure à 1°).

Une barre est installée à l'avant du bateau de manière transversale à l'axe de navigation. De chaque côté sont installés un hydrophone 30° et un 180°. Ainsi une large portion d'écoute est assurée.

L'enregistrement des sons dans l'eau est fait par l'intermédiaire de l'ordinateur qui génère un fichier horaire. L'ordinateur assure l'enregistrement des positions et des angles à la seconde. L'horloge de l'ordinateur est synchronisée avant chaque descente à l'heure GPS. Cela permet de faire le lien entre le moment où le poisson est repéré et la position du bateau et son angle.

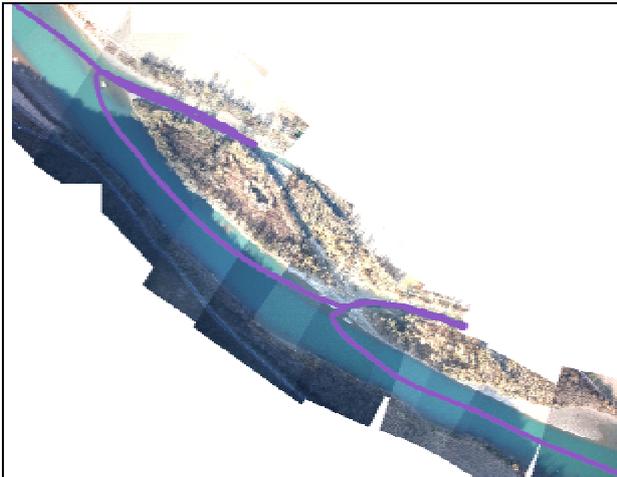


Figure 72 : Exemple de traces bateau pour la remontée des lônes situées à l'aval de Sault-Brénaz.

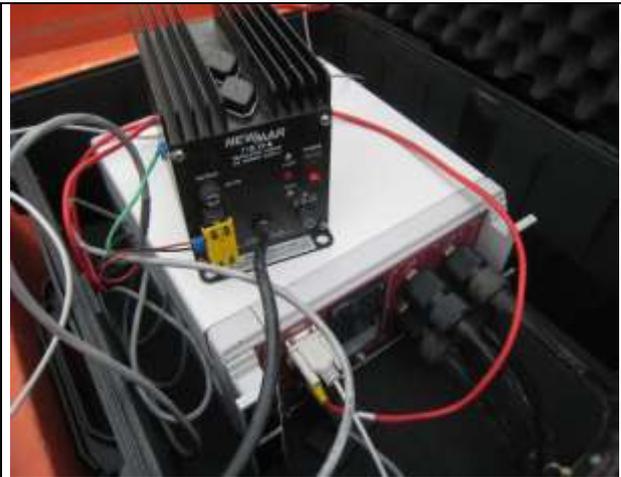


Figure 73 : Schéma de montage l'ATR et du transformateur.



Figure 74 : Schéma de montage du matériel sur le bateau. La coupole en aluminium renforcé permet de limiter l'écoute de l'hydrophone omni-directionnel (330°) à un angle de 180°.

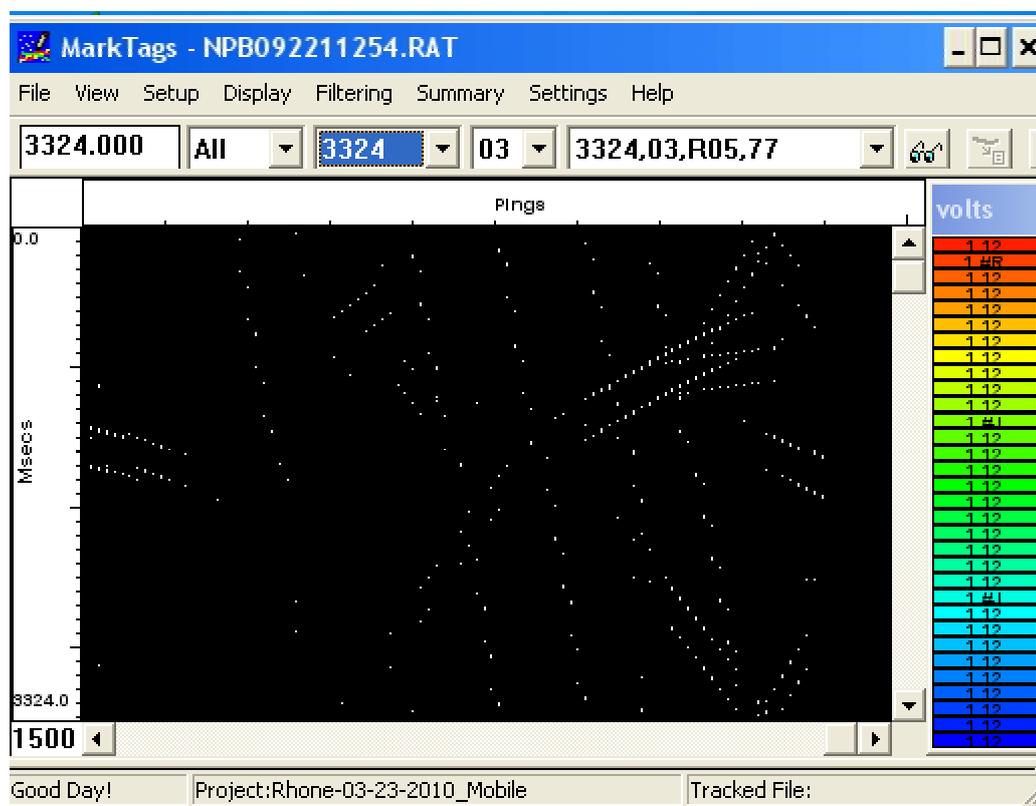


Figure 75 : Ecran de contrôle du logiciel MarkTags qui permet de saisir les marques des poissons. Les traits parallèles sont des marques représentant les poissons (ici, il s'agit d'un groupe de barbeaux fréquentant régulièrement le secteur des îles de Proulieu).

Test de précision

De la même manière que pour l'expérimentation de 2009 nous avons testé le pouvoir de détection et évalué la précision de localisation du système HTI de télémétrie mobile dans le Rhône (Pella *et al.*, 2011). Le pouvoir de détection et la précision de localisation après post traitement pour le système mobile sont essentiellement liés au gain (réglage sur le récepteur) et à la vitesse de déplacement du bateau par rapport à la marque, et dans un second temps à la distance entre l'hydrophone et la marque. Cependant les poissons ne sont pas localisés au m² près. L'objectif de cette étude est de connaître la partie du chenal occupé par chaque poisson (rive droite ou gauche) et sur quelle abscisse curviligne il se trouve entre St Brénaz et Jons.

Données poissons

Marquage

Une campagne de marquage de poisson a été réalisée du 15 au 19 mars 2010. Une période d'émission est définie pour chaque poisson ce qui permet de les identifier avec certitude, notamment par rapport à ceux marqués en 2009 et dont la marque n'était en théorie pas éteinte (9 individus, dont 3 ont été très peu localisés en été 2009).

Au total, 105 poissons de 10 espèces différentes ont été suivis.

Les espèces (et les effectifs par espèce) sont : anguille (1), barbeau (39), brème bordelière (1), brochet (1), carpe commune (5), chevaine (30), hotu (6), perche commune (1), sandre (2), silure(19). La Figure 76 donne les relations entre la longueur totale et la masse de chaque individu.

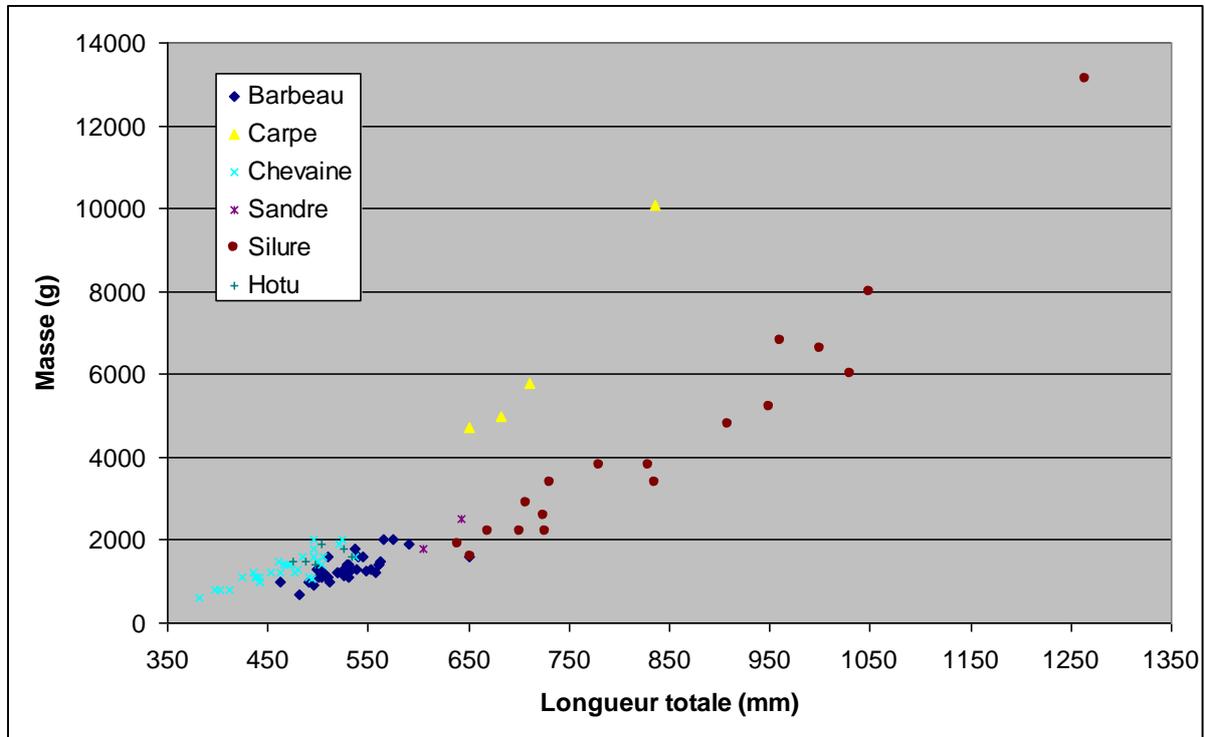


Figure 76 : relation entre la masse (grammes) et la longueur totale (mm) des individus marqués en 2010 ou en 2009 et dont les marques émettaient encore (et qui ont été détecté au moins une fois). Ne sont pas représentés sur ce graphe : anguille (816 ; 1000) ; brème bordelière (635 ; 3600) ; brochet (905 ; 6000) ; perche commune (445 ; 1600).

Traitement des enregistrements

Une fois le suivi réalisé, un travail de post-traitement est effectué pour identifier les poissons repérés et l'heure précise de la localisation. Ce travail est fait manuellement car la procédure automatique est trop sensible aux bruits ambiants. Ce post-traitement des sons enregistrés pendant le suivi consiste à repérer et saisir les marques correspondant aux poissons (Figure 75). A partir de cette sélection, le logiciel crée un fichier résultat où sont listés pour chaque poisson repéré, la période et l'heure où l'émission est la plus forte. A l'approche d'un poisson marqué et dans de bonnes conditions d'écoute, c'est l'hydrophone omni-directionnel du côté du poisson qui détecte la marque en premier. Dans un deuxième temps, l'hydrophone directionnel détecte lui aussi la marque. La sélection des marques est faite en privilégiant les hydrophones directionnels. En théorie, l'heure où l'émission est la plus forte correspond à l'heure où l'hydrophone directionnel est le plus proche du poisson.

Étant donné que l'ordinateur de terrain est synchronisé avec le temps GPS l'heure d'enregistrement des sons dans l'eau et l'heure de positionnement sont identiques. Le temps GPS permet donc de faire le lien avec la position du bateau et son angle par rapport au Nord. Ainsi pour l'ensemble des fichiers résultats issus de la saisie des marques des poissons, nous connaissons la position du bateau et l'angle correspondant.

La position du poisson à bâbord ou à tribord du bateau est déterminée par le numéro de l'hydrophone utilisé pour localiser le poisson. Les hydrophones directionnels (angle d'écoute de 30°) sont toujours utilisés pour définir la position du poisson. Cela permet d'être plus précis qu'avec les hydrophones omni-directionnels (angle d'écoute de 180°). De ce fait, il est possible de déterminer un cône de localisation à partir de la position du bateau, de l'angle et du côté lorsqu'un poisson est localisé.

Le sommet de ce cône est défini par la position du bateau.

L'angle est défini par l'angle de la barre porte-hydrophone par rapport au Nord plus et moins 15 °.

La longueur du cône est fixée à 300 mètres, ce qui correspond à la distance d'écoute de l'hydrophone.

Les cônes calculés sont ensuite découpés par l'emprise de la surface en eau modélisée au débit correspondant ((exemples Figure 77 et Figure 78)) au jour du suivi.

Une base de données contient l'ensemble des localisations des poissons pour l'ensemble des descentes.

Description générale des résultats

Un total de 32 descentes hebdomadaires sont disponibles entre avril et décembre 2010.

Les résultats sont une localisation par individu et pour chaque descente.

Les individus ne sont pas tous localisés à chaque descente.

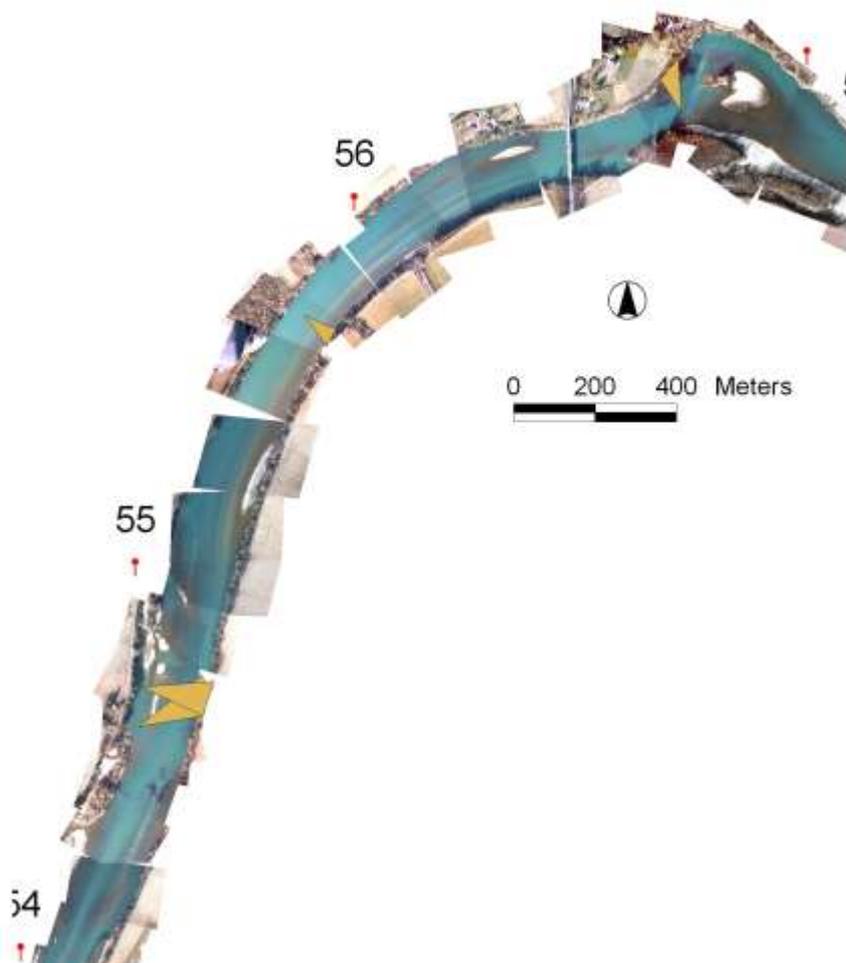


Figure 77 : Cartographie des cônes de positions de poissons du suivi du 21 décembre 2010. (aval Pont de Lagnieu; ; du Pk 54 à 57). Cf. Figure 1 pour le positionnement global.

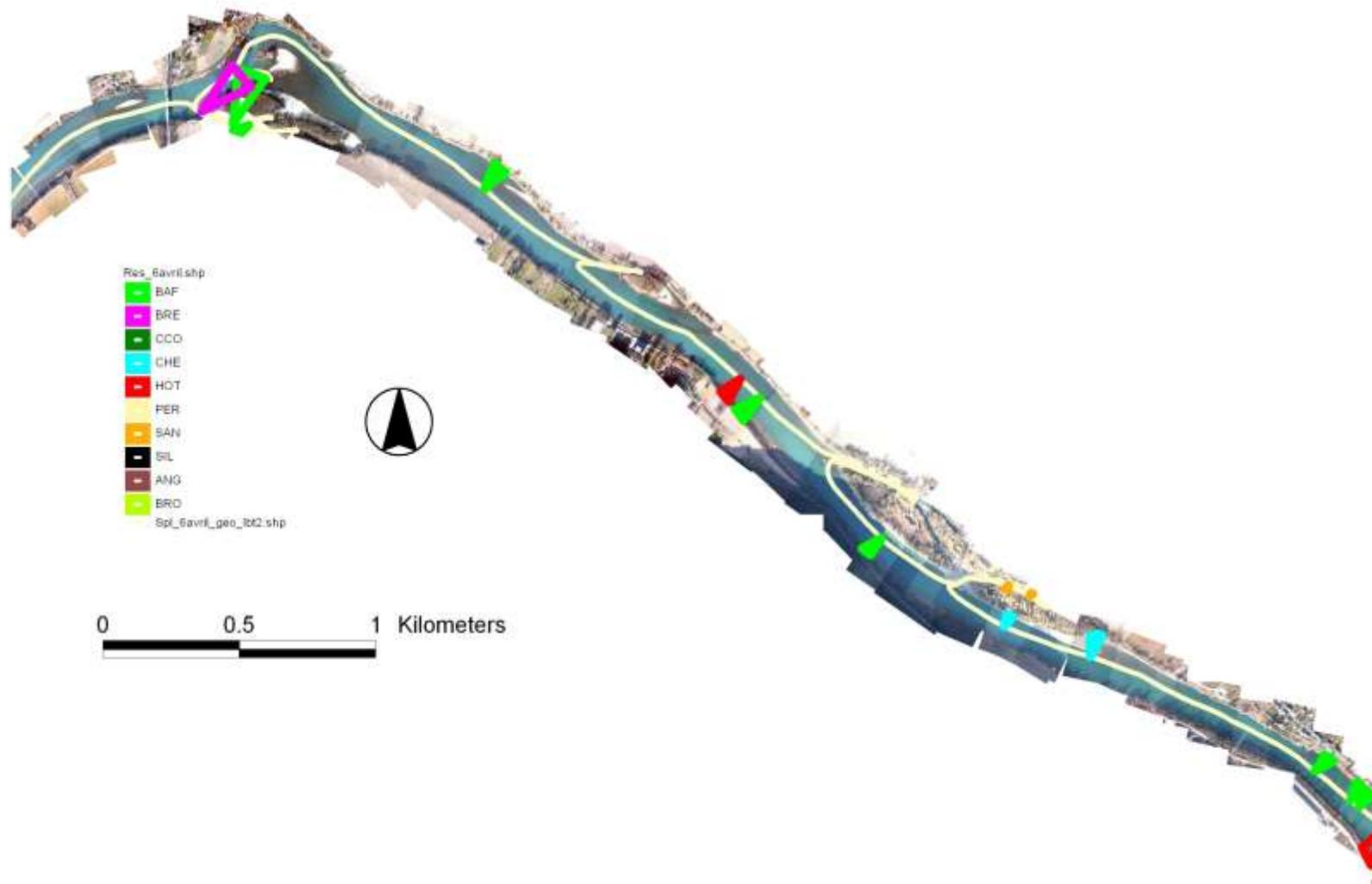


Figure 78 : Cartographie des cônes de positions de poissons du suivi du 6 avril 2010. (amont Pont de Lagnieu; PK 56 à gauche de l'image). Cf. Figure 1 pour le positionnement global.

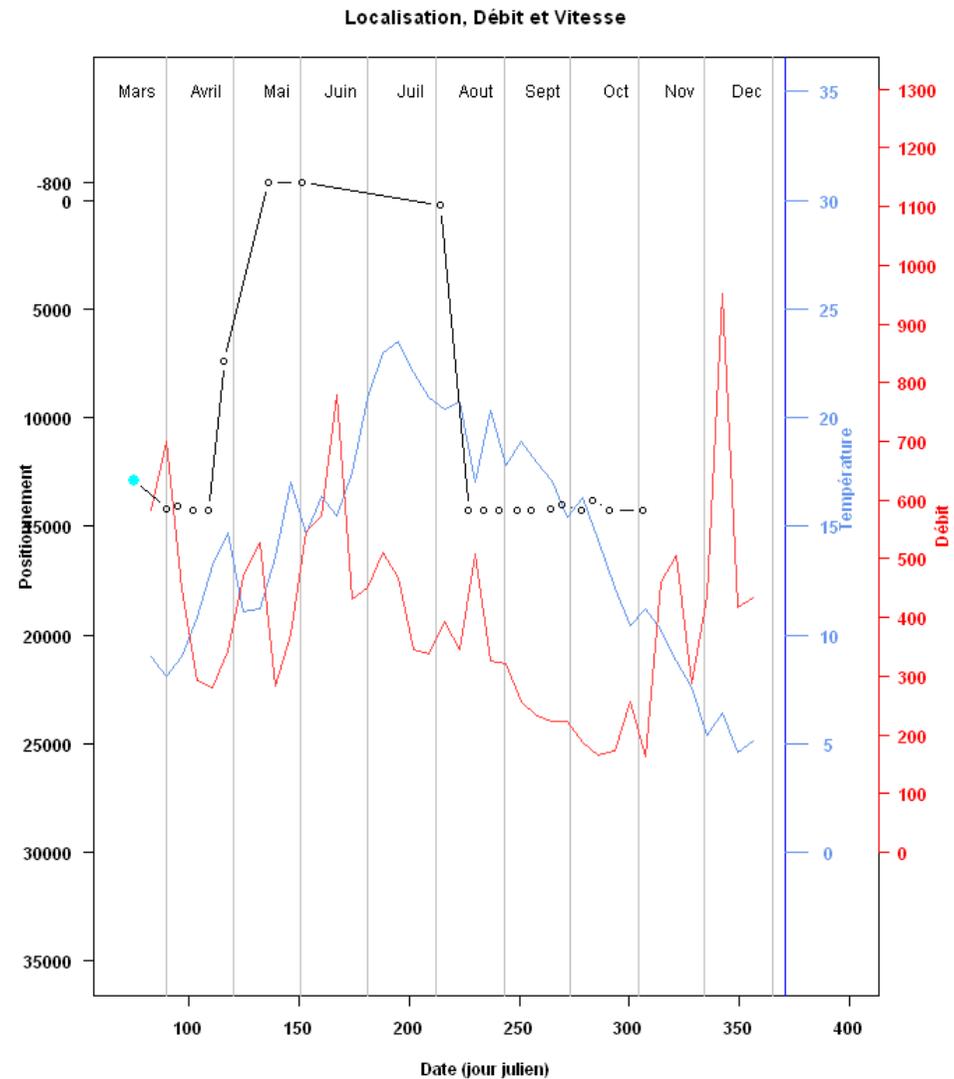
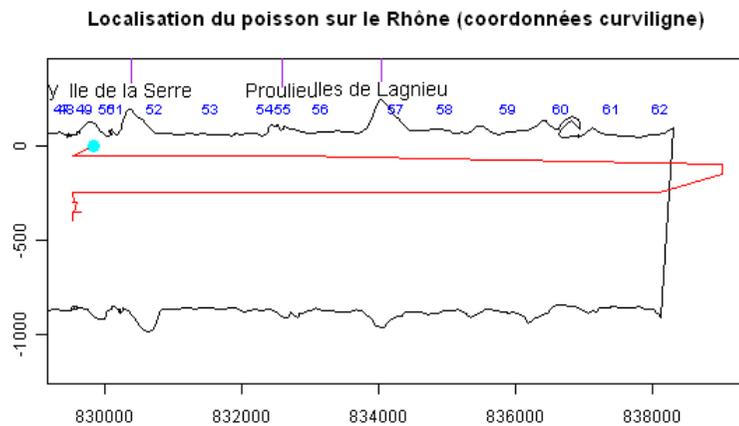
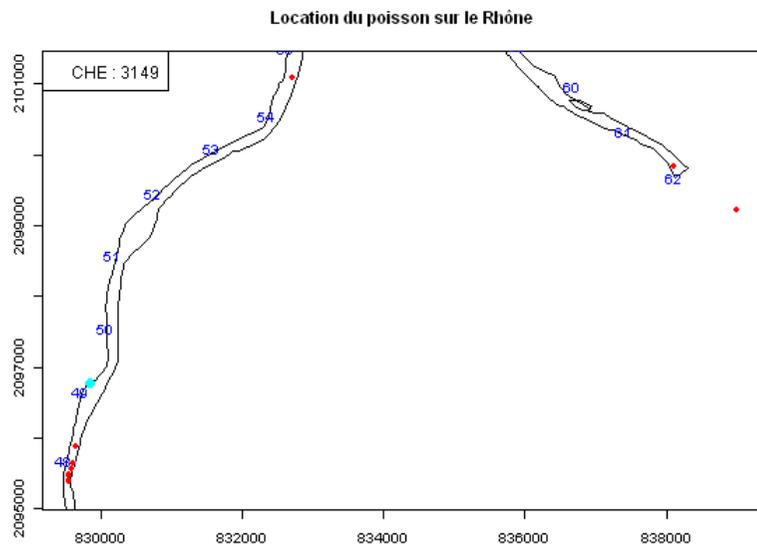


Figure 79 : Exemple de visualisation des résultat pour le chevine – 3149. En haut à gauche une vue en plan avec toutes les localisation (le nombre bleus = Pk) en ronds rouges (centre de gravité des triangles). En bas à droite une représentations des localisation en abscisses curvilignes, avec un décalage temporel selon l'axe des ordonnées qui permet de voir les directions des déplacements hebdomadaire (ici d'abord vers l'amont puis vers l'aval). A droite un graphique qui permet de visualiser en même temps les chronique de débit (rouge) et température (bleue) au pas de temps hebdomadaire et les déplacements (abscisse curviligne en noire).

