UNIVERSITÉ FRANÇOIS – RABELAIS DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE EMSTU

Laboratoire GéoHydrosystèmes COntinentaux (EA 6293)

THÈSE présentée par :

Coraline WINTENBERGER

soutenue le : **02 juin 2015**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université François – Rabelais de Tours**

Discipline/ Spécialité : Sciences de la terre/Biogéomorphologie

Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse

Etudes *in* et *ex situ* de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne

THÈSE dirigée par :

BREHERET Jean-Gabriel	Professeur, Université F. Rabelais de Tours
RODRIGUES Stéphane	Maître de conférences, HDR, Université F. Rabelais de Tours
VILLAR Marc	Chargé de recherches, HDR, INRA – Centre Val de Loire, Orléans

RAPPORTEURS :

PIEGAY Hervé	Directeur de recherches, Ecole Normale Supérieure de Lyon
TREMOLIERES Michèle	Professeur, Université de Strasbourg

JURY :

BREHERET Jean-Gabriel	Professeur, Université F. Rabelais de Tours
PIEGAY Hervé	Directeur de recherches, Ecole Normale Supérieure de Lyon
RODRIGUES Stéphane	Maître de conférences, HDR, Université F. Rabelais de Tours
STELLA John	Associate Professor, SUNY College of Environmental Science and Forestry, Syracuse
TAL Michal	Maître de conférences, Université Aix-Marseille
TREMOLIERES Michèle	Professeure, Université de Strasbourg
VILLAR Marc	Chargé de recherches, HDR, INRA – Centre Val de Loire, Orléans
WANTZEN Karl Matthias	Professeur, Université F. Rabelais de Tours

Remerciements

Ce manuscrit de thèse représente l'achèvement d'un travail de recherche qui a été possible grâce aux nombreuses personnes qui m'ont aidée, conseillée et soutenue durant les différentes étapes de cette aventure. A cet égard, je souhaite dans cette partie leur témoigner toute ma reconnaissance et toute ma gratitude.

Tout d'abord, je tiens à remercier les membres du jury, Jean-Gabriel Breheret, Hervé Piegay, Stéphane Rodrigues, John Stella, Michal Tal, Michèle Trémolières, Marc Villar et Karl Matthias Wantzen ainsi que Stéphane Braud, membre invité, de m'avoir fait l'honneur d'évaluer ce travail. Je les remercie tout particulièrement pour les discussions menées le 2 juin 2015, jour de la soutenance, qui me permettront de progresser dans les travaux de recherche initiés pendant cette thèse. J'adresse un remerciement particulier à Hervé Piégay et Michèle Trémolières pour leur rapport constructif et enrichissant à l'égard de mon travail.

Les membres du comité de pilotage, Stéphane Braud, Dov Corenblit, Olivier Forestier, Jean-Noël Gautier, Sabine Greulich, Alexia Stockes et Michal Tal sont également vivement remerciés pour leur intérêt, leurs conseils et leurs remarques qui ont permis d'améliorer ce travail.

Je remercie l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'Etablissement Public Loire, le FEDER et la Région Centre d'avoir financé ce projet. Je tiens également à remercier la DREAL Centre, les DDT 45, 41 et 37 pour leur collaboration et leur soutien à cette étude.

L'approche *in situ* de ce travail s'est principalement focalisée sur le site de Mareau-aux-Prés, localisé dans la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin (45). Je tiens donc à remercier chaleureusement les gestionnaires de la réserve pour leur accueil dans ce merveilleux endroit et en particulier Michel Chantereau et Damien Hémeray pour avoir partagé avec moi leur amour de la Loire et de sa diversité, ainsi que pour leur bienveillance. Je remercie également toutes les personnes du projet BioMareau pour les intéressants échanges scientifiques et la convivialité de nos rencontres tant à l'INRA que sur le terrain.

Les données récoltées au cours de cette thèse n'auraient pu être acquises sans le soutien technique et humain que m'ont apporté le laboratoire GéHCO, l'INRA d'Orléans-Val de Loire et le CETU Elmis. Un grand merci aux enseignants-chercheurs du laboratoire GéHCO pour leur accueil, leurs conseils et soutien au cours de ces quelques années. Je remercie également mes collègues de thèse pour les moments partagés dans la bonne humeur même en période de grand désarroi, merci donc à Aurélien Beaufort, Elie Dhivert, Anthony Foucher et Camille Minaudo. J'adresse une pensée particulière à mon collègue de l'Est pour nos riches discussions matinales. Un grand merci aux personnes du sous-sol qui m'ont chacune accordé de leur temps ; je pense particulièrement à Emilien Aldana-Jague, Olivia Bertrand, Clémence Bohn, Paul-Antoine Castel, Gaëtane Chirié, Francesca Degan, Benjamin Gandubert, Eric Imbert, Laurent Lafuente, Valentin Lendemaine, Cécile Poisvert et Julie Raux. Pardon pour celles et ceux à qui j'ai demandé le travail laborieux qui consiste à disséquer des chatons…de peuplier et de saule ! Merci également aux vacataires qui ont contribué directement à la réalisation de ce travail, Maximilien Rincel, Elise Volette et Ovidiu Ursache ; merci aussi aux stagiaires Ronan Delancret, Anaïs Déboise, Pierrick Belon, Laetitia Gouny, Jassime Qmari pour leur investissement.

De l'INRA d'Orléans, je remercie Christian Breton pour m'avoir permis d'utiliser le matériel d'analyse des racines. Je remercie vivement Anthony Dubois dont la majeure contribution a été son aide pour la réalisation des statistiques sur les racines mais qui s'est également montré présent sur toutes les « manips » liées aux racines ainsi que lors des mesures *in situ* à Mareau-aux-Prés. J'espère que nous aurons l'occasion prochainement de publier ensemble les résultats du dernier chapitre de cette thèse.

Rien n'aurait été possible sans le soutien de l'équipe du CETU Elmis, à ce titre je remercie l'ensemble des personnes travaillant dans cette structure et plus particulièrement ceux qui sont venus naviguer sur la Loire en crue en plein hiver. Merci donc à Thimotée Handfus et Yann Guerez (avec qui j'ai vécu la tempête de neige la plus impressionnante qui soit!) d'avoir bravé le froid Orléanais. Enfin, j'adresse toute ma reconnaissance à Philippe Jugé pour m'avoir fait profiter de ces compétences multiples et légendaires mais également pour sa bienveillance, sa générosité et ses histoires magiques de poisson ! J'en profite pour m'excuser des nombreux papillons perdus, du cône égaré, du GPS déchargé et autres câbles emmêlés !
L'approche *ex situ* de ce travail m'a, quant à elle, conduite jusqu'aux portes de la Bretagne, dans la pépinière de Guémené-Penfao (ONF, 44). Cette pépinière constitue le rêve de tout chercheur travaillant sur la végétation, tout y est rendu possible grâce à une merveilleuse équipe dont les compétences n'ont d'égal que leur gentillesse. J'adresse donc mes plus vifs remerciements à toute cette équipe (permanents, stagiaires et vacataires) et en particulier à Olivier Forestier et Philippe Poupart pour leur aide logistique, leurs précieux conseils et également pour avoir pris soin de nos petits ligneux afin qu'ils grandissent bien !
Il y a deux personnes que je n'ai pas encore remerciées et à qui j'adresse une pensée toute particulière, Jean-Paul Bakyono et Isabelle Pene. Aussi bien l'un que l'autre m'ont accompagnée contre vents (Madame Pene s'en souvient encore !) et marées, toujours dans la bonne humeur. Merci pour votre temps et votre énergie investie ainsi que pour votre générosité à mon égard.
Je remercie également Lauren Valverde, collègue de bureau des premières heures et amie dont le sourire savait éclairer les journées sombres du sous-sol !
Evidemment, j'adresse toute ma gratitude à Nicolas Claude pour son rôle de grand frère toujours prêt à aider dont la gentillesse et la générosité n'ont, quant à elles, d'égal que sa maladresse ! J'espère que les prochaines années nous permettront de continuer à collaborer.
Enfin, je tiens à remercier mes encadrants pour m'avoir fait confiance pendant ces trois années et demi, pour m'avoir soutenue, encouragée, poussée à faire toujours mieux, en un mot merci de m'avoir formée au métier de chercheur. J'adresse un remerciement spécial à Stéphane Rodrigues, qui avait déjà encadré mon M2, d'avoir partagé avec moi sa passion des rivières ainsi que son attachement à la Loire me rendant aujourd'hui *ligérophile*.
Je remercie donc encore une fois toutes les personnes qui au cours de cette thèse ont œuvré de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail qui me tient à cœur.
Je remercie également chaleureusement ma famille pour son soutien et plus particulièrement mes parents pour m'avoir depuis la plus tendre enfance soutenue et encouragée dans mes études et mes choix.
Pour terminer, j'adresse une pensée émue à mon grand-père Jean Saulnier décédé avant l'achèvement de ce travail. Ces quelques mots écrits par ses enfants le caractérisaient parfaitement : « *Il ne plagiait jamais et pensait toujours par lui-même. Il ne développait jamais d'idées partisanes, ni ne faisait partie d'un quelconque courant de pensée. Cette indépendance d'esprit était sa force principale* » me renvoyant aux valeurs qui ont bercé mon enfance à ses côtés à l'ombre des pins Provençaux. Si mes années d'étude ont permis de cultiver ma curiosité et ma soif d'apprendre, ce sont indéniablement mes proches parents qui me les ont insufflées.

