

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Typologie des rivières en tresses du bassin RMC

Rapport de l'année 3
8 novembre 2012

Action n° 14 du Programme 2008 au titre de
l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR

Coordination : H. Piégay, B. Belletti



RAPPEL DES OBJECTIFS :

Dans le cadre de la convention de recherche qui lie la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) et l'agence de l'eau RMC, une action a été initiée sur la gestion des rivières en tresses du Sud-Est de la France. L'objectif est de définir pour les années à venir des travaux de recherche interdisciplinaire permettant de mieux caractériser les rivières en tresses au niveau physique et écologique et proposer des actions de restauration fondées sur des bases plus solides. Ces travaux doivent servir à la fois à définir des priorités d'actions territoriales lors de la mise en œuvre de la DCE et à affiner les différentes mesures préconisées à l'échelle des schémas locaux pour la préservation ou la restauration écologique et la satisfaction des usagers en matière de sécurité et de disponibilité de la ressource en eau. Elle doit apporter des éléments de connaissance répondant aux orientations fondamentales suivantes : (OF2) concrétiser la mise en œuvre du principe de non dégradation des milieux aquatiques, (OF6) préserver et redévelopper les fonctionnalités naturelles des bassins et des milieux aquatiques, (OF8) gérer les risques d'inondations en tenant compte du fonctionnement naturel des cours d'eau.

Dans ce contexte, un projet scientifique interdisciplinaire a été construit collectivement entre scientifiques et gestionnaires sur le thème de la caractérisation fonctionnelle des rivières en tresses. L'objectif général est d'établir une typologie biomorphologique des tresses du bassin du Rhône. C'est en effet dans ce bassin que se concentrent la plupart des rivières de ce type sur le territoire métropolitain (plus de 600 km recensés), voire même en Europe. Cette typologie est fondée sur l'analyse d'une cinquantaine de tronçons en tresses représentatifs des différentes hydroécorégions du bassin Rhône-Méditerranée (Slater, 2007), plusieurs d'entre eux seront ensuite sélectionnés pour faire l'objet d'analyses plus fines.

Les questions posées sont les suivantes : (1) existe-t-il des indicateurs simples permettant de replacer une tresse sur un gradient actif-déliquescent, de définir son état physique et d'identifier ainsi les principales actions à promouvoir en matière de sécurité publique et de gestion sédimentaire ? (2) quels sont les critères d'évaluation et les actions à préconiser pour préserver ou restaurer ces types fonctionnels ?

L'étude est programmée sur une période de 4 ans abordant successivement :

- les trajectoires géomorphologiques (sous la responsabilité d'Irstea Grenoble) ;
- la caractérisation des habitats (sous la responsabilité de l'UMR 5600 du CNRS et l'Université de Rennes) ;

- l'évaluation du potentiel écologique à partir de l'analyse des communautés d'invertébrés (sous la responsabilité de l'UMR 5023 du CNRS).

Le présent rapport fait état de l'avancement de l'année 3. Il présente les résultats finaux de la partie *habitats aquatiques et caractérisation de la mosaïque paysagère sur 50 ans* (UMR 5600, Université de Rennes) ainsi que les résultats consolidés de la partie *compartiment faunistique* (UMR 5023, Irstea de Lyon), de l'étude hydraulique expérimentale (Irstea de Grenoble) et des résultats des suivis thermiques aéroportés (UMR 5600). Il dresse également l'inventaire des travaux prévus en année 4.

SOMMAIRE DU RAPPORT

CHAPITRE I - RAPPEL DES OBJECTIVES PROPRES AUX DIFFERENTS VOLETS	3
Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	4
Partie 2. Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses	5
A. Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés	5
B. Objectif 2: Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresses sur la diversité génétique des populations	5
C. Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresse.....	6
Partie 3. Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses	8
A. Introduction.....	8
B. Etat de l'art	8
Partie 4. Thermie des rivières en tresses	12
CHAPITRE II - RAPPEL ZONE D'ETUDE ET DESCRIPTION DES METHODES PAR VOLET	14
Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	15
A. Les tronçons d'étude.....	15
B. Methode d'analyse de l'evolution du paysage riverain	17
Partie 2. Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses	20
A. Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés	20
B. Objectif 2: Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresses sur la diversité génétique des populations	20
C. Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresse.....	21
Partie 3. Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses	22
A. Dispositif expérimental	22
Partie 4. Thermie des rivières en tresses	26
CHAPITRE III - RESULTATS DE LA TROISIEME ANNEE	28
Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	29
A. Résultats consolidés concernant l'analyse synthétique 1950-2000	29

B.	Evolution des 12 sites en multi-dates	33
Partie 2.	Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses	43
A.	Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés	43
B.	Objectif 2 : Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresseS sur la diversité génétique des populations	44
C.	Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresse.....	44
Partie 3.	Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses	46
A.	Résultats sur les lits en bancs alternés.....	46
B.	Résultats sur les lits en tresses.....	53
Partie 4.	Thermie des rivières en tresses	60
A.	Deux types de structures termiques	60
B.	Hétérogénéité thermique et diversité des habitats.....	61
CHAPITRE IV - CONCLUSIONS DE LA TROISIEME ANNEE ET PERSPECTIVES		63
Partie 1.	Caractérisation des habitats et paysages riverains	64
A.	Conclusions.....	64
B.	Quelques indications opérationnelles	65
Partie 2.	Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses	66
A.	Prévisionnel 2013.....	66
Partie 3.	Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses	67
A.	Conclusions et perspectives	67
Partie 4.	Thermie des rivières en tresses	68
A.	Perspectives.....	68
LISTE DES FIGURES		69
LISTE DES TABLEAUX.....		71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		73
ANNEXES		ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

CHAPITRE I - RAPPEL DES OBJECTIVES PROPRES AUX DIFFERENTS VOIETS

CHAPITRE I - RAPPEL DES OBJECTIVES PROPRES AUX DIFFERENTS VOIETS	3
Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	4
Partie 2. Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses.....	5
A. Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés.....	5
B. Objectif 2: Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresses sur la diversité génétique des populations	5
C. Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresse.....	6
Partie 3. Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses.....	8
A. Introduction	8
B. Etat de l'art	8
Partie 4. Thermie des rivières en tresses.....	12

PARTIE 1. CARACTERISATION DES HABITATS ET PAYSAGES RIVERAINS

Rédacteurs : B. Belletti, S. Dufour, H. Piégay

Cette partie a pour objectif de faire le lien entre la première partie (trajectoire séculaire, cf. rapport année 1) et la 3ème partie (communautés) en abordant la caractérisation de l'habitat à différentes échelles, celle du corridor fluvial et celle de l'habitat aquatique, afin d'identifier une typologie des rivières en tresses sur l'ensemble du bassin RMC.

La première année a été consacrée à la caractérisation des structures paysagères (habitats riverains et aquatiques) à partir d'orthophotographies aériennes et de la dynamique de colonisation de la bande active par la végétation riveraine.

Les travaux de la deuxième année ont porté sur la consolidation des résultats relatifs aux habitats aquatiques et à l'étude de l'évolution du corridor fluvial à l'échelle de 50 ans afin de mettre en évidence les changements planimétriques en lien avec les résultats obtenus dans l'étude des trajectoires géomorphologiques (Volet 1, première année).

Les travaux de cette troisième année ont porté sur la consolidation des résultats relatifs à l'évolution du paysage riverain, notamment en lien avec la dynamique végétale et la chronologie des crues, en s'appuyant cette fois sur un sous-ensemble de seulement 12 tronçons pour lesquels on dispose de plusieurs dates d'observation.

Les données brutes utilisées dans cette partie proviennent essentiellement de la base de données de l'IGN (photographies couleurs ou noir et blanc pour les années 1950 à 2000 et ortho-photographies couleurs des années 2000) et de la base de données hydrologique de la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr>).

PARTIE 2. SPECIFICITES ET STRUCTURE DE LA DIVERSITE DES INVERTEBRES DANS LES RIVIERES EN TRESSES

Rédacteurs : F. Malard, T. Datry, C. Capderrey

L'UMR 5023 en collaboration avec l'Irstea de Lyon pilote le volet « communauté d'invertébrés » du projet.

Cette partie s'inscrit dans le cadre de l'étude de la structuration et de l'assemblage des communautés dans les écosystèmes dynamiques. Il existe un cas extrême de dynamisme au sein des écosystèmes dulçaquicoles: les rivières en tresses.

A. OBJECTIF 1: INFLUENCE DES ECOULEMENTS HYPORHEIQUES SUR LA DIVERSITE ET LA DISTRIBUTION DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES

Il s'agit plus particulièrement de tester l'hypothèse selon laquelle les zones d'exfiltration correspondant à des bandes de tressage contraintes latéralement ou verticalement par une constriction rocheuse pourraient constituer à l'échelle du paysage des hotspots de diversité. La généralisation de cette observation (utilisation de nombreux sites) déboucherait alors sur la possibilité de définir à l'échelle d'un bassin versant les zones à forte diversité à partir d'un système d'information géographique.

Il s'agit au cours de l'année 2012 :

- de finaliser l'analyse, la publication et la valorisation des résultats obtenus sur les 144 échantillons prélevés à une profondeur de 60 cm dans les sédiments ;
- de terminer le tri des échantillons collectés à une profondeur de 90 cm dans les sédiments afin d'analyser l'influence des écoulements hyporhéiques sur la distribution verticale de l'hyporhéos ;
- d'analyser plus finement les liens entre écoulements hyporhéiques, température, matière organique et la richesse et l'abondance de l'hyporhéos.
- de mener au niveau spécifique l'identification de taxons focaux qui pourraient être utilisés comme des indicateurs.

B. OBJECTIF 2: INFLUENCE DE LA STRUCTURE GEOMORPHOLOGIQUE DES RIVIERES EN TRESSES SUR LA DIVERSITE GENETIQUE DES POPULATIONS

L'objectif 2 consiste à déterminer quelle est l'influence de la structure géomorphologique des rivières en tresse sur la diversité génétique des populations d'un organisme souterrain interstitiel, l'isopode *Proasellus walteri*, dont la dispersion est intimement liée à la présence d'un corridor sédimentaire fluvial. Plus précisément, l'étude vise à identifier quelles sont, dans ces corridors, les barrières

naturelles à la dispersion (affleurement rocheux dans des zones de canyon) ou humaines (affleurement du substratum lié à l'incision).

Cette étude dont l'objectif peut à priori sembler relever essentiellement de la recherche fondamentale fournit 2 éléments clés en matière de conservation de la biodiversité et de gestion de l'incision: Elle permet de définir pour la première fois quelle est l'étendue spatiale d'une population d'un organisme souterrain interstitiel à l'échelle d'une région présentant plusieurs rivières en tresse. Cette information, sur laquelle nous n'avons à priori aucune idée précise, est primordiale lorsqu'il s'agit de définir des plans de conservation de la biodiversité. Nous espérons également pouvoir déterminer si l'incision du lit des rivières en tresses, en grande partie liée à l'activité humaine, influence la structure des populations d'une espèce. Ce résultat serait lui aussi nouveau puisque les effets de l'incision ont jusqu'à présent été abordés uniquement au niveau de la richesse et de la composition des communautés.

Il s'agit au cours de l'année 2012 de :

- Constituer une banque microsatellite nécessaire à l'étude de la diversité génétique

La différenciation génétique entre les populations est appréhendée à partir de marqueurs moléculaires de type microsatellites. Il s'agit de séquences répétées du génome caractérisées par un nombre variable de répétitions en tandem (2-5 paires de base). Les individus utilisés pour la création de la banque de marqueurs microsatellites proviendront d'un point "central" situé dans la zone de plaine de la rivière du Roubion. Ces individus qui ont été prélevés sur 3 bancs de graviers distincts d'une même station ont également été utilisés afin de vérifier que la diversité génétique au sein d'une même station est inférieure à la diversité génétique entre stations distantes.

- Réaliser l'échantillonnage de 4 rivières distinctes

Le plan d'échantillonnage qui a été mené en 2012 afin de tester l'hypothèse de l'influence de la structure géomorphologique des rivières en tresses sur la diversité génétique des populations entre et au sein des rivières comprend un total de 33 sites. Au sein de 4 rivières, deux secteurs ont été définis: un corridor de plaine et un corridor de montagne. Des points d'échantillonnage équidistants (tous les 10km) ont été sélectionnés dans chacun de ces corridors.

C. OBJECTIF 3 : INFLUENCE DE LA DYNAMIQUE DES HABITATS SUR LA DIVERSITE DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES TERRESTRES DES RIVIERES EN TRESSE

Les objectifs des études planifiées pour 2012 consistent à : 1) mesurer la biodiversité sur les habitats terrestres du lit d'un cours d'eau en tresses, et 2) comprendre quelles variables contrôlent cette biodiversité. Nous supposons que l'âge des habitats, à travers leur fréquence de perturbation, ainsi que la distance à la source de colonisateurs (par exemple la zone riparienne), sont les 2 facteurs prépondérants dans le contrôle de la distribution de la biodiversité terrestre des lits tressés. En terme finalisé, ce projet permet de quantifier, pour la première fois en France, la biodiversité terrestre d'un lit

de cours d'eau en tresses. Couplée aux précédentes mesures de biodiversité aquatique, cette mesure permet de mieux définir la valeur patrimoniale des cours d'eau en tresses. D'autre part, les facteurs qui contrôlent cette biodiversité ont été examinés, ce qui fournit des « leviers » d'action (par exemple l'entretien du lit) aux gestionnaires dans les projets de gestion et de restauration des cours d'eau en tresses.

Au sein de 4 secteurs cartographiés sur la rivière d'Asse (longueur ~500m), 6 habitats tripliqués ont été sélectionnés de manière à tester de manière indépendante leur âge (3 modalités, jeunes < 2 ans, 2 < intermédiaires < 8, âgés > 10 ans) et la proximité à une source de colonisateurs (2 modalités, proche (connexe à la source) / éloigné (distant de la source)). Sur chacun de ces 18 habitats, une dizaine de pièges à faune (pitfalls) ont été déployés durant 7 jours afin d'échantillonner les invertébrés terrestres. Au total, 180 échantillons ont donc ensuite été triés, et la détermination des taxons est menée au plus fin niveau taxonomique possible (genre ou espèce). Ce niveau de détermination permet de chiffrer au mieux la biodiversité des habitats terrestres du lit de l'Asse, tout en testant les 2 hypothèses du projet.

Coordinateur : Alain Recking

Contributeurs : P. Leduc, H. Bellot, A. Recking, M. Naaim, A. Mours, L. Richard

A. INTRODUCTION

Cette partie correspond à la contribution de Irstea Grenoble à l'accord cadre Agence de l'eau-Zabr pour une meilleure connaissance du fonctionnement hydrosédimentaire et écologique des rivières en tresses, action 2011. Cette action a co-financé (avec l'ANR Gestrans) la thèse de doctorat de Pauline Leduc (période 2011-2013) dont nous présentons ici les résultats intermédiaires.

L'objectif de cette recherche est d'apporter un éclairage sur la compréhension des mécanismes physiques en jeu dans la dynamique sédimentaire, à partir d'une étude sur modèle physique au laboratoire. En particulier, nous nous sommes intéressés aux réponses d'un lit en tresses soumis à différents forçages hydrologiques ou sédimentaires, en considérant des cas d'équilibre, d'érosion et d'aggradation. Pour se rapprocher au plus près des conditions naturelles, une attention particulière a été apportée à la granulométrie du lit.

Nous présentons nos avancements en cinq parties. Une première partie rappelle l'état de l'art (partie 3-B de ce chapitre). Une seconde partie présente le dispositif expérimental et le protocole d'étude (partie 3-A du chapitre II). Une troisième partie présente les résultats obtenus sur un lit à bancs alternés (considérés par certains comme le schéma élémentaire de tressage) (partie 3-A du chapitre III). Enfin une quatrième partie présente les résultats obtenus sur des lits en tresses (partie 3-B du chapitre III). Les conclusions et perspectives sont présentées dans une dernière partie (partie 3-A chapitre IV).

B. ETAT DE L'ART

1 . Que-ce ce qu'une tresse ?

Lorsqu'on s'intéresse aux tresses on commence par se heurter à un problème de définition. Définir un tressage à partir du nombre de ses chenaux n'est pas aussi trivial qu'il peut le paraître puisque la perception que l'on s'en fera sera étroitement liée au niveau de mise en eau du système. Par exemple Piégay et al. (2009) considèrent qu'un lit est en tresses lorsque la largeur totale du lit est supérieure à 6 à 8 fois la largeur des chenaux de basses eaux et lorsque le chenal principal ne touche pas les bords de la bande de tressage. Mais d'autres définitions existent et de nombreux indices ('Braiding River Index') ont été proposés pour décrire le degré de tressage (Bridge 1993).

2 . Instabilité des chenaux

Mais c'est la dynamique sédimentaire qui souvent est utilisée pour distinguer les tresses des simples anabranches. Par exemple Eaton et al. (sous presse) considèrent que ce qui définit le tressage c'est

l'instabilité des chenaux, ce qui d'après eux est le cas dès que leur nombre dépasse une valeur seuil égale à quatre. Cette notion de stabilité a conduit Nicholas et Sambrook Smith (1998) à s'interroger sur le fonctionnement hydrosédimentaire des tresses développées dans les larges vallées proglaciaires. Le transport solide y est très faible et constitué de sédiments relativement fins. Les changements morphologiques visibles correspondent essentiellement à des modifications de connexions hydrauliques entre chenaux existants, très stables, et dont la morphologie n'est réellement remaniée qu'à l'occasion des événements extrêmes. Ils se distinguent ainsi des tresses « actives » (plus proche des zones de production), où des événements hydrologiques même faibles peuvent fortement impacter la morphologie des chenaux (Bertoldi et al. 2010).

3 . Où, quand, comment ?

Le critère proposé par Fredsoe (1978) (ratio largeur du lit – hauteur d'eau supérieur $w/h > 50$) est souvent utilisé pour décrire les conditions hydrauliques responsables de l'apparition du tressage, mais d'autres formulations incluant le nombre de Froude et la pente ont également été proposées (Bridge 1992). La plupart des auteurs s'accordent à dire que les premiers stades de développement des tresses sont les bancs (centraux ou alternés) (Leopold and Wolman 1957; Bridge 1992; Hundey and Ashmore 2009). Des similitudes morphologiques (relation linéaire reliant la largeur du chenal et la longueur des bancs d'une part et la largeur du chenal et la longueur séparant les confluences et bifurcations dans les tresses d'autre part) ont d'ailleurs conduit Hundey et Ashmore (2009) à conclure qu'un même processus serait à l'origine des bancs alternés et tresses.

4 . Un processus granulaire?

Les premières études (Schumm 1968; Schumm and Khan 1972; Schumm et al. 1987) considéraient que les rivières à forte charge de fond produisaient des tresses alors que les rivières à forte charge en suspension produisaient des méandres. En réalité beaucoup de rivières en tresses transportent également une forte charge solide en suspension et cette dichotomie a depuis été abandonnée. Plusieurs études ont par contre mis en évidence le rôle du tri granulométrique (Leopold and Wolman 1957; Warburton and Davies 1994; Warburton 1996; Lanzoni 2000). C'est le dépôt des sédiments les plus grossiers qui pourraient localement produire des points d'ancrage de la charge solide, à l'origine de bancs qui s'engraissent avant de se différencier en tresses par incisions successives.

5 . Fonctionnement à l'équilibre

On sait en réalité encore peu de choses sur la dynamique de tressage (Nicholas 2000). On associe souvent le développement du tressage (ou phase d'*expansion*) à un excès sédimentaire (avec aggradation du lit) et sa disparition (ou phase de *rétraction*) à un déficit (avec incision du lit). Ce constat est particulièrement bien établi dans les vallées fortement anthropisées ou ayant fait l'objet de travaux RTM (Piegay et al., 2009). Des travaux sur modèle physique (Leopold and Wolman 1957; Ashmore 1988) tendent à démontrer que le tressage serait une des nombreuses formes existantes permettant à une rivière de maintenir un équilibre entre le débit et la charge à transporter (Lane et al.

1995). Bertoldi et al. (2009b) ont montré que cet équilibre ne concernerait pas seulement la charge sédimentaire mais également les formes produites et Warburton et Davies (1994) ont démontré la répliquabilité de cet équilibre.

6 . Un équilibre dynamique

Cependant, si équilibre il y a, il ne concerne que les valeurs moyennées dans le temps (équilibre dynamique), différentes études (Ashmore 1988; Hoey 1992; Warburton and Davies 1994) ayant également montré que le transport dans les tresses était toujours associé, pour des conditions hydrauliques constantes, à de très larges fluctuations. Ces fluctuations concernent le débit solide mais aussi la forme des chenaux associés, qui passent alternativement de l'état de tresses (phase d'aggradation) à un écoulement en chenal unique (phase d'incision). Toutes ces mesures indiquent que le débit solide évolue inversement au degré de tressage (les pics de débit solide sont associés à la disparition des tresses au profit du chenal unique). Seuls Warburton et Davies (1994) ont mesuré une tendance inverse ; cependant en utilisant le même dispositif expérimental mais avec des conditions initiales différentes, Warburton (1996) a confirmé le résultat général. Ce résultat contradictoire suggère que le processus de fluctuation fait intervenir des mécanismes complexes, à ce jour méconnus.

7 . Fluctuations et tri granulométrique

Les fluctuations ont été observées à plusieurs échelles d'espace et de temps. Des fluctuations courtes associées au passage de nappes de charriage se superposent à des fluctuations plus longues associées à des changements morphologiques notables (passage du tressage/aggradation à la chenalisation/incision). On peut ainsi mesurer jusqu'à trois périodes superposées dans les fluctuations de débit solide mesurées par Warburton et Davies (1994). Le signal qu'ils mesurent est tout à fait identique au signal mesuré en chenal unique par Recking et al. (2009). Ces derniers avaient mesuré des pics périodiques de débit solide (nappes de charriages) associés à des incisions locales plus ou moins fortes du lit, et avaient montré (par comparaison avec une expérimentation en granulométrie uniforme) que ce phénomène, observé pour des conditions hydrauliques constantes, était sous le seul contrôle du tri granulométrique.

8 . Modélisation

Pour finir, on peut se demander si les lois proposées pour décrire le transport à l'équilibre dans les chenaux uniques sont valables pour les tresses. D'après Bertoldi et al. (2009a), elles pourraient donner des résultats corrects lorsque le calcul est réalisé à partir des sections réelles, mais sous-estimeraient le transport lorsque l'écoulement est calculé sur une section moyenne. Cependant ce constat est basé sur un nombre limité de mesures et la question reste à ce jour entière.

PARTIE 4. THERMIE DES RIVIERES EN TRESSSES

Rédacteurs : V. Wawrzyniak, H. Piégay, P. Allemand

Le régime thermique des cours d'eau joue un rôle important dans les écosystèmes aquatiques (Caissie, 2006 ; Acuna & Tockner, 2009). Il a été montré que la température de l'eau peut avoir des impacts sur la répartition des espèces en milieu fluvial (Vannote et al., 1980). Du fait de leur faible profondeur, les rivières en tresses peuvent enregistrer en période estivale des températures très élevées (Mosley, 1983). Elles présentent également une importante variabilité thermique aussi bien spatialement que temporellement (Arscott et al., 2001 ; Mosley, 1983). Pour un même tronçon, Mosley (1983) observe des variations thermiques jusqu'à 17,7°C entre les différentes entités du cours d'eau. Une particularité de ce type de rivières est que la variabilité thermique latérale est susceptible de dépasser, en été et en automne, la variabilité longitudinale sur tout le cours d'une rivière (Arscott et al., 2001). Des différences thermiques peuvent également exister au sein même des habitats aquatiques et terrestres (Tonolla et al., 2010), tous ces habitats créant une mosaïque thermique complexe de la plaine d'inondation. Outre les différences de profondeur qui jouent sur le taux de radiation reçu par le cours d'eau, les échanges entre les eaux superficielles et les eaux souterraines peuvent expliquer cette variabilité thermique (Mosley, 1983). En effet, les flux hyporhéiques et phréatiques peuvent influencer la thermie de la rivière (Poole & Berman, 2001), tout du moins localement (Burkholder et al., 2008). Les écoulements hyporhéiques ont lieu dans la partie superficielle des alluvions du lit et sont l'expression d'échanges imposés par les formes du lit. L'agencement de ces formes peut ainsi avoir un rôle sur les structures thermiques de la rivière (Malard et al., 2002). De plus, les mares en périphérie du cours d'eau sont susceptibles de présenter elles aussi des conditions thermiques différentes, notamment des échauffements plus marqués en période estivale. Karaus et al. (2005) montrent que la température est un facteur de contrôle essentiel de la diversité de ces mares. La large gamme de température que présentent les rivières en tresses, offre ainsi une grande diversité d'habitats. Cette variabilité thermique est toutefois difficile à appréhender avec des dispositifs de mesure *in situ* tant les unités aquatiques sont nombreuses sur un tronçon donné.

La télédétection infrarouge thermique (IRT) permet depuis peu de s'affranchir de ces limites en fournissant une cartographie continue de la température de surface de l'eau (Torgersen et al., 2001 ; Burkholder et al., 2008 ; Tonolla et al., 2010). Les satellites IRT n'offrant pas des résolutions spatiales assez bonnes, le vecteur d'acquisition aérien (hélicoptères ou avions) doit être privilégié dans l'étude de ces structures thermiques fines, comme c'est le cas pour les différentes surfaces en eau des rivières en tresses. La résolution spatiale, dépendante des paramètres de vols ainsi que des caractéristiques de la caméra thermique, pouvant atteindre le décimètre et la précision en température étant de l'ordre de 0,5°C (Torgersen et al., 2001), ce type de méthode offre de nouvelles perspectives quant à l'étude des structures thermiques fines des rivières en tresses.

Piégay et al. (2009) et Belletti et al. (2012) montrent qu'en condition d'étiage, les rivières en tresses sont très différentes en fonction de leur patron de tressage. Certaines peuvent avoir un réseau de tresses dense et complexe alors que d'autres ont des eaux superficielles concentrées uniquement

dans le chenal principal. Sur le côté ouest des Alpes françaises, les patrons de tressage s'expliquent par des connexions différentes entre les eaux de surface et les eaux souterraines, des apports sédimentaires différents et des régimes hydrologiques contrastés. A la suite de ces travaux, 9 des 53 tronçons étudiés ont été sélectionnés pour être imagés thermiquement. Le choix des tronçons est basé sur la richesse et la diversité des habitats aquatiques. Les objectifs sont d'examiner les structures thermiques spatio-temporelles de ces neuf tronçons à très haute résolution spatiale (<50 cm), de voir si le type de rivière en tresses a une influence sur ces structures thermiques et de déterminer les effets des apports d'eau souterraine en fonction du type de chenal.