Exploration des données

Résultats généraux

Un travail important a été mené pour mettre en place un système de visualisation des données de localisation pour chaque poisson. L'objectif était de voir simultanément les déplacements d'un individu, en conservant la notion d'amont et d'aval, et en visualisant les variations de débit et de température de l'eau dans le tronçon d'étude (Figure 79).

Nous avons résumé les informations individuelles en regroupant les déplacements observés sur l'ensemble du suivi 2010 dans 4 grands types : Resting (ne se déplace presque pas), Aval (pour un déplacement majoritairement vers l'aval), Amont (pour un déplacement majoritairement vers l'amont) et Mixte (à la fois vers l'aval et vers l'amont). La répartition des barbeaux dans ces 4 types de déplacements est relativement bien équilibré (R=15, Av=2, Am=13 et M=10) même si les barbeaux vont rarement vers l'aval uniquement ; La répartition des chevaines dans ces 4 types de déplacements est principalement en resting ou vers l'amont (R=12, Av=1, Am=14, et M=2) ; La répartition des silures dans ces 4 types de déplacements est majoritairement resting (R=10, Av=1, Am=4, et M=3).

L'expérimentation 2010 de télémétrie acoustique mobile nous a permis d'évaluer la mobilité saisonnière (distance parcourue et domaine vital longitudinal) des poissons dans le tronçon d'étude.

Comme ce fut le cas dans l'expérimentation de 2009 une forte variabilité inter individuelle était observée, avec des déplacements variant de 0 à 25 km en une semaine. Pour chaque espèce étudiée il apparaît que trois classes de domaine vital total peuvent être dégagées, les individus qui se déplacent peu (0 à 2km), les individus mobiles (2 à 4 km), et les individus très mobiles (4 à 25 km). La modélisation hydrodynamique couplée à une approche fonctionnelle (description des habitats pour la réalisation des fonctions vitales) permettra d'illustrer les fortes fidélités observées pour certains sites, ou de mieux caractériser les sites choisis pour la reproduction.

La distance moyenne parcourue par semaine et par espèce (tous les individus confondus) est de 692 m (46 m – 3583 m) pour le barbeau, de 608 m (72 m – 3113 m) pour le chevaine et de 291 m (2 m – 1674 m) pour le silure. Les domaines vitaux totaux évalués pour tous les individus par espèce sont de 6738 m (245 m – 34950 m) pour le barbeau, de 4876 m (355 m – 27720 m) pour le chevaine et de 2161 m (5 m – 12485 m) pour le silure.

Analyse des déplacements individuels

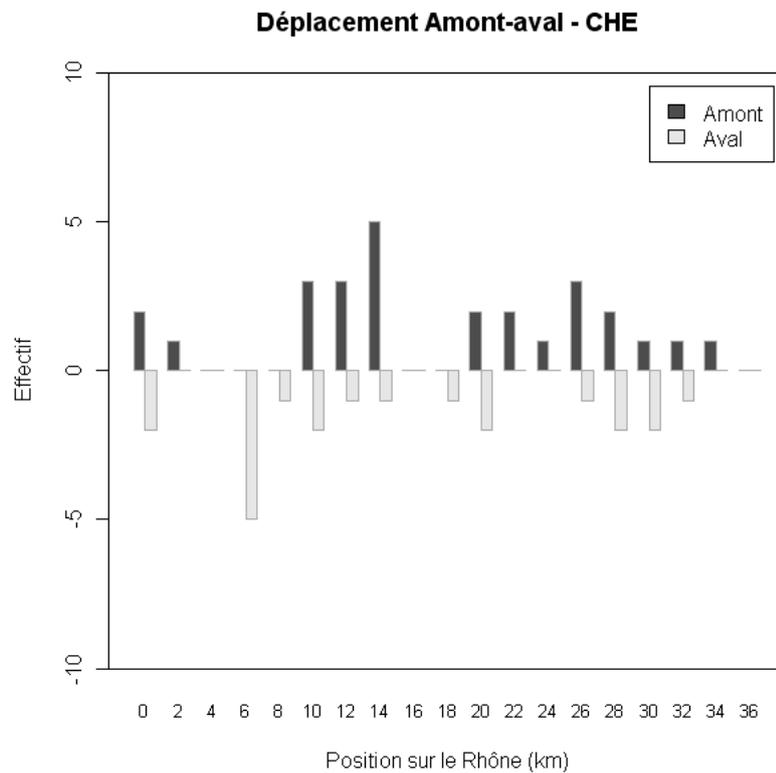
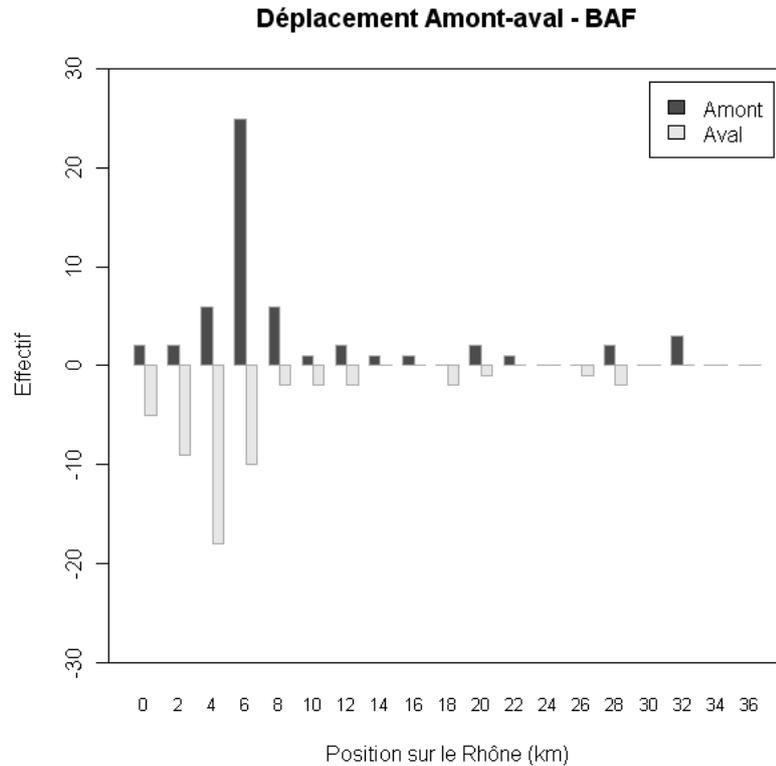
Analyse des déplacements amont – aval

Par espèce, tous les individus sont considérés simultanément. On ne considère que les déplacements de plus de 1000 m entre deux localisations successives, vers l'amont comme vers l'aval :

- si vers l'amont, alors déplacement (depl) négatif, qu'on rapporte à du positif sur le graphe ;
- si vers l'aval, alors déplacement (depl) positif, qu'on rapporte à du négatif sur le graphe.

On porte sur un graphe le nombre de localisations, faisant suite à une montée ou une descente de plus de 1000 m, en fonction de sa distance par rapport au seuil de Sault-Brénaz (dist_debut), incrémentant de 0 à 35000 en direction de l'aval (Jons). Le graphe est un

histogramme dont l'axe-X est composé des classes de 2000 m (valeur de dist-debut), et l'axe-Y représente le nombre de localisations recensées par l'analyse par classe de dist-debut. Les effectifs des montées sont en valeurs positives, ceux des descentes en valeurs négatives (Figure 80).



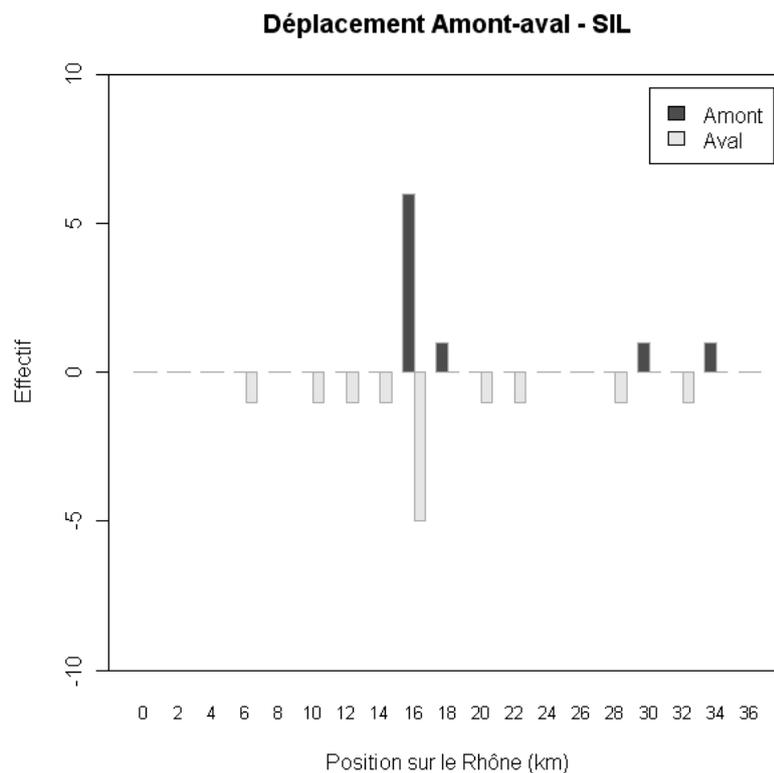


Figure 80 : distribution du nombre de localisations faisant suite à un déplacement de plus d'1 km vers l'amont (ordonnées positives) ou vers l'aval (ordonnées négatives) en fonction de la localisation longitudinale de départ du déplacement (axe horizontal, avec l'amont au km 0 et l'aval au km 36, par classes de 2 km) pour les trois espèces principales.

Les barbeaux sont essentiellement localisés dans le tiers amont du site d'étude (spot très important aux îles de Proulieu). Ils se déplacent vers l'aval et vers l'amont, mais d'après les résultats généraux, lorsqu'il y a un déplacement vers l'aval il est associé à un déplacement vers l'amont ensuite (peu de déplacements de type Av). C'est pour cela que les histogrammes amont et aval ne sont pas en phase.

Les chevaines sont mieux réparties dans la totalité du site d'étude. Il y a globalement plus de déplacements vers l'amont que vers l'aval, et les histogrammes sont aussi décalés comme pour le barbeaux, ce qui tend à montrer que beaucoup d'individus reviennent au même endroit (forte proportion de R dans les résultats généraux).

Les silures sont majoritairement au centre du site d'étude (proche du CNPE) et à l'aval. Ils se déplacent globalement moins que les barbeaux et les chevaines.

Analyse des déplacements nets en fonction de la température de l'eau et du débit

Le déplacement net est la valeur absolue de déplacement (depl).

Déplacements par période de température

On définit des gammes de température pour lesquelles il a déjà été relevé une activité de déplacement pour certains cyprinidés (Ovidio & Philippart 2007 (Hotu) ; Baras & Philippart 1999 (Barbeau)). Pour des raisons de simplicité, nous utiliserons les mêmes gammes de température pour les espèces étudiées ici, barbeau, chevaine et silure. Nous avons ainsi défini 3 classes de température dont les limites exprimées en °C sont :

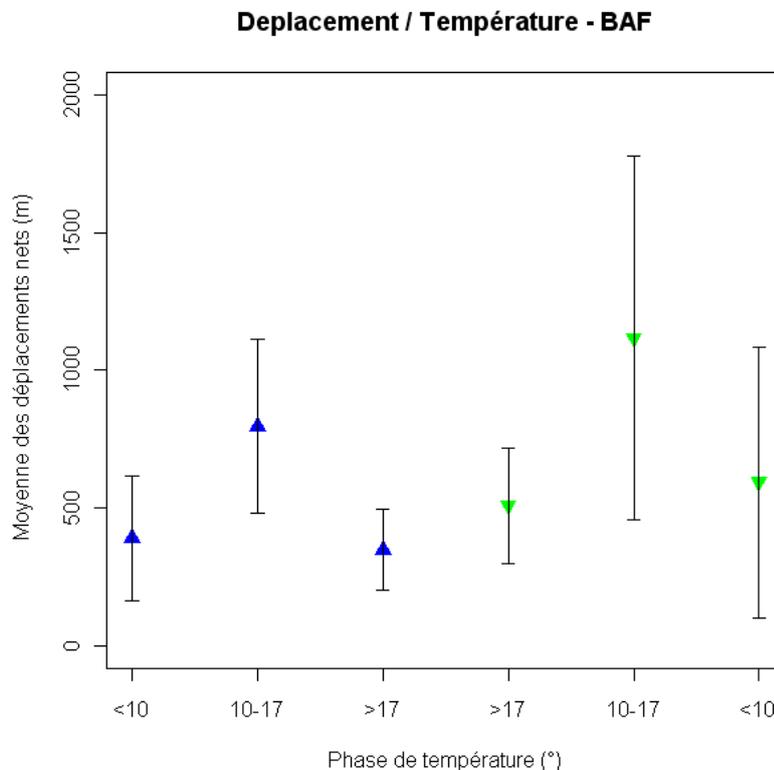
< 10 ; 10 à 17 ; > 17

Nous avons identifié les phases de montée et de descente de la température de l'eau (en moyenne journalière) pour 2010. La date de basculement d'une phase à l'autre est le 17 juillet 2010.

Ainsi le croisement des trois classes de température pour les poissons et des deux phases de température sur l'année 2010 donne 6 périodes à analyser qui se caractérisent par les limites successives de température suivantes (en °C) :

< 10 ; 10 – 17 ; > 17 (montée); > 17 (descente); 17 – 10 ; < 10

Nous avons pour chaque espèce calculé la moyenne des déplacements pour chacune des 6 périodes (Figure 81).



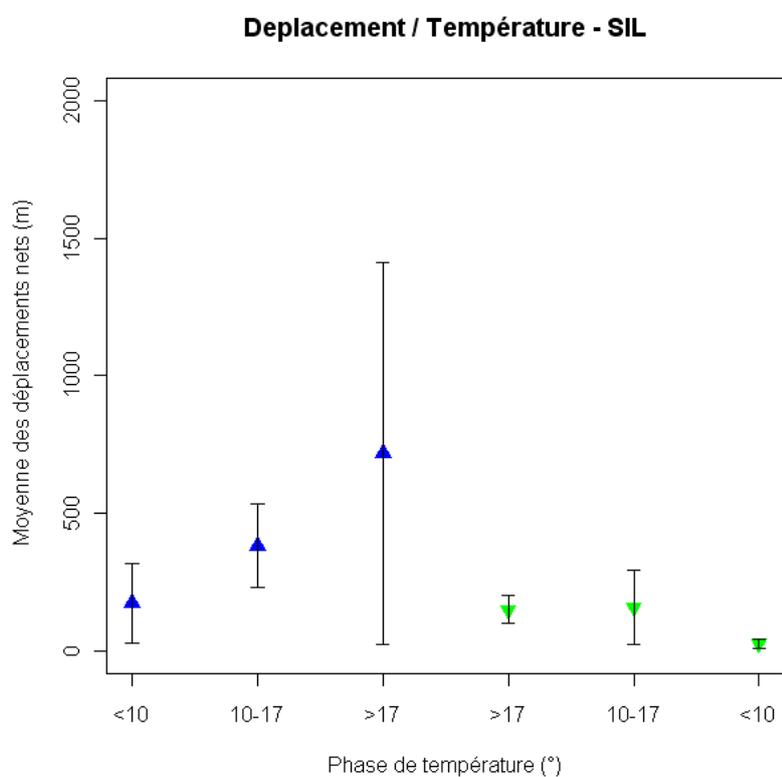
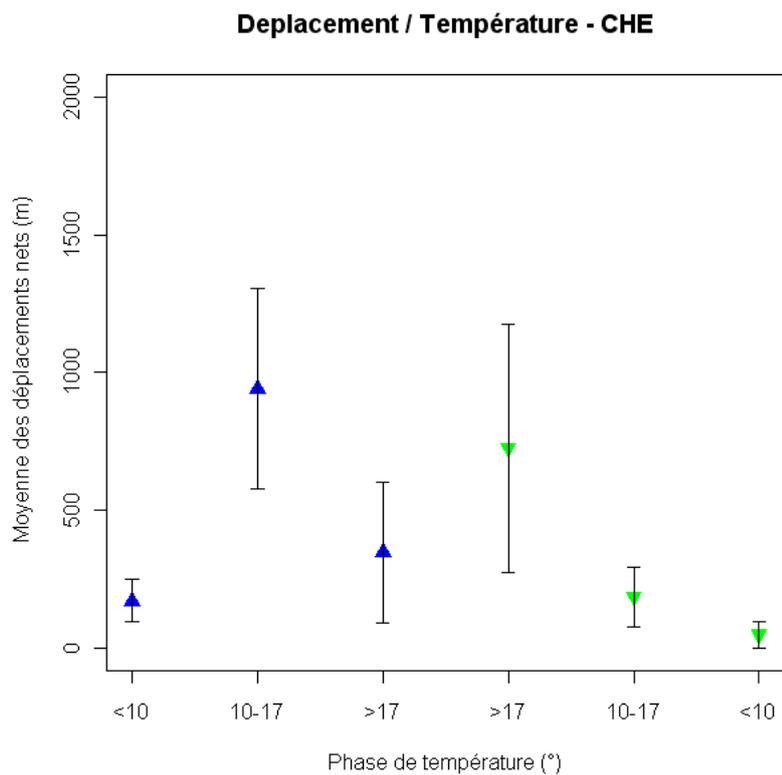


Figure 81 : Distance moyenne (et IC) des déplacements des barbeaux (BAF), chevaines (CHE) et silure (SIL) en 2010 pour les 6 périodes définies relativement à des seuils de température.

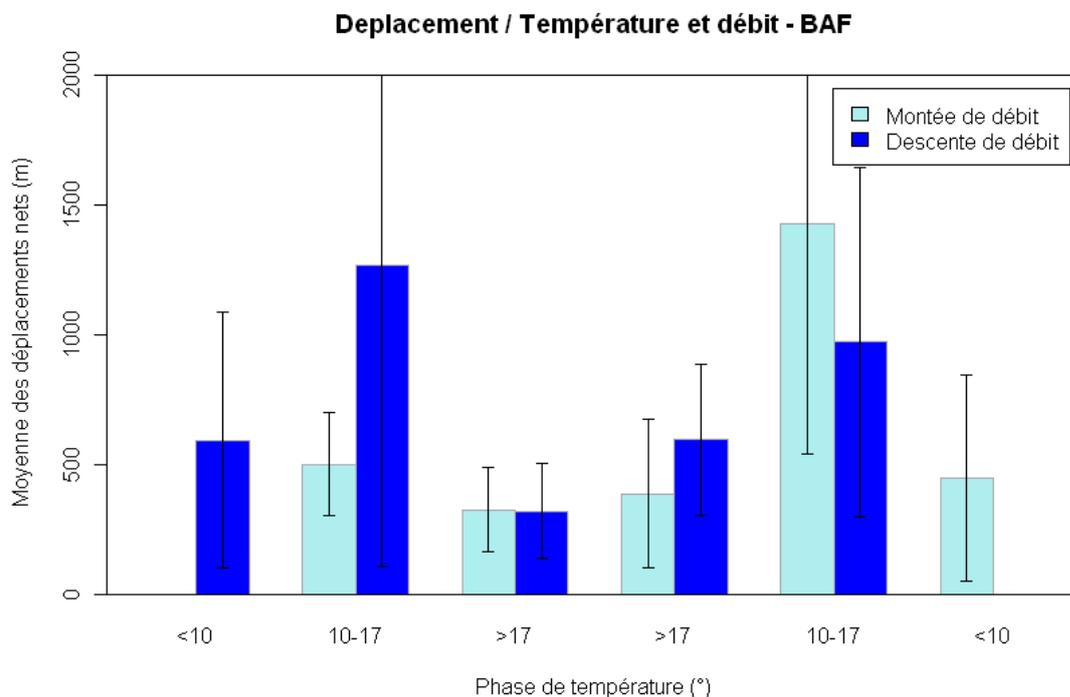
Les barbeaux se déplacent nettement plus pour une température de l'eau entre 10°C et 17°C. Les chevaines se déplacent plus quand la température de l'eau se réchauffe et lorsqu'elle est comprise entre 10°C et 17°C, et quand la température diminue, tant qu'elle reste supérieure à 17°C.

Les silures se déplacent plus lorsque la température se réchauffe et qu'elle dépasse 10°C. Ils se déplacent moins quand la température de l'eau diminue.

Déplacements par période de température et de changement de débit

Nous avons identifié les phases de montée et de descente de débit (en moyenne journalière) pour l'année 2010. A l'inverse de la température les montées et descentes de débit se succèdent dans le temps.

Les changements de débit sont évalués en comparant le débit moyen observé avant la localisation n au débit moyen observé avant la localisation n-1. Si l'écart de débit (localisation n – localisation n-1) est positif alors il y a eu une montée de débit, et si l'écart est négatif, alors le débit a diminué (descente). Ainsi pour chaque période de température de l'année 2010 (cf. c-dessus) nous pouvons calculer une distance moyenne parcourue pendant les montées et pendant les descentes de débit (Figure 82).