Résumé

La présente analyse est ciblée sur la transition entre les **phases géomorphologiques, pionnières et biogéomorphologiques** décrites par le concept de succession biogeomorphologique fluviale d'une **rivière sablo-graveleuse de plaine**, la Loire moyenne. L'étude se focalise sur la **reproduction sexuée et la survie** (dans leur premiers stades, au cours des crues) de deux espèces de Salicacées : ***Populus nigra* L. et *Salix alba* L. sur une barre sédimentaire et repose sur des approches *in*- et *ex-situ*.** La dynamique hydro-sédimentaire d'une barre forcée influence le potentiel de survie des semis des ligneux pionniers. Les semis présentent des adaptations morphologiques différentes en fonction des conditions sédimentaires de germination modulant leur **potentiel de survie**. Trois modèles conceptuels sont proposés : (i) **dynamique d'une barre forcée** en crue, (ii) évolution longitudinale des **processus de mortalité des semis** selon le granoclassement amont-aval, (iii) vitesse d'évolution d'une **barre forcée vers une île pionnière** initiée par l'installation de semis de ligneux pionniers et archivage sédimentaire associé dans une rivière sablo-graveleuse de plaine.

Mots clés : Biogéomorphologie fluviale, Populus nigra, Salix alba, reproduction sexuée, barre forcée, île pionnière.

Abstract

The present study is focused on the three first stages: **geomorphic, pioneer and biogeomorphic** of the Fluvial Biogeomorphological Succession applied to a **sandy-gravel bed lowland river**: the Loire River (in its middle reaches). This work is based on both an *in* and *ex situ* approach. It analyses the **recruitment and survival during their first stages** of growth of two Salicaceae trees: ***Populus nigra* L. and *Salix alba* L. developed on a non-migrating (forced) bar.** The dynamics of this bar influences the survival potential of seedlings during floods. The seedlings adapt morphologically according to the sedimentary structure, and as a consequence, modify their survival potential. Three conceptual models detail: (i) the **dynamics of a mid-channel forced bar** during floods, (ii) the longitudinal evolution of the **mortality of seedlings** induced by the downstream fining of sediments, (iii) the sediment archiving and time needed to **reach a pioneer island state** from a non-migrating vegetated bar.

Keywords: fluvial biogeomorphology, *Populus nigra*, *Salix alba*, sexual reproduction, forced bar, pioneer island.

Préambule

Afin de guider le lecteur dans sa « navigation » au sein du présent manuscrit, nous présentons ici son organisation accompagnée de quelques éléments de contexte sur la réalisation de ce travail de thèse de doctorat.

Cette contribution s'intègre dans l'étude des interactions entre la dynamique fluviale et les premiers stades d'installation de la ripisylve selon une approche biogéomorphologique. La Loire moyenne a été le support de cette étude réalisée à l'échelle de l'unité morphologique sur des espèces patrimoniales (*Populus nigra* L. et *Salix alba* L.). Cette thèse vise à répondre à des questions posées par la communauté scientifique mais également par les gestionnaires des lits de cours d'eau.

Ainsi, cette thèse a été financée au titre du volet Recherche Données Informations du Plan Loire Grandeur Nature III 2007-2013, avec les soutiens du fond européen de développement régional et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de la région Centre s'est positionnée comme un soutien fort, à l'instar de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin et de la Direction Départementale des Territoires du Loiret.

Le manuscrit s'articule selon huit chapitres. Le chapitre 1 présente le contexte scientifique et la problématique ; le chapitre 2 les questions et objectifs de la thèse ainsi que la démarche mise en œuvre dont un résumé est proposé dans la première partie. Cette partie rend compte de l'organisation des chapitres suivants en fonction des questions thématiques abordées. Ces recherches sont en voie de publication dans des revues scientifiques à audience internationale sous la forme d'articles qui ont déjà fait l'objet d'une évaluation par nos pairs (révisions majeures et mineures). Ils constituent les chapitres 3, 4 et 5 de ce manuscrit. Le chapitre 6 préfigure un quatrième article qui sera soumis dans un futur proche. Pour ces quatre chapitres, une synthèse précède les articles, détaillant les questions spécifiques et les interprétations majeures ainsi que leur articulation au sein de la thèse. Le chapitre 7, contextualise, synthétise et discute les résultats pour répondre aux questions fondamentales et appliquées abordées dans cette thèse. Enfin, le chapitre 8 conclut ce travail réalisé entre Décembre 2011 et Avril 2015 et adresse quelques perspectives pour des investigations futures dans le domaine de la biogéomorphologie fluviale.

Enfin, ce travail a également été valorisé à travers des présentations (posters, communications orales) auprès de la communauté scientifique mais aussi des gestionnaires afin d'assurer le transfert de la recherche vers le domaine appliqué. Des éléments relatifs à ces présentations (listes, résumés) sont consignés en annexes.

Table des matières

Remerciements 3
Résumé 5
Résumé en anglais ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Table des matières 9
Liste des tableaux 15
Liste des figures 17
Liste des annexes 27
Chapitre 1 : Contexte scientifique et problématique 29
1.1. Définition des concepts, objets et échelles spatio-temporelles 30
1.1.1. Concepts généraux et problématique environnementale global 30
1.1.2. Paramètres d'évolution morphologique des cours d'eau 32
1.1.3. La végétation ligneuse des hydrosystèmes fluviaux 37
1.1.4. La végétation ligneuse « ingénieure » des hydrosystèmes fluviaux 38
1.2. Concertation avec les gestionnaires 42
Chapitre 2 : Démarche expérimentale : de l'*in situ* à l'*ex situ* 43
2.1. Objectifs et synthèse du chapitre 44
2.2. Présentation de la Loire et de son bassin versant 45
2.2.1. Géographie et hydrographie 45
2.2.2. Lithologie 46
2.2.3. Régime hydrologique 47
2.2.4. Morphologie fluviale de la Loire 48
2.2.5. Incision récente et conséquences sur la végétalisation du lit 50
2.2.6. Gestion au sein du lit endigué 52
2.3. Hypothèse de travail et objectifs 55
2.4. Approche *in situ* 58
2.4.1. Choix des sites d'étude 58
2.4.2. Suivi de la dynamique hydro-sédimentaire 60
2.4.3. Suivi de la végétation 62
2.5. Approche *ex situ* 63
Chapitre 3 : Transformation d'une barre sédimentaire non-migrante (forcée) en île : premier stade de développement et interactions avec la végétation ligneuse 67
3.1. Objectif et synthèse du chapitre 68

3.2. Introduction 71
3.2.1. Loire River islands 73
3.2.2. Study site 74
3.2.3. Topographical survey 77
3.2.4. Scour chains and grain size analysis 78
3.2.5. Stratigraphical analysis of deposits 80
3.2.6. Vegetation analysis 80
3.3. Results 81
3.3.1. Typical stratigraphical architecture of island banks 81
3.3.2. Pioneer woody vegetation developed on the bar 84
3.3.3. Topographical and morphological evolution of the bar 86
3.3.4. Scour and fill processes on the bar 91
3.3.5. Bar depositional architecture 93
3.3.6. Grain size changes on the bar 94
3.3.7. Threshold for sediment motion vs vegetation 96
3.4. Discussion 99
3.4.1. Scour and fill processes during a flood are not directly interrelated to vegetation density or roughness parameter 99
3.4.2. Upstream-shifting accretion and grain size segregation processes during first stages of island development 99
3.4.3. Conceptual model: from the vegetated bar state to the island state in low gradient sandy-gravelly rivers 101
3.5. Conclusions 103
Chapitre 4 : Dynamique hydro-sédimentaire d'une barre non-migrante de centre de chenal et des dunes superposées sur une rivière sablo-graveleuse (Loire, France) 111
4.1. Objectifs et synthèse du chapitre 112
4.2. Introduction 116
4.2.1. Background 116
4.2.2. Loire River and study site 118
4.3. Material and methods 121
4.3.1. Hydraulics 122
4.3.2. Bed morphology and sediment transport 123
4.3.3. Grain size analyses 124

4.4. Results 125
4.4.1. Hydrological history 127
4.4.2. Effects of discharge conditions on flow velocity and bed shear stress 129
4.4.3. Effects of discharge variation on bar morphology 131
4.4.4. Sediment grain size 139
4.4.5. Superimposed dune morphology and dynamics 143
4.5. Discussion 149
4.5.1. Schematic model of the non-migrating bar and superimposed dune dynamics during floods 149
4.5.2. Influence of hydrology on forcing parameters inducing a non-migrating bar 156
4.6. Conclusion 158
Chapitre 5 : Influence de la dynamique hydro-sédimentaire d'une barre alluviale dans la survie des semis de *P. nigra* L. 167
5.1. Objectifs et synthèse du chapitre 168
5.2. Introduction 172
5.2.1. Background 172
5.3. Material and methods 174
5.3.1. The study site in the Loire River 174
5.3.2. Vegetation 176
5.3.3. The bar dynamics 177
5.4. Results 179
5.4.1. Bar dynamics before recruitment 179
5.4.2. Recruitment environment 182
5.4.3. Vegetation establishment and survival 183
5.4.4. Floods constraints on seedlings 189
5.5. Discussion 195
5.5.1. Influence of the non-migrating bar dynamics on seedling survival 195
5.5.2. Influence of type processes leading to seedlings death 196
5.5.3. Influence of seedlings variability 201
5.6. Conclusion 204
5.7. Données sur le saule blanc 210
5.7.1. Recrutement et survie 210