CHAPITRE II - RAPPEL ZONES D'ETUDE ET DESCRIPTION DES METHODES PAR VOLET

CHAPITRE II - RAPPEL ZONES D'ETUDE ET DESCRIPTION DES METHODES PAR VOLET 14

Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	15
A. Les tronçons d'étude.....	15
B. Methode d'analyse de l'évolution du paysage riverain	17
Partie 2. Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses.....	20
A. Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés.....	20
B. Objectif 2: Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresseS sur la diversité génétique des populations.....	20
C. Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresse.....	21
Partie 3. Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses.....	22
A. Dispositif expérimental.....	22
Partie 4. Thermie des rivières en tresses.....	26

A. LES TRONÇONS D'ETUDE

1 . Les cinquante-trois tronçons de l'analyse diachronique

La localisation au sein du réseau RMC des cinquante-trois tronçons sélectionnés est reportée ci-dessous (Figure 1.1) : ceux-ci couvrent une large gamme d'altitudes (de 75,3 m à 1787 m), de pentes (de 2,5 à 52,5 m/km) et de surfaces drainées (de 36,7 à 12972 km²). Les régimes hydrologiques sont également variables, comprenant des secteurs de haute montagne à fonctionnement glaciaire jusqu'aux rivières méditerranéennes des Alpes du Sud présentant des étiages sévères, voire des assecs.

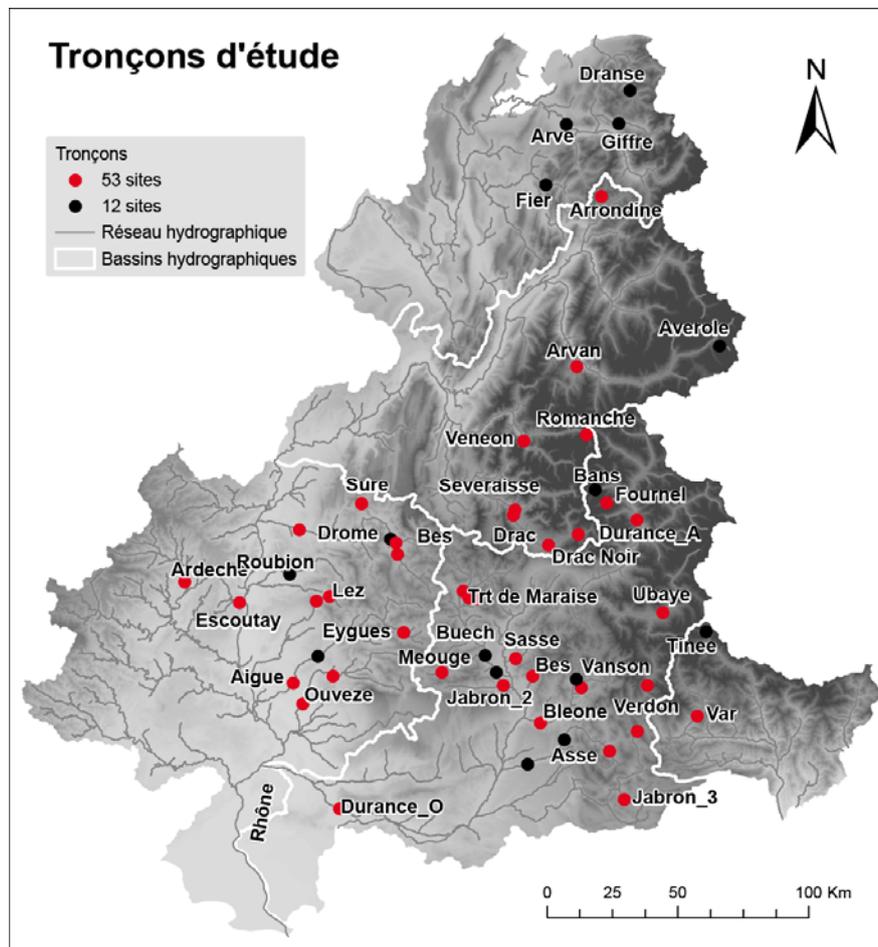


Figure 1.1. Localisation des tronçons d'étude.

Les 53 tronçons choisis sont distribués sur tout le réseau du bassin RMC, comprenant 4 grands bassins hydrographiques (Figure 1.2), témoins de la versatilité du style en tresses : 20 tronçons se situent dans le bassin hydrographique du Rhône, 9 dans celui de l'Isère, 24 dans celui de la Durance et 2 dans le bassin hydrographique du Var. Les tronçons se répartissent en 4 hydro-écorégions de

niveau 1 (HER-1) et en 14 hydro-écorégions de niveau 2 (HER-2) : 11 sites sont localisés dans la HER-1 Alpes Internes (2), 8 sites en HER-1 Jura-Préalpes du Nord (5); 13 sites en HER-1 Méditerranée (6) ; 23 sites en HER-1 Préalpes du Sud (7).

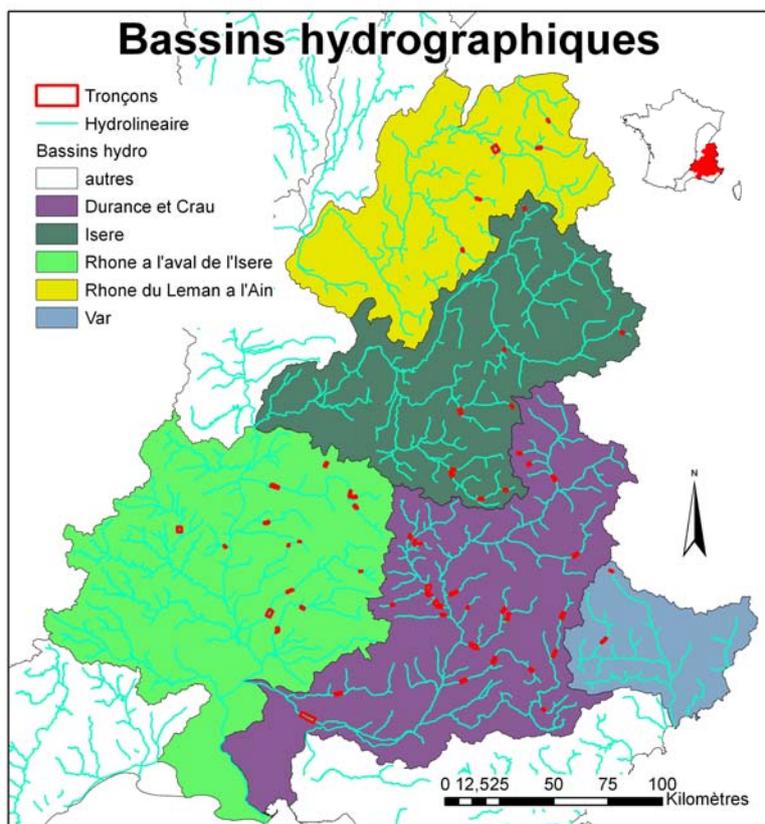


Figure 1.2. Distribution des tronçons au sein de 5 bassins hydrographiques intéressés.

2 . Les 12 sites de l'analyse multi-dates

Pour l'analyse multi-dates, basée sur cinq observations sur cinquante ans, nous avons sélectionné un sous-ensemble de 12 tronçons (Figure 1.1). Ces tronçons ont été sélectionnés sur la base des résultats obtenus lors de l'analyse des trajectoires géomorphologiques (Liébault et al., sous presse) et des changements paysagers observés entre 1950 et 2000. Nous avons sélectionné les photographies aériennes utilisées de sorte qu'elles concordent le mieux possible avec les données hydrologiques disponibles afin de disposer d'une période avec crue, suivie d'une période de calme hydrologique, puis à nouveau d'une période de crue...

Ces tronçons sont essentiellement groupé en 4 zones hydro-géographiques (Figure 1.1): quatre tronçons dans les Alpes du nord (l'Arve, le Giffre, le Fier, la Dranse), 2 tronçons en haute montagne (Alpes Internes ; le Bans et la Tinée), 3 tronçons dans le sud-ouest (corridor rhodanien ; le Roubion, l'Eygues de milieu, la Drôme aval de la confluence avec le Bes) et 3 tronçons dans le sud-est (bassin de la Durance ; le Buëch aval, le Bes sur la Bléone, l'Asse à Mézel). A nouveau, ils couvrent une large gamme d'altitudes (611 m en moyenne), de pentes (13,1 m/km en moyenne) et de surfaces drainées (500 km² en moyenne). La largeur du fond de vallée est de 572 m en moyenne et la largeur moyenne de la bande active de 106 m.

B. METHODE D'ANALYSE DE L'EVOLUTION DU PAYSAGE RIVERAIN

1 . Analyse diachronique (1950-2000)

La structure du corridor fluvial est analysée par le biais de l'occupation du sol. Les objets numérisés grâce aux photographies aériennes permettent d'étudier l'évolution de la bande fluviale et de la bande active (rétraction/élargissement, longévité des îles boisées) sur la période 1950-2000. Cela permet notamment d'établir une comparaison avec les données d'incision et d'exhaussement fournies par l'IRSTEA de Grenoble en année 1. Les données utilisées pour l'étude de l'évolution du corridor fluvial sont les photographies en noir et blanc des années 50 de l'IGN qui ont été comparées avec les orthophotographies de la BD Ortho (IGN) traitées et discutées dans le rapport de l'année 1.

Le prétraitement des photographies aériennes en noir et blanc (années 50) et des orthophotographies à couleur des années 2000, ainsi que la procédure d'extraction des classes d'objet par télédétection sont décrites dans les rapports des années 1 et 2. Pour rappel, les unités de paysage identifiées et retenues pour l'analyse sont les suivantes :

- La « bande active » (AC, *active channel*) : zone comprenant les chenaux en eau et les bancs de galets non végétalisés, obtenue suite à la classification puis à la fusion des objets eau et bancs de galets qui la composent;
- Les « îles » : toutes les tâches de végétation (mature et pionnière considérées séparément) qui ne sont pas connectées à la forêt riveraine ; la taille minimale retenue pour les analyses est de 15.6 m² (Figure 1.3) ;
- La « bande fluviale » (TA, *total channel area*) : zone comprise entre deux berges, c'est-à-dire la bande active plus les îles végétalisées et toutes les taches de végétation dans la bande active (Toone, 2009) ;
- Les « écotones » : la ligne à la frontière entre végétation (îles et forêt des marges) et bande active.

Pour chacun des polygones de ces unités la surface (m²) et le périmètre (m) ont été calculés sur ArcGis9.X. Pour la bande active, nous avons calculé la largeur ainsi que sa variation entre les 2 observations. Pour les îles, nous avons calculée leur proportion surfacique dans la bande fluviale (%) ainsi que leur densité (n/km²). Enfin, nous avons calculé la densité d'écotones (m/km²).

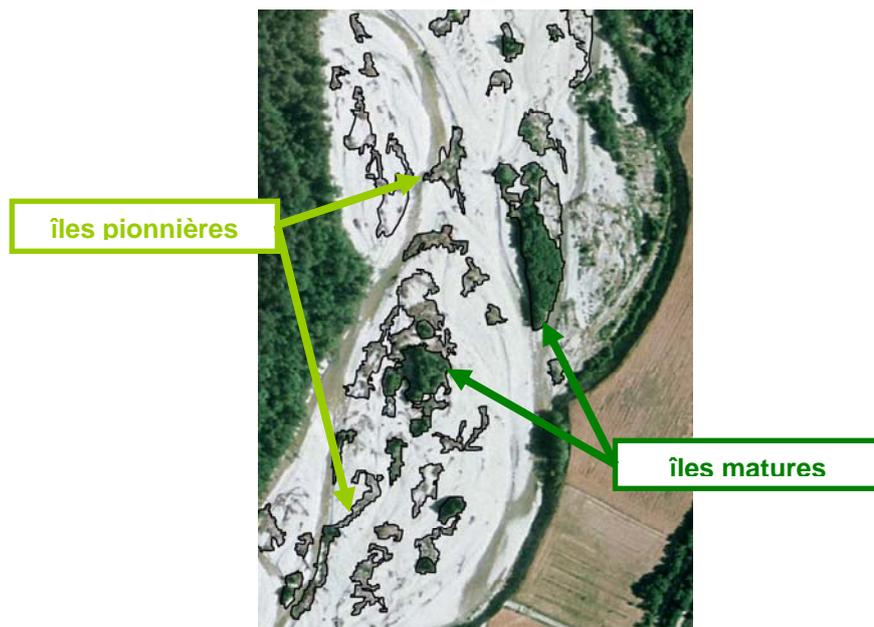


Figure 1.3. Représentation des îles matures et pionnières.

2 . Analyse multi-dates des 12 tronçons (entre 1950 et 2000)

Pour l'analyse multi-dates conduite sur le sous-ensemble de 12 tronçons, nous avons acquis trois observations supplémentaires par tronçon (trois dates) ce qui correspond à un total de 48 nouveaux clichés (Tableau 1.1). Pour ces images, nous avons procédé à une digitalisation manuelle et à la photo-interprétation des classes d'objets suivantes (sur ArcGis 9.X) :

- bande active (AC) ;
- îles de végétation (mature et pionnière confondues) ;
- unités de végétation pionnière situées aux bords de la bande active (marges pionnières, PM), à la frontière avec la forêt alluviale mature ; elles constituent le complément de la bande fluviale (TA, îles plus bande active).

Tableau 1.1. Caractéristiques des photographies aériennes couleur et noir et blanc additionnelles utilisées pour l'analyse multi-temporelle des douze sites. (2x) indique que deux clichés ont été utilisés pour l'année donnée.

<i>Id</i>	<i>Site</i>	<i>Année</i>	<i>Echelle</i>	<i>Année</i>	<i>Echelle</i>	<i>Année</i>	<i>Echelle</i>
39	Arve	1961 (2x)	1:25000	1973 (2x)	1:15000	1984 (2x)	1:15000
14	Dranse	1974	1:21000	1984	1:15000	1993	1:20000
19	Fier	1968	1:25000	1984	1:15000	1990	1:30000
49	Giffre	1974	1:22000	1984	1:18000	1993 (2x)	1:24000
33	Tinée	1978	1:30000	1983	1:17000	1995	1:20000
7	Bans	1980	1:30000	1988	1:30000	1993	1:20000
15	Drôme	1970	1:30000	1991	1:18000	1996	1:25000
43	Eygues	1972 (2x)	1:15000	1988	1:30000	1996 (2x)	1:25000
45	Roubion	1972 (2x)	1:15000	1991 (x2)	1:18000	1996	1:26000
42	Buëch	1971	1:15000	1981 (x2)	1:15000	1993 (2x)	1:20000
4	Asse	1974 (2x)	1:17000	1993	1:20000	2000 (2x)	1:25000
8	Bès	1974	1:17000	1982	1:17000	1995	1:20000

Le travail de photo-interprétation et de digitalisation a été réalisé à l'échelle 1:1000.

Ensuite, nous avons obtenu les unités de superposition (*overlay*, ArcGis9.X) par croisement des polygones observés aux différentes dates: érosion ; végétalisation ; réduction du corridor par pressions externes ; stabilité ; nouvelles îles ; îles érodées ; îles stables (Figure 1.4).

Pour chaque polygone, la surface (m²) ainsi que le périmètre (m) ont été calculés sur ArcGis9.X. D'une manière similaire à l'analyse synthétique réalisée entre 1950 et les années 2000, nous avons calculé les paramètres suivants :

- Largeur de bande active et sa variation entre deux dates (ACvar) ;
- Proportion surfacique (%) et densité (n/km²) d'îles dans la bande fluviale ;
- Variation de la surface des marges pionnières (PM, complément de la bande fluviale) entre deux dates ;
- Rapport entre la surface végétalisée et érodée entre deux dates (VA/EA) ;
- Rapport entre la surface de nouvelles îles et celle des îles stables entre deux dates (NIs/SIs).

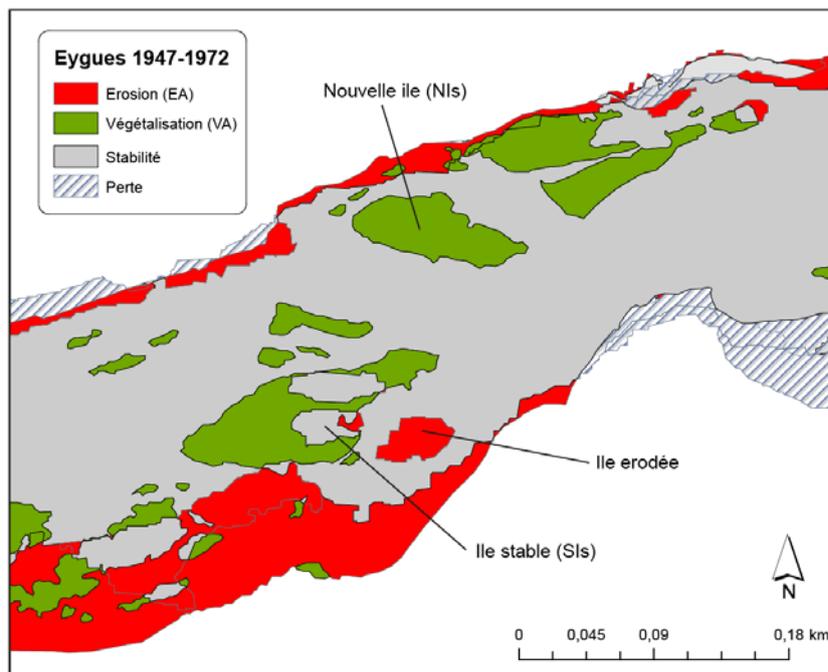


Figure 1.4. Exemple de mosaïque de superposition (*overlay*) et unités de paysage identifiées.

PARTIE 2. SPECIFICITES ET STRUCTURE DE LA DIVERSITE DES INVERTEBRES DANS LES RIVIERES EN TRESSES

Rédacteurs : F. Malard, T. Datry, C. Capderrey

A. OBJECTIF 1: INFLUENCE DES ECOULEMENTS HYPORHEIQUES SUR LA DIVERSITE ET LA DISTRIBUTION DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES

1 . Avancements depuis le mois de juin 2011

Les 576 échantillons hyporhéiques et benthiques réalisés dans le cadre de cet objectif sont désormais tous triés. Cela inclut le tri des échantillons effectués à une profondeur de 90 cm dans les sédiments.

L'analyse statistique conjointe des jeux de données hyporhéiques et benthiques a été réalisée. Cette analyse implique la totalité des échantillons qui recouvrent trois échelles spatiales: kilométrique (le secteur), hectométrique (le banc de gravier), décimétrique (gradient vertical jusqu'à une profondeur de 90 cm dans les sédiments). L'article est toujours en cours de rédaction avec une date de soumission prévue pour octobre 2012.

L'identification au niveau spécifique des taxons focaux est achevée pour les ostracodes et les isopodes. Elle a débuté pour les oligochètes et les amphipodes souterrains (144 échantillons réalisés).

B. OBJECTIF 2: INFLUENCE DE LA STRUCTURE GEOMORPHOLOGIQUE DES RIVIERES EN TRESSES SUR LA DIVERSITE GENETIQUE DES POPULATIONS

1 . Avancement depuis le mois de juin 2011

L'échantillonnage des individus nécessaires à la réalisation de la banque microsatellite et la mise au point de cette banque sont achevés.

La comparaison des diversités inter- et intra- stations est achevée. Elle a nécessité le recours à une étudiante de master 2 recherche (Pauline JEAN) qui a rendu son rapport de master en juin 2012 et a été reçue en première position de son Master.

L'échantillonnage de la Drôme (9 sites), de l'Ouvèze (8 sites) et du Roubion (8 sites) a été réalisé aux mois d'avril et mai 2012. Il a nécessité un total de 44 personnes jours. Sur chaque site, a été récolté un minimum de 30 individus de l'isopode *Proasellus walteri*. Sur 6 sites, ce nombre a été porté à 90 individus afin de pouvoir identifier l'hétérogénéité entre bancs de graviers sur des sites de plaine et de montagne.

Le travail de laboratoire a nécessité plusieurs étapes: 1) séparation des mâles et des femelles pour chaque site (15 mâles et 15 femelles); 2) extraction de l'ADN et réalisation des PCR sur le gène 16S

pour identification de l'espèce *Proasellus walteri* (5 PCR microsatellites sont réalisés par individu pour un total de 7 microsatellites); 3) électrophorèse sur capillaires pour génotyper chaque individu 4) lecture des profils génétiques pour chaque individu pour les 7 marqueurs.

Le nombre d'individus à analyser est de 1098. En septembre 2012, les PCR ont été réalisés sur tous les individus et l'analyse complète (étapes 1 à 4) a été réalisée sur plus de 500 individus.

C. OBJECTIF 3 : INFLUENCE DE LA DYNAMIQUE DES HABITATS SUR LA DIVERSITE DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES TERRESTRES DES RIVIERES EN TRESSE

1 . Avancement depuis le mois de juin 2011

La sélection des habitats sur les secteurs est achevée. Ces habitats ont été sélectionnés suite à un travail de Master (M. Geoffre) qui a consisté à décrire la dynamique des habitats terrestres des 4 secteurs concernés au cours des 10 dernières années. Ce travail a notamment permis de déterminer l'âge des habitats sur les secteurs concernés.

L'échantillonnage des invertébrés est terminé. Le tri et détermination des individus est en cours et sera terminé fin novembre 2012.

Coordinateur : A. Recking

Contributeurs : P. Leduc, H. Bellot, A. Recking, M. Naaim, A. Mours, L. Richard

A. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1 . Présentation générale du dispositif

Les expériences ont été réalisées sur la plate-forme torrentielle d'Irstea (6 m de long sur 1 m de large, pente variable). Il est alimenté en eau en circuit fermé par une pompe et le débit est contrôlé par un débitmètre. Les sédiments sont injectés dans le canal à l'aide d'un tapis roulant alimenté par une trémie. Ils sont récupérés à la sortie du canal avec des bacs percés, puis sont séchés et pesés afin de calculer le débit solide sortant.

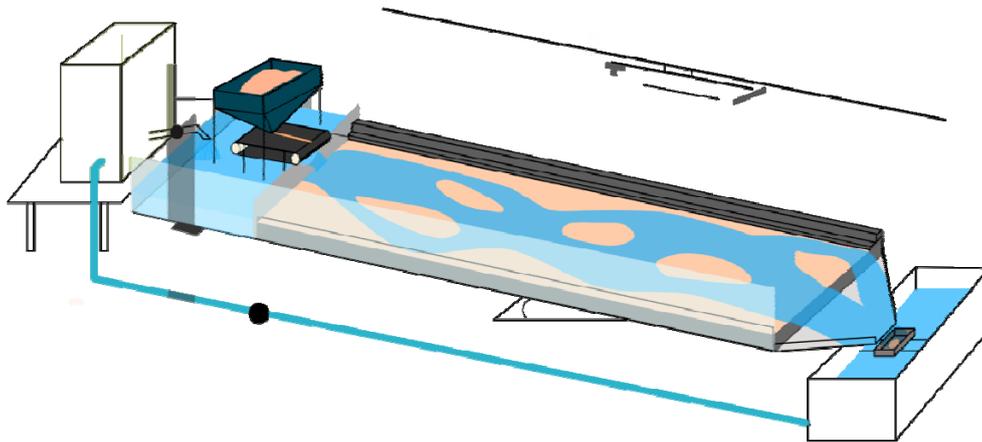


Figure 3.5. Schéma du canal.

L'objectif n'était pas de construire un modèle physique d'une tresse en particulier, mais de travailler en similitude de Froude afin que les écoulements observés en canal soient représentatifs des conditions naturelles d'écoulement. Dans la mesure du possible les écoulements turbulents ont été maintenus rugueux ($Re^* > 70$), afin de ne pas modifier les conditions de début de mouvement des matériaux. Cet aspect a imposé de trouver un compromis entre la taille des matériaux et la taille (et la pente) du canal. Néanmoins les tests réalisés à ce jour indiquent que les conditions de tressage ne seraient que faiblement affectées par ce paramètre s'il n'est pas trop éloigné de $Re^* = 70$ (Ashmore 1988 ; Hoey 1992).

Deux sables ont été sélectionnés pour réaliser les mélanges sédimentaires : un sable orange d'un diamètre médian de 0.5 mm, et un sable blanc plus grossier de diamètre médian 1.5mm.

Chaque expérience a été réalisée avec des conditions imposées et constantes en entrée de canal (débit liquide et solide, granulométrie du mélange). La vitesse d'écoulement (sur la base

d'observations de surface), le débit solide en sortie de canal et l'évolution de la granulométrie de surface et de la topographie ont été mesurés à des intervalles réguliers.

Le débit solide de sortie a été mesuré par échantillonnage manuel. La surface du lit et la granulométrie ont été suivis par coloration des matériaux et suivi photographique. Des techniques de coloration ont été utilisées pour suivre les écoulements.

La topographie du lit a été mesurée avec la méthode de Moiré, par projection de franges.

2 . Adaptation de la méthode de Moiré au dispositif expérimental

La méthode optique de Moiré est fondée sur la déformation d'un motif régulier projeté sur une surface non plane.

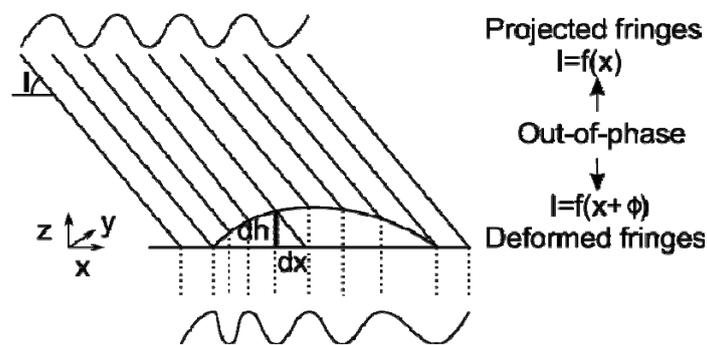


Figure 3.6. Déformation des franges.

Les deux signaux, celui initialement projeté et celui déformé, sont en décalage de phase. La différence de phase est liée à la hauteur du relief par une relation trigonométrique simple. Pour connaître le relief il suffit de connaître la différence de phase entre ces deux signaux. Plusieurs méthodes existent et nous avons choisi celle dite de décalage de phase. On projette sur un plan de référence et sur la surface à mesurer 4 motifs de franges déphasées de $\pi/2$. On obtient la différence de phase par l'équation suivante avec les indices « r » se référant au plan de référence et les indices « o » à la surface objet, à mesurer:

$$\Delta\varphi = \varphi_o - \varphi_r = \arctan \frac{I_{r\frac{3\pi}{2}} - I_{r\frac{\pi}{2}}}{I_{r0} - I_{r\pi}} - \arctan \frac{I_{o\frac{3\pi}{2}} - I_{o\frac{\pi}{2}}}{I_{o0} - I_{o\pi}}$$

En pratique, un vidéoprojecteur projette des franges sur une surface et un appareil photo installé à l'aplomb de la surface à mesurer récupère les images des franges déformées.

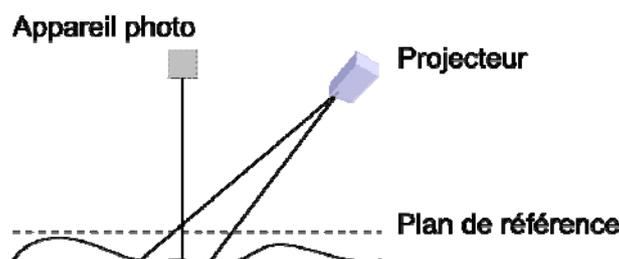


Figure 3.7. Mise en place de la méthode de Moiré.