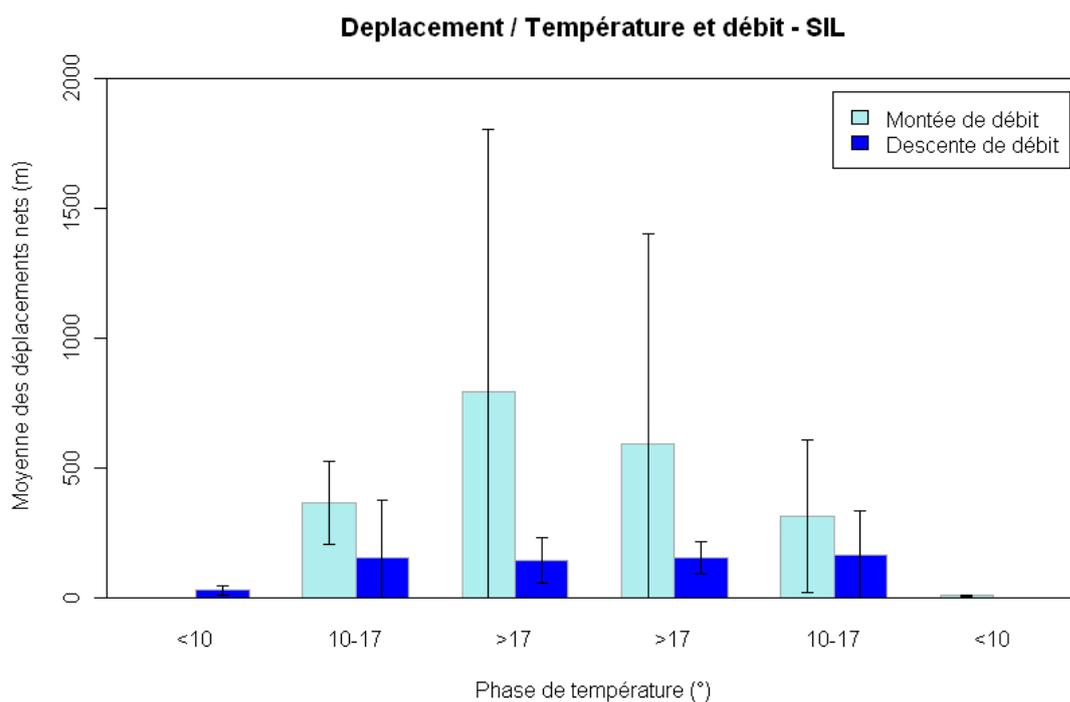
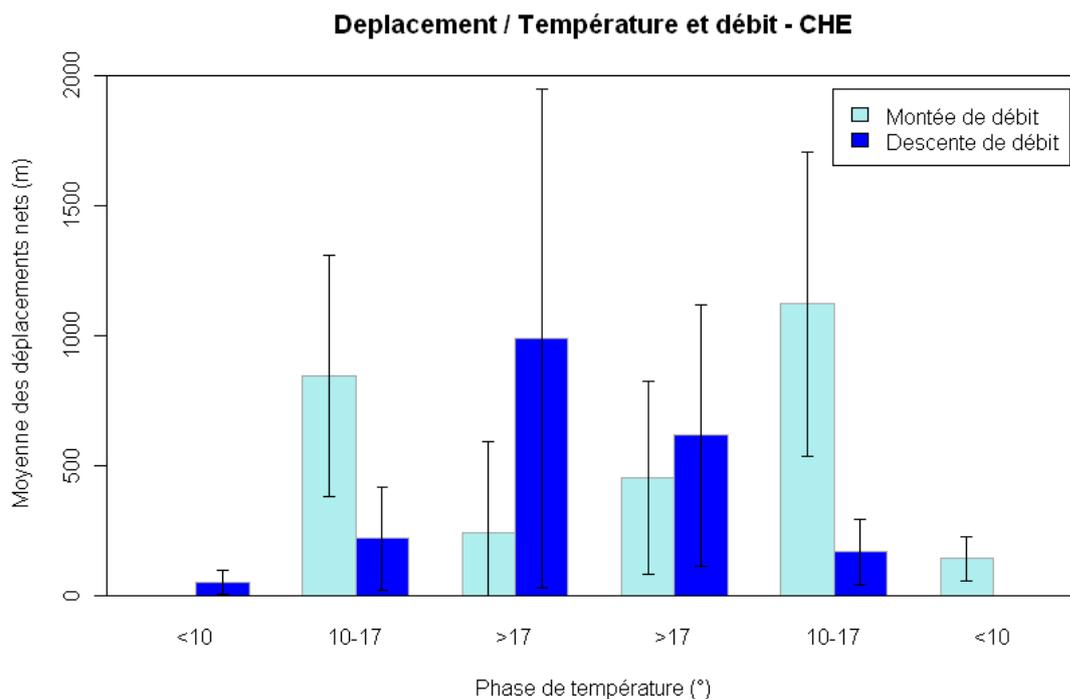


Figure 82 : Distance moyenne (et IC) des déplacements des barbeaux (BAF), chevaines (CHE) et silure (SIL) en 2010 pour les 6 périodes définies relativement à des seuils de température et pour chacune de ces période pour les montées (bleu clair) et les descente (bleu foncé) de débit entre deux localisations.

Les barbeaux se déplacent plus dans la gamme de température de l'eau 10°C-17°C, mais si la température est en phase de montée alors les barbeaux se déplacent plus pendant les descentes de débit et si la température est en phase de descente alors les déplacements sont un peu plus longs pour les montées de débit.

Les déplacements des chevaines sont plus longs pour les descentes de débit si la température de l'eau est supérieure à 17°C, et pour les montées de débit si la température de l'eau est entre 10°C et 17°C.

Les silures se déplacent toujours plus quand le débit monte que quand le débit descend si la température de l'eau est supérieure à 10°C.

Conclusions

Une première exploration des données de l'expérimentation de télémétrie acoustique mobile de 2010 a confirmé que cet échantillonnage était tout à fait adapté aux questions posées concernant l'évaluation des distances de déplacement au sein du tronçon et l'influence de la température de l'eau et du débit sur ces déplacements (déclenchement, distance). L'intérêt d'échantillonner l'ensemble du tronçon limite implicitement le biais de représentativité que peut engendrer le choix d'une station d'étude pour l'évaluation des déplacements des individus adultes. En revanche le pas de temps de localisation peut difficilement être inférieur à la journée. De ce fait l'expérimentation mobile de 2010 est tout à fait complémentaire de l'expérimentation fixe de 2009 dont l'avantage était de pouvoir détecter des changements de comportement à l'échelle infra journalière.

Il serait cependant nécessaire, malgré la durée de chaque descente complète du tronçon étudié (environ 10h-12h au total avec les déplacements), d'augmenter la fréquence des localisations surtout lors des périodes cibles de déplacement (e.g. température de l'eau dépassant 10°C). Une campagne d'observation journalière a été effectuée sur une semaine en mai 2010, avec en plus deux descentes de nuit, mais ces données n'ont pour l'heure pas été traitées. Les résultats pourraient démontrer l'intérêt d'un échantillonnage plus dense sur certaines périodes, avec des déplacements enregistrés à l'échelle d'un ou de quelques jours.

Il est important de noter que la variabilité inter individuelle montrée par nos données est très forte. Elle peut cependant être amplifiée par le rythme hebdomadaire des échantillonnages, puisque certains individus pourraient très bien faire un aller retour de plusieurs kilomètres en moins d'une semaine. Même s'il semble que tous les poissons ne se déplacent pas sur de longues distances, certains individus, des trois espèces principalement suivies en 2010, parcourent des distances de plusieurs kilomètres en une semaine. Ainsi l'habitat disponible nécessaire pour ces individus adultes ne se limite pas à quelques centaines de m², mais bien à un tronçon de plusieurs dizaines de kilomètres. La notion de connectivité des habitats, notamment en lien avec la reproduction, n'est pas que théorique, c'est une exigence importante dans le cycle de développement des poissons du Rhône, même dans un tronçon soumis à éclusées.

Les premiers résultats obtenus avec l'analyse exploratoire des données de 2010 montrent que la température de l'eau et le débit sont, pour les trois espèces principalement suivies (barbeau, chevaine et silure) dans le Rhône à hauteur du Bugey, des facteurs qui régulent les déplacements individuels. Il semble qu'en dessous de 10°C très peu de déplacements sont effectués par les trois espèces. Entre 10°C et 17°C les cyprinidés (barbeaux et chevaines) effectuent leurs plus longs déplacements, et c'est au delà de 17°C que les silures se déplacent le plus. L'influence du débit est plus difficile à mettre en évidence à cette échelle d'observation, mais les premiers résultats obtenus montrent que les augmentations ou diminutions du débit moyen hebdomadaire peuvent influencer les distances parcourues lors

des déplacements, mais toujours en fonction de la température de l'eau. La température de l'eau est donc a priori le facteur le plus déterminant des deux facteurs étudiés (température et débit) dans le déclenchement des grands déplacements observés à l'échelle du tronçon Sault-Brénaz – Jons, lors de l'expérimentation de télémétrie mobile.

Enfin, les localisations des individus enregistrées sur plusieurs mois mettent en évidence des habitats colonisés préférentiellement par certaines espèces (e.g. : les îles de Proulieu pour les barbeaux ; les habitats atteints lors des déplacements...). Grâce à la modélisation hydrodynamique nous allons pouvoir caractériser ces habitats et analyser leur caractéristiques hydrauliques en fonction du débit. Ces résultats associés à ceux enregistrés lors de l'expérimentation de 2009 au droit du CNPE de Bugey compléteront nos connaissances de la sélection de l'habitat par les poissons dans le Rhône.

Perspectives

La forte concentration des barbeaux autour des îles de Proulieu permet d'envisager une expérimentation proche de celle effectuée en 2009 mais centrée sur cette espèce, en lien avec un suivi mobile (du type de celui de 2010) pour connaître simultanément les déplacements locaux (en fonction des changements de débit et des conditions d'habitat) et à plus grande échelle (e.g. reproduction). Ce type d'enregistrement (plus ciblé sur une espèce et son rythme d'activité) permettrait d'aller vers une description plus « fonctionnelle » du comportement des poissons suivis et d'affiner, grâce à la modélisation hydrodynamique, les caractéristiques physiques des différents habitats fonctionnels.

Nous n'avons pas pu marquer beaucoup de hotus, mais il serait très intéressant de pouvoir le faire dans une future expérimentation. En effet nous ne capturons qu'exceptionnellement des individus adultes dans le tronçon étudié, et pourtant, les échantillonnages du suivi réglementaire du CNPE de Bugey montrent certaines années un très bon recrutement pour le hotu (e.g. 2009), sans que l'abondance relative des juvéniles ou des adultes dans le secteur soit en augmentation ensuite. Nous manquons de connaissances sur cette espèce.

Une étude plus approfondie du comportement des silures pourrait aussi être très informative quant à ses capacités de colonisation du milieu. Est il un réel danger pour la biomasse des poissons autochtones ? L'augmentation des durées à faible débit est elle un facteur favorable à l'expansion du silure dans le Rhône ? Une étude simultanée de la sélection de l'habitat au cours de son développement ontogénique et de ses stratégies alimentaire et de reproduction permettrait d'évaluer si le développement du silure se fera forcément au détriment (de type invasif) d'autres espèces (hotu, gardon...).

CONCLUSIONS

Synthèse des résultats

Nous avons étudié le comportement estival de trois espèces de poisson caractéristiques du peuplement piscicole actuel du Haut Rhône le barbeau, le chevaine et le silure. L'objectif était de décrire le comportement d'individus adultes à deux échelles de temps et d'espace pour évaluer le rôle de la température de l'eau et des variations artificielles de débit sur leur sélection d'habitat. Le comportement des poissons était déterminé grâce à la connaissance des localisations des poissons dans leur environnement et grâce à la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des conditions physiques environnementales. Les localisations des poissons étaient enregistrées in situ en utilisant un équipement de télémétrie acoustique après implantation de marques émettrices dans les poissons. Les conditions environnementales du site d'étude étaient parfaitement connues en tout point et à toute heure du suivi des poissons grâce à un modèle hydrodynamiques en 2D, étalonné et validé pour une large gamme de débit. Soulignons ici qu'en 2009 le CNPE de Bugey n'a pas fonctionné à pleine puissance pendant l'été (arrêt tranche 3), ce qui est une situation assez fréquente (la disponibilité des réacteurs de Bugey a été de 75% en moyenne sur la période 1999-2009).

Sélection de l'habitat

L'analyse des préférences d'habitat globales (courbes et hydrosignatures de préférences) a montré que les barbeaux sélectionnent préférentiellement des vitesses faibles ($<0.6 \text{ m.s}^{-1}$) associées à des profondeurs faibles ($<0.8 \text{ m}$) à fort débit ($> 500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) ou au contraire à des profondeurs très fortes ($>3.2 \text{ m}$) pour des débits faibles à moyens ($< 500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Dans la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 (de 15°C à 24°C) ces préférences hydrauliques sont bien marquées. Dans les veines d'eau échauffées à l'aval des rejets du CNPE, les profondeurs préférées sont comprises entre 1 m et 3 m pour une gamme de vitesses plus fortes (de 1.0 m.s^{-1} à 1.4 m.s^{-1}). Les barbeaux ne sélectionnent pas les températures supérieures à 25°C . Le substrat utilisé préférentiellement est le caillou, puis dans une moindre mesure le gravier et le bloc.

Les chevaines sélectionnent très fortement les profondeurs faibles ($<0.8 \text{ m}$) associées à des vitesses faibles ($<0.2 \text{ m.s}^{-1}$) dans toute la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 (de 15°C à 24°C). Dans le panache d'eau échauffée les chevaines sélectionnent plus des profondeurs ($<1.4 \text{ m}$) et des vitesses un peu plus importantes ($< 0.8 \text{ m.s}^{-1}$). Ils sélectionnent principalement des habitats profonds ($>3.2 \text{ m}$) uniquement à faible débit et leur spectre de préférences est sensiblement plus large lorsque le débit est stable. Les chevaines ne sélectionnent pas les températures supérieures à 23°C . Enfin aucun type de substrat ne semble être particulièrement sélectionné.

Les silures sélectionnent principalement des vitesses faibles ($< 0.4 \text{ m.s}^{-1}$) à moyennes ($<0.8 \text{ m.s}^{-1}$) pour pratiquement toutes les classes de profondeur, et plus spécialement les faibles profondeurs à fort débit. La gamme de température préférentielle des silures suivis au cours de l'été 2009 s'étale au delà de 23°C . Le substrat sélectionné est fin (sable) ou grossier (pierre et bloc).

Pour les trois espèces étudiées, les préférences hydrauliques établies dans la gamme de température de l'eau du Rhône observée au cours de l'été 2009 se caractérisent par des habitats plutôt lents ($< 0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et majoritairement peu profonds ($< 0.8 \text{ m}$). Ce type d'habitat, d'autant plus sélectionné que le débit augmente, est utilisé plus de 20% du temps total de localisation pour chacune des trois espèces (barbeaux, 23%, chevaines, 40% et silures, 21%) alors qu'il ne représente que 15% de la surface totale disponible à $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 4.3% à $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et 2.1% à $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il s'agit bien d'un habitat hydraulique fortement sélectionné. Dans le panache d'eau échauffée à l'aval des rejets du CNPE de Bugey les préférences hydrauliques des cyprinidés, majoritairement localisés hors du panache, évoluent vers des habitats plus profonds et plus rapides.

Enfin, il existe une variabilité interindividuelle des préférences hydrauliques et thermiques très forte pour les barbeaux ($n=5$), assez forte pour les silures ($n=6$; sauf pour la vitesse de courant) et faible pour les chevaines ($n=7$). Cette variabilité individuelle n'est pas liée à la taille ni pour les barbeaux ni pour les silures. Pour les trois espèces les courbes de préférences individuelles pour le substrat sont très variables entre les individus.

Les barbeaux adultes suivis en 2009 dans le Rhône au droit du CNPE de Bugey sélectionnent principalement des habitats hydrauliques plus lenticulaires et moins profonds que ceux préférés par les barbeaux adultes observés lors des échantillonnages analysés par Lamouroux *et al.* (1999). Le Rhône à Bugey est pourtant d'un gabarit nettement supérieur à celui des rivières étudiées (e.g. Ardèche, Ain, Rhône court-circuité) par Lamouroux *et al.* (1999) et offre ainsi des surfaces d'habitat ayant de vitesses de courant et des profondeurs élevées beaucoup plus importantes. Il est donc surprenant que les barbeaux suivis en 2009 sélectionnent principalement les habitats peu profonds et lents. Les variations journalières de débit, et donc de disponibilité, pourraient expliquer ce résultat. En effet, le fait d'observer majoritairement les poissons en berge laisse penser que ceux-ci recherchent plutôt les habitats qui évoluent le moins (le moins vite) en fonction du débit. Les chevaines adultes suivis en 2009 ont quant à eux des préférences très proches des celles présentées par Lamouroux *et al.* (1999), notamment pour la vitesse de courant.

L'analyse cartographique des simulations de disponibilité en habitat favorables obtenues à partir de nos hydrosignatures de préférences hydrauliques montre une décroissance de la quantité d'habitat favorable disponible en fonction du débit pour les trois espèces. L'habitat favorable ainsi défini est uniquement disponible en berge. Des habitats favorables sont disponibles en rive droite pour les deux espèces de cyprinidés, mais ces habitats sont peu utilisés en été, sans doute à cause de la température de l'eau échauffée.

Répartition spatiale

Les principaux spots de localisation des barbeaux se répartissent en rive gauche, avec un faible chevauchement des localisations individuelles, puis en rive droite en amont du rejet 4-5, dans la confluence du rejet 2-3 (les barbeaux étaient localisés 7% du temps dans l'eau échauffée ; ces utilisations sont très courtes et très peu nombreuses pour chaque individu) et enfin autour du banc de galet. Les seuls spots où des localisations de plusieurs individus sont superposées sont le banc de galets et la confluence du rejet 2-3, le jour uniquement. La nuit les barbeaux utilisent des habitats nettement moins chevauchants.

Les chevaines sont quant à eux fortement inféodés à la rive gauche, avec quelques spots le jour et la nuit en rive droite (surtout en aval du rejet 4-5 ; les chevaines étaient localisés 4% du temps dans l'eau échauffée ; ces utilisations sont très courtes et très peu nombreuses pour chaque individu), avec un très fort chevauchement des localisations des différents individus suivis, principalement le jour et lors des changements de luminosité (aurore / crépuscule).

Les silures sont plus densément localisés en rive droite (les silures étaient localisés 53% du temps dans l'eau échauffée), principalement situés à l'aval du rejet 4-5 et au niveau de la confluence du rejet 2-3, mais également en rive gauche. Les localisations des silures semblent plus concentrées que celles des deux autres espèces, suggérant une mobilité moindre, et sont faiblement chevauchantes.

Les spots des localisations individuelles ne sont pas redistribués lorsque les localisations sont regroupées par phase de débit, signifiant ainsi que les changements de débit ne provoquent pas de déplacements vers des habitats différents. En revanche il semble que lorsque le débit demeure stable il y ait plus de localisations éparpillées (mouvements), et notamment dans le chenal. Selon les espèces et les individus c'est plutôt lorsque le débit monte (barbeau, chevaine, silure) ou descend (chevaine) que les localisations sont les plus regroupées (immobiles).

Les barbeaux et les silures ont rarement été localisés pendant la même heure dans le même habitat (représenté par un carreau de la grille à 20 m). Les résultats pour les chevaines montrent plus de localisations conjointes, principalement en rive gauche. Les spots de localisations des barbeaux sont assez indépendants de ceux des silures (un peu de chevauchement le jour), alors que ceux des chevaines sont assez chevauchants avec les spots des silures le jour et la nuit.

Nous n'avons pas détecté de regroupement d'individus au sein du site d'étude qui pourrait supposer la présence d'un refuge thermique, c'est à dire une zone où la température de l'eau pourrait être significativement plus fraîche que l'eau du Rhône, et a fortiori que l'eau échauffée issue du CNPE. Les relevés de température effectués pour l'étalonnage du modèle de température dans cette étude et pour l'étude du groupe GT-Thermie (Ciden) confirme cette conclusion. Dans le site d'étude de 2009, au droit du CNPE de Bugey, et la gamme de température de l'eau du Rhône enregistré en été 2009, l'utilisation de l'habitat par les différents individus marqués et suivis n'est donc pas influencée par la présence d'eau plus fraîche que l'eau du Rhône. En revanche la plus forte concentration des localisations des cyprinidés (barbeaux et chevaines) adultes en rive gauche, et plus globalement dans des habitats dont la température de l'eau reste inférieure à 25°C, permet de conclure à un évitement des veines d'eau échauffées à l'aval des rejets du CNPE de Bugey de la part des individus suivis pendant l'été 2009.

Déplacements et trajectoires

Les barbeaux sont plus localisés en resting le jour (56%) alors que pendant les trois autres phases les proportions de localisations en resting et en moving sont comparables. Les chevaines sont plus localisés en moving à l'aurore (67%) et le jour (61%) et en resting la nuit (65%). Les silures sont plus localisés en resting le jour (68%) et sont plus localisés en moving la nuit (57%).

Pendant les phases de changement de débit, la principale différence de proportions entre localisations en moving et en resting par rapport aux proportions pour l'ensemble du suivi est que les barbeaux sont plus souvent localisés en moving pendant les montées de débit (surtout les plus importantes).

Le passage des gouttes froides ne modifient pas les proportions de localisations en resting et en moving observées pour l'ensemble du suivi.

L'analyse de l'orientation des déplacements entre deux localisations montre que les individus se déplacent soit de manière homogène dans les 4 directions principales (surtout les barbeaux) soit principalement dans le sens longitudinal (surtout chevaines et quelques silures). Il faut souligner une forte variabilité interindividuelle dans la direction des déplacements.

Les barbeaux se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min. Les déplacements médians par individu varient de 21 à 58 m à l'aurore, de 28 à 40 m le jour, de 28 à 62 m au crépuscule et de 13 à 46 m la nuit. Les barbeaux ne montrent globalement pas de différence de distance parcourue entre les différentes phases de débit.

Les chevaines se déplacent individuellement de 0 à 250 m en 10 min. Les déplacements médians par individu varient de 32 à 90 m à l'aurore, de 29 à 76 m le jour, de 18 à 83 m au crépuscule et de 19 à 38 m la nuit. Les chevaines se déplacent moins la nuit (toutes les médianes individuelles sont inférieures à 50 m / 10 min). Les déplacements médians les plus élevés s'observent à l'aurore et au crépuscule. Il ne semble pas y avoir de lien entre la taille des individus et leurs déplacements médians par phase nyctémérale. Enfin, les chevaines ont tendance à se déplacer un peu moins lorsque le débit baisse.

Les silures se déplacent individuellement de 0 à 300 m en 10 min. Les déplacements médians par individu varient de 11 à 75 m à l'aurore, de 6 à 57 m le jour, de 5 à 52 m au crépuscule et de 3 à 94 m la nuit. Globalement les silures se déplacent moins le jour et plus la nuit. Enfin, les silures ont tendance à se déplacer moins quand le débit monte et plus quand le débit baisse.

A l'échelle du tronçon de 35 km les silures se déplacent moins que les barbeaux et que les chevaines. Les longs déplacements (jusqu'à 30 km) sont initiés dès que la température de l'eau dépasse les 10°C pour les barbeaux et les chevaines et les 17°C pour les silures.

L'analyse descriptive des trajectoires individuelles lors des montées et descentes de débit ne permet pas de détecter un comportement particulier suggérant une réponse de type spécifique et systématique aux modifications de débit (e.g. échappement vers les berges lors des montées de débit). Un nombre suffisamment important de déplacements ont été observés pour chaque espèce pour valider le fait que les individus marqués et suivis en 2009 se déplacent pendant les phases de changement de débit.

Un effort particulier a été mis dans le développement d'un outil de visualisation du déplacement des poissons dans le site d'étude avec les chronogrammes des profondeurs, des vitesses et des températures utilisées à chaque localisation. Une indication du débit et de la température de l'eau en amont du site d'étude est fournie simultanément.