Chapitre 6 : Rôle de la structure sédimentaire sur la croissance aérienne et racinaire, l'arrachage et l'enfouissement de semis de peuplier noir (*Populus nigra* L.) et saule blanc (*Salix alba* L.) en conditions semi-contrôlées. 215
6.1. Objectifs et synthèse du chapitre 216
6.2. Introduction 219
6.3. Matériel et méthodes 221
6.3.1. Dispositif expérimental 221
6.3.2. Expérience témoin et d'arrachage 231
6.3.3. Expérience d'enfouissement 238
6.4. Résultats 239
6.4.1. Expérience témoin 239
6.4.2. Expérience d'arrachage sur le peuplier noir 248
6.4.3. Expérience témoin sur le saule blanc 263
6.4.4. Expérience d'enfouissement des peupliers noirs 267
6.5. Discussion 270
6.5.1. Robustesse des données 270
6.5.2. Influence du substrat sur la morphologie des espèces ligneuses pionnières 272
6.5.3. Paramètres d'influence sur l'arrachage 278
6.5.4. Enfouissement 279
6.5.5. Données complémentaires 279
6.6. Conclusion 282
Chapitre 7 : Synthèse et discussion 287
7.1. Rappel du contexte et des objectifs de la thèse 288
7.2. Influence de la dynamique hydro-sédimentaire sur la survie de *P. nigra* et *S. alba* 290
7.2.1. Influence des conditions de recrutement 290
7.2.2. Influence des paramètres hydro-sédimentaires sur la survie 294
7.3. Influence des travaux d'entretien du lit 304
7.3.1. Influence sur la dynamique hydro-sédimentaire 304
7.3.2. Influence des travaux sur les peuplements arasés 305
7.3.3. Durabilité des opérations de dévégétalisation 307
Chapitre 8 Conclusion et perspectives 313
8.1. Conclusion 313

8.2. Perspectives 322
8.2.1. A court terme 322
8.2.2. A moyen terme 323
8.2.3. A long terme 323
Résumé 357
Résumé en anglais 357

Liste des tableaux

TABLE 1-1 : LES QUATRE PHASES DU CONCEPT *FLUVIAL BIOGEOMORPHIC SUCCESSION* ET LA STRUCTURE DES INTERACTIONS CORRESPONDANTES ENTRE LES FACTEURS BIOTIQUES (DYNAMIQUE DE LA VEGETATION) ET ABIOTIQUES (DYNAMIQUE FLUVIALE), MODIFIE D'APRES CORENBLIT (2007). 39

TABLE 2-1 : CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET EVOLUTION RECENTE DES SITES CHOISIS. 59

TABLE 2-2 : MESURES REALISEES EN FONCTION DES SITES ET NOMBRE DE JOURNEES DE TERRAIN ASSOCIES SUR LA DUREE TOTALE DE LA THESE 61

TABLE 4-1: AVERAGE HYDRAULIC AND SEDIMENT TRANSPORT PARAMETERS FOR EACH SURVEY ON THE BAR. THE WATER DEPTH IS THE DEPTH IN THE INTERSECTION BETWEEN THE LONGITUDINAL TRACK LT18 AND THE CROSS-SECTION CS3. FOR SURVEY S1, NAVIGATION WAS IMPOSSIBLE DUE TO INSUFFICIENT FLOW DEPTH. DISCHARGE VALUES WERE PROVIDED BY THE DREAL CENTRE (ENVIRONMENTAL AGENCY) FOR THE ORLEANS GAUGING STATION (10 KM UPSTREAM). 126

TABLE 5-1: RELATIVE IMPORTANCE OF EACH PROCESS LEADING TO SEEDLING MORTALITY ON A RIVER BAR. VALUES CORRESPOND TO THE PERCENTAGE OF SEEDLINGS MORTALITY BY EACH PROCESS COMPARED TO THE MORTALITY ON THE ENTIRE BAR, THE NUMBER IN PARENTHESES INDICATES THE NUMBER OF PLOTS CONCERNED BY THE PROCESS. 197

TABLE 5-2: HIGHEST VALUES OF EACH PROCESS FOR WHICH THE SEEDLING SURVIVAL WAS MEASURED. THE ASTERISKS REFER TO SCOUR CHAINS MEASUREMENTS WITH 0.02 M ACCURACY. FOR TYPE IV IN THE FIXED AREA, THE MAXIMAL EROSION AND DEPOSITION TOLERATED BY SEEDLINGS DO NOT REFER TO THE SAME PLOT. 197

TABLE 6-1 : REPARTITION DES SUBSTRATS DANS LA FOSSE EXPERIMENTALE. 226

TABLE 6-2 : RECAPITULATIF DES DONNEES ET CALENDRIER DES EXPERIENCES EN PEPINIERE. 229

TABLE 6-3 : NOMBRE DE POINTS TOPOGRAPHIQUES LEVES PAR QUADRAT (0,5 M * 0,5 M) AVANT ET APRES ENFOUISSEMENT DES SEMIS. 239

TABLE 6-4 : VALEURS MOYENNES DES PARAMETRES BIOLOGIQUES ANALYSES SUR LES TROIS SUBSTRATS. LES NOMBRES ENTRE PARENTHESES CORRESPONDENT AUX NOMBRES DE SEMIS MESURES POUR CHAQUE PARAMETRE. 240

TABLE 6-5 : RESULTATS DES ANOVA ENTRE SUBSTRATS POUR L'EXPERIENCE TEMOIN. LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE EST $*P < 0,05$; $**P < 0,01$; $***P < 0,001$; NS, NON SIGNIFICATIF. 242

TABLE 6-6 : CONTRIBUTIONS DES SUBSTRATS DANS L'EXPERIENCE TEMOIN. LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE EST $*P < 0,05$; $**P < 0,01$; $***P < 0,001$; NS, NON SIGNIFICATIF. 243

TABLE 6-7 : COMPARAISON ENTRE L'EXPERIENCE TEMOIN ET D'ARRACHAGE DES VALEURS MOYENNES DES PARAMETRES DESCRIPTIFS DU SYSTEME RACINAIRE POUR CHAQUE SUBSTRAT. 250

TABLE 6-8 : RESULTATS DES ANOVA ENTRE SUBSTRATS POUR L'EXPERIENCE ARRACHAGE. LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE EST $*P < 0,05$; $**P < 0,01$; $***P < 0,001$; NS, NON SIGNIFICATIF. 250

TABLE 6-9 : CONTRIBUTIONS DES SUBSTRATS DANS L'EXPERIENCE D'ARRACHAGE. LE NIVEAU DE SIGNIFICATIVITE EST $*P < 0,05$; $**P < 0,01$; $***P < 0,001$; NS, NON SIGNIFICATIF. 251

TABLE 6-10 : VALEURS MOYENNES DES PARAMETRES MESURES SUR LES SAULES BLANCS. 263

TABLE 6-11 : VALEURS MOYENNES CALCULEES SUR LES SEMIS DE PEUPLIERS NOIRS ET DE SAULES BLANCS EN FONCTION DU SUBSTRAT. LE NOMBRE ENTRE PARENTHESES CORRESPOND AU NOMBRE D'INDIVIDUS MESURES. 275

Liste des figures

FIGURE 1-1 : LES FLUX D'ECHANGES AU SEIN DE L'HYDROSYSTEME FLUVIAL MODIFIE D'APRES AMOROS ET PETTS (1993)..... 31

FIGURE 1-2 : LA BALANCE DE LANE (1955) ILLUSTRE LE PRINCIPE D'EQUILIBRE DYNAMIQUE DES COURS D'EAU..... 33

FIGURE 1-3 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PROPAGATION DE LA VEGETATION DANS LE SYSTEME FLUVIAL DU SILURIEN INFERIEUR AU PRESENT MODIFIE D'APRES CORENBLIT *ET AL.* (2014)..... 36

FIGURE 1-4 : EVOLUTION DU POURCENTAGE RELATIF DE STYLES FLUVIATILES DU CAMBRIEN AU CARBONIFERE, MODIFIE D'APRES GIBLING *ET AL.* (2013)..... 36

FIGURE 2-1 : RELIEF DU BASSIN VERSANT DE LA LOIRE AVEC LES BASSINS VERSANTS DES PRINCIPAUX AFFLUENTS, LES BARRAGES ET LES CENTRALES NUCLEAIRES D'APRES ANDRIAMAHEFA (1999), MODIFIE. ..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 2-2 : CARTE LITHOLOGIQUE DU BASSIN DE LA LOIRE D'APRES BLANCHARD (2007), MODIFIE. .... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 2-3 : DEBITS DE LA LOIRE A LA STATION DE JAUGEAGE D'ORLEANS (SOURCE DREAL CENTRE) DEPUIS JANVIER 1965 JUSQU'A MARS 2015. 48

FIGURE 2-4 : STYLES FLUVIATILES RENCONTRES SUR LA LOIRE : A) CHENAL A MEANDRE EN LOIRE AMONT (DIGOIN), B) CHENAUX MULTIPLES EN LOIRE MOYENNE (LA CHARITE-SUR-LOIRE), C) CHENAL A MEANDRE EN LOIRE MOYENNE (GUILLY), D) CHENAL RECTILIGNE EN LOIRE MOYENNE (BLOIS), E) CHENAUX MULTIPLES EN LOIRE AVAL (INGRANDES). LES FLECHES BLEUES INDIQUENT LE SENS D'ECOULEMENT. (PHOTOGRAPHIE ISSUES DU SITE INTERNET HTTP://WWW.GEOPORTAIL.GOUV.FR/) 50

FIGURE 2-5 : REPOUSSE VEGETATIVE DE L'ANNEE N+1 A PARTIR DE FRAGMENTS DE PEUPLIERS NOIRS ABANDONNES SUR SITE APRES TRAVAUX L'ANNEE N..... 55