Cette méthode n'est pas une méthode absolue, c'est une méthode relative qui nécessite un plan de référence. Habituellement, un plan physique, parfaitement plan et blanc est utilisé. Ainsi pour chaque pixel de la photo, la valeur de la phase de référence est précisément connue. Cette technique nécessite des appareils de mesure fixes.

Dans notre cas, le canal et la surface du lit sont trop grandes pour qu'une seule photo suffise. Il a donc fallu installer l'appareil photo et le vidéoprojecteur sur un rail amovible fixé sur le plafond du laboratoire. Au lieu de bouger avant chaque mesure un plan physique, nous avons choisi de reconstituer virtuellement un plan de référence. Pour cela des barres ont été installées sur les cotés du canal.



Figure 3.8. Cales de calibration et de référence.

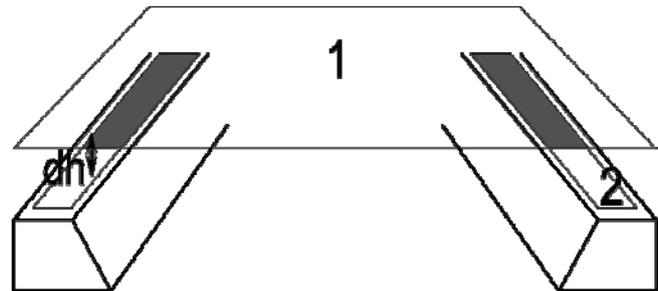


Figure 3.9. Schéma de principe de la construction du plan de référence virtuelle.

La phase d'un plan blanc plat (1) et qui s'étend sur toute la largeur du canal (recouvrant les barres) est calculée. Sur les photos de la surface à mesurer, une bande de 2 cm de large est extraite des deux barres et la phase est calculée (2). Sur le premier plan (1), la phase correspondant à la position des barres est soustraite à la valeur de la phase sur les barres. On obtient une différence de phase (dh) pour chaque barre. On étend cette différence de phase sur toute la largeur du canal au moyen d'une interpolation linéaire d'ordre 1. On obtient alors un plan de différence de phase. Ce plan est ajouté au premier plan (1) et on obtient ainsi le plan de référence virtuel. En d'autres termes, par cette opération, le plan physique est placé virtuellement à la hauteur des barres dont on connaît précisément la position en hauteur. Ainsi, pour chaque pixel, on connaît la valeur de la phase de référence.

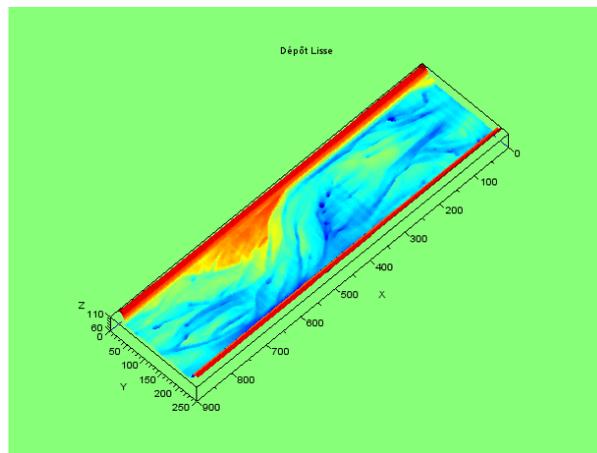


Figure 3.10. Exemple d'une topographie complète.

La calibration en plan est faite en utilisant une mire avec des carrés de 30cm de côté. La calibration en hauteur se fait grâce à des objets de hauteur connue : 2 barres de 4 et 6 cm placées au-dessus des barres servant à la construction du plan de référence virtuelle. Pour couvrir l'intégralité du canal, trois photos sont nécessaires. On reconstitue la topographie du canal en recollant les données relatives à chaque partie en utilisant des mires placées sur les bords du canal.

3 . Protocole d'étude

Dans un premier temps, nous sommes repartis sur l'hypothèse de processus communs aux bancs et aux tresses (voir bibliographie), pour essayer de mettre en évidence un effet du tri granulométrique. Lisle et al. (1993) avait montré, en travaillant à une pente de 3%, que le tri granulométrique avait pour effet de réduire la mobilité des bancs, par formation d'une armure. Cependant cette observation était basée sur une durée très courte (10h), alors que les expériences de Recking (2006) sur des écoulements contraints latéralement avaient montré que lorsque les expériences sont suffisamment longues (60h), l'armure est périodiquement détruite pour laisser place à de très fortes érosions verticales à l'origine de nappes de charriage. Nous avons donc reproduit les expériences de Lisle et al. (1993) sur une durée de 100h minimum afin de vérifier si des érosions périodiques en plan se superposent aux érosions verticales lorsque l'écoulement n'est pas contraint latéralement. Les résultats de cette expérience simple ont ensuite servi à la mise en place du protocole de suivi des macroformes pour les expérimentations plus complexes sur les tresses.

La seconde série d'expériences a consisté à étudier la réponse du tressage aux conditions d'alimentation. Ces expériences ont été réalisées à des pentes relativement fortes de 1 à 2% et avec des sables grossiers (en granulométrie étendue) afin de pallier aux faibles dimensions du canal. Différentes combinaisons de débits (liquide et solide) ont été testées. Nous avons cherché à reproduire les formes susceptibles d'être présentes sur tout le gradient évolutif des tresses (depuis la déliquescence avec débit solide imposé nul, à l'aggradation avec débit solide imposé élevé). Pour chaque expérience nous avons cherché à mettre en évidence ce qui est dû au processus purement érosif (changement de connexions entre canaux existants, destruction par transport massif) et ce qui est dû au tri granulométrique (production de nappes de charriage, périodicité des érosion-aggradation locales). Plusieurs scénarios ont donc été considérés.

Rédacteurs : V. Wawrzyniak, H. Piégay, P. Allemand

Les tronçons du groupe 1 (Vénéon, Drac Noir, Bans) sont situés en altitude dans le massif des Écrins. Ils présentent des régimes proglaciaires avec un débit important en été. Les tronçons du groupe 2 (Drôme, Bez, Eygues, Buëch, Bléone, Asse de Blieux) sont des rivières de plaine. Ils sont caractérisés par un régime méditerranéen avec un faible débit pendant l'été, mais présentent un indice de tressage élevé. Ces tronçons montrent de fortes diversités d'habitats aquatiques.

Trois approches temporelles sont considérées. La première consiste à observer tous les sites une fois pour les comparer entre eux. Dans la seconde phase, trois sites (Drôme, Bez et Bléone) sont imagés thermiquement deux fois, durant les étés 2010 et 2011, pour étudier la variabilité inter-annuelle de ces structures. Enfin, deux tronçons (Drôme et Drac Noir) sont sélectionnés pour un suivi intra-journalier avec plusieurs vols au cours d'une même journée.



Figure 4.11. Le drone DRELIO devant le tronçon du Bez (à gauche) et le para-moteur (à droite, photo plateforme ISIG, ENS).

Du fait de la faible largeur de leurs chenaux, les tronçons sont imagés à très haute résolution spatiale grâce à un drone et un para-moteur (Figure 4.11). Les acquisitions ont été effectuées à l'aide d'une caméra thermique (*VarioCAM[®] hr Head* ou *Research*). Ces appareils thermographiques offrent des résolutions thermiques relatives meilleures que 0,1°C. En fonction des optiques et paramètres de vol, les résolutions spatiales varient entre 14 cm et 27 cm. Les acquisitions thermiques ont été couplées à des acquisitions d'images visibles grâce à un appareil photo. Ces images permettent d'identifier les surfaces en eau et de faire la typologie des chenaux.

Pour explorer les structures thermiques des différents chenaux, nous utilisons une classification basée sur les travaux de Belletti et al. (2012) :

- le chenal principal,
- les chenaux secondaires (courants, connexions amont et aval avec le chenal principal),
- les chenaux alluviaux (connexion aval, origine dans la bande active),
- les chenaux phréatiques (connexion aval, origine hors de la bande active),
- les mares.

A partir de cette typologie, un indice de diversité de ces types fonctionnels est calculé. Le calcul repose sur le cumul des surfaces par type et leur fréquence relative. L'indice retenu est celui de Shannon. Les distributions spatiales de la température sont également analysées. L'ensemble de ces éléments méthodologiques est détaillé dans Wawrzyniak et al. (accepté pour publication dans International Journal of Remote Sensing).

CHAPITRE III - RESULTATS DE LA TROISIEME ANNEE

CHAPITRE III - RESULTATS DE LA TROISIEME ANNEE.....	28
Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	29
A. Résultats consolidés concernant l'analyse synthétique 1950-2000	29
B. Evolution des 12 sites en multi-dates	33
Partie 2. Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses.....	43
A. Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés.....	43
B. Objectif 2 : Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresses sur la diversité génétique des populations	44
C. Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresses	44
Partie 3. Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses.....	46
A. Résultats sur les lits en bancs alternés	46
B. Résultats sur les lits en tresses	53
Partie 4. Thermie des rivières en tresses.....	60
A. Deux types de structures termiques	60
B. Hétérogénéité thermique et diversité des habitats	61

A. RESULTATS CONSOLIDES CONCERNANT L'ANALYSE SYNTHETIQUE 1950-2000

Concernant l'évolution diachronique des 53 tronçons, l'objectif était de comprendre les mécanismes à la base de la structure du paysage riverain et de son évolution à moyen terme afin de déterminer s'il existe une organisation spatiale au niveau régional. Les résultats présentés en deuxième année montraient une réduction générale de la largeur des bandes actives au sein de la zone d'étude, même si sur certains secteurs elles n'ont pas rétréci significativement, certains enregistrant même localement un élargissement. Ces derniers sont situés au sud de la zone d'étude et en particulier dans le bassin de la Durance (Figure 1.12). Ces résultats concordent avec l'analyse des trajectoires morphologiques menée par Irstea en première année (Liébault et al., sous presse).

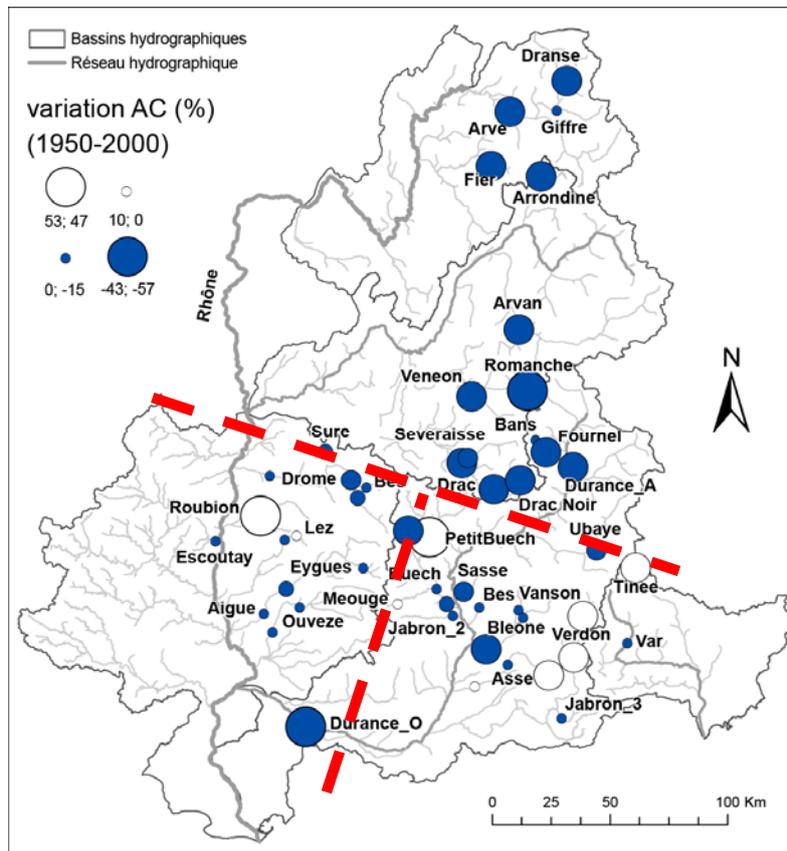


Figure 1.12. Variation de la largeur de bande active (%AC) au sein du bassin rhodanien ; les lignes rouges pointillées séparent les tronçons du nord et du sud et les tronçons du sud-ouest et du sud-est.

Afin de mieux comprendre cette régionalisation du rétrécissement/élargissement, nous avons donc établi une typologie des tronçons en tresses sur la base des variables et facteurs de contrôle suivants : la localisation des tronçons au sein du réseau (pente et altitude), le régime sédimentaire (représenté par W^* , la largeur de la bande active normalisée par la taille du bassin ; Piégay et al.,

2009 ; cf. rapport deuxième année), l'histoire hydrologique (en terme de nombre de mois qui sépare l'état observé en 2000 de la dernière crue de récurrence décennale), l'évolution latérale des tronçons sur une période de 50 ans (la variation de AC).

1 . Typologie des tronçons en tresses du bassin rhodanien

La Figure 1.13 montre la distribution des types de tronçons en tresses identifiés au sein de la zone d'étude sur la base de critères hydromorphologiques et géographiques :

- Le type 1 (3 tronçons) comprend les tronçons de plaine très rétrécis, et qui ont une faible dynamique sédimentaire (W^* faible).
- Le type 2 (12 tronçons) comprend aussi les tronçons de plaine, mais qui sont plus stables latéralement comparés au type 1. Ces tronçons ont enregistré une crue récemment, mais ils ne sont pas très actifs (faibles valeurs de W^*). Ils sont distribués essentiellement dans le corridor du Rhône.
- Les tronçons du type 3 (13 sites) sont plus caractéristiques de zones de piémont (pente et W^* plus importants). Ils sont stables en largeur comme le type 2, et ils ont également enregistré une crue décennale récemment. Ils sont présents dans le sud de la zone d'étude mais sans suivre une distribution régionale spécifique.
- Les tronçons du type 4 (4 sites) se distinguent des autres types en termes de variation de largeur de bande active (tronçons élargis) ; ils sont modérément actifs (valeur moyen de W^*) et ils ont été touchés par une Q10 récente. Ils se situent dans le corridor du Rhône et dans le bassin de la Durance.
- Le type 5 (6 tronçons), concerne les tronçons de montagne, stables en termes de dynamique latérale mais qui enregistrent les plus grandes valeurs d'activité (W^* élevée).
- Les tronçons du type 6 (10 sites) incluent également les tronçons de montagne mais très rétrécis, qui n'ont pas subi une Q10 depuis au moins 4 ans et qui sont beaucoup moins actifs comparés au type 5.
- Le type 7 (5 tronçons) correspond aux tronçons de haute montagne. Ces tronçons, qui n'ont pas subi un évènement de crue depuis au moins 8 ans, ont rétréci considérablement. Toutefois, ils semblent plus actifs que les tronçons du type 6.

Il se dessine ainsi une forte relation entre la dynamique latérale de la bande active, l'histoire hydrologique et la dynamique sédimentaire : les tronçons s'élargissent après une crue, mais l'élargissement est plus important là où la disponibilité en sédiment permet la remobilisation des formes et la création de nouveaux espaces libres pour une éventuelle colonisation de la part de la végétation. A l'inverse, plus la période de temps est longue depuis la dernière crue de récurrence décennale plus les tronçons sont étroits avec un seuil de 50 mois (4 ans) au-delà duquel la réduction de largeur est très prononcée (Figure 1.14).

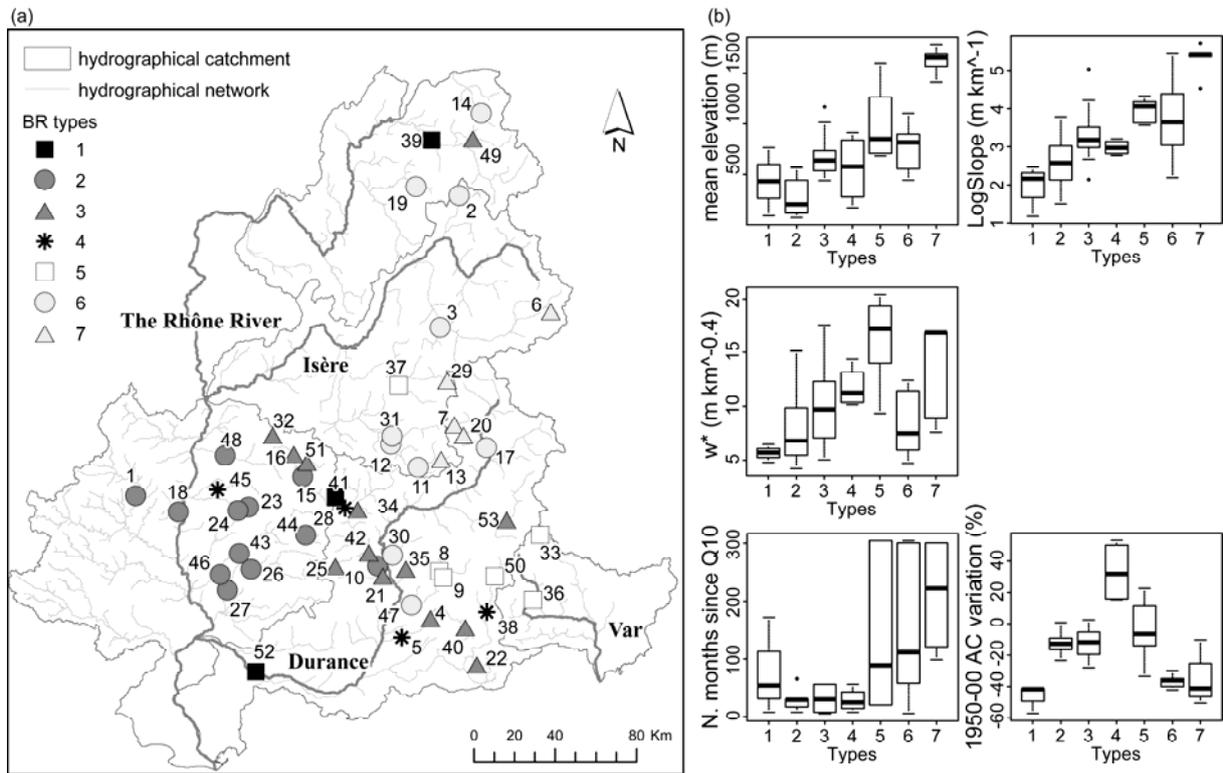


Figure 1.13. (a) Typologie de tronçons en tresses basée sur les facteurs de contrôle. (b) Caractéristiques des types de tronçons en tresses au regard des facteurs de contrôle suivants : altitude et pente moyennes, largeur de bande active normalisée (w^*), nombre de mois depuis la dernière crue de récurrence décennale (Q10), variation de la largeur de bande active (AC) entre 1950 et 2000.

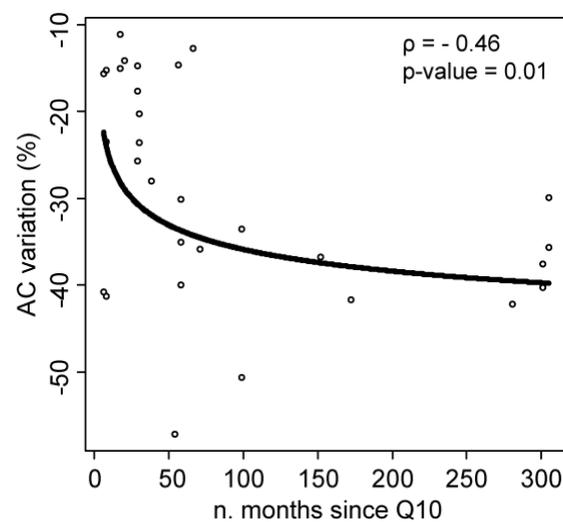


Figure 1.14. Relation entre la variation de la largeur de bande active (AC) et le nombre de mois depuis la dernière crue de récurrence décennale (Q10).

2 . Les îles de végétation et les écotones

L'évolution de la végétation au sein de la bande active entre 1950 et 2000 est représentée sur la Figure 1.15. Si, en surface, la proportion des îles au sein de la bande active reste *grosso modo*

constante dans le temps (sauf pour les types 2 et 4 où elle diminue), leur densité (en nombre) augmente considérablement.

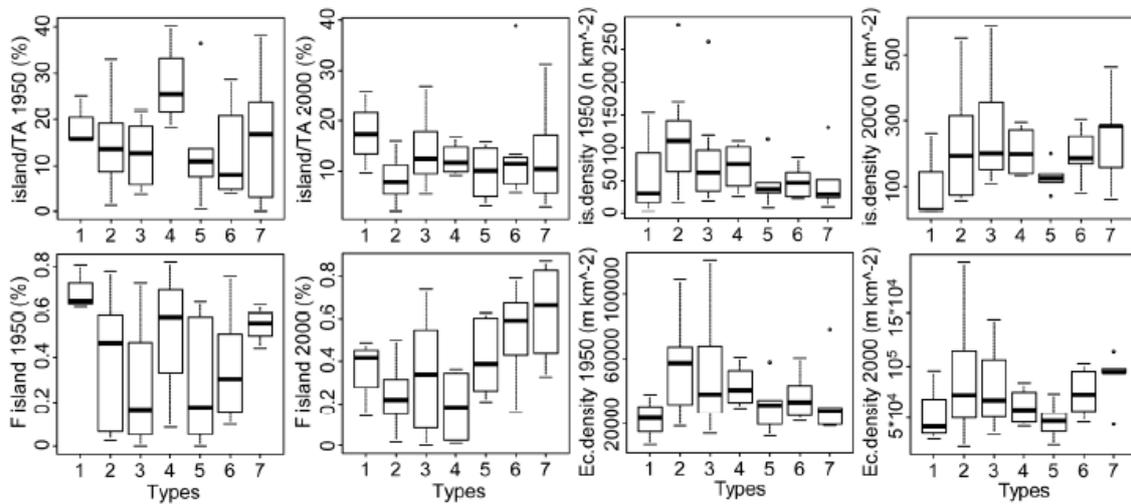


Figure 1.15. Caractéristiques des îles entre 1950 et 2000. A partir d'en haut à gauche : proportion d'îles dans la bande fluviale (island/TA ; %), densité d'îles dans la bande active (is.density ; n/km²), proportion d'îles mature (Fisland ; %), densité d'écotones (Ec.density ; m/km²).

La densité d'îles et d'écotones augmente notamment pour les tronçons qui n'ont pas enregistré récemment une Q10 (types 3, 5, 6 et 7). De plus, pour ces tronçons, la proportion d'îles boisées matures augmente (*F island*). Les tronçons du type 1 sont formés par des îles de grande surface et peu nombreuses ; cela correspond aux tronçons les moins actifs : 39-Arve, 52-Durance aval, 41-Buech amont, non plus en tresses.

En nous appuyant sur le fait que la présence plus ou moins importante d'îles de végétation rend compte de différents types de patron de tressage (Gurnell et al., 2001), nous avons mis en relation la densité d'îles et leur proportion dans la bande active (Figure 1.16a). A partir de cela, nous avons obtenu la valeur des résidus de cette relation et observé leur évolution dans le temps et dans l'espace. Cela nous permet d'identifier 3 types de patrons de tressage, en fonction de la végétation insulaire (Figure 1.16a) :

- A. Les tronçons *multiple-island braided*, composés de nombreuses îles de taille moyenne ;
- B. Les tronçons *large-island braided*, composés de larges îles et peu nombreuses ;
- C. Les tronçons *bar-braided*, avec une proportion faible d'îles de petite taille.

La Figure 1.16a montre comment le paysage des tresses rhodaniennes change en termes de composition en îles entre 1950 et 2000 : durant les années 1950 les tronçons présentaient soit une mosaïque composée de petites îles ou nombreuses (faibles valeurs de densité et de proportion dans la bande active ; patron C), soit une mosaïque composée de grandes îles, toujours peu nombreuses (faibles valeurs de densité mais proportion importante ; patron B). En 2000 nous observons une augmentation généralisée de la densité d'îles dans la bande fluviale des tronçons étudiés, qui voient changer leur structure vers un patron *multiple-island braided* (patron A). Si ce changement semble plutôt uniforme sur la zone d'étude, cette évolution oppose cependant les tronçons du corridor

rhodanien et de la rive droite de la Durance aux tronçons situés en rive gauche de la Durance (Figure 1.16b et c) : les tronçons de l'ouest ont des résidus plus élevés que les tronçons de l'est. Cela semble s'expliquer par deux facteurs concomitants : une dynamique fluviale plus faible, ainsi qu'un climat plus favorable au développement de la végétation pour les premiers, une plus grande activité et une plus grande sensibilité à l'érosion en milieu méditerranéen pour les seconds (données de climat d'après : Guiot, 1986 ; Pujol et al., 2007; Vidal et al., 2010).

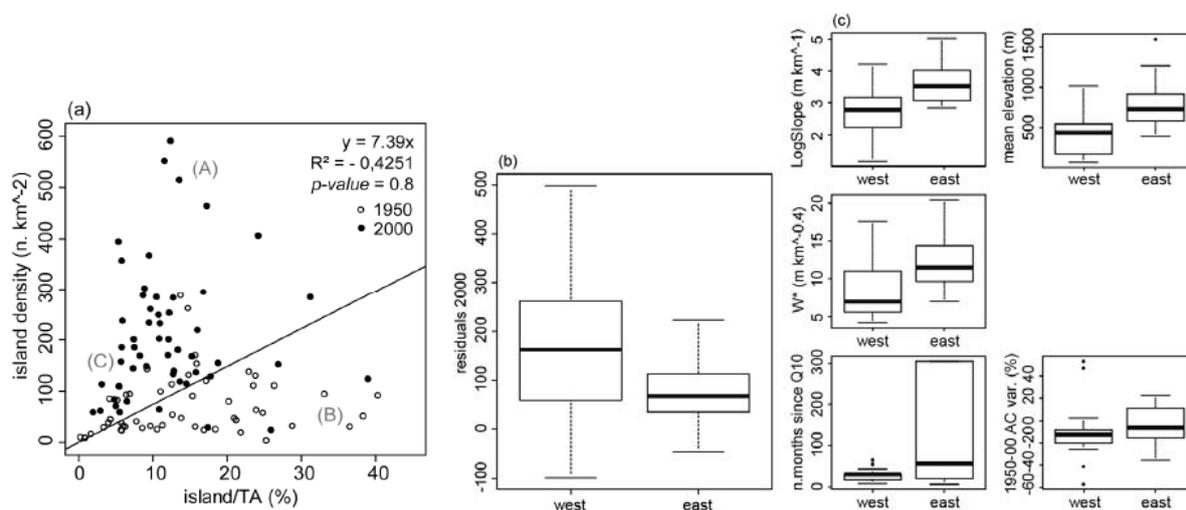


Figure 1.16. (a) Relation entre la densité (island density ; n/km²) et la proportion (island/TA ; %) d'îles dans la bande fluviale, avec laquelle ont été calculés les résidus en (b) et (c). (A), (B) et (C) indiquent les 3 types de patron de tressage identifiés en fonction de la composante en îles. (b) Gamme de valeurs des résidus en 2000 entre tronçons du sud de la zone d'étude, situés à l'ouest et à l'est de la Durance. (c) Caractéristiques des tronçons à l'ouest et à l'est de la Durance en termes d'activité (pente, altitude et W*), d'histoire hydrologique (Q10) et de dynamique latérale (variation AC).