En conclusion

- Le système de télémétrie acoustique choisi pour cette étude a parfaitement répondu aux attentes, notamment celles de la précision des localisations des individus (dans le temps et dans l'espace) et celle de la quantité d'individus suivis simultanément. L'ensemble du travail dépendait du déploiement de cette technologie dans le Rhône (fleuve vif et courant), et nous avons montré que cela était possible.
- L'apport de la modélisation hydrodynamique en 2D, définie comme préalable à notre étude, s'est révélée réellement indispensable pour comprendre la sélection de l'habitat par les poissons suivis en 2009, et le sera plus tard pour ceux suivis en 2010. La qualité de la modélisation, compatible avec l'erreur de positionnement des individus par le système de télémétrie acoustique, supporte entièrement la qualité du travail effectué avec les données du suivi de l'été 2009. Le couplage d'un suivi télémétrique de grande précision et d'une modélisation de l'habitat au même pas de temps est un travail très original et très novateur.
- Les variations de débit liées à la production hydroélectrique ne semblent pas influencer instantanément le comportement des poissons adultes étudiés. Ceux-ci sélectionnent très fortement les habitats lents et peu profonds. Or ces habitats à faible vitesse disparaissent très vite au delà de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui impose aux différents individus de rester en berge la plupart du temps. L'effet des variations artificielles de débit est sans doute de contraindre les individus à se maintenir dans les habitats les moins rapides. Mais cette contrainte ne semble modifier, par rapport aux connaissances disponibles à propos de l'éthologie des espèces étudiées, que les comportements des barbeaux. Ceux-ci semblent en effet moins grégaires que dans d'autres sites d'études (Ain, RCCs, Seine) et utilisent des habitats moins lotiques, pourtant disponibles.
- Les cyprinidés étudiés à l'été 2009 (barbeaux et chevaines) utilisent très peu les habitats dont la température est échauffée par les rejets d'eau chaude du CNPE. Ces deux espèces ne sélectionnent pas les habitats dont la température de l'eau est supérieure à 25°C pour le barbeau et à 23°C pour la chevaine. Le silure est plus thermophile, avec une sélection des températures de l'eau supérieure à 23°C , mais il ne semble pas se cantonner aux veines d'eau échauffées. Rappelons ici que l'emprise du panache d'eau chaude est d'autant plus forte, par rapport à la surface en eau, que le débit est bas.
- Certains adultes des trois espèces principales étudiées en 2009 et 2010, barbeaux, chevaines et silures, se sont déplacés de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres au sein du tronçon Sault-Brénez – Jons. Les variations infra-journalières de débit du Rhône dans le tronçon étudié ne semblent pas affecter le comportement de migration des adultes. Cela complète la vision plus « statique » de l'expérimentation de 2009, même si en été 2009 40% des individus marqués n'ont jamais été localisés dans le site d'étude (suggérant en cela des déplacements / migrations hors du site). Cela souligne également l'importance de la connectivité entre différents types d'habitats (e.g. accès à des habitats de reproduction). Il faut maintenant essayer de

caractériser les spécificités physiques et thermiques des habitats sélectionnés lors de ces déplacements très longs.

- Nous avons observé une variabilité inter individuelle importante des comportements (sélection de l'habitat, déplacements). Cela confirme le besoin de multiplier les expérimentations, avec le plus grand nombre d'individus possible pour chaque expérimentation. Des modèles de préférences représentant cette variabilité individuelle pourraient être développés (e.g. faisceau de courbes probabilisées) au profit de courbes moyennes plus globales.

Eléments de discussion

Modélisation hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique en 2D dans un fleuve comme le Rhône est très lourde à mettre en œuvre et ce n'est pas quelque chose de commun en France. Mais sans l'apport des simulations d'habitat disponible pour les poissons l'expérimentation de 2009 n'aurait pas fourni de lien direct entre le comportement des poissons et la variabilité des conditions environnementales. La très bonne connaissance des conditions hydrauliques et thermiques en tout point du site d'étude et pour toute la gamme des débits observés est absolument fondamentale dans l'étude du comportement des poissons en cours d'eau.

Cependant la qualité de la modélisation est directement fonction de la qualité des données d'entrée et de l'étalonnage des modèles. Par exemple dans notre cas une meilleure connaissance du fonctionnement (en terme de débit et de température des rejets) du CNPE n'aurait sans doute pas changé significativement les résultats mais nous permettrait d'être plus proches des conditions réelles vécues par les poissons. De manière plus générale l'effort investi dans l'acquisition de données de caractérisation du fonctionnement de l'écosystème étudié ne doit pas être minimisé, au contraire.

Des habitats peu connus

Dans le Rhône non court-circuité qui coule dans la plaine du Bugey, il existe beaucoup d'habitat profonds (profondeur supérieure à 2 m) et courants (vitesse de courant supérieure à 1.0 m.s^{-1}). Ces habitats ont été peu échantillonnés auparavant puisque les techniques classiques d'échantillonnage des poissons ne sont pas assez efficaces dans les conditions hydrauliques qui prévalent dans ce tronçon du Rhône. La pose de filets est très difficile à cause du courant, et d'autant plus quand le niveau d'eau varie beaucoup. La pêche électrique devient rapidement inefficace avec la profondeur et la vitesse de courant. Et l'observation directe est impossible la majorité du temps à cause de la turbidité. La répartition spatiale des poissons dans ces habitats typiques de grands cours d'eau (rapides et profonds) est donc peu connue. Il était intéressant d'étudier, grâce à une technique plus adaptée (la télémétrie acoustique), le comportement de poissons adultes dans des habitats lotiques et profonds. Il s'avère finalement que les individus marqués dans cette étude utilisent majoritairement les berges.

Notion de refuge thermique

Il ne semble pas y avoir de véritables refuges thermique (au sens de Torgersen *et al.*, 1999) au sein de la station d'étude de 2009. Ces refuges peuvent se caractériser par des affluents plus frais ou des résurgences d'eau plus fraîche au niveau du lit du cours d'eau. Il n'y a pas d'affluent dans la station d'étude et les poissons ne semblent pas se regrouper sur un habitat en particulier lorsque la température de l'eau est supérieure à 20°C. Notre expérience nous permet cependant de supposer que certains affluents, même petits (en terme de débit par rapport au Rhône), peuvent peut être jouer ce rôle. Lors des pêches de capture des poissons pour le marquage 2009, la confluence de l'Amby, juste en amont du site d'étude en rive gauche, était densément colonisée par des barbeaux, des silures, des chevaines et des hotus. Il se peut que l'Amby apporte aussi une nourriture plus spécifique recherchée par ces poissons mais le fait que les quatre espèces différentes aient des régimes alimentaires différents ne tend pas à soutenir cette hypothèse. Sur 18 poissons capturés dans la confluence de l'Amby, et relâchés dans le site d'étude (quelques centaines de mètres en aval seulement), 8 n'ont jamais été localisés dans le site d'étude (baf - 3114, 3702, 3450, 3219, 3534, 3548, hot - 3436, 3016.), 5 ont été très peu localisés, juste au début (baf - 3520, 3646, 3884, 3191) ou à la fin (baf - 3688) du suivi, 3 ont été suivis moyennement (che - 3590, 3562, baf - 3576 ; de 4780 à 20558 localisations), 1 a été très bien suivi (sil - 3856 ; 221832 localisations), et le che - 3443 est mort. Les poissons sil - 3856 et baf - 3884 implantés d'une marque Z (3 ans) ont été localisés plusieurs fois au cours du suivi mobile de 2010 dans la zone de confluence de l'Amby. L'attrait pour cette confluence semble donc important, et il serait intéressant de caractériser plus finement les qualités physico-chimiques de cet affluent (jugé en bon état chimique en 2009 ; http://sierm.eaurmc.fr/geo-sdage/synthese-fiches.php?codeFiche=RM_08_09&typeFiche=SB), et notamment l'effet potentiel des rejets issus des abattoirs de Hières-sur-Amby s'ils sont toujours présents.

Notion de connectivité

En terme de connectivité longitudinale, le tronçon étudié (Sault-Brénaz à Jons) peut être considéré comme isolé :

- à l'aval, ni Cusset ni Jons ne permettent les migrations vers l'amont ;
- à l'amont, ni Sault-Brénaz ni Villebois ne permettent les migrations vers l'amont.

Une dévalaison d'individus est possible, mais elle participe certainement peu à la dynamique des populations en place dans le tronçon étudié du Rhône. Les résultats de 2010 (télémetrie mobile) ont montré que de très longs déplacements étaient réalisés au sein de ce tronçon. Certains individus ont même franchi le seuil de Sault Brénaz (hotus (n=2 ; avril), chevaines (n=3 ; avril - juin) et barbeaux (n=2 ; avril - mai))

L'utilisation de la dimension transversale du fleuve par les poissons est très perturbée dans ce tronçon. En effet les variations journalières des débits en lien avec la production hydroélectrique exondent beaucoup d'habitats en berge, et notamment les abris rivulaires (Capra *et al.*, 2011a). La connectivité transversale intermittente pourrait être limitante car l'accès aux abris / refuges est un paramètre clefs pour l'écologie des poissons. L'étude des disponibilités en refuges favorables est difficile à faire, mais cela pourrait être une très bonne évaluation du degré de résistance et de résilience des organismes à une perturbation, telle que des éclusées par exemple. Les refuges ont également un rôle primordial à bas débit, pendant les étiages par exemple (Humphries & Baldwin, 2003 ; Magoulick & Kobza, 2003).

Dans le site d'étude de 2009 le banc de galets, l'amont et l'aval de la rive gauche, ou encore une bonne partie de la rive droite à hauteur du rejet 4-5 commencent à être exondés dès que le débit descend en dessous de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dans ce site d'étude, et même pour cette gamme de faibles débits des habitats en berge restent tout de même disponibles (enrochements, fosses...).

Problème de référence

Il n'existe pas de cours d'eau témoin ou de référence ayant un module comparable à celui du Rhône. Il est donc difficile de mesurer l'adaptation des individus suivis dans le Rhône à Bugey à la variabilité hydrodynamique et thermique imposée par la production d'électricité. On ne peut que comparer nos résultats à la littérature qui reste pauvre à propos du comportement des trois espèces de poissons étudiées dans des grands cours d'eau. Les références étudient fréquemment des cours d'eau de gabarit très nettement inférieur au Rhône à Bugey. Cependant, dans le Rhône à Bugey l'hétérogénéité temporelle est très forte (donc jugée défavorable) et l'hétérogénéité spatiale est relativement constante (donc jugée peu favorable). Au final le fonctionnement hydrodynamique du fleuve, en comparaison avec un fonctionnement naturel potentiel, peut raisonnablement être jugé défavorable. De plus la comparaison des structures des peuplements de poissons dans les RCCs à l'amont et à l'aval du secteur d'étude montre que le peuplement piscicole du Rhône à Bugey n'est pas mieux structuré que ceux des RCCs, qui eux sont soumis à une perturbation hydrologique (et donc hydraulique) majeure (débit réservé ; crues extrêmes).

Les communautés aquatiques sont vues comme des assemblages déterministes plutôt que stochastiques, plutôt à l'équilibre, pour lesquelles les crues, par exemple, sont des événements à court terme qui bouleversent l'équilibre temporairement. Si on essaie d'appliquer cette vision au Rhône on peut poser comme hypothèse que le cortège d'espèces de poissons est surtout lié à de grandes perturbations telles que les dernières glaciations, l'aménagement hydroélectrique du fleuve, les introductions d'espèces, les bio-manipulations d'espèces ou encore la pêche sélective. En effet ces perturbations ont conduit à l'isolement du fleuve, avec apparition d'espèces non autochtones et disparition de certaines espèces migratrices, qui conduit à un certain équilibre en terme de richesse spécifique. Ensuite les conditions hydrologiques (crues, étiages, sécheresses) peuvent modifier la composition de ce peuplement (cf. Cattaneo *et al.* 2001) et terme d'abondance relative des différentes espèces.

Dans notre cas du Rhône à Bugey, comme dans les cours d'eau soumis à des éclusées, la fréquence des augmentations de débit est très forte (journalière). Mais sont elles réellement des crues ? Non si l'on se réfère aux valeurs estimées par la CNR (crue de retour 2 ans = $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ou à nos propres observations ($1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est un débit observé pratiquement chaque année. Donc des « éclusées » qui culminent à $700 - 800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ne peuvent pas être des perturbations en terme d'intensité (voir les résultats du Lot5 de l'étude Rhône phase IV). Leur occurrence en revanche est très artificielle (normalement, en débit moyen journalier, le $Q_{80} = 624 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et le $Q_{90} = 761 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ces valeurs de débit sont donc attendues moins de 20% du temps, certes en moyenne journalières. Mais si elles sont enregistrées au moins 1h par jour, tous les jours de la semaine, après une « nuit d'étiage » (le Q_{MNA5} est estimé à $190 - 230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), le rythme impulsé aux communautés vivantes peut raisonnablement être considéré comme perturbant. Il faut pour cela se rendre compte des changements des conditions hydrodynamiques entre $150-250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $600-700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Donc si on considère que les éclusées observées dans le Rhône à Bugey sont une perturbation pour les peuplements de poissons, c'est plus par leur fréquence d'occurrence que par leur intensité, et par les écarts de débit observés entre le débit de base et le débit d'éclusée. La survenue d'événements structurants tels que des crues et des étiages se surimpose à ce schéma.

Représentativité de notre étude

La représentativité de nos résultats dépend à la fois du type de cours d'eau échantillonné, des espèces et des stades de développement échantillonnés et de la technique d'échantillonnage.

Les conditions hydrodynamiques de notre site d'étude de 2009 sont représentatives des conditions hydrodynamiques de l'ensemble du tronçon Sault-Brénaz – Jons. Mais ce tronçon est en lui même unique sur l'ensemble du Rhône Français dont une très grande proportion de linéaire est court-circuitée. Donc en terme de gabarit de cours d'eau, nos résultats sont assez particuliers, et doivent être exploités avec beaucoup de précaution pour des cours d'eau de gabarit significativement plus petits y compris les portions court-circuitées du Rhône (RCC).

La description du peuplement de poissons à Bugey par rapport aux peuplements de poissons des tronçons situés à l'amont ou à l'aval a montré la similitude des espèces dominantes présentes. De ce fait nos résultats concernent bien les mêmes espèces que d'autres tronçons du Rhône et sont, de ce point de vue représentatifs.

Enfin, la représentativité ou la transférabilité des résultats de télémétrie est toujours une question très délicate, notamment à cause du petit nombre d'individus échantillonnés. Il faudrait donc pouvoir évaluer si les poissons suivis en 2009 et 2010 ont eu un comportement très particulier (non transférable) ou non (transférable). Les barbeaux, par exemple, ont montré en 2009 un comportement non grégaire et une sélection de l'habitat qui diffère de nos résultats obtenus sur d'autres cours d'eau, de gabarit souvent plus petit. En l'absence de réplicat, il est plus raisonnable de considérer les comportements estivaux des barbeaux enregistrés dans la station d'étude au droit de Bugey en 2009 comme particuliers, et donc peu transférables. En revanche pour les chevaines et les silures les résultats peuvent être transférés pour d'autre secteurs du Rhône.

En conséquence, nous supposons donc que la transférabilité est difficilement envisageable pour les préférences d'habitat estimées pour les barbeaux. Pour les chevaines cela semble possible du fait de la cohérence avec les courbes de préférence de Lamouroux *et al.* (1999). Pour les silures, il n'existe aucune autre courbe, mais comme le silure paraît sensible aux forts débits, l'exportation vers des cours d'eau à plus faible gabarit, donc a priori plus favorables, sera difficile.

Pour ce qui concerne les déplacements saisonniers des poissons (résultats de 2010) les résultats sont exportables, car en cohérence avec certains résultats obtenus sur des rivières Belges (Ovidio & Philippart, 2007).

Enfin, il est important de rappeler ici que tous les individus étudiés en 2009 et en 2010 sont des adultes (individus de plusieurs années) d'espèces bien implantées dans le Rhône à Bugey, donc des individus qui connaissent bien leur environnement et en particulier les variations de débit ou la présence des veines d'eau échauffées.

BIBLIOGRAPHIE

- Baras E. & Philippart J.C., 1999. Adaptive and evolutionary significance of a reproductive thermal threshold in *Barbus barbus*. *Journal of Fish Biology*. 55 : 354-375.
- Bard, A., Renard, B. & Lang, M. 2010. Observed trends in the hydrologic regime of Alpine catchments. Poster at the 7th EGU General Assembly, Vienne, AUT, 02/05/2010. (disponible : <http://cemadoc.cemagref.fr>).
- Bergé, J. (in prep) : Apport de la télémétrie acoustique pour la compréhension de l'utilisation dynamique des habitats par les poissons dans un grand fleuve aménagé, le Rhône. Thèse de doctorat. Irstea – Lyon 1.
- Blanck, A. 2007. Variabilité des traits d'histoire de vie de poissons d'eau douce Européens à différentes échelles spatiales et niveaux biologiques (population et espèce). Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I – Cemagref. 170 p.
- Brown, R. S., Cooke, S. J., Anderson, W. G. & McKinley, R. S. 1999. Evidence to challenge the '2% rule' for biotelemetry. *North American Journal of Fisheries Management* 19 : 867-871.
- Carrel, G., Desaint, B., Fruget, J-F., Khalanski, M., Olivier, J-M., Poirel, A. & Souchon, Y. 2006. Etude thermique globale du Rhône - Phase III : Synthèse et conclusions. Rapport EDF, Cemagref, Aralep, CNRS – Lyon 1. 59 p.
- Cattaneo, F., Carrel, G., Lamouroux, N. & Breil P. 2001. Relationships between hydrology and cyprinid reproductive success in the lower Rhône at Montélimar, France. *Archiv für Hydrobiologie*, 151 : 427-450.
- Burrell, K. H., Isely, J. J., Bunnell, D. B. Jr., Lear, D. H.V., Dolloff, C. A 2000. Seasonal movement of brown trout in a southern Appalachian river. *Transactions of American Fisheries Society* 129 : 1373-1379.
- Capra, H., Pella, H., Morin, J., LePichon, C., Perraud, C., Datry, T., Secretan, Y., Jouve, P. & Matte, P. 2011a. Conséquences de l'artificialisation de l'hydrologie du Rhône sur la structuration des communautés d'invertébrés et de poissons. Rapport Final. Rapport Cemagref – Agence de l'Eau RM&C. 104 pp.
- Capra, H., McNeil, E., Bouillon, M.C., Pella, H., & Alfaro, C. 2011b. Intérêt d'un modèle hydrodynamique en deux dimensions pour interpréter le comportement des poissons dans les grands cours d'eau. *La Houille Blanche* 6 : 28-33
- Copp, G.H., Britton, J.R., Cucherousset, J., Garcia-Berthou, E., Kirk, R., Peeler E. & Stakenas, S. 2009. Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges. *Fish and Fisheries* 10: 252-282.
- Daufresne, M. & Boët, P. 2007. Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology* 13: 2467–2478.
- Daufresne, M., Roger, M.-C., Capra, H., & Lamouroux, N. 2004. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global Change Biology* 10: 124-140.
- Daufresne, M., Souchon, Y., Villeneuve, B. & Capra, H. 2005. Influence du rejet thermique de la centrale nucléaire de Bugey dans un contexte de réchauffement climatique, Rapport Cemagref Lyon, EDF R&D, Rapport étude thermique du Rhône, phase III, 21 p.
- Grossman, G. D., Moyle, P. B., & Whitaker, Jr. J. R. 1982. Stochasticity in structural and functional characteristics of an Indiana stream fish assemblage: a test of community theory. *American Naturalist* 120: 423-454.
- Humphries, P. & Baldwin, D.S. 2003. Drought and aquatic ecosystems: An introduction. *Freshwater Biology* 48: 1141-1146.

- Khalanski, M., Carrel, G., Dessaint, B., Fruget, J.-F., Olivier, J.-M., Poirel, A. & Souchon, Y. 2009. Étude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécologie Appliquée* 16 : 53-108.
- Lake, P. S. 2000. Disturbance, patchiness, and diversity in streams. *Journal of the North American Benthological Society* 19(4):573–592.
- Lamouroux, N., Capra, H., Pouilly, M. & Souchon, Y. 1999. Fish habitat preferences in large streams of southern France. *Freshwater Biology* 42 : 673-687.
- Lamouroux, N., Poff, N. L. & Angermeier P. L. 2002. Intercontinental convergence of stream fish community traits along geomorphic and hydraulic gradients. *Ecology*, 83 : 1792-1807.
- Lamouroux, N., Olivier, J.M., Capra, H., Zylberblat, M., Chandesris, A., Roger, P. 2006. Fish community changes after minimum flow increase: testing quantitative predictions in the Rhône River at Pierre-Bénite, France. *Freshwater Biology* 51(9) : 1730-1743.
- Le Pichon, C., Gorges G., Baudry J., Goreaud F., & Boët P. 2008. Spatial metrics and methods for riverscapes: quantifying variability in riverine fish habitat patterns. *Environmetrics* 20(5) : 512–526.
- Magoulick, D.D. & Kobza, R.M. 2003. The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis. *Freshwater Biology* 48 : 1186–1198.
- Olivier, J.-M., Lamouroux, N. *et al.* 2011. Suivi Scientifique du programme de restauration hydraulique et écologique du Rhône: un observatoire de l'état écologique du fleuve. Rapport annuel. ZABR, Université de Genève, Aralep, UE, Agence de l'Eau RM&C, CNR, Région Rhône-Alpes, Syndicats de communes.
- Ovidio, M. & Philippart, J.C. 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. Implications pour le fonctionnement de la nouvelle échelle à poissons du barrage de Lorcé. Rapport final au Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-Division de l'Eau, Direction des Cours d'eau non navigables. Université de Liège, Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie, 82 pages.
- Ovidio, M., Dettaille, A., Bontinck C. & J. C. Philippart, J. C. 2009. Movement behaviour of the small benthic Rhine sculpin *Cottus rhenanus* (Freyhof, Kottelat & Nolte, 2005) as revealed by radio-telemetry and pit-tagging. *Hydrobiologia* 619 (1) : 119-128.
- Pella, H., Capra, H. & Foulard, S. 2007. Développement d'un MNT du haut Rhône à partir de relevés bathymétriques réalisés avec un sondeur multi-faisceaux. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. 186: 81-86.
- Pella, H., Capra, H., Bergé, J., Lamouroux, N., McNeil & E., Oriol, E. 2011. Designing installations of fixed and mobile telemetry systems in a large rivers to estimate accuracy of fish positioning. Poster for the AFS Symposium, Seattle, September 2011.
- Persat, H., Olivier, J.M. & Pont, D. 1994. Theoretical habitat templates, species traits, and species richness: fish in the Upper Rhône river and its floodplain. *Freshwater Biology* 31 : 439–454.
- Poff, N.L. & Ward, J.V. 1990. The physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatio-temporal heterogeneity. *Environmental Management* 14 : 629-646.
- Poff, N.L. & Zimmerman, J.K.H. 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform environmental flows science and management. *Freshwater Biology* 55:194-20.
- Scharl, A. & Le Coarer, Y. 2005. Morphohydraulic quantification of non spatialized datasets with the "Hydrosignature" software. In proceedings of the COST 626 - European Aquatic Modelling Network symposium, Silkeborg, Denmark, 19-20 mai 2005. p. 313-326.

- Southwood, T. R. E. 1977. Habitat, the templet for ecological strategies? *Journal of Animal Ecology*, 46: 337-365.
- Tissot, L. & Souchon, Y. 2010. Synthesis on thermal tolerances of the principal freshwater fish species of large Western Europe rivers. *Hydroécologie Appliquée* 17: 17-76.
- Torgersen, C. E., Price, D. M., Li, H. W. & McIntosh, B. A. 1999. Multiscale thermal refugia and stream habitat associations of chinook salmon in northeastern Oregon. *Ecological Applications* 9(1): 301–319.
- Townsend, C. R. 1989. The patch dynamics concept of stream community ecology. *Journal of the North American Benthological Society* 8: 36-50.
- Tedesco, P. 2006. Ecologie des communautés de poissons intertropicaux: diversité, traits d'histoire de vie et gradients environnementaux. Thèse de doctorat. Université Claude-Bernard, Lyon 1.
- Townsend, C. R. & Hildrew, A.G. 1994. Species traits in relation to a habitat templet for river systems. *Freshwater Biology*, 31 : 265-275.