FIGURE 2-6 : ORGANISATION DES CHAPITRES DE LA THESE EN FONCTION DES AXES DE RECHERCHE DEFINIS ET DES PREMIERES PHASES DE LA *FLUVIAL BIOGEOMORPHIC SUCCESSION* (CORENBLIT *ET AL.*, 2007). 56

FIGURE 2-7 : LOCALISATION SUR LE BASSIN ET CONFIGURATION MORPHOLOGIQUE DES SITES RETENUS. LES UNITES MORPHOLOGIQUES CHOISIES SONT ENCERCLES EN ROUGE, LES TRAITS CONTINUS ROUGES MATERIALISENT LE LIT ENDIGUES.**ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 2-8 : A) BATEAU EQUIPE AVEC LES APPAREILS DE MESURES BATHYMETRIQUES, COURANTOMETRIQUES ET GRANULOMETRIQUES ; B) SCAN LASER TERRESTRE PILOTE PAR ORDINATEUR ; C) RECHERCHE DES CHAINES D'EROSION A L'AIDE D'UN DETECTEUR DE METAUX ; D) TOPOGRAPHIE REALISEES AU GPS DIFFERENTIEL ; E) PHOTOGRAPHIES PAR BALLON CAPTIF ; F) COUPE SEDIMENTAIRE..... 62

FIGURE 2-9 : REPARTITION DES MODALITES D'EXPERIENCE, DE SUBSTRAT ET DE MATERIEL VEGETAL AU SEIN DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL. ..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**

FIGURE 3-1: LOCATION OF THE STUDY SITE OF MAREAU-AUX-PRES. A REGIONAL VIEW OF THE SITE IS AVAILABLE FROM GOOGLE EARTH (47°51'50.90"N, 1°46'59.92"E). (A)MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE STUDY SITE BETWEEN 1848 AND 2010 (PHOTO COURTESY OF DREAL CENTRE, IGN AND RICHARD CHEVALIER, IRSTEA). THE BLACK POINT ON THE AERIAL PHOTOGRAPH OF 2010 AND THE DOTTED LINES CORRESPONDS TO THE TRENCH PRESENTED IN FIGURE 3-2B AND TO THE BAR STUDIED RESPECTIVELY. (B) MORPHOLOGICAL UNITS OF THE BAR, LOCATION OF THE CROSS SECTIONS SURVEYED (GREY LINES) AND COUPLED WITH SCOUR CHAINS (BLACK LINES AND POINTS). (C,D) HYDROGRAPH OF THE LOIRE BETWEEN 1965 AND 2012 (C) AND DURING THE STUDY PERIOD (D). 75

FIGURE 3-2: TYPICAL STRATIGRAPHY OF ISLANDS OF THE MIDDLE REACHES OF THE LOIRE RIVER. TRENCHES DUG ON TWO ISLANDS LOCATED IN THE STUDY SITES OF BREHEMONT (FIGURE 3-2A, SEE DETRICHE *ET AL.* 2010 FOR DETAILS) AND MAREAU-AUX-PRES (FIGURE 3-2B) LOCATED RESPECTIVELY 800 KM AND 648 KM FROM THE SOURCES. FOR THE SITE OF BREHEMONT, OSL DATINGS WERE PERFORMED. FIGURE 3-2C CORRESPONDS TO CUMULATIVE CURVES OF THE SEDIMENTS OF THE TRENCH PRESENTED IN FIGURE 3-2B. 83

FIGURE 3-3: A. NUMBER OF STEMS AND BRANCHES MEASURED AT 0, 0.25, 0.5, 1.2 AND 2 M ABOVE THE BED. B. MANNING'S VEGETATION FLOW RESISTANCE PARAMETER FOR EACH VEGETATED PLOT. C. RELATIONSHIP BETWEEN TREE DIAMETER AND NUMBER AND STEM/M². 85

FIGURE 3-4: FREQUENCY OF RANDOMLY SAMPLED BED ELEVATION FROM THE YEARS BETWEEN 2003 AND 2012 (N=630 POINTS). DATA OF 2003 CORRESPOND TO THE LIDAR DATA (COURTESY OF DREAL CENTRE) BEFORE VEGETATION DEVELOPMENT (2004). DATA OF SURVEYS 2007 TO 2012 CORRESPOND TO FIELD MEASUREMENTS. 86

FIGURE 3-5: GAMMA FUNCTION BASED ON RANDOMLY SAMPLED BED TOPOGRAPHY DATA BETWEEN 2003 AND 2012. DATA OF 2003 CORRESPOND TO THE LIDAR DATA (COURTESY OF DREAL CENTRE) BEFORE VEGETATION DEVELOPMENT (2004). DATA OF SURVEYS 2007 TO 2012 CORRESPOND TO FIELD MEASUREMENTS. 87

FIGURE 3-6: MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE VEGETATED BAR ASSESSED FROM TOPOGRAPHICAL SURVEYS. DIGITAL ELEVATION MODELS (DEMS) OBTAINED ON THE BAR (A), CROSS SECTIONS CS1 TO CS6 WITH LOCATION OF SCOUR CHAINS (C1 TO C30) (B), SLOPE MAPS (C). 88

FIGURE 3-7: A. CUMULATIVE CURVES OF SEDIMENT DEPOSITION AND SCOURING SINCE 2007 ON THE ENTIRE BAR (FILLED SYMBOLS) AND ON AREAS ONLY AFFECTED BY SEDIMENT DEPOSITION AND EROSION (EMPTY SYMBOLS). B. MEDIAN ELEVATION (A.S.L.) OF CROSS SECTIONS CS2 TO CS5 AND AVERAGE VALUE OF THE DISCHARGE ABLE TO INUNDATE THE BAR. 90

FIGURE 3-8: SCOUR AND FILL DEPTHS RECORDED ON CROSS SECTIONS 2, 3, 4 AND 5. DASHED LINES CORRESPOND TO MORPHOLOGICAL UNITS ON THE MID-CHANNEL BAR OF MAREAU-AUX-PRES AND C4 TO C27 CORRESPOND TO THE SCOUR CHAIN NUMBER. 92

FIGURE 3-9: SEDIMENT ARCHITECTURE AT FOUR LOCATIONS (REPRESENTATIVE OF THE MORPHOLOGICAL UNITS OF THE BAR) ASSOCIATED WITH SCOUR AND FILL DEPTHS (ARROWS) MEASURED USING SCOUR CHAINS BETWEEN 2008 AND 2012. RESULTS FOR YEAR 2007 ARE BASED ON TOPOGRAPHICAL SURVEYS ONLY. INDICATION "N.C." MEANS "NO CHANGES". 93

FIGURE 3-10: GRAIN SIZE EVOLUTION ON THE BAR (ALL PLOTS) BETWEEN 2008 AND 2012 (A); NOTE THE TWO POPULATIONS OF GRAINS ON THE FIRST GRAPH. GRAIN SIZE EVOLUTIONAT LOCATIONS OF TRENCHES PRESENTED IN FIGURE 3-9 (B). NO DATA FOR C12 IN 2008. 95

FIGURE 3-11: CHANGES OF THE CRITICAL BED SHEAR STRESS CALCULATED FOR D50 (LEFT GRAPH) AND D90 (RIGHT GRAPH) OF SURFACE BAR SEDIMENTS BETWEEN BETWEEN 2008 AND 2012. THE BISECTOR INDICATES THE SAME VALUES OF CRITICAL BED SHEAR STRESS IN BOTH COMPARED YEARS.. SEE FIGURE 3-1 FOR LOCATION. 96

FIGURE 3-12: NORMALIZED EXCESS BED SHEAR STRESS AND SCOUR/FILL DEPTHS OBSERVED AND COMPARED TO THE VEGETATION PARAMETERS (NVEG, STEM DENSITY). 98

FIGURE 3-13: CONCEPTUAL MODEL OF EVOLUTION FROM A VEGETATED BAR TO AN ESTABLISHED ISLAND STATE. CONSEQUENCES OF THE FIRST STAGES OF DEVELOPMENT OF PIONEER TREES ON TOPOGRAPHY AND GRAIN SIZE DURING YEARS FOLLOWING COLONIZATION (A). TRANSITION (LONGER TIME SCALE) BETWEEN A VEGETATED BAR AND AN ESTABLISHED ISLAND (B). COMPARISON IS MADE WITH THE FLUVIAL BIOGEOMORPHOLOGICAL SUCCESSION OF CORENBLIT *ET AL.*, 2014. 103

FIGURE 4-1: STUDY SITE OF MAREAU-AUX-PRES, LOCATED IN THE MIDDLE REACHES OF THE LOIRE RIVER (AERIAL PHOTOGRAPHS FROM DREAL CENTRE). (A) THE MORPHOLOGICAL CONTEXT IN A CONTRACTION-EXPANSION AREA ASSOCIATED WITH CHANNEL CURVATURE AND NATURAL RIFFLES DUE TO THE BEDROCK EXPOSURE OF WHERE THE NON-MIGRATING MID-CHANNEL BAR DEVELOPED. (B) CROSS SECTIONS AND LONGITUDINAL TRACK FOLLOWED FOR BATHYMETRIC AND HYDRAULIC SURVEYS ASSOCIATED WITH SEDIMENT SAMPLING. 120

FIGURE 4-2: FOUR FLOODS OCCURRED DURING THE STUDY PERIOD. FOR EACH FLOOD ONE TO FOUR SURVEYS WERE DONE TO DOCUMENT RISING, PEAK AND FALLING STAGES. THE FLUVIAL MANAGEMENT WORKS (FMW) WERE DONE DURING LOW-FLOW CONDITIONS. GREY DIAMONDS AND BLACK CIRCLES REFER RESPECTIVELY TO THE TOPOGRAPHIC AND BATHYMETRIC SURVEYS. 122