B. EVOLUTION DES 12 SITES EN MULTI-DATES

L'objectif de cette analyse était de valider les résultats obtenus avec l'analyse synthétique 1950-2000 et de mieux comprendre la dynamique d'évolution des tronçons en tresses, en termes de rétraction/élargissement et de dynamique végétale, en fonction des facteurs de contrôle principaux que sont les crues et le régime sédimentaire.

1 . Histoire hydrologique des tronçons étudiés

La Figure 1.17 et le Tableau 1.2 synthétisent les données hydrologiques collectées pour chaque tronçon d'étude.

En termes de nombre de crues (Figure 1.17), la deuxième période (entre les années 70 et 80) enregistre le plus grand nombre de crues (au moins une crue Q10 pour chaque tronçon), alors que la troisième période (entre années 80 et 90) enregistre le plus faible nombre de crues.

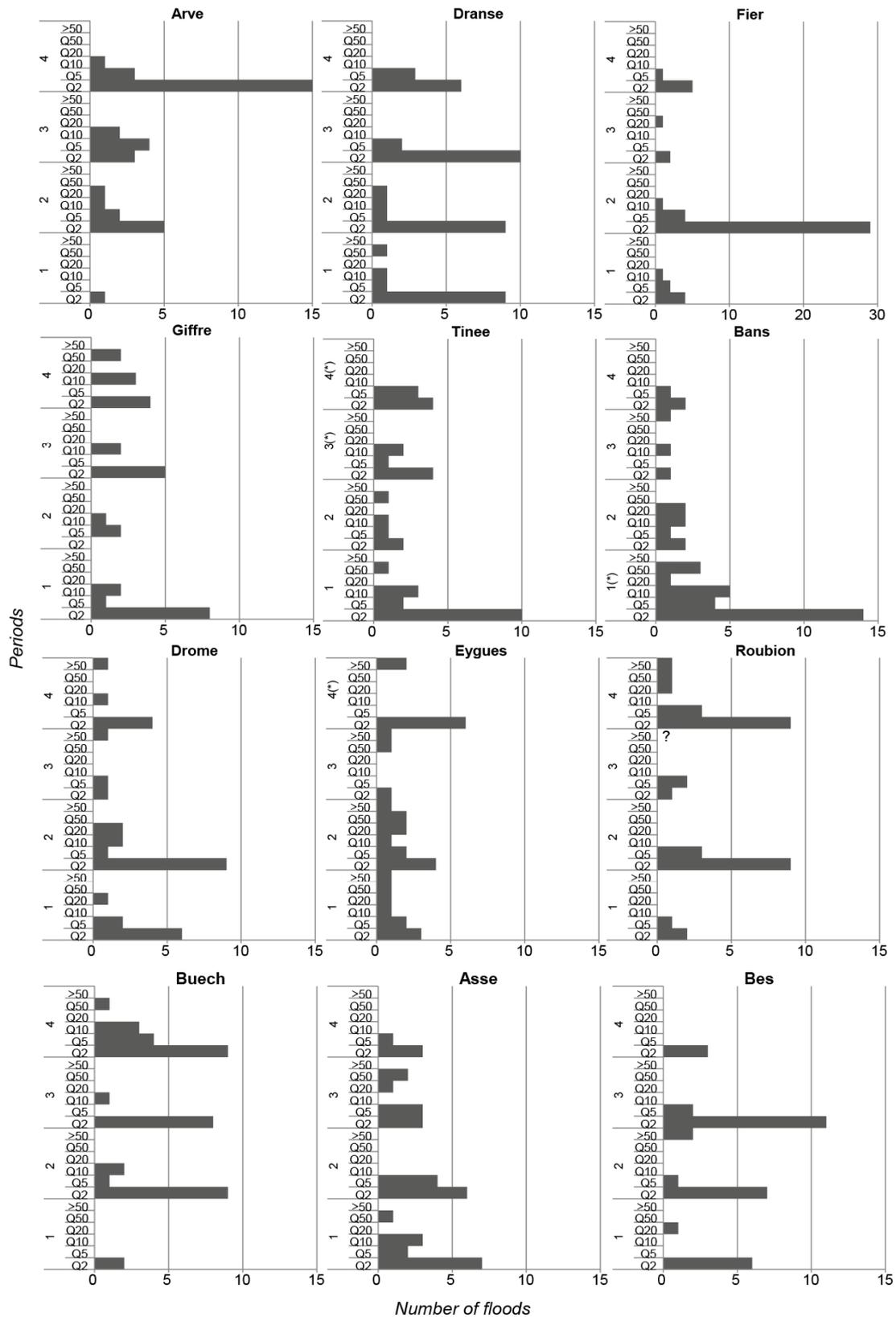


Figure 1.17. Le nombre de crues (selon le temps de retour) par période (1 à 4) pour chaque tronçon. Les périodes marquées avec un astérisque (*) sont incertaines. Pour le Roublon « ? » correspond à la crue de 1994 pour laquelle aucune donnée hydrologique n'est disponible.

Le nombre de jours durant lesquels le débit dépasse la fréquence de retour biennale (Q2) est reporté dans le Tableau 1.2. Cette variable exprime la durée des événements hydrologiques majeurs et donc leur efficacité morphogénétique. Comme pour le nombre de crues, les années 70 et 80 ont enregistré le plus grand nombre de jours avec des débits morphogènes ; la dernière période (entre les années 90 et 2000) a aussi été plus active en termes de durée d'événements hydrologiques, alors que la période entre les années 50 et 70 n'a pas enregistré une durée significativement importante de débits supérieurs à la Q2.

Tableau 1.2. Le nombre de jours durant lesquels, pour une période donnée, le débit dépasse le débit de récurrence décennale (Q2). Le nombre d'années correspondant à chaque période est aussi indiqué : période 1 = de 1950 à 1970 environ ; période 2 = de 1970 à 1980 environ ; période 3 = de 1980 à 1990 ; période 4 = de 1990 à 2000 environ). Les astérisques indiquent les données incertaines.

	Période 1		Période 2		Période 3		Période 4	
	n.jours	n.années	n.jours	n.années	n.jours	n.années	n.jours	n.années
Arve	1	5	9	12	11	11	23	20
Dranse	15	22	13	10	11	9	13	11
Fier	5	20	27	16	5	6	7	14
Giffre	13	22	4	10	6	9	12	11
Tinee	30	22	10	5	7*	12	12*	9
Bans	144*	28	86	8	14	5	5	10
Drome	13	14	16	21	5	5	10	10
Eygues	2	25	7	16	25*	8	73*	10
Roubion	5	26	15	19	5	5	24	10
Buech	4	15	15	10	8	12	24	10
Asse	17	21	8	19	16	7	4	4
Bes	10	18	9	8	13	13	2	9
<i>Moyenne</i>	<i>0,97</i>		<i>1,85</i>		<i>1,35</i>		<i>1,67</i>	

2 . Evolution du paysage riveraine et histoire hydrologique

Nous avons mis en relation les variables (indicateurs) du paysage décrites dans le chapitre 2 avec les facteurs de contrôle principaux, c'est-à-dire les crues et le régime sédimentaire (Tableau 1.3).

Tableau 1.3. Les valeurs du coefficient de Spearman calculées entre variables de réponse et facteurs de contrôle. En gras les relations pour lesquelles la significativité correspond à p-value = 0,1 ; avec l'astérisque sont indiquées les relations les plus significatives (p-value<0,05). Les variables de réponse caractéristiques du paysage riverain : la variation de la largeur de bande active entre deux dates (ACvar) ; les résidus de la relation entre densité et proportion d'îles dans la bande fluviale (REis ; cf. partie 1-A-2 de ce chapitre) ; la variation en pourcentage de la proportion des marges pionnières entre deux dates (PM) ; le ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre 2 dates (VA/EA) ; le ratio entre la surface des nouvelles îles comparée à la surface des îles stables entre deux dates (NIs/SIs). Les facteurs de contrôle : le nombre de mois depuis la dernière crue, pour tous les temps de retour (Q2 à Q>50) ; la durée, en nombre de jours, des événements de magnitude supérieure à Q2 (n.joursQ>Q2) ; le régime sédimentaire (mean W* ; d'après Piégay et al., 2009 et Belletti et al., 2012).

	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q>50	n.jourQ>Q2	moyW*
ACvar	0.09	-0.22	(*) -0.48	-0.02	-0.20	-0.22	-0.03	0.07
REis	0.13	0.09	0.09	-0.03	-0.01	-0.07	0.18	-0.16
PM	-0.13	0.06	0.36	-0.35	-0.15	(*) 0.80	0.14	-0.03
VA/EA	-0.08	(*) 0.35	(*) 0.46	0.43	0.11	0.45	0.10	0.19
NIs/SIs	-0.03	0.06	(*) 0.44	0.27	0.04	0.28	0.24	(*) -0.31

Comme le montre le Tableau 1.3, tous les indicateurs, excepté REis, sont significativement liés au nombre de mois depuis la dernière crues décennale (Q10), positivement pour la plupart mais négativement pour la variation de la largeur de la bande active. En ce qui concerne les autres facteurs de contrôle :

- le nombre de mois depuis la dernière Q5 est positivement lié aux surfaces végétalisées (VA/EA) ;
- le nombre de mois depuis la dernière crue de très forte magnitude (>Q50) est positivement lié à la proportion de pionniers aux marges de la bande fluviale (PM) ;
- la durée de crues de magnitude supérieure à Q2 est liée (faiblement) à la surface de nouvelles îles comparés à celle d'îles stables entre deux dates (NIs/SIs), tout comme le régime sédimentaire (moyW* ; relation statistiquement significative et négative).

L'analyse des relations entre facteurs de contrôle et variables paysagères par le biais de régressions linéaires multiples permet de mettre en évidence l'effet que la combinaison (interaction, effet additif) de plusieurs facteurs peut avoir sur le patron paysagère de tresses étudiées (

Tableau 1.4). Pour résumer :

- La variation de la largeur de la bande active (A) répond à l'effet combiné de l'interaction entre le temps depuis la dernière Q10 et la durée des événements hydrologiques majeurs (A1) ; de plus, le régime sédimentaire semble aussi influencer la réponse de la dynamique latérale des tronçons à la crue Q10 (A1).
- Les résidus de la relation entre densité et proportion d'îles dans la bande fluviale (B) répondent à l'effet additif entre durée ($n.\text{jours}_{Q>Q2}$) et magnitude (Q10) des crues (B1) ; encore une fois le régime sédimentaire semble interagir avec la variable hydrologique pour déterminer le patron évolutif d'un tronçon dans le temps (B2).
- Le ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre deux dates (C) semble influencé par l'interaction entre temps passé depuis la dernière Q10 et régime sédimentaire.
- Le ratio entre surface des nouvelles îles et surfaces des îles stables entre deux dates (D) est influencé par l'effet additif de la durée des crues morphogènes et du régime sédimentaire.

Suite à ces analyses préliminaires (Tableau 1.3 ; Tableau 1.4), nous avons ensuite retenu les facteurs de contrôle suivants :

- le nombre de mois depuis la dernière crue de récurrence quinquennale (Q5) ;
- le nombre de mois depuis la dernière crue de récurrence décennale (Q10) ;
- le nombre de jours pour lesquels le débit dépasse le débit de crue de magnitude Q2 ;
- le régime sédimentaire ($\text{moy}W^*$).

Tableau 1.4. Résumé des analyses de régression linéaire multiple effectuées entre les variables de réponse et les facteurs de contrôle. Les variables de réponse caractéristiques du paysage riverain : la variation de la largeur de bande active entre deux dates (ACvar) ; les résidus de la relation entre densité et proportion d'îles dans la bande fluviale (REis ; cf. partie 1-A-2 de ce chapitre) ; le ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre 2 dates (VA/EA) ; le ratio entre la surface des nouvelles îles comparée à la surface des îles stables entre deux dates (NIs/SIs). Les facteurs de contrôle : le nombre de mois depuis la dernière crue de récurrence décennale (Q10) ; la durée, en nombre de jours, des événements de magnitude supérieure à Q2 (n.joursQ>Q2) ; le régime sédimentaire (moyW* ; d'après Piégay et al., 2009 et Belletti et al., 2012). Les astérisques indiquent la significativité des régressions.

	Régressions linéaires multiples	R carré	Statistique F	p-value	
(A1)	ACvar ~ n.joursQ>Q2 * Q10	0,31	4,308	0,0177	*
(A2)	ACvar ~ Q10 * moyW*	0,36	5,043	0,0097	*
(B1)	REis ~ n.joursQ>Q2 + Q10	0,25	4,752	0,0205	*
(B2)	REis ~ n.joursQ>Q2 + moyW*	0,17	5,825	0,0056	**
(C)	VA/EA ~ Q10 * mean W*	0,41	6,147	0,0042	**
(D)	NIs/SIs ~ n.joursQ>Q2 + moyW*	0,23	7,996	0,0011	**

3 . Evolution des tronçons d'étude et histoire hydrologique

Afin d'observer l'existence de comportements homogènes en termes de patron d'évolution paysagère, nous avons ensuite effectué une classification hiérarchique basée sur une analyse en composantes principales (logiciel R) (Figure 1.18 ; Figure 1.19).

L'analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée sur les variables du paysage suivantes : ACvar (variation % de la largeur de la bande active entre deux date), REis (valeurs des résidus des îles, obtenus selon la relation entre densité et proportion d'îles dans la bande fluviale), VA/EA (ratio entre surfaces végétalisées et surfaces érodées entre deux dates), NIs/SIs (ratio entre surface de nouvelles îles et celle des îles stables entre deux dates). Les deux premiers axes de l'ACP expliquent le 78% de la variance entre tronçons (Figure 1.19A). L'axe F1 est significativement et positivement lié à la variation de la largeur de la bande active ($\rho = 0.9$, p-value < 0.0001), puis dans une moindre mesure au ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre deux dates (VA/EA) et au ratio entre surface des nouvelles îles et celle des îles stables entre deux dates (NIs/SIs ; respectivement : $\rho = -0.81$, p-value < 0.0001 ; $\rho = -0.74$, p-value < 0.0001). L'axe F2 est significativement et positivement lié au résidus des îles (REis ; $\rho = 0.9$, p-value < 0.0001), et dans une moindre mesure au ratio entre surface des nouvelles îles et celle des îles stables entre deux dates (NIs/SIs) et au ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre deux dates (VA/EA ; respectivement : $\rho = 0.33$, p-value 0.02 ; $\rho = -0.35$, p-value = 0.01). Concernant les facteurs de contrôle, l'axe F1 est négativement et significativement lié au temps passé depuis la dernière Q10 ($\rho = -0.55$, p-value = 0.006) ; l'axe F2 est lié négativement au régime sédimentaire (moyW* ; $\rho = -0.3$, p-value = 0.04).

L'analyse hiérarchique a été menée sur les 2 principales composantes de l'ACP. Nous avons ainsi obtenu 5 types de patrons bio-géomorphologiques (Figure 1.18) :

- Le premier type est composé de tronçons élargis, ayant de faibles valeurs de REis et NIs/SIs, et où les surfaces érodées prévalent sur celles qui sont végétalisées. Ces tronçons ont enregistré une Q5 et une Q10 récemment et ont un régime sédimentaire actif (moyW*).

- Le deuxième type, comme le type 1, est composé de tronçons également élargis où les surfaces érodées prévalent ; mais, comparé au type 1, les valeurs de résidus sont nettement plus élevées, indiquant une densité d'îles très importante, ainsi que la surface de nouvelles îles comparée à la surface d'îles stables. Ces tronçons ont enregistré une Q10 au moins durant les derniers 4 ans.
- Le type 3 est composé de tronçons latéralement stables ; les résidus des îles enregistrent des valeurs autour de zéro, le rapport NIs/SIs n'est pas très élevé alors que les surfaces végétalisées prévalent sur les surfaces érodées. Ces tronçons, comme ceux de type 1, ont enregistré une Q5 et une Q10 récemment.
- Le type 4 concerne des tronçons rétrécis; les résidus enregistrent les valeurs les plus négatives, ce qui indique des îles plus grandes et peu nombreuses (cf. partie 1-A-2 de ce chapitre). Les surfaces végétalisées prévalent significativement sur les surfaces érodées. La variable relative aux marges pionnières (PM) se différencie pour ce type adoptant des valeurs positives et qui indique un développement significatif de marges pionnières. Ces tronçons n'ont pas enregistré une crue de forte magnitude (Q10) depuis longtemps et, comme le type 1, semblent avoir un régime sédimentaire actif (moyW*).
- Le dernier type rassemble des tronçons également rétrécis mais pour lesquels REIs et NIs/SIs ont les valeurs les plus élevées ; les surfaces végétalisées prévalent sur celles érodées. Ces tronçons n'ont pas enregistré une crue de forte magnitude (Q10) depuis au moins plus de 4 ans et ils semblent les seuls à répondre, bien que faiblement, à la durée des crues morphogènes (n.joursQ>Q2).

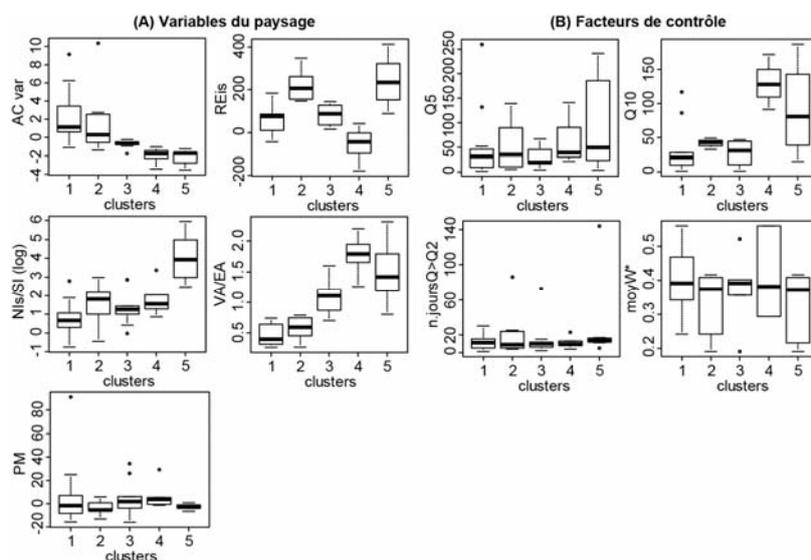


Figure 1.18. Les types résultant de l'analyse hiérarchique construite sur les résultats d'une ACP (les 2 premiers facteurs ont été retenus). (A) Les caractéristiques paysagères des types : variation de la largeur de bande active entre deux dates (ACvar) ; résidus de la relation entre densité et proportion d'îles dans la bande fluviale (REIs ; cf. partie 1-A-2 de ce chapitre) ; variation en pourcentage de la proportion des marges pionnières entre deux dates (PM) ; ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre 2 dates (VA/EA) ; ratio entre la surface des nouvelles îles comparée à la surface des îles stables entre deux dates (NIs/SIs). (B) Les caractéristiques des types en termes de facteurs de contrôle : nombre de mois depuis la dernière crue

quinquennale (Q5) et décennale (Q10) ; durée, en nombre de jours, des événements de magnitude supérieure à Q2 (n.joursQ>Q2) ; régime sédimentaire (moyW* ; d'après Piégay et al., 2009 et Belletti et al., 2012).

La Figure 1.19B montre l'évolution de la mosaïque paysagère pour chaque tronçon séparément sur toute la période d'étude (4 observations). Les tronçons sont affichés sur le plan factoriel F1xF2 de l'ACP ; chaque observation est affichée selon le type d'appartenance suite à l'analyse hiérarchique. Sur la base des résultats précédents (Tableau 1.3 ; Tableau 1.4 ; Figure 1.18 ; ACP, cf. Figure 1.19A), nous pouvons proposer une clef de lecture pour l'interprétation de l'évolution paysagère des tronçons étudiés (Figure 1.19C) :

- L'axe F1 correspond à l'évolution latérale des tronçons régit par la dynamique des crues : aux valeurs positives correspondent un élargissement des tronçons, alors qu'aux valeurs négatives correspondent un rétrécissement des tronçons, en fonction du temps qui sépare l'observation de l'évènement hydrologique (ici Q10).
- L'axe F2 semble répondre à des facteurs structurant au niveau régional, en termes de régime sédimentaire (moyW*) : des tronçons déconnectés de leurs sources ou peu actifs en termes d'apports sédimentaires (valeurs positives sur la seconde composante) s'opposent des tronçons connectés avec un apport important en sédiments.

Globalement, l'évolution des patrons bio-géomorphologiques dans le temps, en termes de développement d'îles (REis, NIs/SIs) ou de végétalisation dans un sens plus large (VA/EA, PM), semblent aussi structurés par le régime sédimentaire : on voit donc s'opposer, autour de valeurs positives et négatives de l'axe F2, les tronçons du sud-ouest (valeurs positives ; types 2, 5, la Drôme et le Roubion) et les tronçons du sud-est (valeurs négatives ; types 1, 4 ; le Bès et le Buëch).

En termes d'évolution, nous observons des comportements diversifiés (Figure 1.19). Ainsi :

1. Certains tronçons s'ajustent latéralement en réponse à chaque événement de crue, changeant de patron d'une manière cyclique : il s'agit par exemple des tronçons du sud-est, comme la Tinée et en partie le Roubion et la Drôme ;
2. Certains tronçons ne montrent pas de comportement cyclique et répondent faiblement aux événements hydrologiques majeurs : comme les tronçons du nord (excepté l'Arve) et l'Eygues.

Concernant les tronçons de haute montagne, la Tinée répond aux crues (Q10) en 1977-78 et s'élargit légèrement (TN1), mais elle ne semble pas réagir à une plus grosse crue (Q50) en 1982 (TN2). Même si l'élargissement en 1978 a pu être en partie surestimé par la moindre qualité de la photographie à cette date, le non élargissement malgré des crues successives semble plutôt s'expliquer par le fait qu'en 1978 la rivière avait déjà atteint sa largeur maximale, étant donné la faible largeur du fond de vallée, occupée quasiment par toute la rivière. Cette interprétation semble validée par le fait que la rivière ne s'élargit plus ou très peu alors qu'elle s'exhausse fortement (> 7 m ; Liébault et al., sous presse). Le Bans est potentiellement réactif aux crues, il s'élargit en 1988, mais il ne répond pas à la crue de forte magnitude en 1990 et rétrécit légèrement ensuite, durant une période de calme hydrologique.

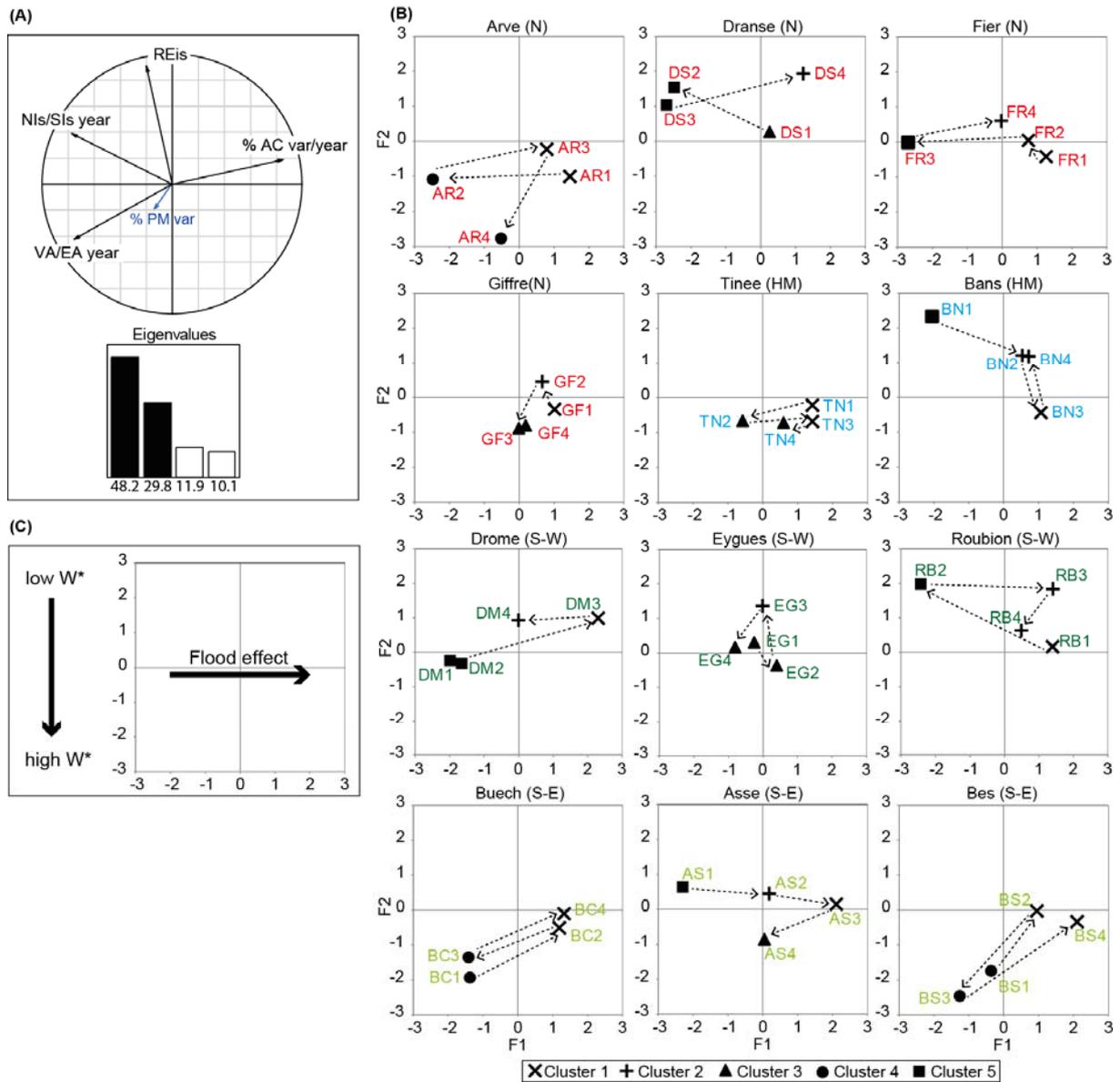


Figure 1.19. (A) Cercle des corrélations de l'Analyse en Composantes Principales effectuée sur les variables du paysage (ACvar, variation de la largeur de bande active entre deux dates ; REis, résidus de la relation entre densité et proportion d'îles dans la bande fluviale, cf. partie 1-A-2 de ce chapitre ; VA/EA, ratio entre surfaces végétalisées et érodées entre 2 dates ; NIs/SIs ratio entre la surface des nouvelles îles comparée à la surface des îles stables entre deux dates), sur laquelle ont été obtenus les 5 types de l'analyse hiérarchique (Figure 1.18). (B) Evolution de la mosaïque paysagère dans le temps pour chaque tronçon. N = tronçons du nord de la zone d'étude ; HM = tronçons de haute montagne ; S-W = tronçons du sud-ouest (corridor rhodanien) ; S-E = tronçons du sud-est (bassin durancien). (C) Clé de lecture pour l'interprétation de l'évolution paysagère des tronçons étudiés.