ANNEXES

Tableau récapitulatif des différentes classes de taille et des relations taille-poids pour certaines espèces

Famille / Code espèce	Nom scientifique	Nom commun	Limites des classes de taille (cm)	Masse (g) = B*Taille (mm)^A	
				A	B
<i>Anguillidae</i>					
ANG	<i>Anguilla anguilla</i> (L. 1758)	Anguille	41	3.071	0.0000012
<i>Centrarchidae</i>					
PES	<i>Lepomis gibbosus</i> (L. 1758)	Perche soleil	8	2.479	0.0002114
<i>Cobitidae</i>					
LOF	<i>Nemacheilus barbatula</i> (L. 1758)	Loche	6	2.073	0.0005068
<i>Cottidae</i>					
CHA	<i>Cottus gobio</i> (L.)	Chabot			
<i>Cyprinidae</i>					
BRE	<i>Abramis brama</i> (L.)	Brème			
SPI	<i>Alburnoides bipunctatus</i> (Bloch)	Spirilin	7	1.941	0.0009952
ABL	<i>Alburnus alburnus</i> (L.)	Ablette	8, 12	2.181	0.0003426
BAF	<i>Barbus barbus</i> (L.)	Barbeau	9, 22	2.778	0.0000283
BRB	<i>Blicca bjoerkna</i> (L.)	Brème bordelière	9, 22	2.375	0.0001787
CAS	<i>Carassius auratus</i> (L.)	Carassin			
HOT	<i>Chondrostoma nasus</i> (L.)	Hotu	8, 19	2.870	0.0000175
TOX	<i>Chondrostoma toxostoma</i> (Vallot)	Toxostome	7		
CCO	<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe			
GOU	<i>Gobio gobio</i> (L.)	Goujon	10	2.490	0.0000961
BLN	<i>Leuciscus (telestes) soufia</i> (Risso)	Blageon	8	2.940	0.0000116
CHE	<i>Leuciscus cephalus</i> (L.)	Chevaisne	8, 17	2.698	0.0000475
VAN	<i>Leuciscus leuciscus</i> (L.)	Vandoise	8.5, 19	2.837	0.0000253
VAI	<i>Phoxinus phoxinus</i> (L.)	Vairon	4	1.722	0.0023332
PSR	<i>Pseudorasbora parva</i>	Pseudorasbora			
BOU	<i>Rhodeus sericeus</i> (Bloch)	Bouvière		1.719	0.0028139
GAR	<i>Rutilus rutilus</i> (L.)	Gardon	6, 11	2.862	0.0000207
ROT	<i>Scardinius erythrophthalmus</i> (L.)	Rotengle		3.028	0.0000100
TAN	<i>Tinca tinca</i> (L.)	Tanche		2.688	0.0000741
<i>Esocidae</i>					
BRO	<i>Esox lucius</i> (L.)	Brochet		3.092	0.0000036
<i>Gadidae</i>					
LOT	<i>Lota lota</i> (L.)	Lote de rivière		3.064	0.0000054
<i>Gasterosteidae</i>					
EPI	<i>Gasterosteus aculeatus</i> (L.)	Epinoche			
<i>Ictaluridae</i>					
PCH	<i>Ictalurus melas</i> (Lesueur)	Poisson chat		2.700	0.0000601
<i>Percidae</i>					
GRE	<i>Gymnocephalus cernua</i> (L.)	Gremille			
SAN	<i>Lucioperca lucioperca</i> (L.)	Sandre			
PER	<i>Perca fluviatilis</i> (L.)	Perche	10	3.081	0.0000078
<i>Petromyzonidae</i>					
LPP	<i>Lampetra planeri</i> (Bloch)				
<i>Salmonidae</i>					
TAC	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truite arc-en-ciel			
TRF	<i>Salmo trutta</i> (L.)	Truite commune		2.550	0.0001175
<i>Siluridae</i>					
SIL	<i>Silurus glanis</i> (L.)	Silure		2.905	0.0000123



Probability of detection and positioning error of a hydro acoustic telemetry system in a fast-flowing river: Intrinsic and environmental determinants

Julien Bergé^{a,*}, Hervé Capra^a, Hervé Pella^a, Tracey Steig^b, Michaël Ovidio^c, Elise Bultel^a, Nicolas Lamouroux^a

^aIRSTEA, UR MALY, Laboratory Dynam, 3 bis Quai Chauvau – CP 220, F-69336 Lyon, France

^bHydroacoustic Technology Inc., 715 NE Northlake Way, Seattle, WA 98105, USA

^cUniversity of Liège, Biology of Behaviour Unit-Capra, Laboratory of Fish Demography and Hydroecology (LDPH), 10 Chemin de la Justice, 4500 Thionne, Belgium

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 July 2011

Received in revised form 3 February 2012

Accepted 5 February 2012

Keywords:

Acoustic tags

Hydrophones configuration

Triangulation parameters

Aquatic fish behavior

ABSTRACT

In situ fixed acoustic telemetry methods make it possible to study simultaneously the detailed movements of individual fish and their relationship to the environment, but the properties of these methods is little known in harsh physical conditions. We examined the probability of tag detection by the system and the positioning error for detected tags of an existing telemetry system installed with 32 fixed hydrophones in a reach of the fast-flowing Rhône River in France. The reach was 1.8 km long and had heterogeneous thermal and hydraulic conditions described by a two-dimensional hydraulic model. We compared positions detected by the system with true positions estimated using a tachometer or a differential GPS, for various sets of experimental tag emissions. We analyzed how the probability of detection and the positioning error were affected by user-defined variables and three groups of environmental variables describing the configuration of the hydrophones around tag position, the physical environment at tag position and the reception quality. Tag emissions from the center channel had an average probability of detection (40–50%) higher than emissions originating from positions close to the banks, and were positioned with smaller average errors (3–5 m). The probability of detection of emissions typically varied between near 0% and 80% with configuration variables (density of surrounding hydrophones and location of tag relative to the hydrophones) and also decreased in the presence of coarse substrate. The positioning error was mainly reduced when user-defined variables of the triangulation software were set by an expert user. Configuration variables also influenced the positioning error with weaker effects than those observed for detection probability.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The sensitivity of fish and other freshwater organisms to changes in abiotic conditions of rivers has been reported in many studies with a particular emphasis on their ecological (e.g., behavioral, demographic, physiological) responses to modifications of hydrological or thermal regimes (Minns et al., 1996; Lukšienė et al., 2000; Vehanen et al., 2000; Ovidio et al., 2008; Craven et al., 2010; Olden and Naiman, 2010; Poff and Zimmerman, 2010). In particular, individual fish movements have often been related to short-term changes in discharge rate and temperature (Ovidio et al., 1998; Ovidio and Philippart, 2008). Behavioral studies in aquatic systems increasingly use biotelemetry (Lyons and Lucas, 2002; Cooke

et al., 2004; Geeraerts et al., 2007; Ovidio et al., 2007) to record individual fish movements at different time steps, from seconds to multiple years (Lucas and Batley, 1996; Meyer and Hinrichs, 2000; Ehrenberg and Steig, 2003). The probability of detection and the positioning error are major characteristics of telemetry systems and have been improved in recent years. Low errors are essentially obtained with fixed acoustic telemetry systems that provide detailed information when sound transmitters (i.e. tags) are detected by acoustic hydrophones (Ehrenberg and Steig, 2003; Cooke et al., 2005). Compared to other systems, fixed systems enable the simultaneous detailed study of the movements of many individual fish. However, a better quantification of their properties is needed to find appropriate compromises between the probability of detection, the positioning error and the surface area covered by the system. For example, Clements et al. (2005) showed that the probability of detection of the VR2 system (Vemco Ltd, Canada) could vary between 0 and 100% in a stream reservoir and an estuary depending on the placement of the hydrophones and their mooring method. Cote et al. (1998), using the MAP_500 Lotek® system (Lotek Marine Technologies Inc., Ca) in the Bonavista Bay (Newfoundland,

* Corresponding author. Tel.: +334 7220 8732; fax: +334 7847 7875.
E-mail addresses: julien.berge@irstea.fr (J. Bergé), herve.capra@irstea.fr (H. Capra), herve.pella@irstea.fr (H. Pella), tsteig@hiltonar.com (T. Steig), M.Ovidio@ulg.ac.be (M. Ovidio), elise.bultel@gmail.com (E. Bultel), nicolas.lamouroux@irstea.fr (N. Lamouroux).

Canada), reported an average positioning error of 2 m or less inside the baseline of hydrophones used during a two months tracking of juvenile Atlantic cods (*Gadus morhua*, pulse rate of 5 min). The 3-dimensional positioning error of the Vemco radio-acoustic positioning system was estimated in a South African bay (O'dor et al., 1998) to be about 1–2 m inside the hydrophones array and about 3–5 m when emissions were 100 m outside the array.

The probability of detection and the positioning error of telemetry systems potentially depend on a large number of intrinsic and environmental factors (Kell et al., 1994; Voegeli and Pincock, 1996). Intrinsic factors include the estimation of the speed of sound, the knowledge of exact hydrophone positions and the adjustment of the parameters of the positioning software (Juell and Westerberg, 1993; Cote et al., 1998; Wahlberg et al., 2001; Ehrenberg and Steig, 2002). Among environmental factors, weak spatial configurations of hydrophones relative to the tag location (long distances, narrow viewing angles) have been identified as influencing the probability of detection and the positioning error (Baras and Lagardère, 1995; Smith et al., 1998; Ehrenberg and Steig, 2002; Niez goda et al., 2002; Simpfendorfer et al., 2002; Heupel et al., 2006; Espinoza et al., 2011). In addition, the probability of detection and the positioning error likely decrease in heterogeneous substrate, hydraulic and thermal conditions that can favor sound refraction, ambient noise and variations in speed of sound (Voegeli and Pincock, 1996; Trevorrow, 1998; Ehrenberg and Steig, 2002). Quantifying the combined influence of intrinsic and environmental characteristics of the study site on the system properties can improve further study designs. It is particularly needed for telemetric studies made in fast-flowing rivers, whose heterogeneous physical characteristics may complicate tag detection and positioning.

In summer 2009, an acoustic fixed telemetry system (HTI[®]) was installed in a physically heterogeneous reach of the fast-flowing Rhône River in France to analyze the behavioral response of fish to variations in discharge rate (due to hydropeaking) and water temperature (warm water is discharged in the reach by a nuclear power plant). In this paper, we describe how we used this installation (1) to quantify the probability of detection and the positioning error of the telemetry system in a fast-flowing heterogeneous river, (2) to infer which intrinsic and environmental variables influence the detection and the position errors, and (3) to discuss methods for optimizing installations in future studies. For this purpose, we simultaneously estimated tag positions in the river using the HTI[®] system and using an independent "reference" differential GPS or tachometer. We studied how the probability of detection and the positioning error were affected by the user-defined variables in the telemetry system (intrinsic variables), and various environmental variables associated with tag positions.

2. Materials and methods

2.1. Study site

The Rhône river has a drainage basin area of 98,556 km² and a mean annual discharge of 1720 m³ s⁻¹ at its mouth (Olivier et al., 2009). Our study reach was 1.8 km long and 140 m wide (at mean discharge) and was situated at Bugey (45° 47' N; 5° 16' E), upstream from the confluence of the Ain River and the town of Lyon, in the longest Rhône segment without discharge derivation (Fig. 1). The Rhône at Bugey has a nival hydrological regime (i.e. under the influence of snowmelt) characterized by a mean monthly discharge ranging from 387 m³ s⁻¹ in September to 567 m³ s⁻¹ in June. Mean annual discharge is 473 m³ s⁻¹, and the mean daily discharge ranges from 197 m³ s⁻¹ (exceeded 95% of the time) to 933 m³ s⁻¹ (exceeded 5% of the time). A high discharge variability (daily changes up to 700 m³ s⁻¹, Olivier et al., 2009) is

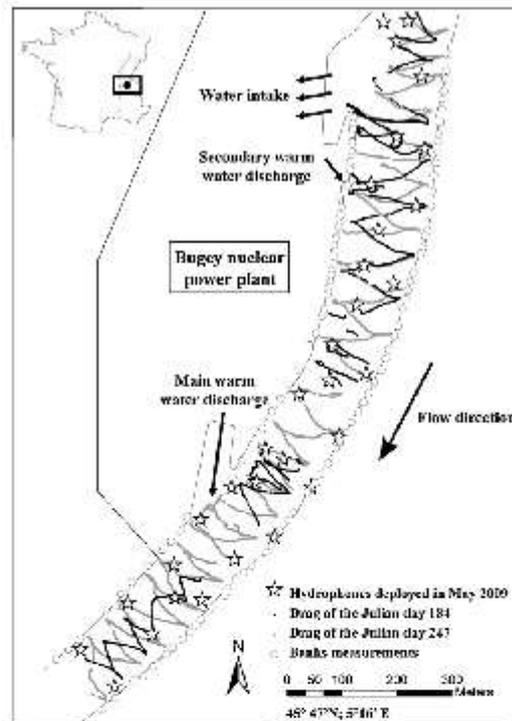


Fig. 1. Location of the Bugey site on the Rhône River in France. Hydrophone positions and survey points.

generally observed during the week due to hydropeaking at upstream dams, and discharge is generally lower and more stable during week-ends. At mean discharge, point depth-averaged velocity reaches 1.8 m s⁻¹ and point depth reaches 8 m. The substrate composition was mapped using a combination of visual observations from a boat and high resolution aerial photographs. Substrate size was assigned to one of five ordinal classes and consisted of pebbles (36.0% of the surface area), gravel (26.4%), stones (14.4%), blocks (13.9%) and sand (8.2%). The daily water temperature upstream from the study reach ranged in 2009 from 2.8 °C to 23.6 °C (Roger et al., 2010). A nuclear power plant (Bugey Power Plant), located on the west bank of the study reach, extracts 100 m³ s⁻¹ to cool reactors and discharges warmer water (between 8 and 10 °C warmer) at two different places (Fig. 1), creating a strong transversal thermal heterogeneity. No vertical thermal stratification was observed in the reach (Capra et al., 2008). Downstream from the nuclear power plant, the warmed water cools down by around 1 °C per kilometer, and diffuses from the west bank to the whole channel 10 km downstream (Capra et al., 2008). Water turbidity recorded in 2009 ranged between 9.5 mg l⁻¹ in February and 81 mg l⁻¹ in November (Roger et al., 2010).

A two-dimensional hydraulic model of the reach was developed using (1) a digital elevation model based on extensive field measurements of topography and bathymetry (an average of four measuring points per m², Pella et al., 2007), (2) water level – discharge relationship records, and (3) velocity measurements at different discharge rates (Capra et al., 2011). The hydraulic model

was calibrated and validated for a discharge rate between 150 and 850 m³ s⁻¹. Differences between simulated and measured water levels were found to be around 1 cm, and a comparison of measured and simulated velocities did not show errors exceeding 0.1 m s⁻¹ across the study site (Capra et al., 2011).

2.2. Telemetry system principles and deployment

We used an HTI[®] automatic acoustic telemetry system that included a set of pre-positioned hydrophones used to detect ultrasounds emitted by acoustic tags of various sizes, programmed with a frequency of 307 KHz (Ehrenberg and Steig, 2003). Each hydrophone was cabled to a receiver unit (the Acoustic Tag Receiver, model 290) that recorded acoustic signals and stored them on a computer. The Acoustic Tag Receiver was synchronized with UTC time (Universal Time Coordinated) thanks to an internal GPS, and its digital signal processor had a precision of 12 KHz. We used Model 795G tags (transmit power level: 155 dB relative to 1 μ Pa at 1 m; length: 25 mm; diameter: 11 mm; weight: 3.1 g). The average lifetime of tags was about 50 days in our experimental conditions (according to the manufacturer). Tag signals were series of pulses (1 ms long in our experiment) sent with different periods P (P varied around 3 s in our experiment) that were used to identify and track individual tags. A secondary signal, called "subcode", which was a replication of the first signal, was used to improve tag signal reception and the identification of each tag in noisy environments. The subcode was usually not used for positioning tags, but sometimes it could be considered by the system as another principal signal. In such a case, two positions were estimated with close emission times. Such "duplicate" positions were identified and filtered. In our experiment, we positioned tags in two dimensions (2D). A three dimensional (3D) positioning of tags was not feasible because the study site had too little vertical separation in the hydrophone array to resolve tag depth. For our 2D analysis, the acoustic tag signal must be received by at least three hydrophones. Only three hydrophones were selected by the system to position a given tag and are called thereafter the "listening trio". During a post treatment stage, arrival times of pulses received by hydrophones were used to estimate the coordinates of tags at signal emission and the emission time. The post treatment of the acoustic signals (filtering and triangulation) was made using successively two HTI[®] proprietary softwares (see <http://www.htisonar.com/>).

A total of 32 hydrophones were installed in May 2009 (Fig. 1) and 16 km of weighted acoustic cables were used to connect them to the Acoustic Tag Receiver. The connection of acoustic cables to the hydrophones was made by a diver. Each hydrophone was mounted on a concrete block of 300 kg (Fig. 2) and deposited on the river bed using a boat; an operation that was sometimes difficult due to high current velocities. The hydrophone was positioned about 10 cm above the block, and the block could constitute an acoustic shadow for signals emitted from the bottom within an area of about 10 m² around the block. Hydrophone positions were pre-defined using the digital elevation model so that most emission points could be *a priori* heard by more than three hydrophones, as recommended by Kell et al. (1994) or Voegeli and Pincock (1996), while taking into account that the theoretical detection (hearing) range of hydrophones was 300 m (according to the manufacturer). We released hydrophones at pre-defined positions using a dGPS (Leica[®] 1200) and a real time track process on a computer taken on board. Pre-defined coordinates were stored in Matrix M1. Because of local hydraulic or substrate constraints, seven hydrophones were positioned a few meters away from their pre-defined position. Their theoretical coordinates in M1 were replaced by coordinates measured in the field with a tachometer (Leica[®] 800). At the end of the study (on September 18, 2009), the coordinates of the hydrophones



Fig. 2. Concrete block of 300 kg and its hydrophone.

were again measured with a dGPS (Leica[®] 1200) and were stored in Matrix M2.

2.3. Data used for estimating the probability of detection and positioning errors

Two different sets of data were collected, one by dragging tags over the whole study site from a boat (drags data), and the other by holding tags at fixed locations along the banks (banks data). In both cases, the objective was to compare tag positions estimated by the HTI[®] system with reference positions measured by dGPS or tachometer. We estimated the detection probability of tags by the proportion of known emissions actually positioned by the HTI[®] system, and the positioning error of detected tags by the Euclidian distance between HTI[®] estimated position and the reference positions. The dGPS and tachometer systems used have themselves a centimetric positioning error (given in Takac and Walford, 2006, for the dGPS and by the manufacturer for the tachometer) and we assumed that they provided true positions. Because the errors of the dGPS and tachometer and the errors of the HTI[®] system can be assumed independent, our estimation of positioning error is conservative.

Drags data were collected with the dGPS during two surveys of the whole site by boat (Fig. 1), following zigzag trajectories at reduced relative velocity (less than 1 m s⁻¹) to limit potential effects of the boat movement on the probability of detection (Melnychuk and Christensen, 2009). Characteristics of the two drag surveys are presented in Table 1. A NKE[®]- SP2T sonde (± 0.05 °C) recorded water temperature every second. During drags, we used four tags with emission periods P equal to 3051, 3079, 3121 and 3247 ms, and subcodes emitted 225 ms after the principle signal. Tags were attached to the base of a pole supporting the antenna of the dGPS: two tags were submerged 50 cm below the surface and two tags were submerged at 1 m. UTC time was assigned to each boat's position recorded by the dGPS (frequency: 1 Hz). The data corresponding to the four tags were pooled for the analyses.

Table 1
Characteristics of drags and banks data. Water temperatures are daily averages measured at fixed points situated upstream from the site and at power plant warm discharges.

Data set characteristics	Drags data		Banks data	
	July 3rd	September 4th	June 24th	June 25th
Recording time (min)	101.0	132.0	26.0	33.5
Daily discharge ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	546.0	525.0	519.0	522.0
Water temperature ($^{\circ}\text{C}$)				
Cold zone	22.1	21.1	17.3	18.4
Main power plant discharge	29.1	23.3	24.8	26.1
Secondary power plant discharge	31.5	30.1	26.0	27.4

The banks data set was less extensive and targeted shallower habitats where the boat could not navigate and where the dGPS could not work due to the presence of trees. We collected these data over two days (June 24–25, 2009) with a tachometer at 114 fixed locations chosen along both banks of the study site (Fig. 1). Characteristics of banks measurements are presented in Table 1. One tag (with P equal to 3121 or 3205 ms and subcode set up at 225 ms) was attached to the tachometer tip and we submerged the tag during a 15 s sequence just under the surface and just above the bed (one sequence each) at each fixed location. Each fixed location was measured for each sequence of 15 s and a UTC time was recorded for each tachometer measurement.

2.4. Estimating true positions at emission times

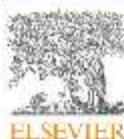
All periods of times with dGPS gaps (absence of data) longer than 5 s were removed from all analyses to reduce dGPS interpolation errors. Before analyzing detection probability and positioning errors, we estimated true positions at emission times (UTC) using the dGPS and tachometer data, for all emissions, detected or not, by the HTI[®] system. Concerning positions detected by the HTI[®] system, the dGPS positions of drag data corresponding to the emission times (t_i) were interpolated from the raw dGPS data (gaps up to 5 s) using cubic spline functions that smoothed the x and y dGPS coordinates (Fritsch and Carlson, 1980; R Development Core Team, 2010). Concerning positions undetected by the HTI[®] system, virtual emission times were estimated. Specifically, for each tag of emission period P and for each detected emission time by the HTI[®] system (t_i), if no position was estimated at $t_i + P$ (± 0.5 s of tolerance), we considered that an emission was undetected. In this case, we considered that $t_i + P$ was a virtual emission time. The virtual coordinates of this virtual emission time were interpolated from the dGPS data as described above and the position obtained was called a "virtual position". Several (k) consecutive virtual emission times could be identified using the same principle, and these virtual emission times were set as $t_i + P$, $t_i + 2P$, ..., $t_i + kP$. Similarly, virtual emission times were identified between the start of the experiment and the first detection.

2.5. Intrinsic and environmental variables relationship with the probability of detection and positioning errors

We organized explanatory variables into one group of user-defined variables, and three groups of environmental variables: (1) the configuration of hydrophones surrounding tag positions (detected and virtual), (2) the physical characteristics at tag positions (detected and virtual), and (3) indicators of reception conditions (detected positions only). All variables were calculated similarly for drags and banks data.

User-defined variables can affect both detection probability and positioning error. These variables include: (1) the speed of sound (SpS), which determined how time was translated into distances in the positioning algorithm, (2) the hydrophone coordinates listed in the positions Matrix (M) and (3) a series of 19 Post-Treatment parameters (PT, detailed in Supplementary file S1). We analyzed the effects of SpS by using two SpS values: a first value of 1482 m s^{-1} corresponding to the SpS recorded in pure water at a temperature of 20°C , and a second value of 1509 m s^{-1} corresponding to a SpS at 30°C (Del Grosso and Mader, 1972). These values cover the temperature variations observed in our site during the experiment (Table 1). Hereafter, we refer to SpS values using their equivalent temperature (20°C and 30°C). We analyzed the effects of M using the matrices M1 and M2 that corresponded respectively to the hydrophone coordinates at the beginning and at the end of the experiment. PT parameters values were closely dependant on the user and on his experience of system operation. The influence of PT values was tested by using two independent sets of parameters defined by two persons using the same field data: 13 h of survey of 17 tagged fish tracked on the 18 August 2009 throughout the site. The first set of PT values were defined by J. Bergé (PT-JB) and was based on an analysis of the influence of each parameter on the number of positioned points and the spatial consistency of these positions. The second set of PT values were defined by HTI[®] engineers (PT-HTI) using similar criteria but with greater acoustical experience, and experience with the acoustic equipment and positioning software. Overall, we used a total of eight user defined combinations ($2 \text{ SpS} \times 2 \text{ M} \times 2 \text{ PT}$, named C1–C8 and detailed in Table 2) to infer the influence of user-defined variables.

Among environmental variables (Table 3), the first group (configuration of hydrophones) included two variables. First, the viewing angle (C-VA, "C" for configuration) was defined as the angle needed, from the tag position, to view the polygon formed by the surrounding hydrophones (i.e. those located in a radius of 300 m, equal to the theoretical range of detection of hydrophone). When the tag was present inside the polygon, C-VA was equal to 360° . The second variable was the number of hydrophones (C-NH) situated within a radius of 300 m. The second group of environmental variables (physical characteristics) described the physical environment at tag positions (detected or virtual), it included: the depth-averaged current velocity (P-CV, "P" for physical), the size of the dominant substrate in the water column relative to water depth (relative roughness, P-RR), the depth (P-Dp) and the water temperature (P-WT). P-CV and P-Dp were obtained from the hydraulic model, and P-WT was recorded by the NKE recorder (drags data) and by thermometers installed along the banks (temperatures were interpolated using spline functions for both sampling methods). The third group (indicators of reception conditions) included four variables potentially explaining positioning errors, and concerned detected positions only. The first variable was the maximal distance between the tag location and the hydrophones of the listening trio (I-MD, "I" for indicator). The second variable was the maximal angle of the triangle formed by the listening trio (I-MAT, in degrees) and illustrated the form of this triangle (flat triangle when I-MAT approaches 180°). The third variable was the viewing angle needed, from the tag position, to view the triangle formed by listening trio (I-VA). The last variable was the amount of ambient noise, i.e. sounds produced naturally in the environment recorded by the listening trio (Voegeli and Pincock, 1996). A Noise Ratio (I-NR, equivalent to the signal-to-noise ratio index used by Cote et al., 1998) was calculated for each hydrophone of the listening trio, by dividing (1) the highest amplitude of the received signal (echo) in samples recorded by the hydrophone, by (2) the average noise level recorded over 1 s prior to the signal reception. The minimum I-NR (maximum noise) of the listening trio was retained as explanatory variable.