FIGURE 4-3: DIGITAL ELEVATION MODELS (DEM) AFTER FLUVIAL MANAGEMENT WORKS WITH GROUND PICTURE ORIENTED DOWNSTREAM ILLUSTRATING THE RIDGE AND SWALE TOPOGRAPHY (2012), AND AFTER FLOODS OF 2013 (AERIAL PICTURE, SMOOTH TOPOGRAPHY). 128

FIGURE 4-4: MEAN FLOW VELOCITIES ALONG THE CROSS SECTION CS3 (SEE LOCATION ON THIS FIGURE, C) WITH DARKER CURVES FOR HIGH FLOWS AND PALE GREY FOR THE LOWER (A). THE MEAN FLOW VELOCITIES MEASURED ON THE BAR ARE AVERAGED AND COMPARED TO WATER DISCHARGE ON THE CROSS SECTION CS3 (B). MEAN DIRECTIONS AND FLOW VELOCITIES MEASURED ON ALL CROSS SECTIONS FOR HEIGHT SURVEYS AND ASSOCIATED BED SHEAR STRESS (C). DIRECTIONS ARE CLASSIFIED ACCORDING TO THEIR DEVIATION FROM THE DIRECTION OF THE LONGITUDINAL TRACK LT18 (237°) AND THE MAIN FLOW (270°). 130

FIGURE 4-5: LONGITUDINAL BATHYMETRICAL (LT18) EVOLUTION OF THE BAR DURING FLOODS (A, B, C, D) AND BETWEEN FLOODS (E, F, G) WITH DARKER CURVES FOR MORE RECENT SURVEYS AND PALE GREY FOR OLDER SURVEYS. 132

FIGURE 4-6: BAR EDGES, CHARACTERIZED BY THE ISOLINE 84.2 M, EVOLUTION DURING FLOODS (A, B, C AND D) AND BETWEEN SUCCESSIVE FLOODS (E, F, G AND H). DISTANCES ON THE LONGITUDINAL TRACK LT18 REFER TO DISTANCE FROM DOWNSTREAM IN FIGURE 4-5. 134

FIGURE 4-7: ELEVATION VARIATIONS BETWEEN TWO SUCCESSIVE SURVEYS DURING FLOODS FOR FLOOD 1, 2 AND 4 AND BETWEEN SUCCESSIVE FLOODS BETWEEN THE FOUR FLOODS. THE MAPS ARE ORDERED BY CHRONOLOGICAL OF THE SUCCESSIVE SURVEYS. 136

FIGURE 4-8: SEDIMENT BUDGET CALCULATED BETWEEN TWO SUCCESSIVE SURVEYS ON EACH CROSS SECTION. GREY DIAMONDS REFER TO THE CROSS SECTIONS LOCATION, FROM CS16 (270 M UPSTREAM) TO CS6 (0 M). 138

FIGURE 4-9: GRAIN SIZE OF SEDIMENTS SAMPLED ON THE BAR (GREY CUMULATIVE CURVES FOR GROUP 1, A BLACK LINES FOR GROUP 2) IN 2012 AND 2013 (A). SPATIAL DISTRIBUTION OF SEDIMENTS ON THE BAR IN 2012 AND 2013 (B). 139

FIGURE 4-10: SEDIMENT SURFACE IN 2013 (A,B,C AND D) AND ASSOCIATED EVOLUTION OF GRAIN SIZES BETWEEN 2012-2013 WITH THE VARIATIONS DURING FLOODS. 141

FIGURE 4-11: D_{50} SEDIMENT BED GRAIN SIZE IN RELATION TO THE BED SHEAR STRESS PLOTTED IN THE SOUTHARD AND BOGUCHWAL (1990) BEDFORM STABILITY DIAGRAM. LABELS FOR REGION: I, NO MOVEMENT ON PLANE BED; II, RIPPLES; III, LOWER PLANE BED; IV, DUNES; V, OVERLAP REGION OF DUNES, UPPER PLANE BED, AND ANTIDUNES; VI, OVERLAP REGION OF RIPPLES, UPPER PLANE BED, AND ANTIDUNES; VII, OVERLAP REGION OF UPPER PLANE BED AND ANTIDUNES. 142

FIGURE 4-12: FREQUENCY OF DUNE LENGTH FOR EACH SURVEY (A), THE NUMBER OF DUNE IS AVAILABLE IN TABLE 4-1.DIGITAL ELEVATION MODEL DURING THE HIGH MAGNITUDE FLOOD (S14) WITH DISCHARGE OF 1810 $M.^{3}s^{-1}$ (B). FREQUENCY OF STEEPNESS FOR ALL DUNES MEASURED WITH THE WHOLE SURVEYS. 144

FIGURE 4-13: TOTAL AND MEDIAN DUNE WAVELENGTHS AND HEIGHTS COMPARED TO THE THEORETICAL EQUATIONS OF FLEMMING (1988) AND ASHLEY (1990) (A). STEEPNESS EVOLUTION IN REGARD TO DUNE LENGTHS COMPARED TO CARLING'S (2000) RESULTS ON THE RIVER RHINE (B). (N=1423)..... 146

FIGURE 4-14: (A) DUNE HEIGHT FOR EACH SURVEY ACCORDING TO THE MAXIMUM DEVELOPMENT HEIGHT OF DUNES IN RIVERS ESTIMATED AT 20% OF WATER DEPTH (KLEINHANS *ET AL.*, 2002). (B) COMPARISON BETWEEN MEDIAN DUNE LENGTHS (L_D) AND MEDIAN DUNE HEIGHTS (H_D) PER MEASUREMENT SURVEY WITH PREDICTED VALUES (L_{PRED} AND H_{PRED}) USING ALLEN'S (1968) EQUILIBRIUM MODEL. THE ERROR BARS REPRESENT THE QUARTILES CALCULATED AROUND THE MEDIAN..... 147

FIGURE 4-15: EVOLUTION OF DUNE HEIGHTS AND LENGTHS IN REGARD TO THE MODIFICATION OF DISCHARGE AND WATER DEPTH DURING THE HIGH MAGNITUDE FLOOD SURVEYED..... 148

FIGURE 4-16: CONCEPTUAL MODEL OF THE MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF THE NON-MIGRATING BAR (PLANFORM AND BATHYMETRY) DURING A FLOOD EVENT. ON MAPS, BLACK DASHED LINES CORRESPOND TO THE PREVIOUS STAGE WHEREAS COLORED BARS REFER TO THE EVOLUTION STAGE. LONGITUDINAL TRACKS CORRESPOND TO LT18 AND THE COLOR CODE REFERS TO THE MAPS. STAGES 2 AND 3 ARE GROUPED BECAUSE THEY REFER TO SEDIMENT SUPPLY (DIFFERENT ACCORDING TO THE FLOOD MAGNITUDE). 152

FIGURE 4-17: EVOLUTION OVER TIME ACCORDING TO DISCHARGE RATES OF DEPOSITED AND ERODED VOLUMES AND CUMULATIVE VOLUMES ON CROSS-SECTIONS CS6-CS16. 154

FIGURE 4-18: THEORETICAL VIEW (BASED ON THIS STUDY) OF THE HYDROLOGICAL CONTROL OF THE MORPHOLOGICAL FORCING PARAMETERS (OBSTACLE [RIFFLE] VS PLANFORM [EXPANSION AND LOW-AMPLITUDE CURVATURE]) INVOLVED IN THE DYNAMICS OF NON-MIGRATING BARS. ARROWS INDICATE THAT THE RELATIVE INFLUENCE OF THE TWO MORPHOLOGICAL FORCING PARAMETERS CAN SHIFT ACCORDING TO THE SPECIFICITY OF THE SITE CONSIDERED..... 157

FIGURE 5-1: (A) MORPHOLOGICAL CONTEXT OF THE STUDY SITE CHARACTERIZED BY AN ANABRANCHING FLUVIAL PATTERN. THE NON-MIGRATING BAR STUDIED IS MARKED WITH THE WHITE LINE AND THE DASHED LINES REFER TO NATURAL RIFFLES. (B) DISCHARGE VARIATIONS SINCE THE FMW DONE IN 2012 TO THE SURVIVAL MEASUREMENTS ON *P. NIGRA* SEEDLINGS IN 2014. TOPOGRAPHICAL SURVEYS (A, B AND E) AND VEGETATION MEASUREMENTS (C, D, E AND F) WERE DONE DURING LOW FLOWS. CIRCLES CORRESPOND TO FLOOD MEASUREMENTS (BATHYMETRY, FLOW VELOCITY, SEDIMENT SAMPLING). BETWEEN DECEMBER 2012 AND JUNE 2013, MEASUREMENTS CHARACTERIZED THE BAR DYNAMICS BEFORE THE RECRUITMENT OF *P. NIGRA* (GREY CIRCLES). MEASUREMENTS PERFORMED AT F1 AND F2 (DARK CIRCLES) CHARACTERIZE FLOOD CONSTRAINTS APPLIED ON SEEDLINGS. (C) CS3 TO CS16 REPRESENT BATHYMETRICAL CROSS SECTIONS. FLOW VELOCITY MEASUREMENTS WERE PERFORMED ON THE UNBROKEN DARK LINES (CS3, 6, 8, 9, 11 AND 15). THE BLACK CIRCLES REFER TO INITIAL PLOTS FOLLOWED SINCE FMW; THE TRIANGLES TO ADDITIONAL PLOTS AFTER RECRUITMENT OF *P. NIGRA*. 175