En ce qui concerne les Alpes du nord, nos résultats montrent une tendance au rétrécissement progressif dans le temps. Ces tronçons répondent encore aux crues lors des premières observations, mais leur évolution semble ensuite indépendante de l'histoire hydrologique. Ce résultat démontre probablement ainsi l'influence des activités anthropiques sur ces tronçons, se traduisant, dans le cas extrême de l'Arve, par la disparition du patron de tressage (valeurs maximales de REis = *large-island pattern*). Au cours de la période récente, la Dranse réagit différemment puisque les crues récentes ont

provoqué un élargissement partiel de sa bande active, même si la largeur de celle-ci reste encore très éloignée de la largeur observée dans les années 1950 et 1960.

La partie au sud de la zone d'étude est plus complexe. Nous retrouvons l'opposition ouest-est observée sur la tendance à long terme (cf. partie 1-A-2 de ce chapitre). Les tronçons de l'Ouest semblent peu réactifs aux crues jusque dans les années 1980 même lorsque des crues de forte magnitude se manifestent alors que les tronçons de l'est sont toujours réactifs en s'élargissant après chaque crue. En 1994-95 de gros événements hydrologiques se produisent sur les tronçons du corridor rhodanien : les tronçons réagissent jusqu'à récupérer les largeurs qu'ils avaient en début des années 70 (DR3, RB3). Au contraire, ces tronçons ne réagissent pas aux crues produites entre 2002 et 2003 (DR4, RB4). De fait, les événements de 1994-95 ont été si importants (réalisation des largeurs des années 70) que les crues plus récentes, en 2002-2003, sont probablement trop proches dans le temps pour produire un quelconque effet sur la largeur. Cette opposition (ouest-est) s'explique peut-être par le fait que les tronçons de l'ouest ont subi des impacts anthropiques plus importants (extractions de graviers durant les années 70-80 ; occupation d'espace par l'agriculture), alors que la densité de population et d'activités anthropiques dans les bassins de piémont et montagnards de la Durance ont été, comparativement, moins importants. De plus, comme cela est indiqué plus haut, ces derniers sont plus actifs en termes de dynamique sédimentaire que les tronçons du corridor rhodanien. Cela se traduit aussi en termes de patron bio-géomorphologique : les tronçons du sud-ouest, durant les périodes sans crues, développent un patron bio-géomorphologique caractérisé par un nombre croissant d'îles dans la bande fluviale alors que, dans le sud-est, les îles du Buëch et du Bès, durant les périodes de calme hydrologique, se développent plutôt en surface en s'attachant à la forêt située aux marges (type 4).

PARTIE 2. SPECIFICITES ET STRUCTURE DE LA DIVERSITE DES INVERTEBRES DANS LES RIVIERES EN TRESSES

Rédacteurs : F. Malard, T. Datry, C. Capderrey

A. OBJECTIF 1: INFLUENCE DES ECOULEMENTS HYPORHEIQUES SUR LA DIVERSITE ET LA DISTRIBUTION DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES

Les résultats montrent que la majorité des groupes d'invertébrés considérés atteignent dans la zone hyporhéique une richesse et une abondance maximale à l'amont des bancs de gravier situés dans les zones d'exfiltration. Ces résultats obtenus à partir d'un échantillonnage mené sur 12 sites impliquent que les interactions entre filtres environnementaux s'expriment à différentes échelles spatiales génèrent une même distribution spatiale de la biodiversité au sein de multiples groupes taxonomiques. Si les filtres environnementaux impliqués pour chaque taxon restent à identifier il n'en reste pas moins que ces résultats ont en terme de gestion une forte implication puisqu'ils nous indiquent où devraient être concentrés les efforts de conservation et de gestion dans les rivières en tresse.

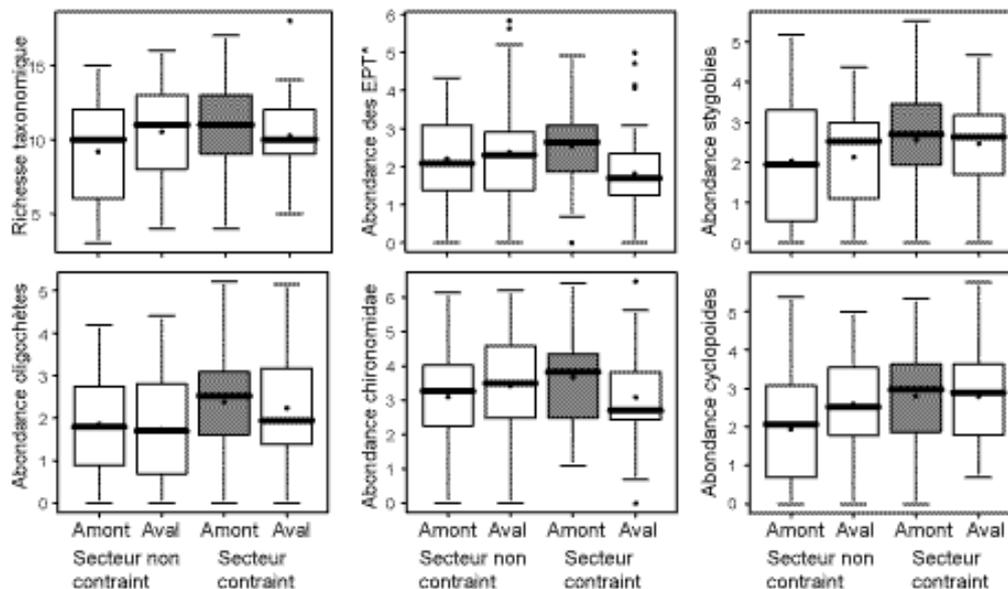


Figure 2.20. Richesse taxonomique et abondance (logarithme) des peuplements d'invertébrés dans la zone hyporhéique des rivières en tresse montrant une richesse et des abondances maximales à l'amont des bancs de gravier dans les secteurs contraints (boîtes grisées) pour des groupes aussi divers que les éphémères, plécoptères et trichoptères (EPT), les taxons souterrains (stygobies), les oligochètes, les chironomides et les cyclopoïdes.

B. OBJECTIF 2 : INFLUENCE DE LA STRUCTURE GEOMORPHOLOGIQUE DES RIVIERES EN TRESSES SUR LA DIVERSITE GENETIQUE DES POPULATIONS

Les résultats ne sont pas achevés mais un certain nombre de verrous ont été levés et les premières tendances se dessinent: 1) la différenciation génétique intra-site est inférieure à celle inter-site, ce qui était un pré requis pour une étude à l'échelle du linéaire d'une rivière; 2) les populations de l'isopode *Proasellus walteri* sont bien plus importantes que ne le laissait présager l'idée d'une forte fragmentation du milieu sédimentaire; 3) il n'y a pas de différence de dispersion entre les sexes; 4) la différenciation génétique inter-site est supérieure en zone de montagne à celle observée en zone de plaine, ce qui laisse présager une forte influence des conditions géomorphologiques (e.g. affleurement rocheux dans des zones de canyon) sur la dispersion de l'espèce, ce résultat restant bien sûr à confirmer.

C. OBJECTIF 3 : INFLUENCE DE LA DYNAMIQUE DES HABITATS SUR LA DIVERSITE DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES TERRESTRES DES RIVIERES EN TRESSES

La dynamique paysagère des habitats terrestres des secteurs étudiés a été décrite sur les 10 dernières années, ce qui permettra de calculer un certain nombre d'attributs nécessaires à l'interprétation des données biologiques (âge, fréquence de perturbation, connectivité aux autres habitats, etc.).

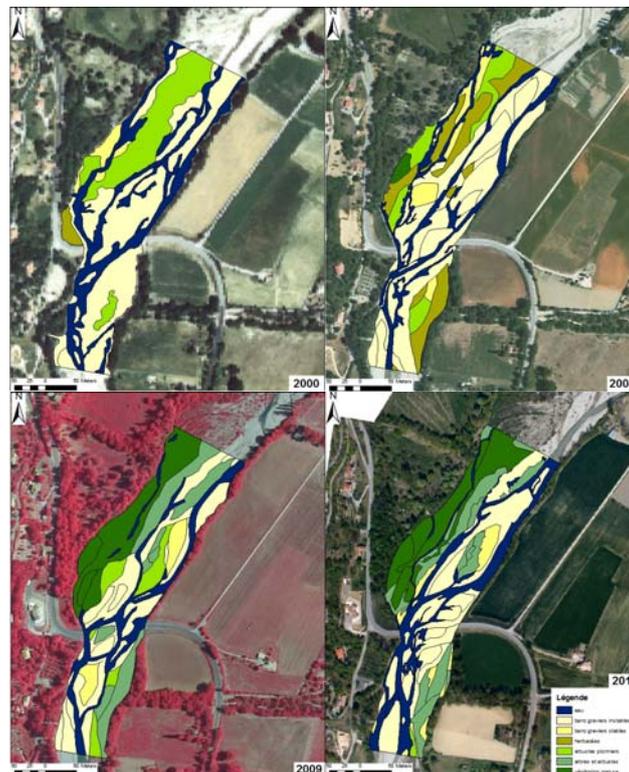


Figure 2.21. Evolution des habitats terrestres d'un secteur temporaire de l'Asse au cours des 10 dernières années.

L'absence de crues importantes entre 2000 et 2009 a favorisé le vieillissement des habitats terrestres et l'avancement des successions végétales s'y déroulant. Ainsi, la composition de la mosaïque paysagère a peu évolué durant cette période, et la végétation a progressé des stades pionniers (sols nus, herbacés) vers des stades matures (arbusitifs et arborés).

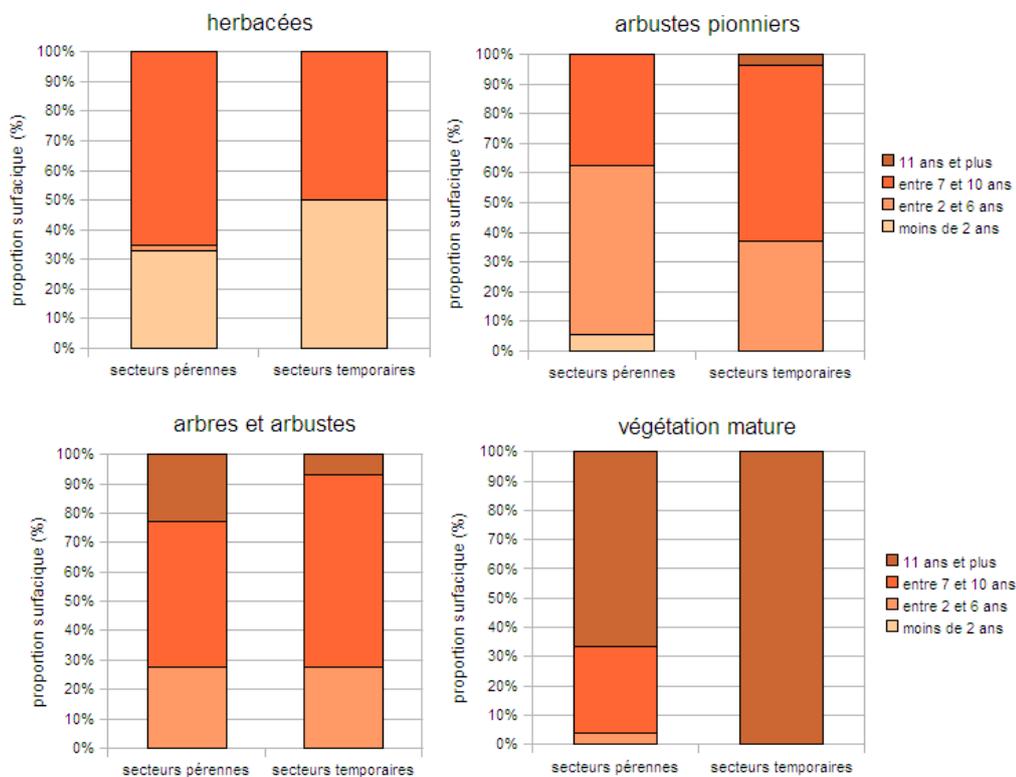


Figure 2.22. Age des habitats sur les secteurs pérennes et temporaires sélectionnés.

En 2011, la composition de la mosaïque paysagère est relativement semblable entre les 2 secteurs pérennes et temporaires de l'Asse, et ce, pour tout type de végétation. Toutefois, les successions végétales semblent, de manière globale, plus avancées sur les secteurs temporaires que pérennes.

Coordinateur : Alain Recking

Contributeurs : P. Leduc, H. Bellot, A. Recking, M. Naaim, A. Mours, L. Richard

A. RESULTATS SUR LES LITS EN BANCS ALTERNES

1 . Méthode

Pour cette expérience la largeur du canal a été réduite à 0.3m et la pente a été fixée à 3%. Le mélange sédimentaire utilisé est bimodal, composé de 43% de sédiments d'un diamètre compris entre 4 et 5 mm, et 57% de sédiments d'un diamètre de 1 à 3 mm, avec un diamètre moyen est de 3,4 mm. Les débits liquide et solide injectés ont été maintenus constants à 1.45 l/s et 5 g/s respectivement. Le débit infiltré dans le lit était environ 0.08 l/s. La durée totale de l'expérience a été de 100h. Les changements induits par les variations du régime hydraulique et sédimentaire lors de l'arrêt de l'alimentation liquide et solide ont été considérés négligeables.

Le canal a été divisé arbitrairement en 6 tronçons de 0.75 m de longueur. La profondeur du lit et la largeur de chacune des unités morphologiques présentes ont été mesurées toutes les 15 minutes pour chaque section. La granulométrie de surface a été mesurée par comptage visuel à l'aide d'un gabarit (Figure 3.23). Huit classes ont été utilisées, allant de moins de 5 sédiments grossiers sur la surface du gabarit à plus de 30. Cette information renseigne sur l'état de pavage du lit.



Figure 3.23. Gabarit de mesure (visuelle) de la granulométrie de surface.

La largeur de l'écoulement principal, la largeur active et la profondeur du lit ont été mesurées à l'aide d'un régle (la méthode de Moiré n'étant pas encore au point au moment de cette expérience préliminaire). La largeur de l'écoulement correspond à la surface totale prise par l'écoulement sur une section. La largeur active correspond à la zone de transport solide, elle est toujours inférieure ou égale à la largeur totale de l'écoulement.

2 . Observations

Après une période d'initialisation de la morphologie du lit, quatre bancs alternés dont deux complets ont été observés. La phase de mise en place de ces bancs a duré 16 heures environ. Bien qu'il se soit

formé sans contrainte, le premier banc situé en rive droite du lit a agi comme un forçage amont et n'a pas subi de changement important sur la durée de l'expérience. Les bancs alternés s'accompagnent d'une zone d'affouillement ou mouille provoquée par le contact de l'écoulement à la paroi (Figure 3.24).

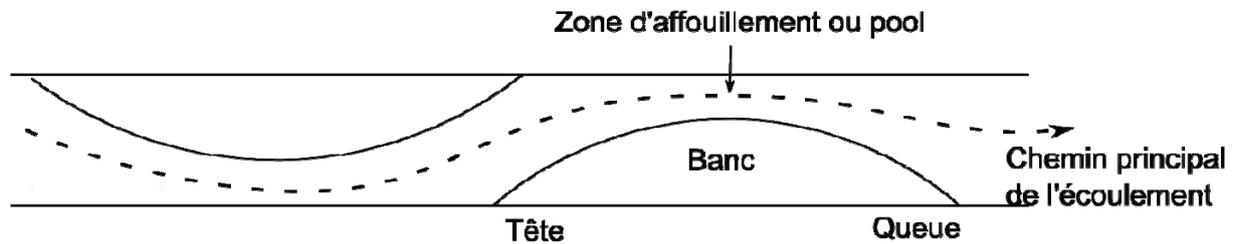


Figure 3.24. Représentation schématique d'un lit en bancs alternés.

Bien que les quatre bancs fussent persistants, nous avons observé deux morphologies bien distinctes (Figure 3.25).

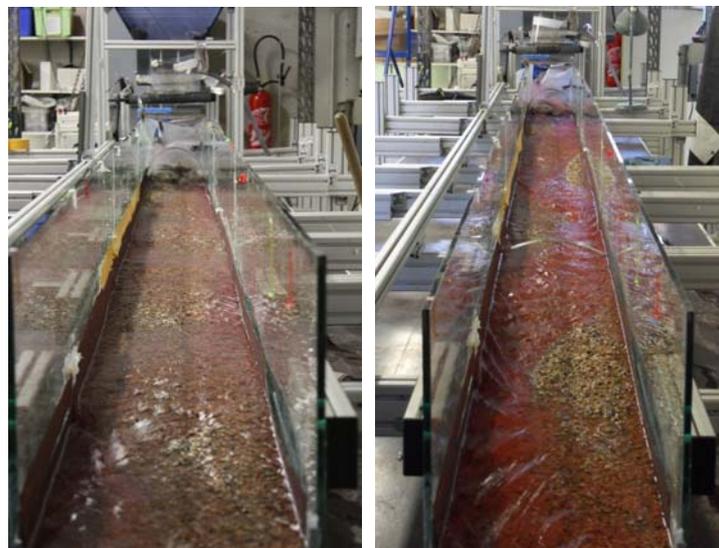


Figure 3.25. (a) Lit pavé (avec chenal principal peu individualisé) et (b) lit dépavé (avec chenal principal encaissé).

Le premier type de morphologie (Figure 3.25a) correspond à une phase de pavage de l'ensemble du lit. Il ne reste en surface que la fraction grossière de la courbe granulométrique. Les bancs ressortent peu, le lit dans son ensemble est plat, nous sommes dans une configuration d'alternance seuil-mouille bien marquée. Le transport solide est faible sur l'ensemble du canal ainsi qu'en sortie. Les sédiments se déplacent peu et sur de courtes distances. L'écoulement s'étend sur la toute la largeur du canal, à l'exception du banc amont.

La deuxième morphologie est associée avec un lit en érosion, dépavé au niveau du chenal principal (Figure 3.25b). Le transport solide en sortie est important avec une forte présence de sédiments fins. Les sédiments grossiers se déplacent à grande vitesse sur un lit de sédiments fins. La surface des bancs est émergée et la largeur de l'écoulement est faible.

Malgré des conditions d'alimentation maintenues constantes, ces deux morphologies sont apparues de façon alternée et quasi-périodique avec des intensités différentes. Le temps de changement de

morphologie que nous avons pu observer est de l'ordre de la dizaine d'heures. Le passage d'une morphologie à l'autre est associé à la migration des bancs.

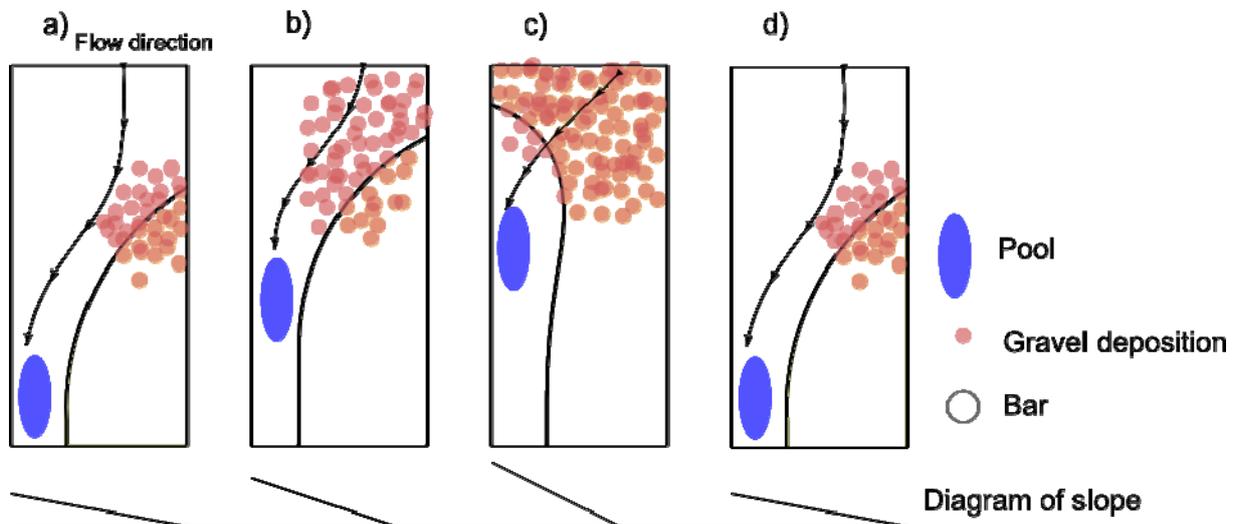


Figure 3.26. Représentation schématique de l'évolution (cyclique) du front des bancs.

Le front des bancs constitue une zone de dépôt préférentielle : l'écoulement est dévié par le front du banc (Figure 3.26a), la hauteur d'eau diminue et les sédiments grossiers ont tendance à se déposer. Plus la taille du dépôt augmente, plus l'écoulement est dévié à l'amont du banc et donc plus le front du banc migre vers l'amont (Figure 3.26b). A mesure que le front du banc progresse et que la distance entre le front du banc et la zone d'affouillement se réduit, la pente à l'amont de la mouille se raidit (Figure 3.26c). Progressivement tout l'amont du banc se compose de graviers, la tête du banc est fortement pavée. Dans cette configuration, la morphologie est celle d'une alternance seuil-mouille, avec une pente transversale importante. La différence d'altitude le long d'un profil est en revanche faible, hormis au droit des zones d'affouillement. Lorsqu'une certaine pente est atteinte, le pavage se détruit, et crée une importante érosion. La tête du banc est alors érodée, la largeur du banc diminue ainsi que la largeur de l'écoulement. La pente reliant la tête du banc et la mouille diminue. A cet instant, le banc est alors perché au-dessus du niveau moyen de l'écoulement. Dans cette phase il n'est pas rare d'observer un sapement de berges le long du banc pouvant même conduire à sa destruction partielle. Indépendamment du stade dans lequel on se trouve, les bancs et particulièrement ceux du centre du canal pouvaient être détruits, soit par une érosion agressive en phase d'érosion, soit par un recouvrement par les sédiments grossiers lors d'une phase de pavage.

Cette mobilité et migration des bancs met en relief le tri granulométrique, phénomène déjà étudié dans les expériences en canal étroits. Plus précisément, nous avons observé que lors du passage de l'écoulement dans les mouilles, les trajectoires des particules de sable et des graviers diffèrent. Du fait de leur taille, les graviers sont soumis de façon plus intense à la gravité et donc entraînés plus facilement au fond de la mouille. Le sable lui, reste en marge de l'écoulement. A la sortie de la mouille, le sable resté en marge se dépose sur les côtés.

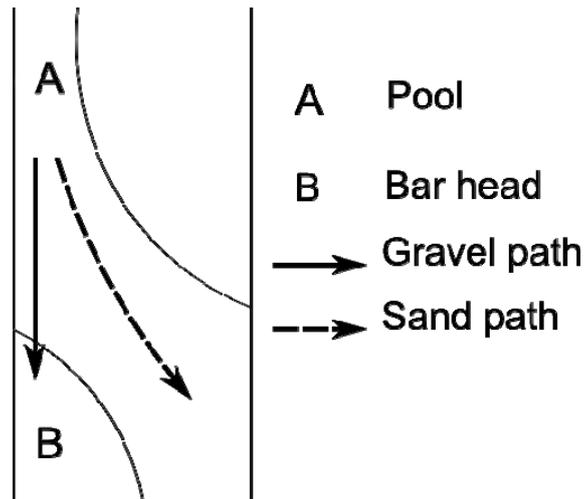


Figure 3.27. Mécanisme de ségrégation au niveau de la mouille.

Un autre phénomène vient s'ajouter à cela. Les sédiments grossiers ont des diamètres jusqu'à 4 fois supérieurs aux sédiments fins. Leur inertie est alors plus importante. A la sortie de la mouille, les graviers sont alors moins sensible à la déviation de l'écoulement provoquée par l'amont du banc suivant. Ils conservent la direction de l'écoulement au passage de la mouille, c'est-à-dire parallèlement aux bords du canal. La tête de banc suivant, dans le prolongement de la mouille, constitue une zone importante de dépôt de sédiments grossiers.

Les sédiments fins en revanche sont plus sensibles à la variation de la direction de l'écoulement à la sortie de la mouille. Ils se dirigent dans la direction de la mouille suivante, et se déposent en marge de l'écoulement. La différence de trajectoire entre les sédiments fins et grossiers provoque des zones de dépôts préférentiels en fonction de la taille des sédiments. Ce phénomène est à l'origine de l'hétérogénéité de la surface des bancs et témoigne d'un tri granulométrique longitudinal. Les sédiments grossiers se situent vers la tête du banc alors que les sédiments fins constituent la queue du banc. Ce mécanisme bien observé au laboratoire, explique la morphologie des bancs souvent observée sur le terrain (Figure 3.28).

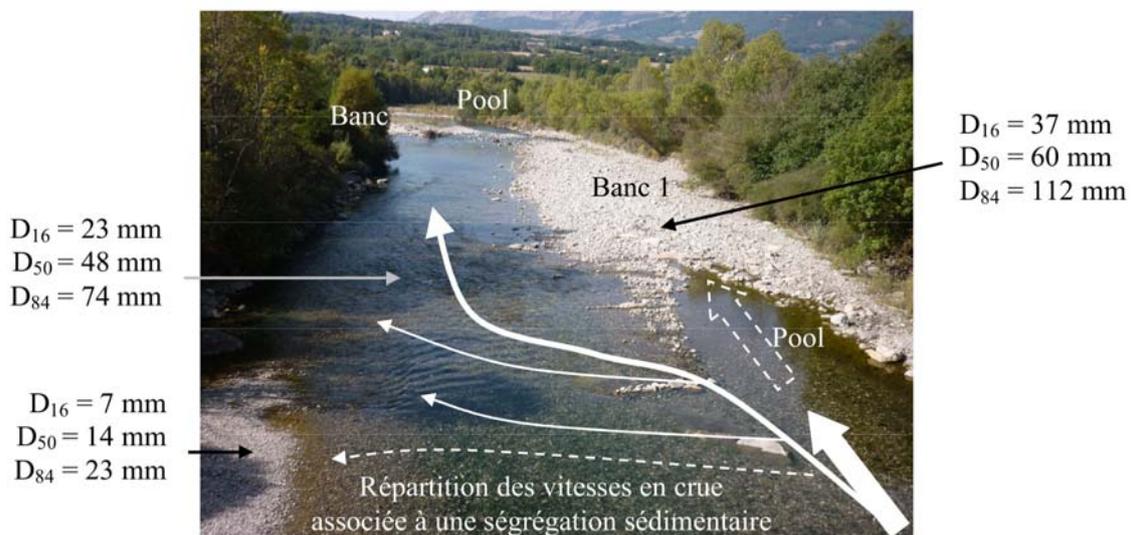


Figure 3.28. Bancs alternés sur le Drac à Forest Saint Julien.