Probability of detection and positioning error of a hydro acoustic telemetry system in a fast-flowing river: Intrinsic and environmental determinants

Julien Bergé^{a,*}, Hervé Capra^a, Hervé Pella^a, Tracey Steig^b, Michaël Ovidio^c, Elise Bultel^a, Nicolas Lamouroux^a

^aIRSTEA, UR MALY, Laboratory Dynam, 3 bis Quai Chauvau – CP 220, F-69336 Lyon, France

^bHydroacoustic Technology Inc., 715 NE Northlake Way, Seattle, WA 98105, USA

^cUniversity of Liège, Biology of Behaviour Unit-Capra, Laboratory of Fish Demography and Hydroecology (LDPH), 10 Chemin de la Justice, 4500 Thionne, Belgium

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 July 2011

Received in revised form 3 February 2012

Accepted 5 February 2012

Keywords:

Acoustic tags

Hydrophones configuration

Triangulation parameters

Aquatic fish behavior

ABSTRACT

In situ fixed acoustic telemetry methods make it possible to study simultaneously the detailed movements of individual fish and their relationship to the environment, but the properties of these methods is little known in harsh physical conditions. We examined the probability of tag detection by the system and the positioning error for detected tags of an existing telemetry system installed with 32 fixed hydrophones in a reach of the fast-flowing Rhône River in France. The reach was 1.8 km long and had heterogeneous thermal and hydraulic conditions described by a two-dimensional hydraulic model. We compared positions detected by the system with true positions estimated using a tachometer or a differential GPS, for various sets of experimental tag emissions. We analyzed how the probability of detection and the positioning error were affected by user-defined variables and three groups of environmental variables describing the configuration of the hydrophones around tag position, the physical environment at tag position and the reception quality. Tag emissions from the center channel had an average probability of detection (40–50%) higher than emissions originating from positions close to the banks, and were positioned with smaller average errors (3–5 m). The probability of detection of emissions typically varied between near 0% and 80% with configuration variables (density of surrounding hydrophones and location of tag relative to the hydrophones) and also decreased in the presence of coarse substrate. The positioning error was mainly reduced when user-defined variables of the triangulation software were set by an expert user. Configuration variables also influenced the positioning error with weaker effects than those observed for detection probability.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The sensitivity of fish and other freshwater organisms to changes in abiotic conditions of rivers has been reported in many studies with a particular emphasis on their ecological (e.g., behavioral, demographic, physiological) responses to modifications of hydrological or thermal regimes (Minns et al., 1996; Lukšienė et al., 2000; Vehanen et al., 2000; Ovidio et al., 2008; Craven et al., 2010; Olden and Naiman, 2010; Poff and Zimmerman, 2010). In particular, individual fish movements have often been related to short-term changes in discharge rate and temperature (Ovidio et al., 1998; Ovidio and Philippart, 2008). Behavioral studies in aquatic systems increasingly use biotelemetry (Lyons and Lucas, 2002; Cooke

et al., 2004; Geeraerts et al., 2007; Ovidio et al., 2007) to record individual fish movements at different time steps, from seconds to multiple years (Lucas and Batley, 1996; Meyer and Hinrichs, 2000; Ehrenberg and Steig, 2003). The probability of detection and the positioning error are major characteristics of telemetry systems and have been improved in recent years. Low errors are essentially obtained with fixed acoustic telemetry systems that provide detailed information when sound transmitters (i.e. tags) are detected by acoustic hydrophones (Ehrenberg and Steig, 2003; Cooke et al., 2005). Compared to other systems, fixed systems enable the simultaneous detailed study of the movements of many individual fish. However, a better quantification of their properties is needed to find appropriate compromises between the probability of detection, the positioning error and the surface area covered by the system. For example, Clements et al. (2005) showed that the probability of detection of the VR2 system (Vemco Ltd, Canada) could vary between 0 and 100% in a stream reservoir and an estuary depending on the placement of the hydrophones and their mooring method. Cote et al. (1998), using the MAP_500 Lotek® system (Lotek Marine Technologies Inc., Ca) in the Bonavista Bay (Newfoundland,

* Corresponding author. Tel.: +334 7220 8732; fax: +334 7847 7875.
E-mail addresses: julien.berge@irstea.fr (J. Bergé), herve.capra@irstea.fr (H. Capra), herve.pella@irstea.fr (H. Pella), tsteig@htisonar.com (T. Steig), M.Ovidio@ulg.ac.be (M. Ovidio), elise.bultel@gmail.com (E. Bultel), nicolas.lamouroux@irstea.fr (N. Lamouroux).

Table 2
Characteristics of the eight combinations defined for the treatment of drags and banks data: associated user-defined variables and statistics of probability of detection and positioning error. The mean positioning errors are given with their standard errors.

Combination characteristics	Methods	Combinations							
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<i>User-defined variables</i>									
SpS (°C)		20	30	20	30	20	30	20	30
M		M1	M1	M1	M1	M2	M2	M2	M2
PT		HTI	HTI	JB	JB	HTI	HTI	JB	JB
<i>Accuracy statistics</i>									
Probability of detection (%)	Drag	41.9	41.6	34.6	35.5	47.2	43.9	42.1	38.9
	Bank	16.7	14.6	8.3	8.8	17.7	16.0	9.6	8.9
Mean positioning error (m)	Drag	5.7 ± 0.05	5.5 ± 0.08	10.7 ± 0.16	9.9 ± 0.16	4.5 ± 0.06	3.6 ± 0.05	10.1 ± 0.14	9.3 ± 0.14
	Bank	8.3 ± 0.62	10.7 ± 0.59	11.5 ± 1.24	22.3 ± 3.68	8.2 ± 0.70	9.5 ± 0.79	7.7 ± 0.80	10.5 ± 1.09

2.6. Data analysis

We analyzed the data in two steps. First, in a “within combination analysis”, we analyzed how environmental variables influenced the probability of detection and the positioning error within each combination (C1–C8). For this purpose, we produced plots of the average probability of detection and the average positioning error for ordinal categories of each environmental variable. We also produced smoothed maps of the probability of detection and the positioning error over the entire study site to check for spatial patterns related to the environment. The inter-correlation between environmental variables was checked using scatter plots and by computing Spearman rank correlation ρ for each pair of variables.

In a second step we performed a “between combination analysis”, i.e. we analyzed the average detection probability and the average positioning error associated with the eight combinations of user-defined variables (C1–C8), for drags and banks data. To better inform future users of the telemetry system, the effect of the 19 PT parameters was further detailed using a sensitivity analysis. Once the most accurate PT combination identified (PT-JB or PT-HTI), each parameter was modified in turn and was given two to four values within the usual range covered in practical applications. The set of values included the extreme values of the usual range of the parameter, and the values chosen in PT-JB and PT-HTI. We quantified the changes in probability of detection and positioning error among the different parameter values.

3. Results

3.1. General functionality of the system

Due to flow variability or scouring, four hydrophones did not work at all during the whole experiment; they included the first three hydrophones located in the upstream part of the study site (Fig. 1). Seven additional hydrophones did not work during the first drag, five during the second drag and two during bank measurements. For each data set, only functioning hydrophones were considered for calculating C-NH and C-VA. Six hydrophone positions could not be measured in September due to harsh hydraulic conditions, including the three hydrophones of the upstream part of the study site which never worked. For the three other hydrophones, we did not modify the coordinates of the hydrophones between matrices M1 and M2. The comparison of M1 and M2 indicated that twelve hydrophones had moved: 10 moved less than 6 m and two moved between 6 and 10 m. Concerning the positions estimated by the HTI[®] system (detected positions), approximately 40% of them presented duplicates which were not used for the analyses. In addition, 13.5% of detected positions corresponded to positions extrapolated by the positioning software, i.e. that were derived using temporal extrapolations of reception signals at some hydrophones. These extrapolated positions can be identified and removed from the database. However, we included these positions in our analyses because they were dependent on the choice of user-defined variables and were an integral part of the positioning results. Finally, a total of 12,152 tag emissions (drag

Table 3
Environmental variables: notations and definitions.

Environmental Variable	Symbol	Unit	Description
<i>Configuration variables</i>			
Viewing angle	C-VA	°	The angle needed, from the tag position, to view the polygon formed by the surrounding hydrophones
Density of hydrophones	C-NH		Number of hydrophones situated within a radius of 300 m around the tag location
<i>Physical characteristics</i>			
Current velocity	P-CV	m s ⁻¹	Depth-averaged velocity at tag position
Relative roughness	P-RR	%	Substrate size divided by depth at tag position
Depth	P-Dp	m	Water depth at tag position
Water temperature	P-WT	°C	Water temperature at tag position
<i>Indicators of reception conditions</i>			
Maximal distance	I-MD	m	Maximal distance between the tag location and the hydrophones of the listening trio
Maximal angle of the triangle	I-MAT	°	Maximal angle of the triangle formed by the listening trio
Viewing angle	I-VA	°	The angle needed, from the tag position, to view the triangle formed by listening trio
Noise ratio	I-NR		Ratio of the highest amplitude of the received signal at a hydrophone, by the average noise level recorded over 1 s prior to the signal reception

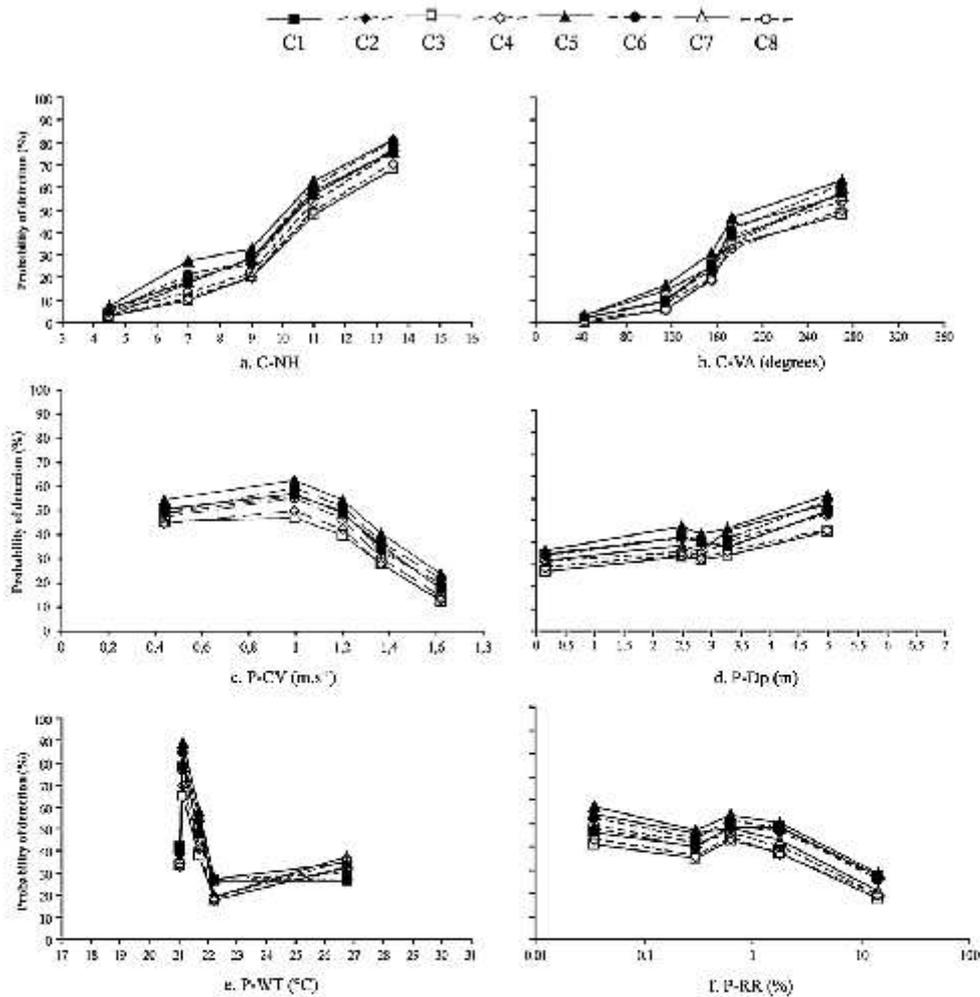


Fig. 3. Probability of detection of drags data as a function of six environmental variables, for the eight combinations of user-defined variables. We fixed the limits of environmental categories so that their sizes were balanced for all combinations, taking into account that some discrete values had a high frequency. The average class size across combinations and classes was 2429 (standard deviation = 1051). Note that the x-axis was log-transformed for the P-RR variable.

data) and 1140 tag emissions (banks data) were considered in our analyses.

3.2. Environmental effects on detection probability within combinations

A number of environmental variables influenced the probability of detection consistently within the eight combinations of user-defined variables (Fig. 3 and Fig. 4). Detection probability was mainly influenced by configuration variables. Detection probability increased with C-NH within all combinations, for banks and drags data: from < 10% for C-NH < 6 to about 70% for C-NH > 12 for drags data (Fig. 3a) and from 0% for C-NH < 6 to about 30% for C-NH > 14 for banks data (Fig. 4a). The detection probability also increased with

C-VA from less than 5% (drags and banks, Fig. 3b and Fig. 4b) to about 55% for drags (Fig. 3b) and 20% for banks (Fig. 4b). Physical variables also influenced the probability of detection, since very high P-CV ($>1.44 \text{ m s}^{-1}$) reduced the probability of detection from around 50% to 20% for drags (Fig. 3c), whereas low P-CV ($<0.52 \text{ m s}^{-1}$) reduced the probability of detection from around 30% to less than 10% for banks (Fig. 4c). Low P-Dp ($<2.31 \text{ m}$) were also associated with reduced detection probabilities, for drags and banks (Fig. 3d and Fig. 4d). High P-RR values ($>2.8\%$, Fig. 3f) could reduce about twofold the probability of detection for drags, and to a lesser extent for banks (Fig. 4f). An intermediate temperature category was also associated with higher detection probabilities, but this temperature differed for drags (21.1°C , Fig. 3e) and banks (17.44°C , Fig. 4e). Banks data generally covered shallower and slower-flowing

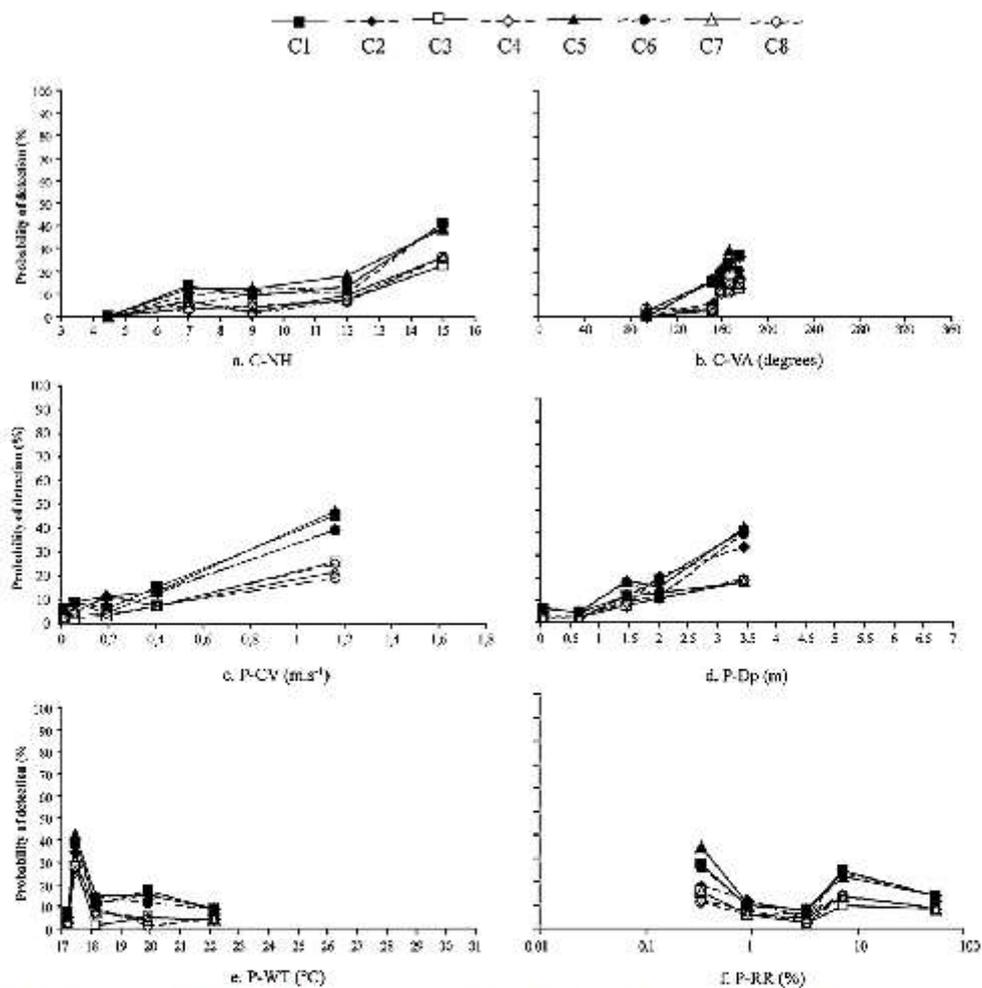


Fig. 4. Probability of detection of banks data as a function of six environmental variables, for the eight combinations of user-defined variables. We fixed the limits of environmental categories so that their sizes were balanced for all combinations, taking into account that some discrete values had a high frequency. The average class size across combinations and classes was 228 (standard deviation = 16). Note that the x-axis was log-transformed for the P-RR variable.

habitats (compare Figs. 3 and 4). They had a lower detection probability than drags on average, consistently with their low C-VA and high P-RR. However, detection probability was lower for banks data, even for comparable values of environmental variables.

Maps of detection probability showed similar spatial patterns among combinations (see Fig. 5A for an example). The lowest detection probabilities were located where hydrophones did not function and thus where the configuration variables were not favorable. Furthermore, detection probability was lower along the river banks (Fig. 5A). Comparing Fig. 5A and B showed that the lowest probabilities of detection were located where the current velocity exceeded 1.6 m s^{-1} . Scatter plots among environmental variables (see an example in Supplementary file S2) indicated that the influence of environmental variables could be

complicated by a high positive correlation between C-NH and C-VA and a negative correlation between P-Dp and P-RR, for both drags and banks data. For drags data, C-NH was also negatively correlated with P-CV. For banks data, P-CV and P-Dp were positively related.

3.3. Environmental effects on positioning error within combinations

For detected tags, environmental variables had weaker relationships with positioning error than with detection probability (Fig. 6 and Fig. 7). Configuration variables were again the main driver of positioning error, which was reduced when C-NH was high (>12 for drags, >13 for banks, Fig. 6a and Fig. 7a) and C-VA was high

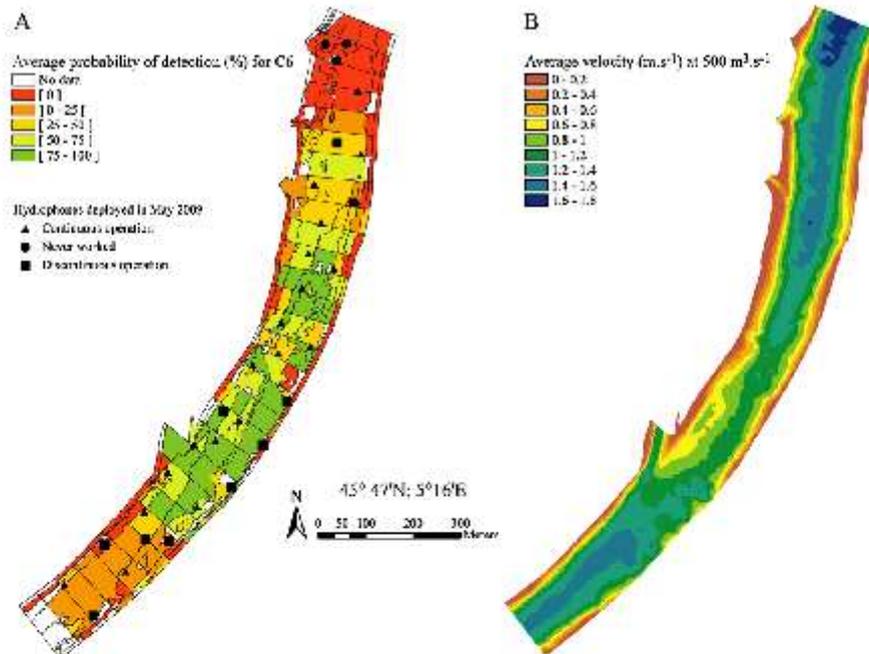


Fig. 5. Map of detection probability for the combination C6 associated with minimum positioning errors (A), and map of depth-averaged velocity for a discharge rate of $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (B). For readability, detection probabilities were averaged by regular categories of water depth (<1 m; 1–2 m; 2–3 m; 3–4 m; >4 m) and by regular longitudinal sub-reaches (50 m long). Values of velocity were averaged by cells of the hydraulic model. Triangles, squares and circles correspond to hydrophones positions identified in the matrix M2.

(>156° for drags and banks, Fig. 6b and Fig. 7b). However, these effects were not obvious for the two most accurate user-defined combinations for drags (C6 and C5). High roughness (P-RR) noticeably reduced the error for banks data (Fig. 7f) and high velocities (P-CV) increased the error of drags data for the worse combinations only (Fig. 6c). Finally, indicators of reception quality were consistently related to the error, that could be increased (by a factor less than two) when I-VA decreased (Fig. 6i and Fig. 7i) and when I-MD and I-MAT increased (Fig. 6g, h and Fig. 7g, h). I-NR had no obvious relationship with the error (Fig. 6j and Fig. 7j). Detected banks data had errors generally two times larger than drags data (Table 2). This was consistent with their C-VA and I-VA being two times lower and their P-RR being ten times larger (see the Supplementary file S3). Note that I-NR of detected tags were two times lower for banks, i.e. though noise did not explain error variations within drags and banks data, it could partly explain differences between the two data sets.

Maps of positioning errors of detected tags showed similar spatial patterns among combinations (see Fig. 8 for an example) and reflected that the environment affected positioning errors less than detection probability. The positioning errors were higher along river banks, and tended to be higher in areas where hydrophones did not function properly. Scatter plots among environmental variables (see an example in Supplementary file S2) indicated that their influence on positioning errors could be complicated by the same inter-correlations as those described for the probability of detection. In addition, they indicated strong correlations among the indicators of reception conditions (except I-NR) and the configuration variables for banks data.

3.4. Differences in detection probability and positioning error between combinations

The average probability of detection varied among user-defined combinations between 34.6% (combination C3) and 47.2% (C5) for drags data (Table 2) and between 8.3% (C3) and 17.7% (C5) for banks data (Table 2). It was higher when PT was PT-HTI and M was M2 (for drags and banks). The average positioning error varied more strongly between combinations: between 3.6 m (C6) and 10.7 m (C3) for drags data (Table 2) and between 7.7 m (C7) and 22.3 m (C4) for banks data (Table 2). It was primarily influenced by PT (i.e. it generally reduced two-fold when PT was PT-HTI), and secondarily reduced when M was M2 and SpS was 30 (for drags only). Environmental variables did not differ much between combinations, for both drags and banks (see the Supplementary file S3), and the most accurate combinations (C6 and C5) did not select particular environmental characteristics.

The sensitivity analysis detailing the effects of PT parameters showed that the probability of detection was very sensitive (i.e. could be modified by about 40%) to a few software parameters influencing echo tracking (i.e. minimum and maximum number of echoes required for a series of echoes from one hydrophone, maximum gaps allowed in this series and maximum distance allowed between two echoes, Supplementary file S1). The average positioning error was mostly influenced (with modifications of about 10 m) by an interpolation parameter (number of echoes used to smooth positions, Supplementary file S1). Different values of these parameters potentially explained differences observed between the PT-HTI and PT-JB settings.