FIGURE 5-2: (A) PLANFORM EVOLUTION DURING FLOODS OF THE NON-MIGRATING BAR OF MAREAU-AUX-PRES. BAR EDGES ARE CHARACTERIZED BY THE ISOLINE 84.2 M. NOTE THE SUCCESSIVE ELONGATION AND SPREADING OF THE BAR DURING FLOODS AND THE PRESENCE OF A FIXED AREA DELIMITED IN RED. FLOW VELOCITIES ON THE BAR ARE GIVEN FOR A DISCHARGE OF 1210 $M^3.S^{-1}$ AT ORLEANS GAUGING STATION. (B) FLOW VELOCITY FOR DISCHARGE VALUES RANGING FROM 530 $M^3.S^{-1}$ TO 1890 $M^3.S^{-1}$ ON CROSS-SECTION 3 (SEE FIGURE 5-1 FOR LOCATION). FLOW VELOCITY ASSOCIATED WITH DISCHARGE VALUES OF 677 $M^3.S^{-1}$ AND 1300 $M^3.S^{-1}$ (CLOSE TO FLOODS F1 AND F2) ARE MENTIONED RESPECTIVELY IN DASHED AND BOLD LINES. (C) MORPHOLOGICAL BAR DYNAMICS AS A FUNCTION OF THE FLOOD STAGES: (1) DOMINANT EROSION DURING THE RISING LIMB OF THE HYDROGRAPH, (2) DOMINANT SUBSEQUENT DEPOSITION CLOSE TO THE PEAK DISCHARGE AND AT THE BEGINNING OF THE FALLING STAGE, (3) SEDIMENT REWORKING (EROSION) ON THE BAR TOP IN BENEFIT OF FRONT LENGTHENING AND SPREADING TOWARD SIDE CHANNEL, (4) EROSION OF BAR EDGES ASSOCIATED WITH THE EMERGENCE OF THE BAR. 181

FIGURE 5-3: (A) ELEVATION AND SEDIMENT GRAIN SIZE DISTRIBUTIONS ON THE BAR DURING THE RECRUITMENT IN SUMMER 2013. (B) THREE SEDIMENT TYPES WERE IDENTIFIED USING THE CUMULATIVE CURVES OF GRAIN SIZE AND *P. NIGRA* RECRUITED ON THE THREE TYPES IN BOTH FIXED AND SPREADING AREAS. PHOTOGRAPHS CORRESPOND TO THE THREE SEDIMENT TYPES PRESENT ON THE BAR SURFACE IN PLOTS OF 0.25 M^2 (SEE A FOR LOCATION). 183

FIGURE 5-4: (A) ELEVATION OF THE WATER LEVEL OBTAINED USING A DIVER PROBE DURING THE RECRUITMENT AND GROWTH SEASON FOR *P. NIGRA* IN 2013 (SEE FIGURE 5-1 FOR LOCATION). THE RAINFALL DATA OF THE METEOROLOGICAL STATION OF ORLEANS-BRICY (CODE: 07249, LFOJ ARE AVAILABLE AT HTTP://ASSO.INFOCLIMAT.FR/). GREY LINES REFER TO THE EXTREME ELEVATION OF THE BAR; THE SHADED AREA CORRESPONDS TO THE RANGE OF ELEVATION OF PLOTS COLONIZED BY *P. NIGRA* SEEDLINGS. TOPOGRAPHIC (B) AND VEGETATION (C AND D) SURVEYS CORRESPONDS TO GREY DIAMONDS. (B) SEEDLINGS DENSITY AND HEIGHT, OBSERVED DURING C AND D SURVEYS, ARE GIVEN IN REGARDS TO THE BAR EMERSION DURATION FROM JUNE TO NOVEMBER. 184

FIGURE 5-5: DENSITY OF RECRUITMENT IN 2013 (A), DISTRIBUTION AND DENSITY OF SURVIVING SEEDLINGS IN 2014 (B) AND THE CORRESPONDING SURVIVAL RATE (C). 186

FIGURE 5-6: CUMULATIVE CURVES OF SEDIMENT GRAIN SIZE ON BOTH SPREADING AND FIXED AREAS (A). CONTINUOUS, DASHED OR DOTTED LINES, REFER RESPECTIVELY TO COMPLETE, INCOMPLETE AND NO SURVIVAL STATES. IN THE SPREADING AREA, THE A.5 PLOT IS ASSOCIATED WITH THE CUMULATIVE CURVE OF SEDIMENTS SAMPLED ON I.1. THESE PLOTS HAVE THE SAME SEDIMENT TEXTURE AND ARE VERY CLOSE (5 M) BUT NOT THE SAME SURVIVAL RATE (GIVEN IN BRACKETS) (B). SEEDLINGS HEIGHT AS A FUNCTION OF SURVIVAL RATE IN THE SPREADING AND FIXED AREAS. NUMBER OF MEASUREMENTS USED TO CONSTRUCT BOX PLOTS IS 64 FOR PLOTS A.9, A.10 AND A.11 AND 32 FOR THE OTHERS. FOR EACH PART OF THE BAR (FIXED OR SPREADING AREA), BOX PLOTS ARE SORTED FROM THE LOWEST TO THE HIGHEST SURVIVAL RATE. 188

FIGURE 5-7: VARIATIONS OF ELEVATION OF THE PLOTS WITH *P. NIGRA* SEEDLINGS BETWEEN THE INITIAL ELEVATION AND THE FLOOD F1 (A), BETWEEN THE FLOOD F1 AND THE FLOOD F2 (B), BETWEEN THE FLOOD F2 AND FINAL ELEVATION AFTER EMERSION OF THE BAR IN SUMMER 2014 (C). VARIATION IN ELEVATION BETWEEN THE INITIAL (2013) AND FINAL (2014) ELEVATION (D). BLACK POINTS REFER TO THE SPREADING AREA AND RED POINTS TO THE FIXED AREA. POINTS LOCATED ABOVE THE LINE REVEAL DEPOSITION PROCESS AND THOSE UNDER THE LINE EROSION. THE INITIAL ELEVATIONS (2013) WERE EXTRACTED FROM THE DEM OBTAINED USING THE TLS POINT CLOUD, THE ELEVATIONS DURING FLOODS FROM THE DEM BASED ON BATHYMETRIC SURVEYS AND FINAL ELEVATIONS WERE RECORDED WITH THE DGPS. 190

FIGURE 5-8: PHASING OF EROSION AND DEPOSITION PROCESSES DURING FLOODS ON EACH VEGETATED PLOTS. THE PLOTS WITH SC WRITTEN ON TOP CORRESPOND TO SCOURS CHAINS RESULTS WITH TWO CENTIMETERS OF ACCURACY. THE BLACK CROSSES ON TWO OF THEM (I.9 AND I.10) INDICATE THE ABSENCE OF SEDIMENT MOVEMENT, FOR THE OTHERS ONLY ONE ARROW INDICATES AN UNIVOCAL PROCESS (EROSION OR DEPOSITION). PLOTS WITHOUT SC WERE DOCUMENTED USING BATHYMETRIC AND TOPOGRAPHIC SURVEYS. THE THREE SUCCESSIVE ARROWS REFER RESPECTIVELY TO ELEVATION VARIATION BETWEEN 2013-F1, F1-F2 AND F2-2014. LOW VALUES SHOULD BE TAKEN WITH CAUTION BECAUSE OF THE ACCURACY OF THE MEASUREMENTS (0.1 M). 192

FIGURE 5-9: SQUARE VELOCITY DURING FLOOD PEAKS F1 AND F2 AS A FUNCTION OF SURVIVAL RATES ON EACH VEGETATED PLOTS. THE SQUARE OF FLOW VELOCITY, ASSUMED TO BE REPRESENTATIVE OF THE DRAG FORCE VARIATION APPLIED ON SEEDLINGS, IS GIVEN FOR EACH PLOT AS A FUNCTION OF SURVIVAL. THE DOTTED LINES SEPARATE PLOTS WITHOUT SURVIVAL, WITH PLOTS OF INCOMPLETE SURVIVAL AND PLOTS OF COMPLETE SURVIVAL. THE LETTER "A" REFERS TO THE PLOTS FOR WHICH A DEPOSIT OVER THE INITIAL ELEVATION IS OBSERVED THAT PERSISTS UNTIL THE EMERGENCE OF THE BAR. CONSEQUENTLY, THE DRAG FORCE APPLIED WAS LOWER THAN THE VALUE OBSERVED AT THE PEAK DISCHARGE OF F1. THE LETTER "B" REFERS TO PLOTS WITH DEPOSITION AT THE PEAK DISCHARGE OF F2. CONSEQUENTLY, THE APPLIED FORCE RANGED BETWEEN THE VALUES OBSERVED AT THE PEAKS DISCHARGE OF F1 AND F2. 194

FIGURE 5-10: (A) POTENTIAL RESPONSE OF A *P. NIGRA* SEEDLING ON BURIAL STRESSES. (B) OBSERVED RESPONSE OF A SEEDLING OF *P. NIGRA*, JUST RECRUITED, HORIZONTALLY BURIED UNDER 0.25 M OF SAND AFTER THE GROWTH PERIOD. THE NEXT YEAR, ONE SHOOT EMERGED, THE BURIED PART OF THIS NEW SHOOT HAS ROOTS AND THE EMERGENT PART HAS BUDS..... 200