3 . Mesures et analyses

Toutes les 15 minutes, la profondeur du lit, la largeur de l'écoulement et la masse de sédiments sortante ont été mesurés. Afin de minimiser d'influence ponctuelle de la zone d'affouillement, la pente moyenne a été calculée sur la base d'une cote moyenne du lit (la prise en compte simple du chenal d'écoulement n'étant pas représentatif de l'état d'aggradation de la section dans son ensemble). La pente moyenne de l'ensemble de lit a été calculée à partir de profondeur moyenne pour les six sections.

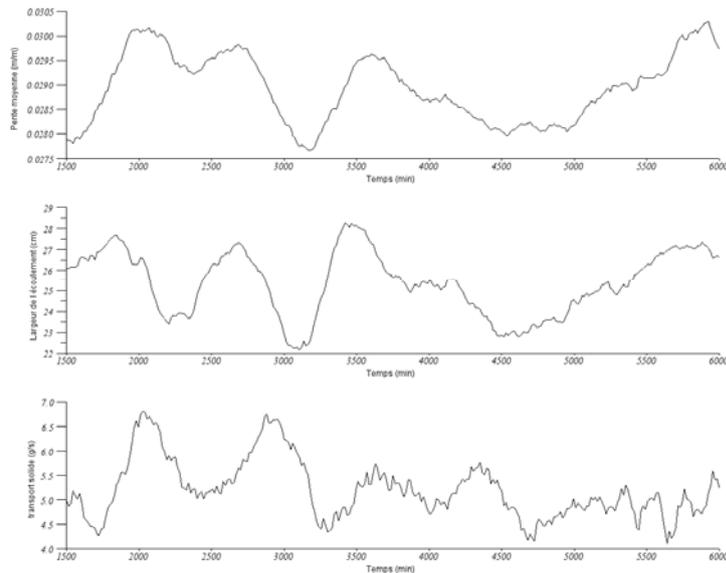


Figure 3.29. Variation de la pente (m/m), du transport solide (g/s) et de la largeur d'écoulement (cm) en fonction du temps.

Avec cette définition de la pente, on s'attend à ce qu'une augmentation de la pente provoque une diminution du débit solide en sortie. La tendance est à l'inverse dans ce cas. Une pente forte coïncide avec un fort transport solide (Figure 3.29). Cela signifie qu'une augmentation locale de la pente n'influence pas le transport solide dans son ensemble. La particularité d'un système en banc alternés peut justifier ce phénomène. Les sédiments mis en mouvement lors d'une phase d'érosion ne sont pas contraints de rester dans l'écoulement principal et viennent pour la plupart se déposer sur la tête du banc suivant. Les sédiments qui se déposent n'interviennent plus à court terme dans le processus sédimentaire sur l'ensemble du canal. Cette déconnexion ne permet pas d'avoir une relation simple liant la pente et le transport solide. La donnée de la pente moyenne du lit nous renseigne sur le volume de sédiment contenu dans le lit.

L'observation montre un lien entre la pente locale et la largeur de l'écoulement (Figure 3.29). Une diminution de la valeur locale de la pente coïncide avec un rétrécissement de la largeur de l'écoulement. Sur les données, le sens de variation de la courbe représentative de la pente est similaire à celui de la largeur.

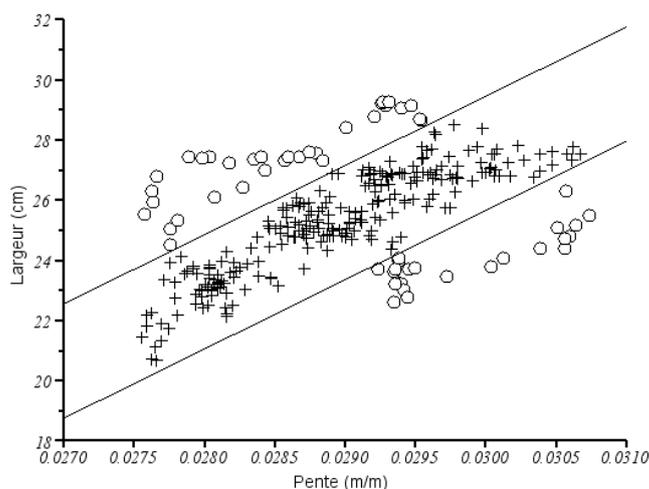


Figure 3.30. Variation de la largeur en fonction de la pente du lit (les points situés entre les deux droites représentent 80% de l'échantillon).

Sur la Figure 3.30 représentant les valeurs de pente (m/m) en fonction de la largeur de l'écoulement (cm), 80% des points se situent entre les deux droites et le coefficient de corrélation est de 0.88. Les points situés au-dessus de l'enveloppe correspondent à une période pour laquelle une zone d'affouillement était présente de façon persistante sur l'un des profils. Le calcul de la profondeur moyenne est alors biaisé par la zone d'affouillement. Les points situés en dessous de l'enveloppe correspondent à une période continue succédant à une très forte érosion. Une réduction de la valeur de la pente est conjointe à un rétrécissement de la largeur de l'écoulement.

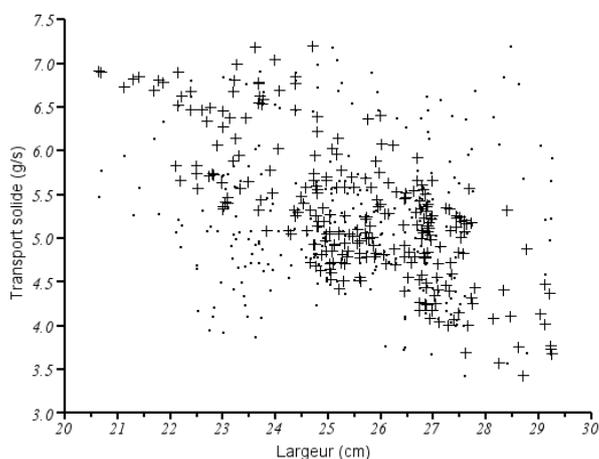


Figure 3.31. Le transport solide exprimé en fonction de la largeur, sans déphasage (symbole = point) et avec un déphasage de 150 minutes (symbole = croix).

Le signal de transport solide est déphasé par rapport à celui de la pente et de la largeur (Figure 3.29). Le coefficient de corrélation est respectivement de 0.25 et -0.07. En décalant les signaux dans le temps, le coefficient de corrélation entre le transport solide et la largeur de l'écoulement atteint son maximum pour un déphasage de 150 minutes (Figure 3.31). Le coefficient de corrélation est alors -0.56. Ce déphasage pourrait correspondre à un "temps de réponse" du transport solide aux variations

de la topographie. La donnée de largeur est une donnée spatiale qui correspond à une moyenne faite sur l'ensemble de canal. En revanche la valeur de transport solide n'est relative qu'à la section aval de l'écoulement. La correspondance entre les deux signaux ne peut s'établir alors clairement.

Lors de l'expérience, nous avons observé qu'une phase d'érosion provoque une réduction de l'écoulement accompagnée d'une forte concentration en sédiments fins et d'un transport solide total actif. L'étude de l'influence de la largeur sur la composition granulométrique de la surface écoulement est fortement biaisée par la localisation des profils. Les profils 1 et 6 sont ceux situés vers les extrêmes du canal et subissent donc l'influence des conditions aux limites. Les profils 4 et 5 encadrent l'un des deux bancs complets de l'expérience. Le profil 5 se situe juste à l'amont d'une zone d'affouillement et le profil 4 à son aval. La relation des largeurs actives de ces deux profils est inverse. Une grande largeur active de l'écoulement sur un des profils correspond à une faible largeur active sur l'autre profil (Figure 3.32).

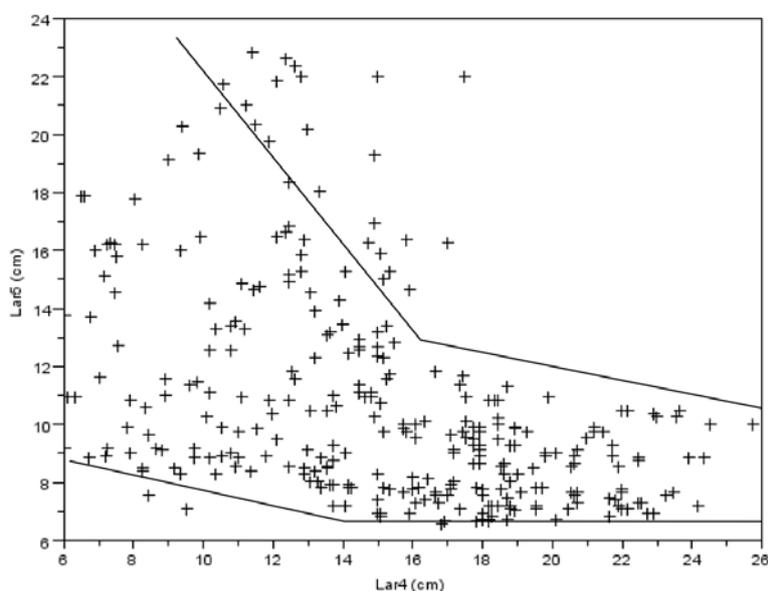


Figure 3.32. Largeur de l'écoulement actif de la section aval (du banc) en fonction de la section amont (du banc).

Il est important de souligner le rôle important de la zone d'affouillement dans la détermination de la largeur active du profil 4. Cette zone agit comme une "pompe" à sédiments principalement à cause de la forte rupture de pente et de l'entonnement de l'écoulement. En particulier, une faible largeur de la section amont correspond à une grande largeur de l'écoulement actif à la section aval. En effet, la zone d'affouillement joue de rôle de tri sélectif en fonction de la taille des sédiments. Ce tri provoque un élargissement de la zone de transport aval, en dissociant les trajectoires des deux tailles de grains. Cette zone a une allure d'éventail au départ de la pool. Ainsi, lors d'une forte érosion, plus des sédiments transitent par la zone d'affouillement, plus la largeur de l'écoulement actif de la section 4 augmente avec une concentration en sédiments fins importante (Figure 3.33).

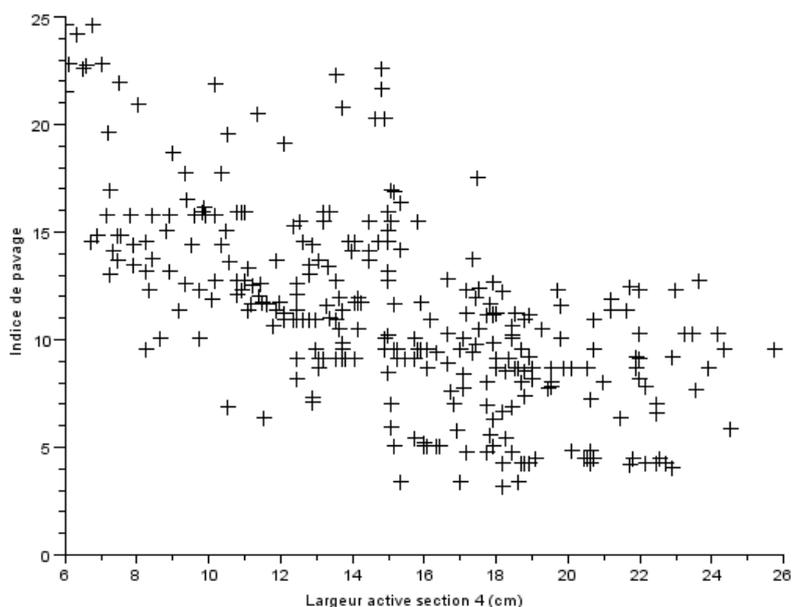


Figure 3.33. Largeur de l'écoulement en fonction de l'indice de pavage pour la section 4 (aval).

Le flux liquide et solide est concentré dans une faible largeur et est localement accéléré au passage de cette zone d'étonnement de l'écoulement. A la sortie de cette zone, l'écoulement s'élargit ainsi que la zone de transport. Le transport sur cette zone est conditionné de façon importante par l'amont. Si la zone d'affouillement est très active, et que de nombreux sédiments y transitent, le transport dans cette zone sera fort. A contrario, si l'activité de la zone d'affouillement est modérée, le transport solide à l'aval le sera aussi. Ces deux configurations ne font pas intervenir les conditions locales sur cette section. Le transport solide dans cette zone est fortement lié à l'activité à l'amont et non aux conditions locales de pente, de hauteur d'eau ou de vitesse. Le lien entre le transport et la largeur active sur un profil est complexe.

B. RESULTATS SUR LES LITS EN TRESSSES

1 . Conditions expérimentales

L'étude des lits en tresses s'est décomposée en deux séries d'expériences. La première a été réalisée avec des sédiments à granulométrie uniforme et la seconde avec un mélange bimodale. Les conditions hydrauliques ont été les suivantes :

En granulométrie uniforme :

Run 1 : $0 < t < 35$ h, $Q = 0.23$ l/s, $Q_s = 0.66$ à 1 g/s ajustement, mise en place

Run 2 : $35 < t < 85$ h, $Q = 0.23$ l/s, $Q_s = 0.4$ g/s, plutôt en processus érosif

Run 3 : $98 < t < 279$ h, $Q = 0.23$ l/s, $Q_s = 0.7$ g/s, plutôt en processus d'aggradation

Run 4 : $279 < t < 385$ h, $Q = 0.35$ l/s, $Q_s = 0.7$ g/s, érosion importante

En granulométrie étendue :

Run 5 : $0 < t < 49$ h, $Q = 0.6$ l/s, $Q_s = 0.7$ g/s, mise en place

Run 6 : $49 < t < 150$ h, $Q = 1$ l/s, $Q_s = 0.7$ g/s, érosion importante

Run 7 : > 150 h, $Q = 0.6$ l/s, $Q_s = 0.7$ g/s, aggradation (expérience toujours en cours)

2 . Observations

Chaque expérience a produit des lits différents, selon la nature du mélange sédimentaire utilisé et l'état d'équilibre du lit. Ces différentes morphologies sont illustrées sur la Figure 3.34 et la Figure 3.35.

Sédiments à granulométrie uniforme



Figure 3.34. Lits en tresses produits avec des sédiments uniformes.

Sédiments à granulométrie étendue

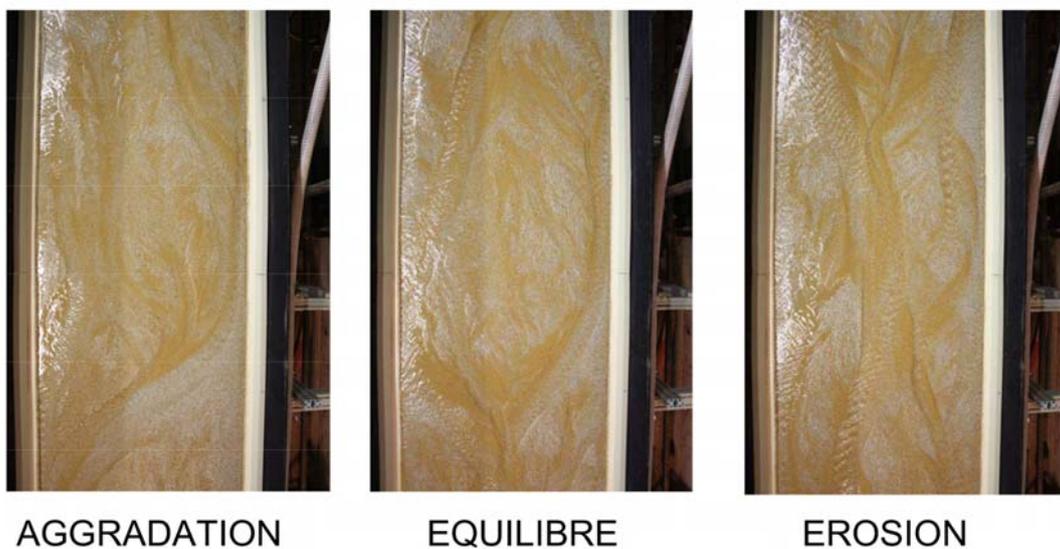


Figure 3.35. Lits en tresses produits avec une granulométrie étendue.

Des différences notables peuvent être observées entre les lits à sédiments uniformes et à granulométrie étendue. Par exemple les matériaux uniformes produisent des « trous » d'érosion (Figure 3.34b) qui n'ont pas été observés en granulométrie étendue. Les formes des bancs sont également différentes en apparence, mais cela devra être confirmé par une analyse de la topographie.

Ce qui est apparu de façon évidente par contre, c'est qu'en granulométrie étendue la formation des bancs est largement contrôlée par un phénomène de tri granulométrique et de transport préférentiel. Les mécanismes sont identiques à ceux déjà observés pour les bancs (Figure 3.27, Figure 3.28) : les sédiments grossiers transportés par l'écoulement principal contribuent à alimenter le banc aval, alors que les sédiments fins, transportés par les écoulements secondaires alimentent le chenal et les bancs latéraux. Une différence existe cependant par rapport aux bancs, car les écoulements secondaires ne sont pas, dans le cas des tresses, contrôlés par des conditions aux limites fixes (cas des bancs alternés) et peuvent se développer de part et d'autre du banc, qui devient dans ce cas central (Figure 3.36).

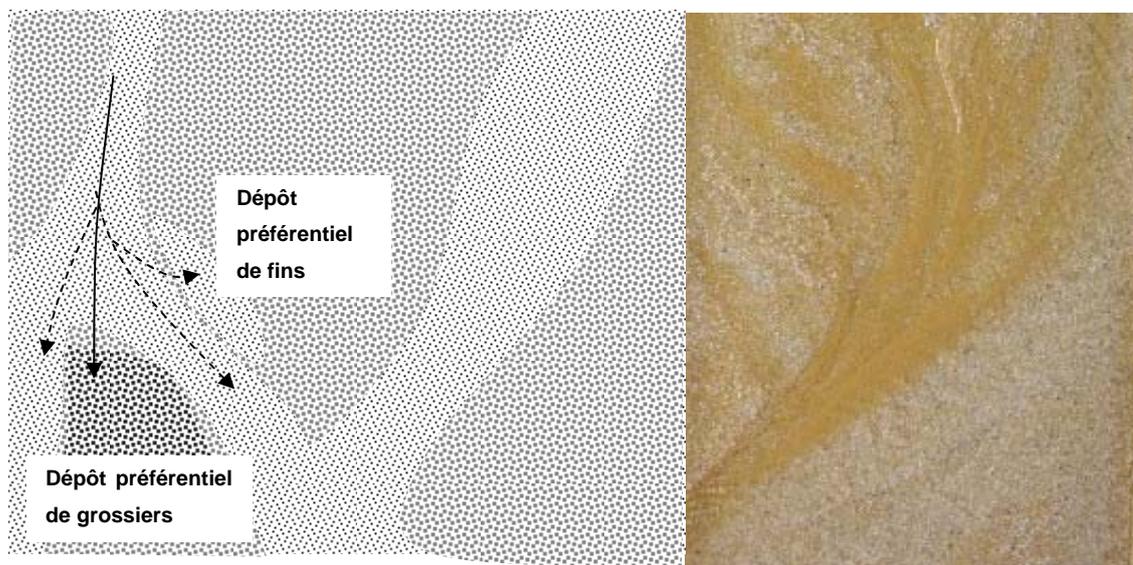


Figure 3.36. Représentation schématique de la ségrégation au niveau des bancs.

Il est difficile à ce stade de se prononcer sur les morphologies associées aux phases d'aggradation ou d'érosion. Il semblerait que ces phases produisent plutôt des chenaux uniques, alors que l'équilibre produirait un tressage bien développé (cet aspect reste à confirmer par une analyse plus fine des données produites).

Un lit en aggradation doit être analysé en plusieurs temps. L'aggradation se produit par propagation successive d'une onde sédimentaire depuis la zone d'alimentation en amont. Pendant ce long processus, et surtout en présence de tri granulométrique, très peu de sédiment est transféré dans les parties avals du canal, où des érosions significatives peuvent apparaître, avec notamment formation d'un chenal principal très développé.

Ce déphasage entre l'alimentation et la réponse du lit peut avoir des conséquences opérationnelles, puisque l'observation de l'état d'incision d'un lit à un moment donné, ne peut être considéré comme représentatif de la dynamique sédimentaire de son bassin. Il faut plutôt considérer un zonage géographique amont aval et raisonner sur des temps longs.

3 . Mesures et analyses

Pour chaque essai, des MNT ont été produits par la méthode de Moiré, toutes les 1 à 2 heures (selon la dynamique d'évolution du lit). Un exemple de rendu est présenté sur la Figure 3.37.

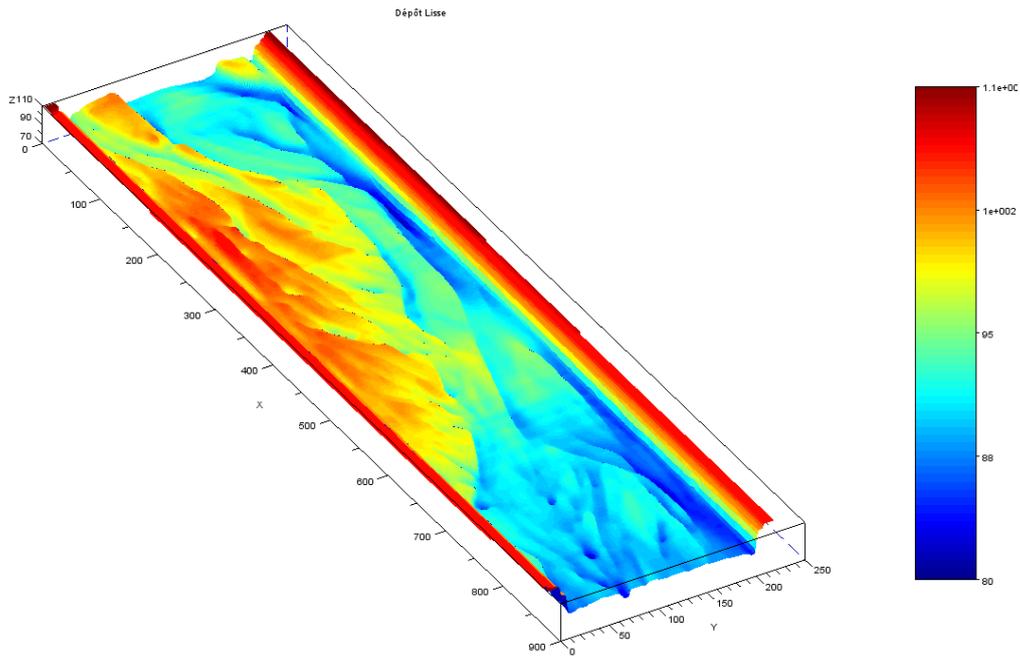


Figure 3.37. Exemple de MNT produit par la méthode de Moiré (cote en mm).

Chaque topographie a ensuite été analysée avec le BRI (Braiding River Index) proposé par Hoey :

$$BRI(Hoey) = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left[(z_i^2 + z_{i+1}^2) / 2 \right]^{0.5} [x_{i+1} - x_i] \right) / (x_n - x_1)$$

Où z est la cote du lit et x son abscisse sur la section considérée. Les résultats sont présentés sur les figures suivantes (Figure 3.38 à Figure 3.41). On peut en déduire que l'aggradation est accompagnée d'une diminution du BRI (moins de « relief ») et que l'érosion est accompagnée d'une augmentation du BRI, ce qui s'explique par le fait que chaque érosion est associée à un écoulement en chenal principal très marqué. Cependant cet indicateur n'informe pas sur le degré de tressage du lit.

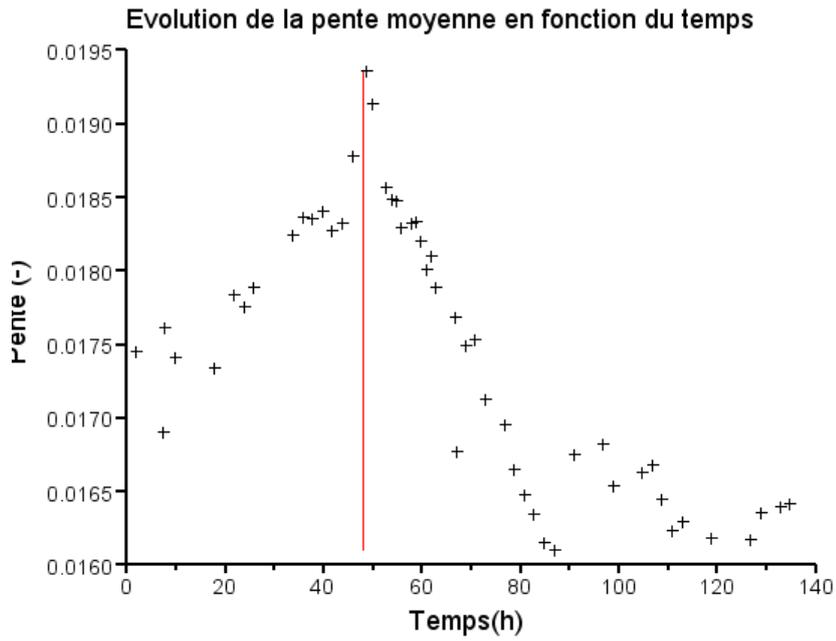


Figure 3.38. Evolution de la pente moyenne en fonction du temps pour l'expérience avec matériaux uniformes.

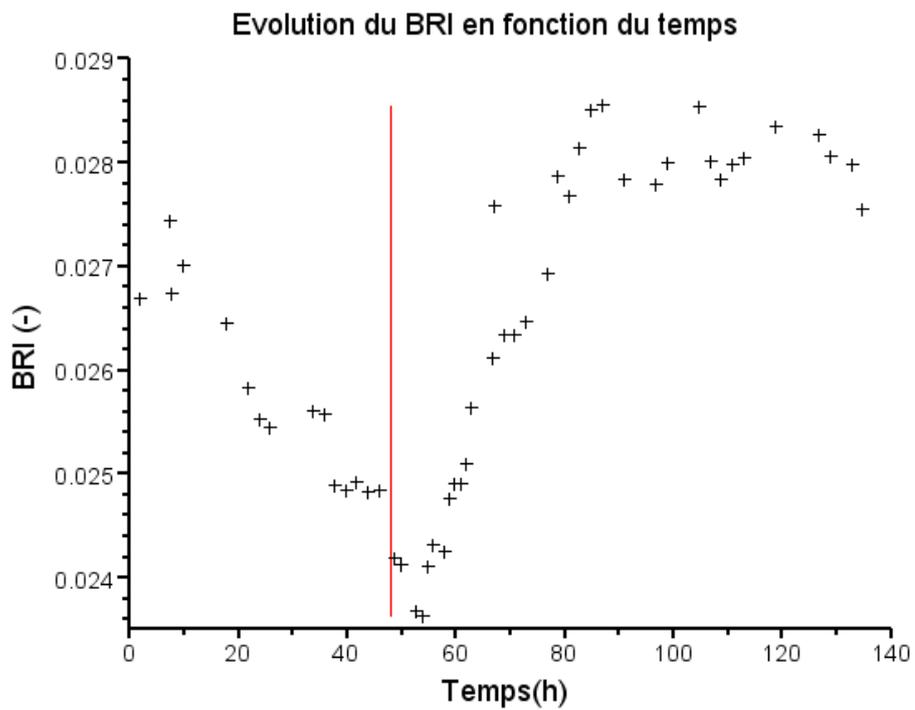


Figure 3.39. Evolution du BRI en fonction du temps pour l'expérience avec matériaux uniformes.