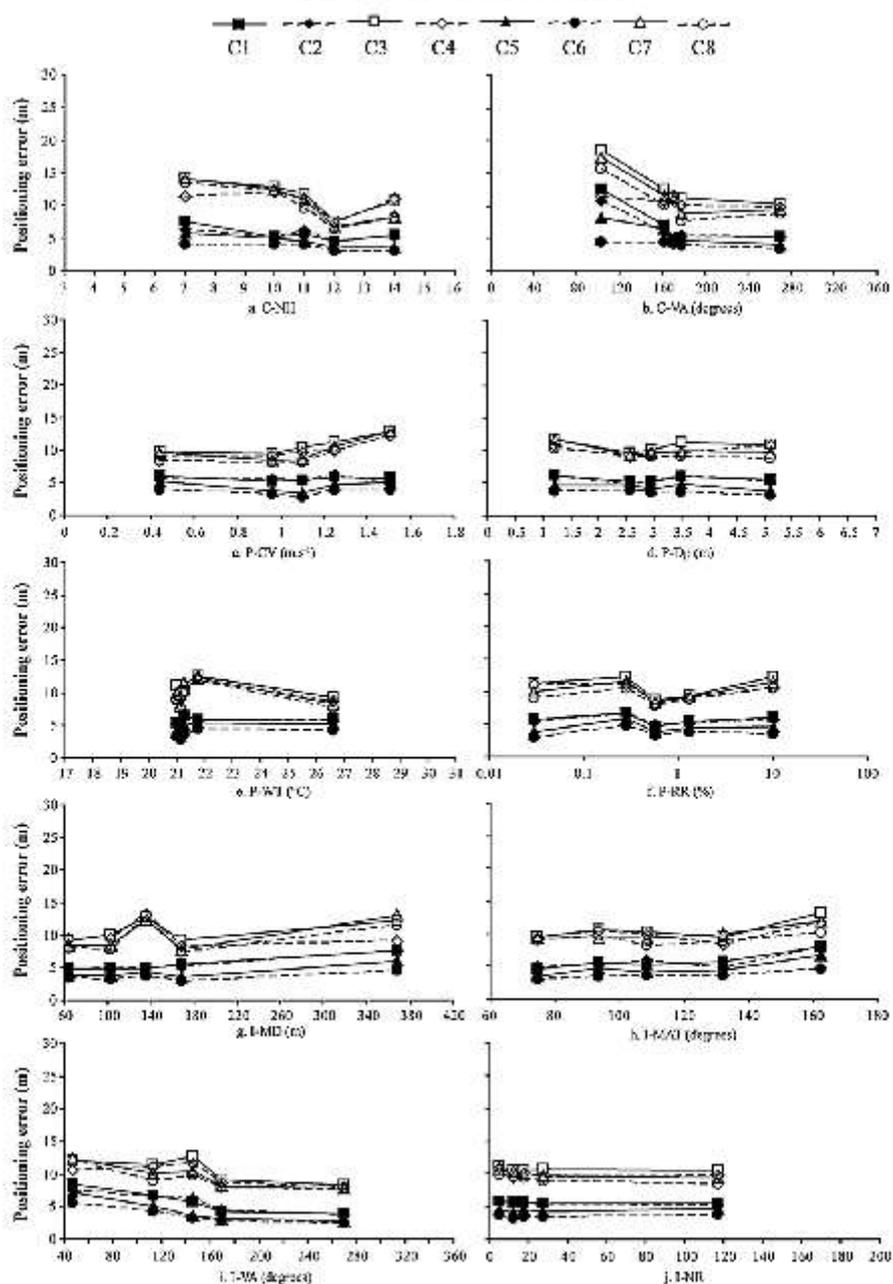


Fig. 6. Positioning error of drags data as a function of six environmental variables and four indicators of reception quality, for the eight combinations of user-defined variables. We fixed the limits of environmental categories so that their sizes were balanced for all combinations, taking into account that some discrete values had a high occurrence. The average class size across combinations and classes was 985 (standard deviation = 504). Note that the x-axis was log-transformed for the P-RR variable.

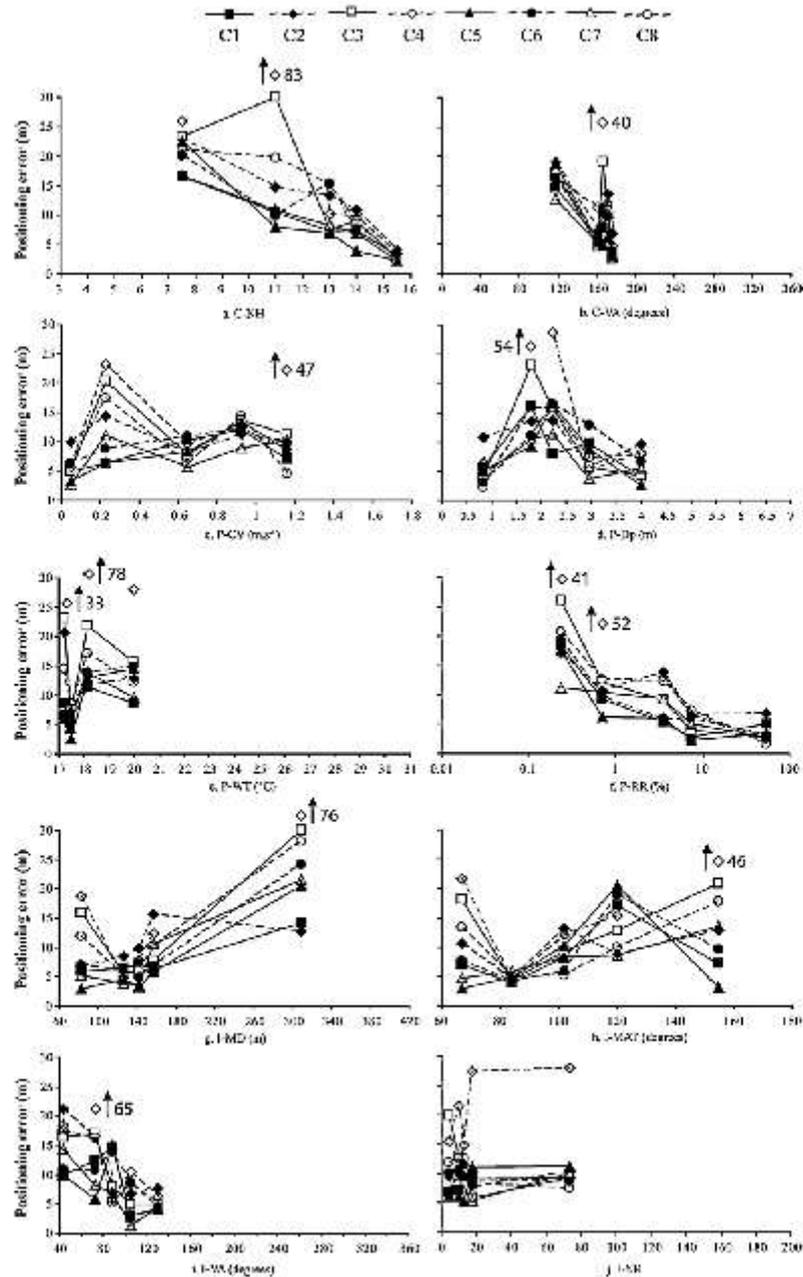


Fig. 7. Positioning error of banks data as a function of six environmental variables and four indicators of reception quality for the eight combinations of user-defined variables. We fixed the limits of environmental categories so that their sizes were balanced for all combinations, taking into account that some discrete values had a high frequency. The average class size across combinations and classes was 28 (standard deviation=5). Note that the x-axis was log-transformed for the P-RR variable and that outliers (positioning error > 30 m) were indicated using arrows in each panel.

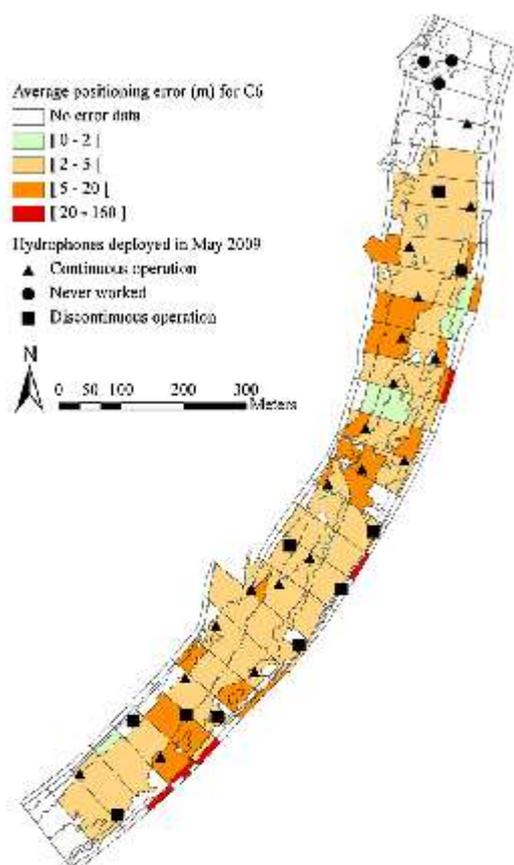


Fig. 8. Maps of positioning error for the combination C6. For readability, positioning errors were averaged by regular categories of water depth (<1 m; 1–2 m; 2–3 m; 3–4 m; >4 m) and by regular longitudinal sub-reaches (50 m long). Triangles, squares and circles correspond to hydrophones positions identified in the matrix M2.

4. Discussion

Our assessment test of the HTI[®] system in heterogeneous environmental conditions showed that the effects of intrinsic user-defined variables and environmental variables were largely independent. Environmental variables were the main variables affecting detection probability, principally the configuration of hydrophones around tags and secondarily relative roughness and velocity. For detected tags, user-defined variables (the post-treatment parameters and secondarily the knowledge of hydrophone positions) were the main determinants of positioning error. Configuration variables had only a secondary influence on the positioning error, especially along the banks.

In our study, the best user-defined combination provided an average detection probability of 44% in the channel (16% for banks) and an average positioning error of 3.6 m in the channel (9.5 m for banks). Our installation was less accurate than a few others made in more homogeneous physical conditions and/or with higher hydrophone densities: e.g., a probability of detection of 75% in

Niezgoda et al. (2002) obtained with a CDMA (Code Division Multiple Access, Lotek Map_500TM) or positioning errors around 1 m in Semmens (2008) obtained with the same HTI system used in the present study. This was largely expected due to the nature of our experiment, whose originality was to test the system in harsh conditions for identifying the determinants of tag detection and positioning error and quantifying their effects.

Our study quantifies how configuration variables can dramatically influence detection probability, and to a lesser extent positioning errors, though the relative role of our two configuration variables was difficult to sort out due to inter-correlation. This effect of hydrophones configuration can partly explain differences in detection probability between previous studies. For example, the study of Niezgoda et al. (2002) obtained a high probability of detection with four hydrophones installed in a delta estuarine wetland with a density of one hydrophone for around 375 m². In another study, Carol et al. (2007) reported a probability of detection of less than 10% with three hydrophones (Vemco radio-acoustic positioning system) installed in a Spanish reservoir with a density of one hydrophone for around 23,000 m² (one third of the triangle surface formed by the listening trio). In our study, we had on average one hydrophone for about 7000 m², and correspondingly intermediate detection probabilities. Other parameters such as transmitter power and frequency could also have contributed to differences among studies. For example, the lower frequency used by Niezgoda et al. (2002), i.e. 76 kHz, can also explain their higher detection probability.

The effect of hydrophone configuration on positioning error in our experiment was secondary compared to its effect on detection probability. Consistently, Carol et al. (2007) reported positioning errors of less than 1 m within the hydrophones array despite their low detection probability. Nevertheless, the influence of configuration (and in particular viewing angles) on positioning errors is consistent with previous results that reported higher errors outside the arrays of hydrophones (Juell and Westerberg, 1993; Kell et al., 1994; Ehrenberg and Steig, 2002; Niezgoda et al., 2002; Espinoza et al., 2011). In our study, both viewing angles and hydrophone densities were often low, largely explaining that our positioning errors could be higher than those obtained in some previous studies (e.g. Carol et al., 2007; Semmens, 2008).

The study of the effect of physical conditions at tag emissions is original to this study, and generally revealed weak effects on the probability of detection and the positioning error. However there was a negative influence of high relative roughness conditions. Higher velocities were associated with lower probabilities of detection for drags data, but this could be due to the negative correlation between velocity and the density of hydrophones (i.e. hydrophones did not work in high velocity areas). Similarly, higher detection probability in fast-flowing and deep conditions for banks data likely reflected a confounding effect: among points of the banks data, those with higher velocity and depth (the two variables being correlated) were closer to the main channel and were better detected. Similar confounding effects along the banks were reported by Melnychuk and Christensen (2009). Concerning the temperature, a weak effect of thermal conditions on detection probability was highlighted but was also likely confounded with spatial patterns. Indeed, the intermediate temperature category associated with high detection probability was different for drags and banks, and was situated in the middle of the reach for both data sets.

Therefore, it is very likely that physical variables affect the probability of detection and the positioning error only through indirect mechanisms, as in fast-flowing zones where high velocities may damage hydrophones or their connections. The clearer effect of the physical environment is that a lower probability of detection was observed along banks, as expected and reported in previous

studies. This effect probably results from weak configurations and high levels of sound reflection in these shallow areas with high relative roughness (Cato and Bell, 1992; Juell and Westerberg, 1993; Trevorrow, 1998; Boswell et al., 2007), as also suggested by our indirect indicators of reception quality.

Experience for tuning PT parameter values had, overall, less influence on the probability of detection than environmental factors in our study. However, our sensitivity analysis indicated that a particular attention should be given in future applications to the parameters influencing echo tracking, since these can alter the probability of detection. The lower positioning error obtained with the expert parameter settings was partly due to an interpolation parameter (number of echoes used to smooth tag position tracks) whose tuning also requires attention. These results suggest that a full understanding of the parameter calibration process is necessary to get the best capabilities from the system, especially when the possibilities of parameter values are numerous and closely dependent on the physical characteristics of the study site.

At the core of our study, the knowledge of the positions of hydrophones (matrix *M*) and speed of sound (*Sps*) had much weaker influence on the positioning error than PT parameters. This is surprising when considering their predominant role emphasized in the literature (Juell and Westerberg, 1993; Kell et al., 1994; Cote et al., 1998; Wahlberg et al., 2001). Still, *M* and *Sps* could affect positioning errors by a meter or more, and they would probably have played a more important role in better configuration conditions. It is also possible that our two *M* matrices were both inaccurate on the experimental days, but the hydraulic conditions of the site prevented us from checking this aspect. Using the coordinates of the hydrophones measured at the end of the experiment improved our results, and this procedure is recommended for future experiments in fast-flowing rivers. Indeed, it is likely that the hydrophones rapidly moved after deployment and then stabilized on the bed.

The main practical lesson of our methodological study is that fixed acoustic telemetry systems can be used efficiently in fast-flowing rivers with high stresses and velocities, where they provided a reasonable detection probability and positioning error, despite a relatively low density of hydrophones installed within a 234,600 m² area. The probability of detection and the positioning error obtained here can be certainly improved with higher hydrophone densities and/or reduced study areas. However, it would be satisfactory for a number of ecological studies for which a higher quantity of accurate positions is not needed. As an example, for studies on the relationships between the physical habitat and the detailed movement of many fish individuals of several fish species in our reach, a fixed telemetry system is appropriate and a positioning error of 3–5 m is satisfactory considering the uncertainty of the hydraulic model. The main limit of fixed telemetry systems in large rivers seems to be the difficulty of deployment, illustrated by the length of weighted cables that were needed in the Rhone River (16 km) and the number of hydrophones that were temporarily disconnected (up to 11 out of 32), mostly due to scouring around blocks or accidents with trees in fast-flowing areas.

Because our results quantify the probability of detection and the positioning error for a variety of intrinsic and environmental combinations, we hope that they provide useful guidelines for optimizing future installations. Recommendations for improving detection and errors certainly depend on the objectives of the telemetry study (Kell et al., 1994). Studies for which detection probability is important, for example when tracking animals with frequent and large movements, should pay a particular attention to local hydrophone densities and viewing angles. If banks are of particular importance in such studies, our results can be used to quantify how the hydrophone density and angles should be increased near the banks to obtain a satisfactory probability of detection. For studies for which positioning error is more important

(e.g. for some studies on species interaction), our results suggest paying particular attention to system parameter values. Evaluation tests of the system would be particularly useful in such conditions and can serve to optimize intrinsic parameter values. In all cases, high roughness zones should be better covered. Zones with extreme velocities or temperature fluctuations should not be problematic for the probability of detection and the positioning error, but should be avoided if a risk of damaging the hydrophones is identified. We recommend paying particular attention to the hydrophone mounting and installation method in such conditions and to choose an aerial deployment of cables when possible.

Acknowledgements

The authors thank the Water Agency Rhône Méditerranée & Corse, Electricity of France (EDF), the European Union / FEDER, the General Direction of Irstea and the Aquitaine region for their financial support, the Nuclear Power Plant of Bugey (EDF) for their collaboration, Eric McNeil, Samuel Johnston, Patrick Neelson, Dave Ouellette, Pascal Roger and Raphael Mons for their help during material installation and software calibration. Special thanks to Yann Le Coarer for his help with tachometer measures and to Alizés plongée® for its involvement in the diving operation. Finally, we thank the anonymous reviewers, André St Hilaire and Lise Vaudor for their comments and assistance.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at doi:10.1016/j.fishres.2012.02.008.

References

- Baras, E., Lagardère, J.P., 1995. Fish telemetry in aquaculture: review and perspectives. *Aquacult. Int.* 3, 77–102.
- Boswell, K.M., Wilson, M.P., Wilson, C.A., 2007. Hydroacoustics as a tool for assessing fish biomass and size distribution associated with discrete shallow water estuarine habitats in Louisiana. *Estuaries Coasts* 30, 607–617.
- Capra, H., McNeil, E., Bouillon, M.C., Pella, H., Allaru, C., 2011. Relevance of 2D hydraulic model to address fish behaviour in large rivers. *La Houille Blanche* 6, 28–33.
- Capra, H., Pella, H., Oriol, E., 2008. Records from the water temperature of the Rhône river in the summer of 2008. Electricity of France – Cemagref Report, p. 37.
- Carol, J., Zamora, L., Garcia-Berthou, E., 2007. Preliminary telemetry data on the movement patterns and habitat use of European catfish (*Silurus glanis*) in a reservoir of the River Ebro, Spain. *Ecol. Freshwat. Fish* 16, 450–456.
- Cato, D.H., Bell, M.J., 1992. Ultrasonic ambient noise in Australian shallow waters at frequencies up to 200 kHz. *DSTO Mat. Res. Lab., Tech. Rep. MRL-TR-91-23*, February, p. 25.
- Clements, S., Jepsen, D., Kamowski, M., Schreck, C.B., 2005. Optimization of an acoustic telemetry array for detecting transmitter-implanted fish. *N. Am. J. Fish. Manage.* 25, 429–436.
- Cooke, S.J., Bunt, C.M., Schreer, J.F., 2004. Understanding fish behavior, distribution, and survival in thermal effluents using fixed telemetry arrays: a case study of smallmouth bass in a discharge canal during winter. *Environ. Manage.* 33, 140–150.
- Cooke, S.J., Niezgod, G.H., Hanson, K., Suski, C.D., Phelan, F.J.S., Tinline, R., Philipp, D.P., 2005. Use of CDMA acoustic telemetry to document 3-D positions of fish: Relevance to the design and monitoring of aquatic protected areas. *Mar. Technol. Soc. J.* 39, 17–27.
- Cote, D., Scruton, D.A., Niezgod, G.H., McKinley, R.S., Rowsell, D.F., Lindstrom, R.T., Ollerhead, L.M.N., Whitt, C.J., 1998. A coded acoustic telemetry system for high precision monitoring of fish location and movement: application to the study of nearshore nursery habitat of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Mar. Technol. Soc. J.* 32, 54–62.
- Craven, S.W., Peterson, J.T., Freeman, M.C., Kwak, T.J., Irwin, E., 2010. Modeling the relations between flow regime components, species traits, and spawning success of fishes in warmwater streams. *Environ. Manage.* 46, 181–194.
- Del Grosso, V.A., Mader, C.W., 1972. Speed of sound in pure water. *J. Acoust. Soc. Am.* 52, 1442–1446.
- Ehrenberg, J.E., Steig, T.W., 2002. A method for estimating the position accuracy of acoustic fish tags. *ICES J. Mar. Sci.* 59, 140–149.
- Ehrenberg, J.E., Steig, T.W., 2003. Improved techniques for studying the temporal and spatial behavior of fish in a fixed location. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 700–706.

- Espinosa, M., Farrugia, T.J., Webber, D.M., Smith, F., Lowe, C.G., 2011. Testing a new acoustic telemetry technique to quantify long-term, fine-scale movements of aquatic animals. *Fish. Res.* 108, 364–371.
- Fritsch, F.N., Carlson, R.E., 1980. Monotone piecewise cubic interpolation. *SIAM J. Numer. Anal.* 17, 238–246.
- Geeraerts, C., Ovidio, M., Verbeest, H., Buysse, D., Coeck, J., Belpaire, C., Philippart, J.C., 2007. Mobility of individual roach *Rutilus rutilus* (L.) in three weir-fragmented Belgian rivers. *Hydrobiologia* 582, 143–153.
- Heupel, M.R., Semmens, J.M., Hobday, A.J., 2006. Automated acoustic tracking of aquatic animals: scales, design and deployment of listening station arrays. *Mar. Freshw. Res.* 57, 1–13.
- Juell, J.E., Westerberg, H., 1993. An ultrasonic telemetric system for automatic positioning of individual fish used to track Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in a sea cage. *Aquacult. Eng.* 12, 1–18.
- Kell, L.T., Russell, L.C., Challis, M.J., 1994. Development of a high resolution tracking system for monitoring the movement of migratory fish past obstructions. In: *Proceedings of the IFM 25th Annual Study Course*, pp. 269–288.
- Lucas, M.C., Bailey, E., 1996. Seasonal movements and behaviour of adult barbel *Barbus barbus*, a riverine cyprinid fish: implications for river management. *J. Appl. Ecol.* 33, 1345–1358.
- Lukšienė, D., Sandström, O., Lounasheimo, L., Andersson, J., 2000. The effects of thermal effluent exposure on the gametogenesis of female fish. *J. Fish Biol.* 56, 37–50.
- Lyons, J., Lucas, M.C., 2002. The combined use of acoustic tracking and echosounding to investigate the movement and distribution of common bream (*Abramis brama*) in the River Trent, England. *Hydrobiologia* 483, 265–273.
- Melnychuk, M.C., Christensen, V., 2006. Methods for estimating detection efficiency and tracking acoustic tags with mobile transect surveys. *J. Fish Biol.* 75, 1773–1794.
- Meyer, L., Hinrichs, D., 2000. Microhabitat preferences and movements of the weatherfish *Misgurnus fossilis*, in a drainage channel. *Environ. Biol. Fish.* 58, 297–306.
- Mims, C.K., Kelso, J.R.M., Randall, R.C., 1996. Detecting the response of fish to habitat alterations in freshwater ecosystems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53, 403–414.
- Niezgodia, G.H., Benfield, M., Sisak, M., Anson, P., 2002. Tracking acoustic transmitters by code division multiple access (CDMA)-based telemetry. *Hydrobiologia* 483, 275–286.
- O'dor, R.K., Andrade, V., Webber, D.M., Sauer, W.H.H., Roberts, M.J., Smale, M.J., Voegel, F.M., 1998. Applications and performance of radio-acoustic positioning and telemetry (RAPT) systems. *Hydrobiologia* 372, 1–8.
- Olden, J.D., Naiman, R.J., 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biol.* 55, 86–107.
- Olivier, J.M., Carrel, C., Lamouroux, N., Dole-Olivier, M.J., Malard, F., Bravard, J.P., Amos, C., 2009. The Rhône River Basin. In: Tockner, K., Robinson, C.T., Uehlinger, U. (Eds.), *Rivers of Europe*. Academic Press, London, pp. 247–295.
- Ovidio, M., Baras, E., Goffaux, D., Birtles, C., Philippart, J.C., 1998. Environmental unpredictability rules the autumn migration of brown trout (*Salmo trutta* L.) in the Belgian Ardennes. *Hydrobiologia* 372, 263–274.
- Ovidio, M., Capra, H., Philippart, J.C., 2007. Field protocol for assessing small obstacles to migration of brown trout *Salmo trutta*, and European grayling *Thymallus thymallus*: a contribution to the management of free movement in rivers. *Fisheries Manage. Ecol.* 14, 41–50.
- Ovidio, M., Capra, H., Philippart, J.C., 2008. Regulated discharge produces substantial demographic changes on four typical fish species of a small salmonid stream. *Hydrobiologia* 609, 59–70.
- Ovidio, M., Philippart, J.C., 2008. Movement patterns and spawning activity of individual nase *Chondrostoma nasus* (L.) in flow-regulated and weir-fragmented rivers. *J. Appl. Ichthyol.* 24, 256–262.
- Pella, H., Capra, H., Foulard, S., 2007. Développement d'un MNT du haut Rhône à partir de relevés bathymétriques réalisés avec un sondeur multi-faisceaux. *Rev. Franc. Photogrammétr. Télédétection* 186, 81–86.
- Poff, N.L., Zimmerman, J.K.H., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biol.* 55, 194–205.
- R Development Core Team, 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Roger, M.C., Capra, C., Roger, P., Le Goff, G., 2010. Hydrobiological monitoring of the Bugey site in 2009. Electricity of France – Cemagref Rep., p. 60.
- Semmens, B.X., 2008. Acoustically derived fine-scale behaviors of juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) associated with intertidal benthic habitats in an estuary. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 65, 2053–2062.
- Simpfendorfer, C.A., Heupel, M.R., Hueter, R.E., 2002. Estimation of short-term centers of activity from an array of omnidirectional hydrophones and its use in studying animal movements. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 59, 23–32.
- Smith, G.W., Urquhart, G.G., Maclellan, D.N., Sarno, B., 1998. A comparison of theoretical estimates of the errors associated with ultrasonic tracking using a fixed hydrophone array and field measurements. *Hydrobiologia* 372, 9–17.
- Takac, F., Wallford, J., 2006. Leica system 1200 – High performance GNSS technology for RTK applications. In: *Proceedings of Conference of Institute of Navigation GNSS – 19th International Technical Meeting of the Satellite Division*, 26–29 September 2006, Fort Worth, TX, pp. 217–225.
- Trevorrow, M.V., 1998. Boundary scattering limitations to fish detection in shallow waters. *Fish. Res.* 35, 127–135.
- Vehanen, T., Bjerke, P.L., Heggenes, J., Huusko, A., Maki-Petays, A., 2000. Effect of fluctuating flow and temperature on cover type selection and behaviour by juvenile brown trout in artificial flumes. *J. Fish Biol.* 56, 923–937.
- Voegel, F.A., Pincok, D.G., 1996. Overview of underwater acoustics as it applies to telemetry. In: Baras, E., Philippart, J.C. (Eds.), *Proceedings of the First Conference and Workshop on Fish Telemetry in Europe* (no. 4-4-0095). University of Liège, Belgium, pp. 23–30.
- Wahlberg, M., Mohl, B., Madsen, P.T., 2001. Estimating source position accuracy of a large-aperture hydrophone array for bioacoustics. *J. Acoust. Soc. Am.* 109, 397–406.