FIGURE 5-11: MODEL OF MORTALITY PROCESSES ON A NON-MIGRATING MID-CHANNEL BAR IN A SANDY-GRAVEL LOWLAND RIVER FROM UPSTREAM TO DOWNSTREAM BASED ON THIS STUDY. 201

FIGURE 5-12: ILLUSTRATION OF THE DIVERSITY OF ROOT GROWTH. TWO ROOT SYSTEMS OF *P. NIGRA* SEEDLINGS GROWN FROM SEEDS COMING FROM THE SAME FEMALE TREE, PLANTED THE SAME DAY AT THE END OF MAY ON AN EXPERIMENTAL TRIAL OF 1 M^3 OF SAND. SEEDLINGS WERE EXCAVATED 260 DAYS AFTER GERMINATION. THE DEEPEST ROOT SYSTEM CORRESPONDS TO AN AERIAL GROWTH OF 40.3 CM, THE OTHER OF 10.9 CM. 203

FIGURE 5-13 : PLACETTES SUR LESQUELLES LE RECRUTEMENT DES LIGNEUX PIONNIERS A REUSSI A LA FIN DE LA PERIODE ESTIVALE DE 2013. 211

FIGURE 5-14 : SURVIE EN 2014 DES SEMIS DES ESPECES *P. NIGRA* ET *S. ALBA* SUR LES PLACETTES OU LES DEUX ESPECES SONT PRESENTES (A). GRANULARITE DES SEDIMENTS DE SURFACE SUR LESQUELS LES SEMIS DE SAULE BLANC ONT GERME ET SURVECU A LA PERIODE ESTIVALE DE 2013..... 212

FIGURE 5-15 : (A) PHASAGE DES PROCESSUS D'EROSION-DEPOT SURVENANT AU COURS DES CRUES SUR LES PLACETTES PORTANT DES SEMIS DE SAULE BLANC ET DE PEUPLIER NOIR. LES PLACETTES AVEC LA MENTION « CE » AU-DESSUS CORRESPONDENT AUX RESULTATS DES CHAINES D'EROSION (PRECISION CENTIMETRIQUE). UNE CROIX NOIR INDIQUE L'ABSENCE DE MOUVEMENT, UNE SEULE FLECHE INDIQUE UN PROCESSUS UNIVOQUE (EROSION OU DEPOT). LES AUTRES RESULTATS SONT ISSUS DES MESURES DE TOPOGRAPHIE ET BATHYMETRIE. TROIS FLECHES SUCCESSIVES CORRESPONDENT RESPECTIVEMENT A L'INTENSITE DE PROCESSUS ENREGISTREE ENTRE 2013-F1, F1-F2 AND F2-2014. LES FAIBLES VALEURS DOIVENT ETRE PRISES AVEC PRECAUTIONS EN RAISON DE LA PRECISION DES MESURES (0,1 M). (B) LE CARRE DE LA VITESSE, PRESUME COMME REPRESENTATIF DE LA VARIATION DE LA FORCE DE TRAINEE APPLIQUEE AUX SEMIS, MESUREE AUX PICS DES CRUES F1 ET F2. LA LETTRE « A » SIGNIFIE UN DEPOT DE SEDIMENT SUR LA PLACETTE SURVENANT AVANT LE PIC DE CRUE F1 ET PERSISTANT JUSQU'A L'EMERGENCE DE LA BARRE. EN CONSEQUENCE, LA FORCE DE TRAINEE APPLIQUEE AUX SEMIS DOIT ETRE INFERIEURE A CELLE OBSERVEE AU PIC DE CRUE F1 ET F2. LA LETTRE « B » SIGNIFIE QUE DU DEPOT A ETE ENREGISTRE SUR CES PLACETTES AVANT LE PIC DE CRUE F2, PROTEGEANT LES SEMIS CONTRE LA FORCE DE TRAINEE MAXIMALE DU PIC DE CRUE F2. 213

FIGURE 6-1 : (A) LOCALISATION DU SITE DE PRELEVEMENT DES GRAINES (RESERVE NATURELLE NATIONALE DE SAINT-MESMIN SUR LA LOIRE MOYENNE) ET DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL (PEPINIERE DE GUEMENE-PENFAO EN LOIRE ATLANTIQUE). CARTE GEOLOGIQUE HARMONISEE (1/50000) ET PHOTO AERIENNE DE LA PEPINIERE DE GUEMENE-PENFAO (B). 222

FIGURE 6-2 : SECTEURS DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE SEDIMENTS A PARTIR DESQUELS LES MELANGES GRANULOMETRIQUES EXPERIMENTAUX ONT ETE DEFINIS. 224

FIGURE 6-3 : COURBES DES FREQUENCES CUMULEES DES TAILLES DE GRAIN (N=68) ET D_{50} (N=98) (LOSANGES) DES SEDIMENTS DE LOIRE EN FONCTION DES UNITES SEDIMENTAIRES ECHANTILLONNEES ASSOCIEES AVEC LES COURBES DE FREQUENCE CUMULEES DE LA TAILLE DES GRAINS DES SEDIMENTS UTILISES POUR REMPLIR LA FOSSE EXPERIMENTALE. 225

FIGURE 6-4 : FOSSE EXPERIMENTALE DE 108 M DE LONG, 1,2 M DE LARGE ET 1,2 M DE PROFONDEUR REMPLIS DE SEDIMENTS LAVES PROVENANT DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE. LES TROIS TYPES DE SUBSTRAT SONT SEPARES PAR DES PLANCHES EN BOIS ET AU SEIN DE CHAQUE SUBSTRAT DES CASIERS INDIVIDUELS DE 1 M DE LONG SONT IDENTIFIES. 226

FIGURE 6-5 : RECOLTE DES GRAINES EN LABORATOIRE. PREMIERE ETAPE : OUVERTURE DES CAPSULES COMPOSANT LES INFLORESCENCES DE SAULES ET PEUPLIERS ET RECOLTE DU COTON CONTENANT LES GRAINES. ETAPE 2 : SEPARATION DU COTON ET DES GRAINES PAR TAMISAGE. 227

FIGURE 6-6 : PLANCHES D'ENSEMENCEMENT (1,2 M * 0,8 M) DES CASIERS INDIVIDUELS AVEC UNE DENSITE (345 TROUS) ET UN ESPACEMENT FIXE (NŒUDS). QUELQUES GRAINES SONT INSEREES DANS CHAQUE TROU POUR OPTIMISER LA GERMINATION, LE BUT ETANT D'AVOIR UNE PLANTULE PAR TROU. LES GRAINES DE PEUPLIER NOIR SONT BLANCHES ET DE TAILLE SUPERIEURE A CELLES DU SAULE BLANC QUI SONT GRISES. 228

FIGURE 6-7 : ENSEMENCEMENT DES DEUX TIERS DES CASIERS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL EN MAI 2012 SUIVI DE L'ENSEMENCEMENT DE TOUS LES CASIERS DE LA PARTIE 3 EN JUIN 2012 SUITE A L'ABSENCE DE GERMINATION EN MAI (A). ENSEMENCEMENT DES PARTIES 1 ET 2 DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL EN MAI 2013 (B) 230

FIGURE 6-8 : EXPERIENCE D'ARRACHAGE, LES SEDIMENTS SONT SATURES EN EAU ET LES SEMIS ARRACHES PAR TRACTION AU COLLET AVEC UN CORDON RELIE A UN DYNAMOMETRE. 231

FIGURE 6-9 : DISPOSITIF DES MESURES MANUELLES EN LABORATOIRE. 232

FIGURE 6-10 : SCANNER RELIE A L'ORDINATEUR PERMETTANT L'ACQUISITION D'IMAGES EN NUANCE DE GRIS DES SYSTEMES RACINAIRES (CHAINE DE MESURE C. BRETON, INRA ORLEANS). 233