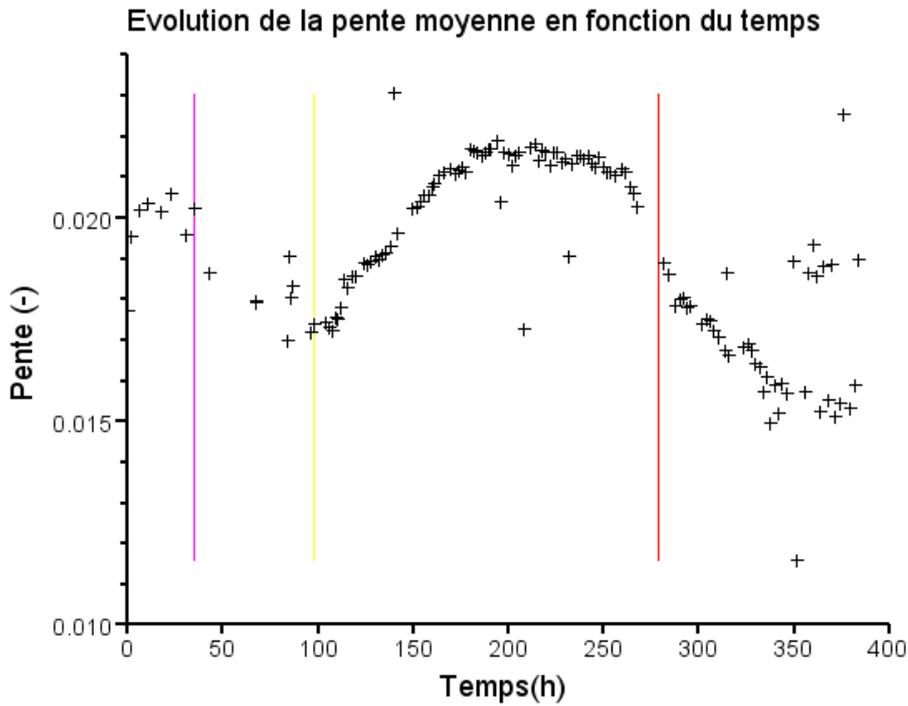


Figure 3.40. Evolution de la pente moyenne en fonction du temps pour l'expérience en granulométrie étendue.

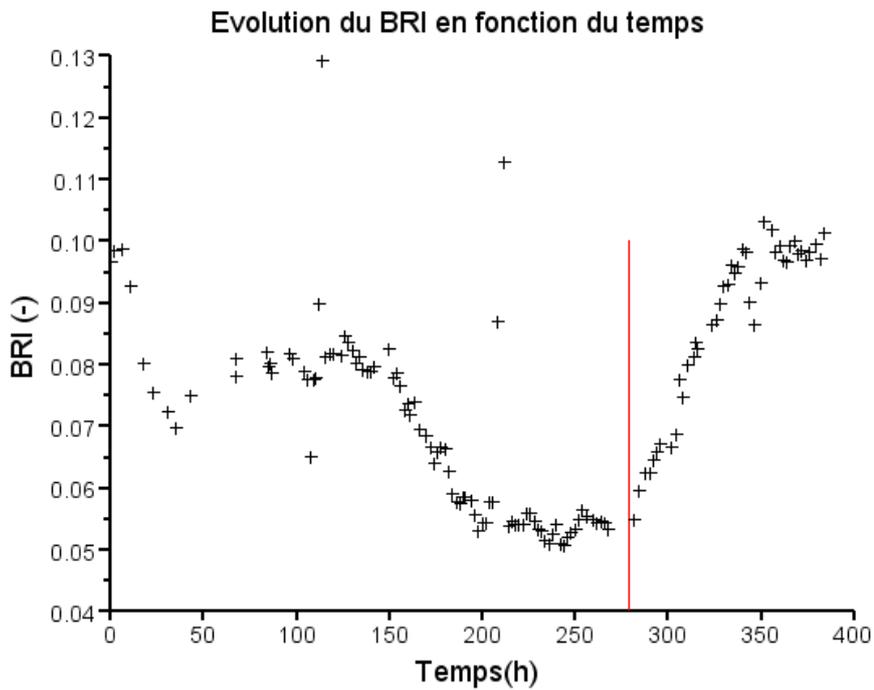


Figure 3.41. Evolution du BRI en fonction du temps pour l'expérience en granulométrie étendue.

En ce qui concerne l'équilibre, les résultats sont nuancés. La Figure 3.39 indique que le BRI obtenu à l'équilibre après une phase d'érosion est élevé alors que la Figure 3.41 indique que le BRI obtenu après une phase d'aggradation est faible. Cela pourrait être dû à la raison évoquée ci-dessus, un lit en équilibre issu de l'érosion gardant la « trace » du chenal incisé et des terrasses latérales marquées.

Un second indicateur est donc nécessaire à ce stade pour quantifier le degré de tressage du lit. Parmi les pistes testées, une procédure automatique de comptage des bancs, basée sur l'analyse d'images, est en cours de tests.

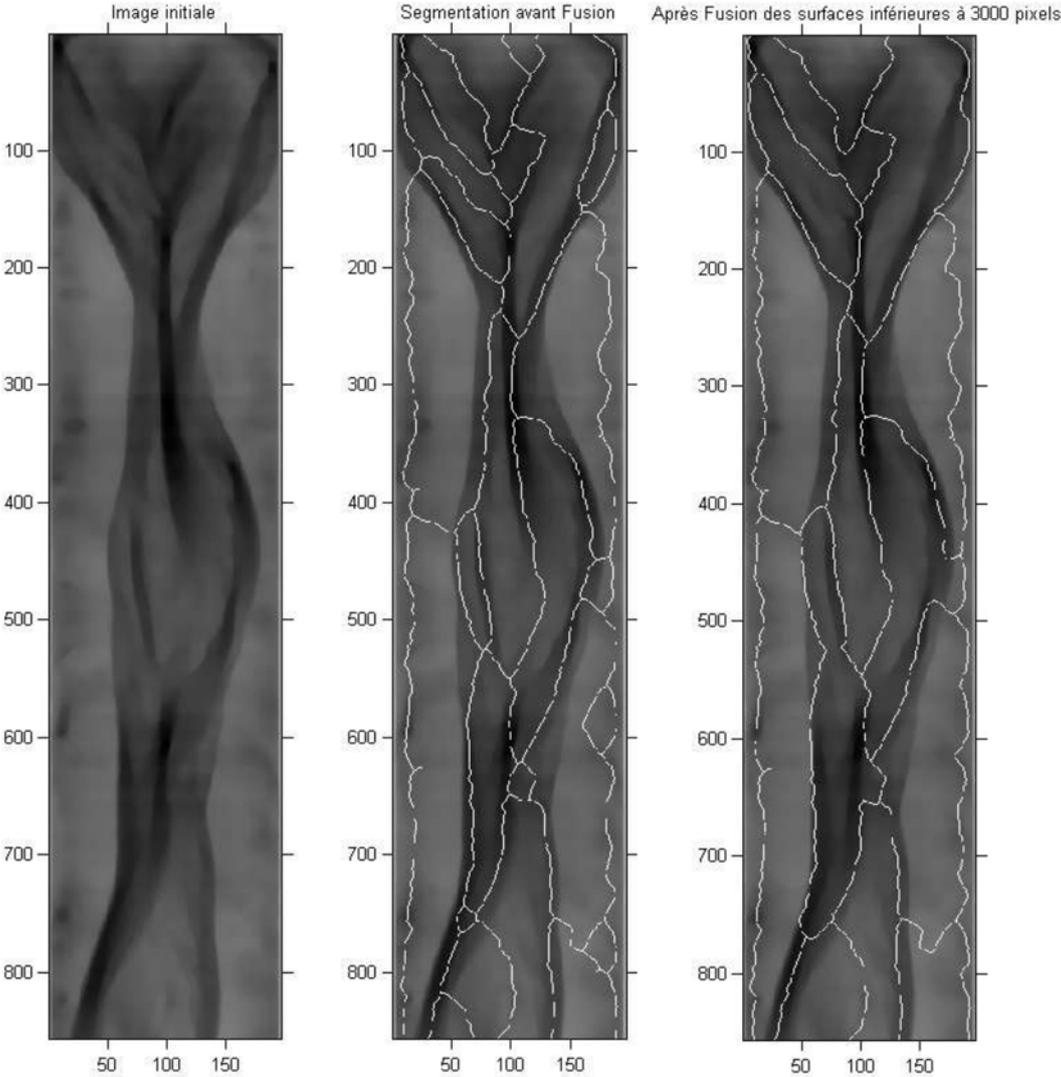


Figure 3.42. Délimitation des bancs par analyse d'images.

A. DEUX TYPES DE STRUCTURES THERMIQUES

Deux types de structures thermiques estivales sont mis en évidence. Le premier montre une très faible variabilité thermique spatiale tout au long de la journée (la distribution spatiale de la température est similaire à celle du tronçon B de la Figure 4.43). La plupart des cours d'eau de ce type ont un régime hydrologique proglaciaire avec des débits estivaux élevés. Les différentes masses d'eau sont ainsi bien connectées entre elles, ce qui tend à homogénéiser la température de l'eau. Nos résultats sont en accord avec ceux d'Arscott et al. (2001) qui observent une plus faible hétérogénéité thermique dans les cours d'eau les plus en amont. Cependant, des différences existent très localement. Elles ne concernent que de très faibles étendues spatiales telles des petits chenaux déconnectés, des mares ou des chenaux alimentés par des *upwellings* hyporhéiques. Dans un secteur en tresses du Val Roseg (cours d'eau glaciaire des Alpes Suisses), d'autres auteurs signalent d'importantes hétérogénéités thermiques (Malard et al., 2001 ; Uehlinger et al., 2003 ; Tonolla et al., 2010) liées à des connexions avec des eaux phréatiques et hyporhéiques (Ward et al., 1999 ; Malard et al., 2001). Ces importantes connexions avec les eaux souterraines rapprochent plutôt le Val Roseg de notre second type thermique décrit ci-après bien qu'il soit caractérisé par un régime proglaciaire. Ce site revête ainsi un caractère assez exceptionnel.

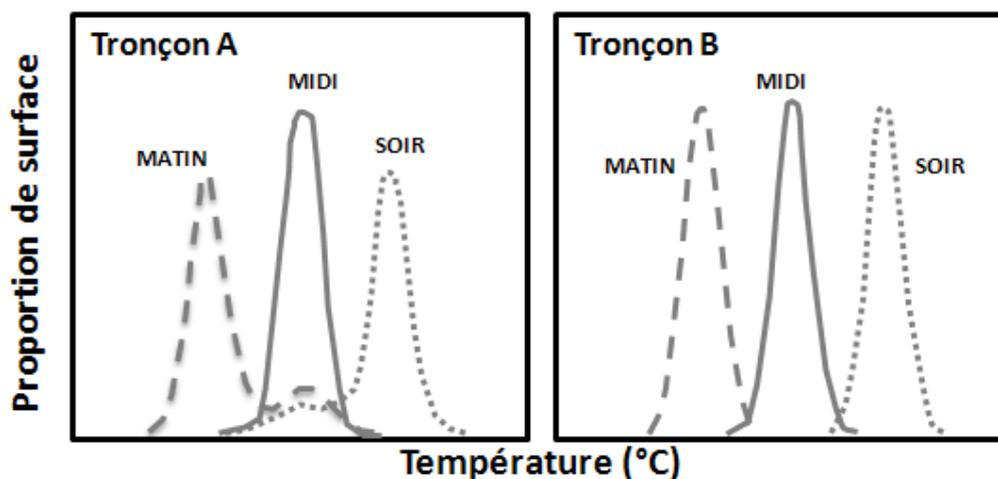


Figure 4.43. Évolution intra-journalière de la distribution spatiale de la température de l'eau pour deux tronçons fluviaux. Notez les distributions bimodales du tronçon A le matin et le soir.

Le second type présente une variabilité thermique élevée avec des changements au cours de la journée. L'hétérogénéité est forte en début de matinée, diminue jusqu'à midi, augmente durant l'après-midi pour finalement atteindre un maximum le soir. Les tronçons de ce type sont caractérisés par une importante diversité de types de chenaux en basses eaux. Cela est également observé par Belletti et al. (2012). La température du chenal principal et des chenaux connectés avec celui-ci varie avec la température de l'air durant la journée. En revanche, la température de chenaux n'ayant pas de connexion amont avec le chenal principal est relativement constante au cours de la journée (la

distribution spatiale de la température du tronçon est similaire à celle du cas A de la Figure 4.43). Comme le suggèrent Belletti et al. (2012), ces chenaux sont très probablement alimentés par des eaux souterraines hyporhéiques ou phréatiques. D'autres auteurs observent également de telles anomalies froides dans des rivières en tresses pour des masses d'eau ayant des connexions avec les eaux souterraines (Mosley, 1983 ; Arscott et al., 2001).

B. HETEROGENEITE THERMIQUE ET DIVERSITE DES HABITATS

Il est possible d'évaluer l'hétérogénéité thermique d'un cours d'eau en se fondant sur l'heure et la diversité des habitats aquatiques, notamment la proportion de mares et de chenaux alluviaux et phréatiques (Figure 4.44). Les anomalies thermiques sont plutôt chaudes le matin, alors qu'elles sont froides l'après-midi (Figure 4.44a). Plus la proportion de mares, chenaux alluviaux et phréatiques est élevée, plus celle des zones présentant des anomalies thermiques est importante (Figure 4.44b). Il est ainsi possible de se passer de l'imagerie IRT au premier ordre. Ces résultats peuvent être utiles aux gestionnaires qui pourront identifier des zones à forts potentiels de diversité thermique sans avoir à utiliser des images thermiques. En effet, nous ne disposons pas d'une couverture thermique régionale ou nationale, comme c'est le cas avec les photographies aériennes de la BD ORTHO® ou les images *Google Earth*. De plus, en France, les débits horaires sont facilement accessibles pour de nombreux cours d'eau via la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr>). En s'appuyant sur des données de débits et des photographies aériennes, il est ainsi possible de déterminer si les tronçons concernés ont une diversité d'habitats aquatiques élevée.

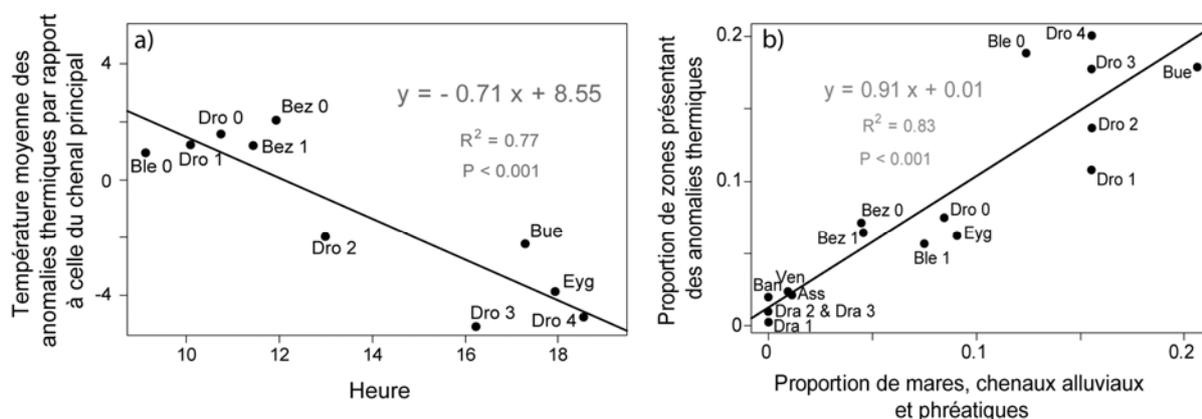


Figure 4.44. Température moyenne des anomalies thermiques par rapport à celle du chenal principal en fonction de l'heure (a). Proportion de zones présentant des anomalies thermiques en fonction de la proportion de mares, chenaux alluviaux et phréatiques.

Cette diversité peut être estimée grâce à l'indice de Shannon qui est facilement calculable. Les suivis répétés (résultats de cette partie et ceux de Belletti et al. (2012)) montrent que, dans le cas des tronçons présentant une importante hétérogénéité thermique, l'indice de diversité de Shannon est relativement constant pour une fréquence de débit $F(Q)$ donnée (Figure 4.45). Cette convergence donne plus de robustesse aux recommandations émises. Ces résultats pourraient avoir des implications opérationnelles dans le cadre de la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau de

l'Union Européenne pour cibler des tronçons à restaurer ou à préserver en se basant sur l'identification précédente des zones potentiellement intéressantes au niveau écologique.

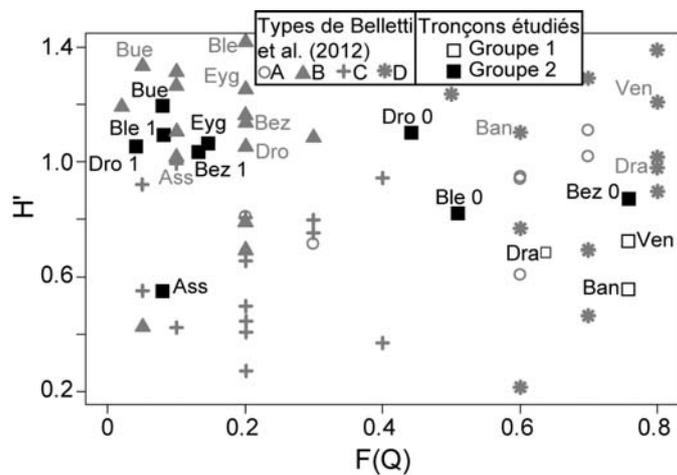


Figure 4.45. Relation entre la fréquence de débit ($F(Q)$) et l'indice de diversité aquatique de Shannon (H'). Les données en gris sont celles de Belletti et al., (2012).

CHAPITRE IV - CONCLUSIONS DE LA TROISIEME ANNEE ET PERSPECTIVES

CHAPITRE IV - CONCLUSIONS DE LA TROISIEME ANNEE ET PERSPECTIVES	63
Partie 1. Caractérisation des habitats et paysages riverains	64
A. Conclusions.....	64
B. Quelques indications opérationnelles	65
Partie 2. Spécificités et structure de la diversité des invertébrés dans les rivières en tresses.....	66
A. Prévisionnel 2013.....	66
Partie 3. Etude sur modèle physique de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses.....	67
A. Conclusions et perspectives	67
Partie 4. Thermie des rivières en tresses.....	68
A. Perspectives.....	68

A. CONCLUSIONS

1 . L'analyse synthétique 1950-2000

En ce qui concerne l'évolution du paysage riverain dans sa totalité, les rivières étudiées sont pour la plupart affectées par un déficit sédimentaire qui se traduit par des rivières plus étroites et incisées par rapport au siècle dernier (Chapitre III - Résultats). L'analyse de la dynamique latérale des tronçons en tresses sur 50 ans (1950-2000, patron d'élargissement et de rétraction) a permis de valider le gradient fluvial précédemment identifié dans le travail conduit par Liébault et al. (sous presse) sur les ajustements verticaux. Sur ce gradient, les tronçons déliquescents, situés principalement au nord de la zone d'étude (Alpes Internes et du Nord), à faible dynamique, s'opposent aux tronçons situés au sud, plus stables, voire localement encore actifs et aujourd'hui plus larges qu'en 1950. Dans le Sud du bassin, 2 types de comportements différents sont observés (ouest versus est), avec les tronçons les plus actifs dans le bassin de la Durance. De plus, à l'Est (i.e. rive gauche de la Durance), les végétaux riverains semblent s'installer plus difficilement. Une différence climatique, bien que mineure, ainsi qu'une dynamique sédimentaire et une puissance fluviale (pente) différente, semblent expliquer cette configuration. En effet, à l'Est, le climat méditerranéen, combiné à une charge solide plus mobile et abondante, semble limiter le développement et la stabilisation de la végétation, même si ces tronçons sont caractérisés par une nappe phréatique superficielle (cf. rapport année 1).

En règle générale l'évolution latérale des tronçons semble s'expliquer par le patron des crues et en particulier celui relatif à la crue de récurrence décennale. Plus l'intervalle qui sépare l'observation de la dernière crue décennale est grand, plus les tronçons sont étroits. Toutefois, si l'opposition nord-sud est cohérente avec l'historique des crues, l'élargissement enregistré dans le sud-est semble s'expliquer en grande partie par la dynamique sédimentaire (tronçons exhausés).

2 . L'évolution des 12 sites en multi-dates

L'analyse temporelle fine de la dynamique d'un sous échantillon montre, à nouveau, que la crue de récurrence décennale semble être morphologiquement la plus significative. De plus, cette analyse montre que :

- l'élargissement n'est pas systématique après une crue importante, notamment si le tronçon n'a pas encore réagi par rétraction à une crue précédente ou si les apports sédimentaires se tarissent et limitent sa capacité érosive.
- les affluents de l'est de la Durance sont les plus réactifs latéralement sans doute en raison d'une alimentation sédimentaire encore importante et un faible impact anthropique sur cette charge en transit.

Les tronçons en tresses, à l'échelle du bassin du Rhône, montrent globalement une évolution de leur patron bio-géomorphologique et un basculement vers des conditions moins dynamiques (augmentation de la densité d'îles, végétalisation généralisée). Cependant il existe une variabilité géographique de cette évolution. Ainsi, les tronçons situés au Sud se distinguent avec des tronçons de l'Ouest qui, grâce à une plus faible dynamique sédimentaire et à un climat favorable, semblent présenter les conditions nécessaires au développement de la végétation dans la bande active, conditions qui ne semblent pas se réaliser pour les tronçons de l'est.

B. QUELQUES INDICATIONS OPERATIONNELLES

En deuxième année, nous avons fourni des indications relatives aux sites clé en matière d'habitats aquatiques. Les résultats de cette troisième année permettent de formuler des recommandations concernant le corridor fluvial et les milieux riverains.

Au niveau des tronçons du sud, deux situations se présentent. D'un côté les tronçons du sud-est sont encore actifs et réactifs aux crues. Ainsi compte tenu de la production sédimentaire du bassin, ils sont capables de modeler une mosaïque d'habitats, terrestres et aquatiques, typique de tronçons en tresses. Ces tronçons sont ainsi de très bons candidats pour la conservation de ce style fluvial en voie de disparition dans la zone alpine compte tenu d'apports sédimentaires encore abondants, d'un régime hydrologique encore très naturel, et de la possibilité pour la rivière de divaguer latéralement.

Dans le corridor rhodanien, l'évolution récente associée à des conditions locales particulières (moins sédiments, climat plus humide), a favorisé le développement de la végétation et donc le développement d'un patron de tressage dans lequel les îles végétalisées sont une partie intégrante de la mosaïque du paysage. Pour préserver ce type de tronçons, il est essentiel de garantir un patron de crues naturel, qui favorise l'autorégulation de la croissance de la végétation, et de maintenir un transit sédimentaire actif afin d'éviter que les rivières, en déficit de sédiment, s'incisent et se rétrécissent. La conservation d'une forêt sur les marges de ces rivières peut aussi potentiellement favoriser des habitats pionniers, grâce à l'apport de bois mort dans la bande active, et contribuer à la diversité de la mosaïque paysagère. Sur les sites où la végétation se développe avec difficulté (i.e. dans le sud-est), la composition et la structure de la communauté végétale nécessiterait des relevés in situ afin de savoir s'ils présentent des spécificités intéressantes en termes de conservation.

En ce qui concerne les tronçons des Alpes du nord, incisés, rétrécis et à faible dynamique, il s'agit d'engager une réflexion sur le type de gestion à promouvoir et sur leur restauration potentielle. En l'état actuel, il convient de se demander quelles sont les pressions anthropiques affectant ces tronçons afin de savoir s'ils sont capables de se réactiver passivement si ces pressions deviennent moins fortes (exceptions : la Dranse, le Giffre). Dans ces secteurs, les bassins versants ont encore une production sédimentaire abondante qui pourraient permettre que ce style fluvial existe mais les sédiments n'arrivent sans doute pas jusqu'aux tronçons concernés.

PARTIE 2. SPECIFICITES ET STRUCTURE DE LA DIVERSITE DES INVERTEBRES DANS LES RIVIERES EN TRESSES

Rédacteurs : F. Malard, T. Datry, C. Capderrey

A. PREVISIONNEL 2013

- 1 . Objectif 1: Influence des écoulements hyporhéiques sur la diversité et la distribution des peuplements d'invertébrés

Publication des résultats et achèvement des identifications au niveau spécifique.

- 2 . Objectif 2: Influence de la structure géomorphologique des rivières en tresse sur la diversité génétique des populations

Il s'agira de terminer les analyses génétiques et notamment de: 1) réaliser l'étude des différenciations intra et inter-sites dans les zones de plaine et de montagne; 2) définir les limites d'utilisation spatiale des microsatellites sur l'ensemble de l'aire de distribution de *Proasellus walteri*.; 3) publier les résultats (2 articles en prévision).

- 3 . Objectif 3 : Influence de la dynamique des habitats sur la diversité des peuplements d'invertébrés terrestres des rivières en tresse

Il s'agira de terminer les analyses des données, prévues en janvier et février 2013.

Coordinateur : Alain Recking

Contributeurs : P. Leduc, H. Bellot, A. Recking, M. Naaim, A. Mours, L. Richard

A. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats présentés dans ce rapport sont des résultats intermédiaires de la thèse de Pauline Leduc. Une quantité importante de données a été produite. Nous entrons maintenant dans une phase d'analyse qui va se poursuivre jusqu'à septembre 2013 (data de soutenance). Les principaux points présentés sont rappelés ci-après.

Une adaptation de la méthode de Moiré a été proposée, pour mesurer la topographie du lit sur un canal de grande dimension. Cette technique peu onéreuse permet de produire des MNT avec une précision millimétrique.

Les expériences sur les bancs en granulométrie étendue ont montré que les bancs étaient fixes (pour des conditions hydrauliques constantes), mais par contre que la mouille associée pouvait migrer longitudinalement et de façon quasi périodique, en association avec un raidissement du front de banc. Des phases de stockage et de déstockage ont également été mises en évidence, en association avec une évolution de la taille du chenal principal et de la granulométrie. Le tri granulométrique est favorisé par un transport préférentiel de chaque taille de grain en fonction de la compétence de l'écoulement : l'écoulement principal assure le transfert des éléments grossiers vers les têtes de bancs alors que les écoulements secondaires assurent un transfert des sédiments fins latéralement et dans le chenal principal.