Intérêt d'un modèle hydrodynamique en deux dimensions pour interpréter le comportement des poissons dans les grands cours d'eau

Hervé CAPRA¹, Eric McNEIL², Marie-Claire BOUILLON³, Hervé PELLA¹, Carola ALFARO³

¹ Cemagref, UR MAEP, Equipe Dynam – e-mail : herve.capra@cemagref.fr

² HydroQuébec – Production – e-mail : mcneil.eric@hydro.qc.ca

³ AECOM – e-mail : carola.alfaro@aecom.com

RESUME. – Cet article vise à décrire en quoi un outil performant de caractérisation des conditions abiotiques (modèle hydrodynamique en deux dimensions en l'occurrence) permet d'aborder des questions écologiques originales, comme une étude in situ des réponses comportementales des poissons du Rhône soumis à d'importantes variations des conditions environnementales. Dans un milieu aussi complexe (nombreux paramètres environnementaux qui interagissent) que le Rhône, les résultats présentés ont montré qu'une modélisation en deux dimensions permettait de prendre en compte, pour chaque période d'observation du milieu, la fluctuation des conditions d'écoulement, d'habitat et de température de l'eau. La mise en œuvre d'une telle approche constitue un atout majeur pour la compréhension de la structuration des communautés aquatiques en générale, et de poissons en particulier, trop rarement appliquée en France. Pour la première fois, les conditions environnementales vécues par les poissons au cours de leur déplacement ont été caractérisées. Cette approche peut également être appliquée pour simuler les conditions d'habitat et de température au cours de périodes significativement plus longues, compatibles, par exemple, avec le suivi de la structure de la communauté piscicole du Rhône entamé en 1979. En cela la mise en œuvre d'une modélisation hydrodynamique en 2D répond à l'une des questions majeures formulées par les experts dans la synthèse du projet Rhône Thermie – phase III en 2006. La disponibilité d'une description en deux dimensions, à des échelles spatiales et temporelles adéquates, et ce, pour une large gamme de débits susceptibles d'être observés dans le secteur d'étude, des conditions d'habitat et de température laisse supposer qu'il sera possible de connaître l'influence de ces deux facteurs environnementaux déterminants sur les choix comportementaux des poissons.

Mots clefs : modèle hydrodynamique en 2D, habitat, poissons, Rhône, variabilité, comportement

Relevance of 2D hydraulic model to address fish behaviour in large rivers

ABSTRACT. – The article presented herein seeks to demonstrate how a two-dimensional hydrodynamic model representing abiotic conditions can be used to study the behaviour of fish affected by large fluctuations of environmental conditions in the Rhône River. Despite the complexity of the Rhône's physical environment, the results presented in this article show that a 2D model is capable of correctly representing the hydraulic conditions, water temperature and habitats for the studied area at each time step. This represents a major advancement in the understanding of aquatic community structures and in particular, for the structure of fish communities that are rarely used in France. For the first time, the environmental conditions affecting fish and their spatial localization will be known simultaneously. The model can also simulate habitat conditions and temperatures over longer periods of time. For example, this methodology is compatible with the monitoring of fish communities of the Rhône initiated in 1979. In this regard, a 2D hydrodynamic model answered a major need of experts working on the Rhône therm – Phase III project in 2006. The interest in modeling precise habitat and temperature conditions in two-dimensions for a large array of flows allows one to speculate that it will be possible to know the role that these two key environmental factors play on the behavioural choices of fish.

Key words : 2D hydrodynamic model, habitat, fish, Rhône River, variability, behaviour

I. INTRODUCTION

Les ressources hydriques du fleuve Rhône sont exploitées pour différents usages, notamment la production hydroélectrique, le refroidissement des Centres Nucléaires de Production Electrique (CNPE) ainsi que l'approvisionnement en eau. Ces différentes utilisations de l'eau impliquent des modifications plus ou moins significatives du régime hydrologique et donc des conditions abiotiques qui y sont associées.

La production hydroélectrique génère des fluctuations de débit significatives sur de courts laps de temps (infra-journaliers) qui ne s'observent pas dans un régime hydrologique

naturel et qui pourraient être assimilées à des éclusées. Ces fluctuations de débit se déclinent, en terme d'habitat du poisson, par des variations importantes de la disponibilité en habitat favorable.

Par ailleurs, l'eau du Rhône est également utilisée pour le refroidissement des réacteurs des CNPE. Il en résulte des rejets d'eau chaude (supérieurs de plusieurs degrés à la température de l'eau pompée) dans le Rhône, ce qui constitue un autre facteur environnemental susceptible d'influencer les communautés de poissons.

L'autorisation de rejet d'eau chaude accordée par les services de l'état oblige les CNPE à organiser des suivis des

communautés aquatiques pour évaluer les conséquences du réchauffement de l'eau sur le fonctionnement écologique de l'écosystème perturbé. Pour le CNPE de Bugey en particulier, après 20 années d'étude, les conclusions et les recommandations du groupe de travail 'Etude Rhône Thermie - Phase III' (EDF, DIRE, Agence de l'Eau, DIREN, Univ. Lyon I, Aralep, Cemagref Aix et Lyon) illustraient clairement le besoin de prendre en compte conjointement la variabilité spatio-temporelle des conditions de débit, d'habitat et de température pour étudier la variabilité de la structure des communautés vivantes du Rhône (poissons, invertébrés, plantes; Carrel *et al.*, 2006 [1]). La connaissance des réponses des poissons à des variabilités de débit sous différentes conditions de température constitue une question d'intérêt primordial. L'approche de simulation numérique des conditions abiotiques susmentionnées a été identifiée comme la plus appropriée pour représenter la variabilité spatio-temporelle des conditions d'habitat et de la température. De ces constats est né le projet Bugey2D, initié en 2006, dont les objectifs principaux étaient :

- de caractériser précisément les variations spatio-temporelles des conditions de vie des communautés aquatiques du Rhône (habitat et température) ;
- d'analyser les réponses comportementales des poissons soumis à des variations simultanées et contrastées d'habitat et de température ;

L'objectif global du projet est d'étudier comment la sélection de l'habitat par les poissons peut être influencée par la température de l'eau, notamment dans un contexte perturbé tant d'un point de vue hydrologique que thermique (e.g. le Rhône à la hauteur de la centrale nucléaire de Bugey). L'hétérogénéité spatiale de l'habitat et de la température peuvent jouer un rôle significatif pour certaines espèces de poissons, notamment celles en marge de leurs tolérances. Pour connaître les stratégies d'utilisation de l'habitat par les poissons, une expérimentation a permis de suivre le comportement de 61 poissons (par télémétrie acoustique) pendant 3 mois au cours de l'été 2009 (Bergé *et al.*, soumis [2]) dans le Rhône au droit du CNPE de Bugey.

Le présent article vise à montrer en quoi un outil performant de représentation des conditions abiotiques (modèle hydrodynamique en deux dimensions en l'occurrence) permet d'aborder des questions écologiques originales, comme une étude *in situ* des réponses comportementales des poissons du Rhône soumis à de fortes variations des conditions environnementales. Les techniques de simulation de l'habitat des poissons en fonction du débit sont des outils fréquemment utilisés dans le cadre d'expertises de gestion (e.g. définition de régime de débit réservé; Reiser *et al.*, 1989[3]; Tharme, 2003[4]) mais beaucoup plus rarement pour étudier les relations entre des caractéristiques du milieu (e.g. disponibilité d'habitat) et le comportement des poissons comme par exemple l'étude de bioénergétique présentée par Hayes *et al.* (2007) [5].

II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Présentation du site

Le secteur du Rhône choisi pour l'étude est situé au milieu du plus long tronçon du Rhône français non dérivé par une installation hydroélectrique. Ce tronçon, long de 36 kilomètres, est localisé à l'Est de Lyon, entre les barrages

de Villebois (Sault-Brenaz) à l'amont et de Jons à l'aval (figure 1). Le site étudié s'étend sur 3,5 km entre l'amont (pk47) et l'aval (pk43,5) du CNPE de Bugey (EDF). La largeur du lit mineur sur le secteur est d'environ 140 m. Les débits du Rhône sont essentiellement régulés par les barrages situés en amont du tronçon (notamment Seujet et Verbois, en Suisse, et Gémisiat) et sont compris 90 % du temps entre 160 et 742 m³.s⁻¹ pour un module de l'ordre de 473 m³.s⁻¹ (www.rdrbrmc.com; à Lagnieu; débit médian de 470 m³.s⁻¹). La température journalière moyenne de l'eau du Rhône en amont du site d'étude, évaluée sur la période 1980-2009, est de 12,1°C. Au cours de cette période, la température moyenne journalière de l'eau a fluctué entre 1°C et 25,8°C.

II.2. Mise en œuvre du modèle hydrodynamique

Une schématisation bidimensionnelle a été retenue pour caractériser les conditions abiotiques qui prévalent au sein du site à l'étude. Ce choix résulte des considérations suivantes : 1) les modèles de préférence d'habitat des poissons sont définis en fonction de vitesses moyennes sur la colonne d'eau ; 2) il n'y a pas de stratification verticale de la température de l'eau ; 3) il convient de disposer d'une description des conditions abiotiques avec une configuration et une résolution spatiale compatible avec une étude comportementale des poissons (ce que n'aurait pas permis d'atteindre le recours à une schématisation unidimensionnelle ; les poissons étant susceptibles de se déplacer tant latéralement que longitudinalement par rapport au cours d'eau), et 4) une approche de modélisation hydrodynamique en trois dimensions n'aurait pas, dans le contexte du projet, apporté davantage d'information, tout en s'avérant plus complexe à mettre en œuvre et à valider.

La discrétisation géométrique du tronçon à l'étude a été réalisée sous la forme d'un maillage irrégulier d'éléments triangulaires en tenant notamment compte de la configuration bathymétrique du secteur (recours, à titre d'exemple, à un maillage de Delaunay contraint au droit de certaines sections de contrôle de l'écoulement à faibles débits). Le tronçon considéré pour les simulations numériques des conditions abiotiques a été étendu vers l'amont par rapport aux

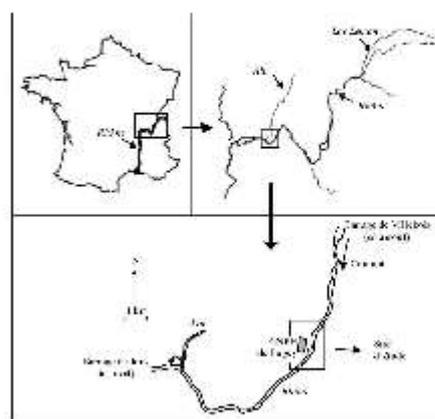


Figure 1 : Site d'étude, localisé sur le Rhône en amont de Lyon, à la hauteur du CNPE de Bugey.

La simulation de la quantité d'habitat favorable potentiel (Surface Pondérée Utile en m^2) en fonction du débit semble peu sensible au choix du débit d'étalonnage du modèle hydrodynamique (figure 4). Les courbes établies à partir des cinq débits d'étalonnage différents sont très proches, malgré un léger décalage à partir de $500 m^3 \cdot s^{-1}$.

Le modèle hydrodynamique mis en œuvre sur le Rhône à Bugey simule les conditions d'habitat utilisées par les poissons pour chacune de leurs localisations (figure 5). La création de chronogrammes permet de visualiser dans le temps et simultanément les profondeurs, les vitesses de cou-

rant, les températures ou le substrat utilisés par les poissons et les conditions disponibles (e.g. le débit, dans la figure 5) dans le milieu.

Enfin, le modèle numérique de température de l'eau a également fait l'objet d'un étalonnage et d'une validation. Il en résulte des écarts maximaux de l'ordre de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dans le cadre de la phase de validation. Par ailleurs, les résultats de simulation de température de l'eau ont été comparés à une cartographie des rejets d'eau chaude observés par le biais d'une thermographie infrarouge dans le cadre de relevés aéroportés. Cette comparaison démontre que les résultats

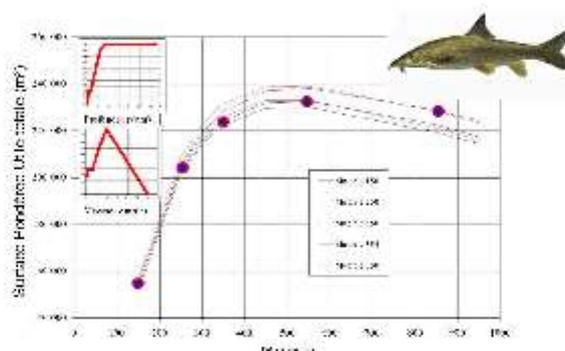


Figure 4 : Evolution de la Surface Pondérée Utile (indice d'habitat favorable potentiel, en m^2) du barbeau adulte (*Barbus barbus*, L. 1758) en fonction du débit pour des modèles hydrodynamiques étalonnés à différents débits (150 à $850 m^3 \cdot s^{-1}$). Les courbes de préférence utilisées pour la profondeur et la vitesse de courant sont présentées à gauche du graphique.

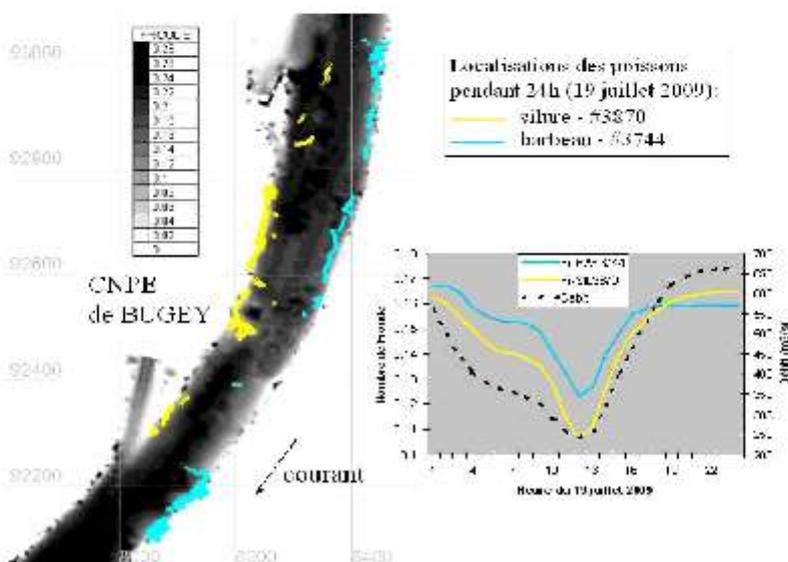


Figure 5 : Exemple de localisation de deux poissons (silure #3870 (*Silurus glanis*, L. 1758) et barbeau # 3744) pendant 24h le 19 juillet 2009 au sein du site d'étude représenté ici par une cartographie du nombre de Froude (dégradé de gris ; adimensionnel) pour le débit moyen de la journée. Le chronogramme des valeurs du nombre de Froude utilisées par les poissons sur 24h sont confrontées à la variation concomitante du débit.

des simulations numériques sont consistants par rapport à la configuration du panache thermique observé *in situ*.

IV. DISCUSSION

Les résultats présentés dans cet article ont montré que l'utilisation d'une modélisation en deux dimensions des conditions d'écoulement, d'habitat et de la température de l'eau s'avère un outil performant pour l'analyse des interrelations de divers facteurs environnementaux sur le comportement du poisson dans des milieux complexes tels que le Rhône. Cette approche, peu appliquée à ce jour en France, possède l'avantage marqué de caractériser, de manière continue, l'interaction de paramètres environnementaux sur l'évolution de la structure des communautés aquatiques. En revanche, ces outils de simulation sont déjà largement exploités au Québec, pour le fleuve Saint-Laurent par exemple (Mingelbier et Morin, 2005 [9]; Morin *et al.*, 2005 [10]). La connaissance des conditions vécues par les poissons dans l'approche comportementale envisagée dans le cadre du projet en cours (projet Bugey 2D) en fait son originalité et sa force. Pour la première fois, les fluctuations des conditions environnementales susceptibles d'influencer les poissons pourront être mises en relation avec leur localisation spatiale. Mais ces outils peuvent également simuler les conditions d'habitat et de température sur des périodes significativement plus longues, notamment celle correspondant au suivi des effets des rejets d'eau chaude sur la structure de la communauté piscicole entamé en 1979. En cela le projet Bugey 2D, via la mise en œuvre d'une modélisation hydrodynamique en 2D, répond à l'une des questions majeures formulées par les experts dans la synthèse du projet Rhône Thermie – phase III (Carrel *et al.*, 2006 [1]).

Les courbes de préférences définies par Lamouroux *et al.* (1999) [8], lesquelles ont été élaborées à partir de campagnes d'échantillonnage effectuées entre autres dans le Rhône, ont été jugées par ces auteurs comme transférables pour les cours d'eau du sud de la France. Il était donc raisonnable d'utiliser ces courbes dans un premier temps afin d'estimer les surfaces d'habitat favorable pour différentes espèces présentes dans le secteur à l'étude. Toutefois, l'analyse des habitats utilisés par les poissons suivis par télémétrie acoustique, dans le cadre du projet en cours Bugey 2D, permettra certainement une analyse assez fine de la pertinence des simulations d'habitat réalisées ici. Par ailleurs, les premières analyses des enregistrements des comportements des poissons, confirment que le comportement des poissons ne sera pas étudié en tenant compte de leur position dans la colonne d'eau (dimension verticale). Ce constat justifie encore, *a posteriori*, le choix d'une schématisation bidimensionnelle des écoulements.

Un des axes forts actuels du projet Bugey 2D est la description des trajectoires des poissons dans le temps et dans l'espace. L'une des questions fondamentales associées à cette description des trajectoires des poissons, incluant les moments d'immobilisation, est la recherche d'événements susceptibles d'expliquer les changements de comportement. L'intérêt de disposer d'une caractérisation des conditions d'habitat et de température de l'eau à des échelles temporelles et spatiales adéquates, et ce, pour une large gamme de débits susceptibles d'être observés dans le secteur d'étude, laisse supposer qu'il sera possible de connaître l'influence

de ces deux facteurs environnementaux clefs dans le comportement des poissons.

V. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier EDF (CNPE et DTG-Grenoble), l'Agence de l'Eau RM&C et l'Union Européenne (FEDER) pour leur collaboration et pour leur soutien financier pour le projet Bugey 2D. Nous remercions également la Compagnie Nationale du Rhône pour nous avoir communiqué les enregistrements de débit et de niveau d'eau au pas de temps horaire à Lagnieu et au droit du CNPE de Bugey. Ces données sont dites « brutes, visuellement contrôlées mais non critiquées et non validées ». Enfin, il importe de souligner ici qu'un tel travail ne peut aboutir que grâce à la collaboration de beaucoup de personnes dévouées, en particulier, Pascal Roger, Raphaël Mons, Julien Bergé et Nicolas Lamouroux.

VI. REFERENCES ET CITATIONS

- [1] CARREL G., DERANT B., FRUKET J. F., KHALANSKI M., OLIVIER J. M., POIRIL A. Et SOUCHON Y. (2006) — *Étude thermique globale du Rhône – Phase III Synthèse et conclusions*. 59 p
- [2] BEHRE J., CAPRA H., OVIEDO M., PELLA H., & LAMOUROUX N. (SOUMES) — *Living with fish in a large river with heterogeneous flow and temperature: an acoustic telemetry experiment*.
- [3] REISSER D. W., WISCHKE T. A. & ESTES C. (1989) — *Status of instream flow legislation and practices in North America*. *Fisheries*. 14 22-29
- [4] THARANI R. E. (2003) — *A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers*. *River Research and Applications*. 19 397-441
- [5] HAYES J., HUGHES N. & KELLY L. (2007) — *Process-based modelling of invertebrate drift transport, net energy intake and reach carrying capacity for drift-feeding salmonids*. *Ecological Modelling*. 207 171-188
- [6] PELLA H., CAPRA H., & FOULARD S. (2008) — *Développement d'un MNT du haut Rhône à partir de relevés bathymétriques réalisés avec un sondeur multi-faisceaux*. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. 186 81-86
- [7] CAPRA H., PELLA H. & ORIOU E. (2008) — *Relevés de la température de l'eau du Rhône au cours de l'été 2008 (profils et enregistrements ponctuels)*. Rapport Cemagref – EDF. 42 p
- [8] LAMOUROUX N., CAPRA H., POUILLY M. Et SOUCHON Y. (1999) — *Fish habitat preferences in large streams of southern France*. *Freshwater Biology*. 42 673-687
- [9] MINGELBIER M. & MORIN J. (2005) — *Modélisation numérique 2 D de l'habitat des poissons du Saint-Laurent fluvial pour évaluer l'impact des changements climatiques et de la régularisation*. *Le Naturaliste Canadien*. 129 96-102
- [10] MORIN J., CHAMPOUX O., MARTIN S. & TURBON K. (2005) — *Modélisation intégrée de la réponse de l'écosystème dans le fleuve Saint-Laurent: Rapport final des activités entreprises dans le cadre du Plan d'étude sur la régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent*. Rapport scientifique SMC Québec – Section Hydrologie RS-108, Environnement Canada, Sainte-Foy, préparé pour le Groupe de travail technique sur l'environnement du Groupe d'étude Internationale sur le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent (Commission Mixte Internationale). 130 p