Les expériences de lit en tresses ont permis de retrouver beaucoup des observations décrites pour les bancs. Des différences de morphologies (trous d'érosion, forme des bancs) ont pu être observées entre les tresses produites avec des matériaux uniformes et des matériaux à granulométrie étendue. L'analyse des BRI a montré que l'aggradation est accompagnée d'une diminution du BRI (moins de « relief ») et que l'érosion est accompagnée d'une augmentation du BRI.

En ce qui concerne l'équilibre les résultats sont nuancés puisqu'un équilibre issu d'une phase d'érosion a un BRI élevé alors qu'un équilibre issu d'une phase d'aggradation a un BRI faible. Cela s'explique par la persistance de terrasses et d'incisions du lit. Un second indicateur serait nécessaire à ce stade pour quantifier le degré de tressage du lit à l'équilibre.

On espère à l'issue de cette recherche, pouvoir proposer des clés d'analyse permettant de juger de l'état d'équilibre d'un lit en tresse.

Toutes ces expériences permettront également de tester les lois de transport solide existantes, et éventuellement de proposer des adaptations de ces dernières pour les écoulements en tresses.

A. PERSPECTIVES

Nos observations datent de 2010-2011 et celles de Belletti et al. (2012) de 2002-2006. Ces deux suivis sont récents. Nous proposons d'évaluer cette diversité sur le plus long terme. Une étude diachronique pourrait ainsi être réalisée en utilisant les photographies aériennes anciennes, la BD ORTHO®, les images *Google Earth* et des données satellites à haute résolution spatiale. Cela permettrait de savoir si les secteurs alimentés par les eaux souterraines varient au cours du temps ou s'il existe des zones ayant toujours des alimentations phréatiques-hyporhéiques.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1. LOCALISATION DES TRONÇONS D'ETUDE.	15
FIGURE 1.2. DISTRIBUTION DES TRONÇONS AU SEIN DE 5 BASSINS HYDROGRAPHIQUES INTERESSES.....	16
FIGURE 1.3. REPRESENTATION DES ILES MATURES ET PIONNIERES.	18
FIGURE 1.4. EXEMPLE DE MOSAÏQUE DE SUPERPOSITION (<i>OVERLAY</i>) ET UNITES DE PAYSAGE IDENTIFIEES.	19
FIGURE 3.5. SCHEMA DU CANAL.	22
FIGURE 3.6. DEFORMATION DES FRANGES.	23
FIGURE 3.7. MISE EN PLACE DE LA METHODE DE MOIRE.	23
FIGURE 3.8. CALES DE CALIBRATION ET DE REFERENCE.	24
FIGURE 3.9. SCHEMA DE PRINCIPE DE LA CONSTRUCTION DU PLAN DE REFERENCE VIRTUELLE.....	24
FIGURE 3.10. EXEMPLE D'UNE TOPOGRAPHIE COMPLETE.....	24
FIGURE 4.11. LE DRONE DRELIO DEVANT LE TRONÇON DU BEZ (A GAUCHE) ET LE PARA-MOTEUR (A DROITE, PHOTO PLATEFORME ISIG).	26
FIGURE 1.12. VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE (%AC) AU SEIN DU BASSIN RHODANIEN ; LES LIGNES ROUGES POINTILLEES SEPARANT LES TRONÇONS DU NORD ET DU SUD ET LES TRONÇONS DU SUD-OUEST ET DU SUD-EST.....	29
FIGURE 1.13. (A) TYPOLOGIE DE TRONÇONS EN TRESSSES BASEE SUR LES FACTEURS DE CONTROLE. (B) CARACTERISTIQUES DES TYPES DE TRONÇONS EN TRESSSES AU REGARD DES FACTEURS DE CONTROLE SUIVANTS : ALTITUDE ET PENTE MOYENNES, LARGEUR DE BANDE ACTIVE NORMALISEE (W^*), NOMBRE DE MOIS DEPUIS LA DERNIERE CRUE DE RECURRENCE DECENNALE (Q_{10}), VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE (AC) ENTRE 1950 ET 2000.	31
FIGURE 1.14. RELATION ENTRE LA VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE (AC) ET LE NOMBRE DE MOIS DEPUIS LA DERNIERE CRUE DE RECURRENCE DECENNALE (Q_{10}).	31
FIGURE 1.15. CARACTERISTIQUES DES ILES ENTRE 1950 ET 2000. A PARTIR D'EN HAUT A GAUCHE : PROPORTION D'ILES DANS LA BANDE FLUVIALE (ISLAND/TA ; %), DENSITE D'ILES DANS LA BANDE ACTIVE (IS.DENSITY ; N/KM ²), PROPORTION D'ILES MATURE (FISLAND ; %), DENSITE D'ECOTONES (EC.DENSITY ; M/KM ²).	32
FIGURE 1.16. (A) RELATION ENTRE LA DENSITE (ISLAND DENSITY ; N/KM ²) ET LA PROPORTION (ISLAND/TA ; %) D'ILES DANS LA BANDE FLUVIALE, AVEC LAQUELLE ONT ETE CALCULES LES RESIDUS EN (B) ET (C). (A), (B) ET (C) INDIQUENT LES 3 TYPES DE PATRON DE TRESSAGE IDENTIFIES EN FONCTION DE LA COMPOSANTE EN ILES. (B) GAMME DE VALEURS DES RESIDUS EN 2000 ENTRE TRONÇONS DU SUD DE LA ZONE D'ETUDE, SITUES A L'OUEST ET A L'EST DE LA DURANCE. (C) CARACTERISTIQUES DES TRONÇONS A L'OUEST ET A L'EST DE LA DURANCE EN TERMES D'ACTIVITE (PENTE, ALTITUDE ET W^*), D'HISTOIRE HYDROLOGIQUE (Q_{10}) ET DE DYNAMIQUE LATERALE (VARIATION AC).....	33
FIGURE 1.17. LE NOMBRE DE CRUES (SELON LE TEMPS DE RETOUR) PAR PERIODE (1 A 4) POUR CHAQUE TRONÇON. LES PERIODES MARQUEES AVEC UN ASTERISQUE (*) SONT INCERTAINES. POUR LE ROUBION « ? » CORRESPOND A LA CRUE DE 1994 POUR LAQUELLE AUCUNE DONNEE HYDROLOGIQUE N'EST DISPONIBLE.....	34
FIGURE 1.18. LES TYPES RESULTANT DE L'ANALYSE HIERARCHIQUE CONSTRUITE SUR LES RESULTATS D'UNE ACP (LES 2 PREMIERS FACTEURS ONT ETE RETENUS). (A) LES CARACTERISTIQUES PAYSAGERES DES TYPES : VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ENTRE DEUX DATES (ACVAR) ; RESIDUS DE LA RELATION ENTRE DENSITE ET PROPORTION D'ILES DANS LA BANDE FLUVIALE (REIS ; CF. PARTIE 1-A-2 DE CE CHAPITRE) ; VARIATION EN POURCENTAGE DE LA PROPORTION DES MARGES PIONNIERES ENTRE DEUX DATES (PM) ; RATIO ENTRE SURFACES VEGETALISEES ET ERODEES ENTRE 2 DATES (VA/EA) ; RATIO ENTRE LA SURFACE DES	

NOUVELLES ILES COMPAREE A LA SURFACE DES ILES STABLES ENTRE DEUX DATES (NIS/SIS). (B) LES CARACTERISTIQUES DES TYPES EN TERMES DE FACTEURS DE CONTROLE : NOMBRE DE MOIS DEPUIS LA DERNIERE CRUE QUINQUENNALE (Q5) ET DECENNALE (Q10) ; DUREE, EN NOMBRE DE JOURS, DES EVENEMENTS DE MAGNITUDE SUPERIEURE A Q2 (N.JOURSQ>Q2) ; REGIME SEDIMENTAIRE (MOYW* ; D'APRES PIEGAY ET AL., 2009 ET BELLETTI ET AL., 2012).	39
FIGURE 1.19. (A) CERCLE DES CORRELATIONS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES EFFECTUEE SUR LES VARIABLES DU PAYSAGE (ACVAR, VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ENTRE DEUX DATES ; REIS, RESIDUS DE LA RELATION ENTRE DENSITE ET PROPORTION D'ILES DANS LA BANDE FLUVIALE, CF. PARTIE 1-A-2 DE CE CHAPITRE ; VA/EA, RATIO ENTRE SURFACES VEGETALISEES ET ERODEES ENTRE 2 DATES ; NIS/SIS RATIO ENTRE LA SURFACE DES NOUVELLES ILES COMPAREE A LA SURFACE DES ILES STABLES ENTRE DEUX DATES), SUR LAQUELLE ONT ETE OBTENUS LES 5 TYPES DE L'ANALYSE HIERARCHIQUE (FIGURE 1.18). (B) EVOLUTION DE LA MOSAÏQUE PAYSAGERE DANS LE TEMPS POUR CHAQUE TRONÇON. N = TRONÇONS DU NORD DE LA ZONE D'ETUDE ; HM = TRONÇONS DE HAUTE MONTAGNE ; S-W = TRONÇONS DU SUD-OUEST (CORRIDOR RHODANIEN) ; S-E = TRONÇONS DU SUD-EST (BASSIN DURANCIEN). (C) CLEF DE LECTURE POUR L'INTERPRETATION DE L'EVOLUTION PAYSAGERE DES TRONÇONS ETUDIES.	41
FIGURE 2.20. RICHESSE TAXONOMIQUE ET ABONDANCE (LOGARITHME) DES PEUPELEMENTS D'INVERTEBRES DANS LA ZONE HYPORHEIQUE DES RIVIERES EN TRESSE MONTRANT UNE RICHESSE ET DES ABONDANCES MAXIMALES A L'AMONT DES BANCS DE GRAVIER DANS LES SECTEURS CONTRAINTS (BOITES GRISEES) POUR DES GROUPES AUSSI DIVERS QUE LES EPHEMERES, PLECOPTERES ET TRICHOPTERES (EPT), LES TAXONS SOUTERRAINS (STYGOBIES), LES OLIGOCHETES, LES CHIRONOMIDES ET LES CYCLOPOIDES.....	43
FIGURE 2.21. EVOLUTION DES HABITATS TERRESTRES D'UN SECTEUR TEMPORAIRE DE L'ASSE AU COURS DES 10 DERNIERES ANNEES.....	44
FIGURE 2.22. AGE DES HABITATS SUR LES SECTEURS PERENNES ET TEMPORAIRES SELECTIONNES.....	45
FIGURE 3.23. GABARIT DE MESURE (VISUELLE) DE LA GRANULOMETRIE DE SURFACE.....	46
FIGURE 3.24. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN LIT EN BANCS ALTERNES.....	47
FIGURE 3.25. (A) LIT PAVE (AVEC CHENAL PRINCIPAL PEU INDIVIDUALISE) ET (B) LIT DEPAVE (AVEC CHENAL PRINCIPAL ENCAISSE).....	47
FIGURE 3.26. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'EVOLUTION (CYCLIQUE) DU FONT DES BANCS.....	48
FIGURE 3.27. MECANISME DE SEGREGATION AU NIVEAU DE LA POOL.....	49
FIGURE 3.28. BANCS ALTERNES SUR LE DRAC A FOREST SAINT JULIEN.....	49
FIGURE 3.29. VARIATION DE LA PENTE (M/M), DU TRANSPORT SOLIDE (G/S) ET DE LA LARGEUR D'ECOULEMENT (CM) EN FONCTION DU TEMPS.....	50
FIGURE 3.30. VARIATION DE LA LARGEUR EN FONCTION DE LA PENTE DU LIT (LES POINTS SITUES ENTRE LES DEUX DROITES REPRESENTENT 80% DE L'ECHANTILLON).....	51
FIGURE 3.31. LE TRANSPORT SOLIDE EXPRIME EN FONCTION DE LA LARGEUR, SANS DEPHASAGE (SYMBOLE = POINT)ET AVEC UN DEPHASAGE DE 150 MINUTES (SYMBOLE= CROIX).....	51
FIGURE 3.32. LARGEUR DE L'ECOULEMENT ACTIF DE LA SECTION AVAL (DU BANC) EN FONCTION DE LA SECTION AMONT (DU BANC).....	52
FIGURE 3.33. LARGEUR DE L'ECOULEMENT EN FONCTION DE L'INDICE DE PAVAGE POUR LA SECTION 4 (AVAL).....	53
FIGURE 3.34. LITS EN TRESSES PRODUITS AVEC DES SEDIMENTS UNIFORMES.....	54
FIGURE 3.35. LITS EN TRESSES PRODUITS AVEC UNE GRANULOMETRIE ETENDUE.....	54
FIGURE 3.36. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA SEGREGATION AU NIVEAU DES BANCS.....	55

FIGURE 3.37. EXEMPLE DE MNT PRODUIT PAR LA METHODE DE MOIRE (COTE EN MM).....	56
FIGURE 3.38. EVOLUTION DE LA PENTE MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS POUR L'EXPERIENCE AVEC MATERIAUX UNIFORMES.....	57
FIGURE 3.39. EVOLUTION DU BRI EN FONCTION DU TEMPS POUR L'EXPERIENCE AVEC MATERIAUX UNIFORMES.....	57
FIGURE 3.40. EVOLUTION DE LA PENTE MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS POUR L'EXPERIENCE EN GRANULOMETRIE ETENDUE.....	58
FIGURE 3.41. EVOLUTION DU BRI EN FONCTION DU TEMPS POUR L'EXPERIENCE EN GRANULOMETRIE ETENDUE.....	58
FIGURE 3.42. DELIMITATION DES BANCS PAR ANALYSE D'IMAGES.....	59
FIGURE 4.43. ÉVOLUTION INTRA-JOURNALIERE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU POUR DEUX TRONÇONS FLUVIAUX. NOTEZ LES DISTRIBUTIONS BIMODALES DU TRONÇON A LE MATIN ET LE SOIR.....	60
FIGURE 4.44. TEMPERATURE MOYENNE DES ANOMALIES THERMIQUES PAR RAPPORT A CELLE DU CHENAL PRINCIPAL EN FONCTION DE L'HEURE (A). PROPORTION DE ZONES PRESENTANT DES ANOMALIES THERMIQUES EN FONCTION DE LA PROPORTION DE MARES, CHENAUX ALLUVIAUX ET PHREATIQUES.....	61
FIGURE 4.45. RELATION ENTRE LA FREQUENCE DE DEBIT (F(Q)) ET L'INDICE DE DIVERSITE AQUATIQUE DE SHANNON (H'). LES DONNEES EN GRIS SONT CELLES DE BELLETTI ET AL., (2012).....	62

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1.1. CARACTERISTIQUES DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES COULEUR ET NOIR ET BLANC ADDITIONNELLES UTILISEES POUR L'ANALYSE MULTI-TEMPORELLE DES DOUZE SITES. (2X) INDIQUE QUE DEUX CLICHES ONT ETE UTILISES POUR L'ANNEE DONNEE.....	18
TABLEAU 1.2. LE NOMBRE DE JOURS DURANT LESQUELS, POUR UNE PERIODE DONNEE, LE DEBIT DEPASSE LE DEBIT DE RECURRENCE DECENNALE (Q2). LE NOMBRE D'ANNEES CORRESPONDANT A CHAQUE PERIODE EST AUSSI INDIQUE : PERIODE 1 = DE 1950 A 1970 ENVIRON ; PERIODE 2 = DE 1970 A 1980 ENVIRON ; PERIODE 3 = DE 1980 A 1990 ; PERIODE 4 = DE 1990 A 2000 ENVIRON). LES ASTERISQUES INDIQUENT LES DONNEES INCERTAINES.....	35
TABLEAU 1.3. LES VALEURS DU COEFFICIENT DE SPEARMAN CALCULEES ENTRE VARIABLES DE REPONSE ET FACTEURS DE CONTROLE. EN GRAS LES RELATIONS POUR LESQUELLES LA SIGNIFICATIVITE CORRESPOND A P-VALUE = 0,1 ; AVEC L'ASTERISQUE SONT INDIQUEES LES RELATIONS LES PLUS SIGNIFICATIVES (P-VALUE<0,05). LES VARIABLES DE REPONSE CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE RIVERAIN : LA VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ENTRE DEUX DATES (ACVAR) ; LES RESIDUS DE LA RELATION ENTRE DENSITE ET PROPORTION D'ILES DANS LA BANDE FLUVIALE (REIS ; CF. PARTIE 1-A-2 DE CE CHAPITRE) ; LA VARIATION EN POURCENTAGE DE LA PROPORTION DES MARGES PIONNIERES ENTRE DEUX DATES (PM) ; LE RATIO ENTRE SURFACES VEGETALISEES ET ERODEES ENTRE 2 DATES (VA/EA) ; LE RATIO ENTRE LA SURFACE DES NOUVELLES ILES COMPAREE A LA SURFACE DES ILES STABLES ENTRE DEUX DATES (NIS/SIS). LES FACTEURS DE CONTROLE : LE NOMBRE DE MOIS DEPUIS LA DERNIERE CRUE, POUR TOUS LES TEMPS DE RETOUR (Q2 A Q>50) ; LA DUREE, EN NOMBRE DE JOURS, DES EVENEMENTS DE MAGNITUDE SUPERIEURE A Q2 (N.JOURSQ>Q2) ; LE REGIME SEDIMENTAIRE (MEAN W* ; D'APRES PIEGAY ET AL., 2009 ET BELLETTI ET AL., 2012).....	35
TABLEAU 1.4. RESUME DES ANALYSES DE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE EFFECTUEES ENTRE LES VARIABLES DE REPONSE ET LES FACTEURS DE CONTROLE. LES VARIABLES DE REPONSE CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE RIVERAIN : LA VARIATION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE ENTRE DEUX DATES (ACVAR) ; LES RESIDUS DE LA RELATION ENTRE DENSITE ET PROPORTION D'ILES DANS LA BANDE FLUVIALE (REIS ; CF. PARTIE 1-A-2 DE CE CHAPITRE) ; LE RATIO ENTRE SURFACES VEGETALISEES ET ERODEES ENTRE 2 DATES (VA/EA) ; LE RATIO ENTRE LA SURFACE DES NOUVELLES ILES COMPAREE A LA SURFACE DES ILES STABLES ENTRE DEUX DATES (NIS/SIS). LES FACTEURS DE CONTROLE : LE NOMBRE DE MOIS DEPUIS LA DERNIERE CRUE DE RECURRENCE DECENNALE	

(Q10) ; LA DUREE, EN NOMBRE DE JOURS, DES EVENEMENTS DE MAGNITUDE SUPERIEURE A Q2 (N.JOURSQ>Q2) ;
LE REGIME SEDIMENTAIRE (MOYW* ; D'APRES PIEGAY ET AL., 2009 ET BELLETTI ET AL., 2012). LES ASTERISQUES
INDIQUENT LA SIGNIFICATIVITE DES REGRESSIONS.38

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

“Habitats”

Belletti B., Dufour S., Piégay H. (2012). Regional variability of aquatic pattern in braided reaches (example of the French Rhône basin). *Hydrobiologia* DOI:10.1007/s10750-012-1279-6.

Guiot J (1986). Sur la détermination de régions climatiques quasi-homogènes. *Revue de statistique appliquée* 34(2):15-34.

Gurnell AM, Petts GE, Hannah DM, Smith BPG, Edwards PJ, Kollmann J, Ward JV, Tockner K (2001). Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 26:31-62.

Liébault F, Lilius-Tacon S, Cassel M, Talaska N (sous presse). Long profile responses of alpine braided rivers in SE France. *River Research and Applications*.

Piégay H, Alber A, Slater L, Bourdin L (2009). Census and typology of braided rivers in French Alps. *Aquatic Sciences* 71:371-388.

Pujol N, Neppel L, Sabatier R. (2007). Approche régionale pour la détection de tendances dans des séries de précipitations de la région méditerranéenne française. *Comptes Rendus Geoscience* 339: 651-658.

Toone J (2009). *Geomorphological discontinuities and ecological organisation: a case study of the River Drome*. Thèse de doctorat, 288 pp.

Vidal J-P, Martin E, Franchisteguy L, Baillon M, Soubeyroux J-M. 2010. A 50-year high resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30: 1627-1644.

“Etude sur modèle physique”

Ashmore PE (1988). Bedload transport in braided gravel bed stream models. *Earth Surface Processes and Landforms* 13:677-695.

Bertoldi W, Ashmore P, Tubino M (2009a). "A method for estimating the mean bed load flux in braided rivers." *Geomorphology* 103:330-340. DOI:10.1016/j.geomorph.2008.06.014.

Bertoldi W, Zanoni L, Tubino M (2009b). "Planform dynamics of braided streams." *Earth Surface Processes and Landforms* 34:547-557. DOI:10.1002/esp.1755.

Bertoldi W, Zanoni L, Tubino M (2010). "Assessment of morphological changes induced by flow and flood pulses in a gravel bed braided river: The Tagliamento River (Italy)." *Geomorphology* 114:348-360. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.07.017.

Bridge J (1993). The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. In: Best J.L., Bristow C.S. (eds), *Braided Rivers*, Geological Society Special Publication N°75:13-71.

- Bridge JS (1992). A revised model for water flow, sediment transport, bed topography and grain size sorting in natural river bends. *Water Resources Research* 28(4):999-1013.
- Eaton BC, Millar RG, Davidson S (sous presse). "Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread." *Geomorphology*. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.04.010.
- Fredsoe J (1978). Meandering and braiding of rivers. *Journal of Fluid Mechanics* 84:609-624.
- Hoey TB (1992). Temporal variations in bedload transport rates and sediment storage in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography* 16(3):319-338.
- Hoey TB, Sutherland AJ (1991). Channel morphology and bedload pulses in braided rivers: a laboratory study. *Earth Surface Processes and Landforms* 16:447-462.
- Hundey EJ, Ashmore PE (2009). Length scale of braided river morphology. *Water Resources Research* 45(W08409):1-9.
- Lane SN, Richards KS, Chandler JH (1995). Morphological estimation of the time-integrated bed load transport rate. *Water Resources Research* 31(3):761-772.
- Lanzoni S (2000). Experiments on bar formation in a straight flume 2. Graded sediment. *Water Resources Research* 36(11):33-51.
- Leopold LB, Wolman MG (1957). River channel patterns-braided, meandering and straight. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 282B:39-85.
- Lisle TE, Iseya F, Ikeda H (1993). Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: A flume experiment. *Water Resources Research* 29(11):3623-3630.
- Nicholas AP (2000). Modelling bedload yield in braided gravel bed rivers. *Geomorphology* 36:89-106.
- Nicholas AP, Sambrook Smith GH (1998). Relationships between flow hydraulics, sediment supply, bedload transport and channel stability in the proglacial Virkisa River, Iceland. *Geografiska Annaler* 80A:111-122.
- Piégay H, Alber A, Slater L, Bourdin L (2009). Census and typology of braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences* 71:371-388. DOI 10.1007/s00027-009-9220-4.
- Piegay H, Grant G, Nakamura F, Trustrum N (2006). Braided river management: from assessment of river behaviour to improved sustainable development. In: Sambrook-Smith GH, Best JL, Bristow CS, Petts GE (eds), *Braided Rivers : Process, Deposits, Ecology and Management*, Special publication 36 of the International Association of Sedimentologists, 257-275.
- Recking A (2006). *Etude expérimentale des effets du tri granulométrique sur le transport solide par charriage*. PhD Thesis Cemagref www.lyon.cemagref.fr/doc/these/recking/index.shtml, Lyon. 261 pp
- Recking A, Frey P, Paquier A, Belleudy P (2009). An experimental investigation of mechanisms responsible for bedload sheet production and migration. *J. Geophys. Res.* 114:F03010. DOI:10.1029/2008JF000990.

Recking A, Liébault F, Peteuil C (soumis). Testing several bed load transport equations with consideration of time scales. *Journal of Hydraulics Engineering*.

Schumm SA (1968). River adjustment to altered hydrologic regimen; Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. USGS prof. paper 598, 65pp.

Schumm S A, Khan HR (1972). Experimental Study of Channel Patterns. *Geological Society of America Bulletin* 83:1755-1770.

Schumm SA, Mosley MP, Weaver WE (1987). Alluvial river channels. *Experimental fluvial geomorphology*, Wiley-Science.

Warburton J (1996). Active braidplain width, bed load transport and channel morphology in a model braided river. *Journal of Hydrology (NZ)*, 35(2):259-285.

Warburton J, Davies T (1994). Variability of bedload transport and channel morphology in a braided river hydraulic model. *Earth Surface Processes and Landforms* 19:403-421.

“Thermie ”

Acuna V, Tockner K (2009). Surface-subsurface water exchange rates along alluvial river reaches control the thermal patterns in an Alpine river network. *Freshwater Biology* 54:306-320.

Arcott DB, Tockner K, Ward JV (2001). Thermal heterogeneity along a braided floodplain river (Tagliamento River, northeastern Italy). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58:2359-2373.

Belletti B, Dufour S, Piégay H (2012). Regional variability of aquatic pattern in braided reaches (example of the French Rhône basin). *Hydrobiologia*. DOI:10.1007/s10750-012-1279-6.

Burkholder BK, Grant GE, Haggerty R, Khangaonkar T, Wamper PJ (2008). Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature of a large, gravel-bed river, Clackamas River, Oregon, USA. *Hydrological Processes* 22:941-953.

Caissie D (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51:1389-1406.

Karaus U, Alder L, Tockner K (2005). Concave Islands: Habitat Heterogeneity of Parafluvial Ponds in a Gravel-bed River. *Wetlands* 25:26-37.

Malard F, Mangin A, Uehlinger U, Ward JV (2001). Thermal heterogeneity in the hyporheic zone of a glacial floodplain. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58:1319-1335.

Malard F, Tockner K, Dole-Olivier M-J, Ward JV (2002). A landscape perspective of surface-subsurface hydrological exchanges in river corridors. *Freshwater Biology* 47:621-640.

Mosley MP (1983). Variability of water temperatures in the braided Ashley and Rakaia rivers. *New Zealand journal of Marine and Freshwater Research* 17:331-342.

Piégay H, Alber A, Slater L, Bourdin L (2009). Census and typology of braided rivers in French Alps. *Aquatic Sciences* 71:371-388.

Poole GC, Berman CH (2001). An Ecological Perspective on In-Stream Temperature: Natural Heat Dynamics and Mechanisms of Human-caused Thermal Degradation. *Environmental Management* 24(6) :787-802.

Torgersen CE, Faux RN, McIntosh BA, Poage NJ, Norton DJ (2001). Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment* 76(3):386-398.

Tonolla D, Acuña V, Uehlinger U, Frank T, Tockner K (2010). Thermal Heterogeneity in River Floodplains. *Ecosystems* 13:727-740.

Uehlinger U, Malard F, Ward JV (2003). Thermal patterns in the surface waters of a glacial river corridor (Val Roseg, Switzerland). *Freshwater Biology* 48:284-300.

Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37:130-137.

Ward JV, Malard F, Tockner K, Uehlinger U (1999). Influence of ground water on surface water conditions in a glacial floodplain of the Swiss Alps. *Hydrological Processes* 13:277-293.

Wawrzyniak V, Piégay H, Allemand P, Vaudor L, Grandjean P (accepté). Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing*.