FIGURE 6-11 : BOITES A MOUSTACHE REPRESENTANT LA VARIABILITE DES VALEURS DE CHAQUE PARAMETRE BIOLOGIQUE POUR CHACUN DES SUBSTRATS TESTES DANS L'EXPERIENCE TEMOIN. 241
FIGURE 6-12 : BOITE A MOUSTACHE DU RATIO DE LA LONGUEUR DE LA TIGE PRINCIPALE SUR LA LONGUEUR CUMULEE DU SYSTEME RACINAIRE DES SEMIS POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE TEMOIN. 243
FIGURE 6-13 : POURCENTAGE DE LONGUEUR CUMULEE DES RACINES POUR CHAQUE SUBSTRAT EN FONCTION DE LA LOCALISATION SUR LA RACINE PRINCIPALE DE L'EXPERIENCE TEMOIN. 244
FIGURE 6-14 : MEDIANES ET MOYENNES DES LONGUEURS DE RACINES EN FONCTION DES CLASSES DE DIAMETRE POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE TEMOIN (A). MOYENNE DES LONGUEURS DE RACINES PAR CLASSE DE DIAMETRE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LA RACINE PRINCIPALE POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE TEMOIN (B). 245
FIGURE 6-15 : BOITE A MOUSTACHE DECRIVANT LA VARIABILITE DES RATIOS DES BIOMASSES ET LONGUEURS DE TIGE SUR LES BIOMASSES ET LONGUEURS DE LA RACINE PRINCIPALE OU CUMULEES DU SYSTEME RACINAIRE, POUR CHAQUE SUBSTRAT DANS L'EXPERIENCE TEMOIN. 247
FIGURE 6-16 : BOITES A MOUSTACHE REPRESENTANT LA VARIABILITE DES VALEURS DE CHAQUE PARAMETRE POUR CHACUN DES SUBSTRATS TESTES DANS L'EXPERIENCE D'ARRACHAGE. 249
FIGURE 6-17 : POURCENTAGE DE SEMIS ARRACHES EN FONCTION DE LA FORCE DE TRACTION APPLIQUEE AU COLLET POUR CHAQUE SUBSTRAT. 253
FIGURE 6-18 : BOITES A MOUSTACHE DECRIVANT LA VARIBILITE DU RATIO DE LA LONGUEUR DE LA TIGE PRINCIPALE SUR LA LONGUEUR CUMULEE DU SYSTEME RACINAIRE DES SEMIS POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE ARRACHAGE. 253
FIGURE 6-19 : POURCENTAGE DE LONGUEUR CUMULEE DES RACINES POUR CHAQUE SUBSTRAT EN FONCTION DE LA LOCALISATION SUR LA RACINE PRINCIPALE DANS L'EXPERIENCE D'ARRACHAGE. 254
FIGURE 6-20 : MEDIANES ET MOYENNES DES LONGUEURS DE RACINES EN FONCTION DES CLASSES DE DIAMETRE POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE ARRACHAGE(A). MOYENNE DES LONGUEURS DE RACINES PAR CLASSE DE DIAMETRE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LA RACINE PRINCIPALE POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE ARRACHAGE (B). 255
FIGURE 6-21 : COMPARAISON DES PARAMETRES BIOLOGIQUES DE LA PARTIE AERIENNE DES SEMIS EN FONCTION DE LA FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE INFERIEURE OU SUPERIEURE A 50 N. 256
FIGURE 6-22 : COMPARAISON DES PARAMETRES BIOLOGIQUES DECRIVANT LE SYSTEME RACINAIRE DES SEMIS EN FONCTION DE LA FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE INFERIEURE OU SUPERIEURE A 50 N. 257
FIGURE 6-23 : COMPARAISON DES PARAMETRES BIOLOGIQUES DECRIVANT LE RAPPORT DE CROISSANCE ENTRE LA PARTIE AERIENNE ET LE SYSTEME RACINAIRE DES SEMIS EN FONCTION DE LA FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE INFERIEURE OU SUPERIEURE A 50 N. 258
FIGURE 6-24 : EVOLUTION DE LA FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE EN FONCTION DES PARAMETRES BIOLOGIQUES POUR LES SEMIS ARRACHES AVEC UNE FORCE INFERIEURE A 50 N DANS LE SUBSTRAT SABLEUX. 259
FIGURE 6-25 : EVOLUTION DE LA FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE EN FONCTION DES PARAMETRES BIOLOGIQUES POUR LES SEMIS ARRACHES AVEC UNE FORCE INFERIEURE A 50 N DANS LE SUBSTRAT SABLO-GRAVELEUX. 260
FIGURE 6-26 : EVOLUTION DE LA FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE EN FONCTION DES PARAMETRES BIOLOGIQUES POUR LES SEMIS ARRACHES AVEC UNE FORCE INFERIEURE A 50 N DANS LE SUBSTRAT BI-COUCHE. 261

FIGURE 6-27 : BOITES A MOUSTACHE DECRIVANT LA VARIABILITE DES RATIOS DES BIOMASSES ET LONGUEURS DE TIGE SUR LES BIOMASSES ET LONGUEURS DE LA RACINE PRINCIPALE OU CUMULEES DU SYSTEME RACINAIRE, POUR CHAQUE SUBSTRAT DANS L'EXPERIENCE D'ARRACHAGE. 262
FIGURE 6-28 : BOITES A MOUSTACHE REPRESENTANT LA VARIABILITE DES VALEURS DE CHAQUE PARAMETRE BIOLOGIQUE POUR CHACUN DES SUBSTRATS TESTES DANS L'EXPERIENCE TEMOIN DES SAULES BLANCS. 264
FIGURE 6-29 : BOITES A MOUSTACHE DECRIVANT LA VARIBILITE DU RATIO DE LA LONGUEUR DE LA R PRINCIPALE SUR LA LONGUEUR CUMULEE DU SYSTEME RACINAIRE DES SEMIS POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE TEMOIN SUR LES SAULES BLANCS... 265
FIGURE 6-30 : POURCENTAGE DE LONGUEUR CUMULEE DES RACINES POUR CHAQUE SUBSTRAT EN FONCTION DE LA LOCALISATION SUR LA RACINE PRINCIPALE DANS L'EXPERIENCE TEMOIN SUR LES SAULES BLANCS. 265
FIGURE 6-31 : MEDIANES ET MOYENNES DES LONGUEURS DE RACINES EN FONCTION DES CLASSES DE DIAMETRE POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE TEMOIN SUR SAULE BLANC (A). MOYENNE DES LONGUEURS DE RACINES PAR CLASSE DE DIAMETRE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LA RACINE PRINCIPALE POUR CHAQUE SUBSTRAT DE L'EXPERIENCE TEMOIN SUR SAULE BLANC (B). 266
FIGURE 6-32 : BOITES A MOUSTACHE DECRIVANT LA VARIABILITE DE LA TAILLE DE LA TIGE DES SEMIS DE PEUPLIERS NOIRS ENFOUIS POUR CHAQUE SUBSTRAT. 267
FIGURE 6-33 : PROFONDEUR D'ENFOUISSEMENT DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR DE 283 JOURS POUR CHAQUE SUBSTRAT. 267
FIGURE 6-34 : TAILLE DES SEMIS EN FONCTION DE LA HAUTEUR D'ENFOUISSEMENT. TOUS LES POINTS REPRESENTENT DES SEMIS N'AYANT PAS EMERGE DE LA NOUVELLE SURFACE TOPOGRAPHIQUE APRES 320 JOURS D'ENFOUISSEMENT. LE LOSANGE REPRESENTE LE SEUL SURVIVANT OBSERVE DANS LE SUBSTRAT SABLO-GRAVELEUX. 268
FIGURE 6-35 : SEMIS SURVIVANT SUR LE SUBSTRAT SABLO-GRAVELEUX. 269
FIGURE 6-36 : SCANS DES SYSTEMES RACINAIRES DE SAULES BLANCS ET DE PEUPLIERS NOIRS. CHAQUE LETTRE EN TETE DE COLONNE CORRESPOND A UN INDIVIDU. POUR CHAQUE INDIVIDU, LES SCANS SONT PRESENTES EN FONCTION DE LEUR LOCALISATION PAR RAPPORT A LA RACINE PRINCIPALE (0-20 CM, 20-40 CM, 40-60 CM, 60-80 CM). POUR CHAQUE SUBSTRAT, TROIS INDIVIDUS SONT PRESENTES EN FONCTION DE LEUR LONGUEUR CUMULEE DE RACINE : LE SYSTEME RACINAIRE DE LONGUEUR CUMULEE MAXIMALE (*S. ALBA* : A, D, G ; *P. NIGRA* : J, M, P), MEDIANE (*S. ALBA* : C, E, H ; *P. NIGRA* : K, N, Q) ET MINIMALE (*S. ALBA* : C, F, I ; *P. NIGRA* : L, O, R). 277
FIGURE 6-37 : FORCE NECESSAIRE A L'ARRACHAGE DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR POUR CHAQUE SUBSTRAT EN FONCTION DE LA HAUTEUR AERIENNE ET DE LA LONGUEUR DE RACINE PRINCIPALE POUR LES DEUX ANNEES DE MESURE. 281
FIGURE 7-1 : ORGANISATION DES CHAPITRES DE LA THESE EN FONCTION DES PROCESSUS DES PHASES ET PROCESSUS QU'ILS DECRIVENT. 289
FIGURE 7-2 : SUCCESSION DES PHASES BIOGEOMORPHOLOGIQUES FLUVIALES EN FONCTION DE L'HISTOIRE DU SITE DE MAREAU-AUX-PRES AINSI QUE LES ARTICLES SCIENTIFIQUES ISSUS DE L'ETUDE DES DIFFERENTES PHASES. 290
FIGURE 7-3 : PEUPLIERS NOIRS ENFOUIS DONT LA SURFACE OPPOSABLE A L'ECOULEMENT EST REDUITE. 297
FIGURE 7-4 : LA BARRE SEDIMENTAIRE DE MAREAU-AUX-PRES APRES TRAVAUX D'ENTRETIEN (EXPORT DU MATERIEL VEGETAL) EN 2012 (A) ET PENDANT L'ETE SUIVANT (ABSENCE DE REJETS) EN 2013 (B). L'ENTREE DE CHENAL SECONDAIRE DE MONTLOUIS-SUR-LOIRE APRES TRAVAUX D'ENTRETIEN (ABANDON SUR SITE DU MATERIEL VEGETAL) EN 2011 (C) ET PENDANT L'ETE SUIVANT (FORTE PROPORTION DE REJETS) EN 2012 (D). LES FLECHES NOIRES INDIQUENT LA DIRECTION DU NORD. 306

FIGURE 7-5 : A) LOCALISATION DES ZONES DE RECRUTEMENT ET D'ABSENCE DE RECRUTEMENT EN 2013 REPRESENTEES PAR RAPPORT A LA PRESENCE OU L'ABSENCE DE VEGETATION EN 2012 AVANT TRAVAUX ; B) SURVIE DES SEMIS INSTALLES EN 2013 REPRESENTEE EN FONCTION DE LA PRESENCE OU NON DE VEGETATION EN 2012 AVANT TRAVAUX A LA MEME LOCALISATION. POUR LES DEUX CARTES, LES ZONES MATERIALISEES PAR UNE COURBE VERTE REPRESENTE LE CONTOUR DES ILOTS VEGETALISES AVANT LES TRAVAUX..... 309

Liste des annexes

ANNEXE 1 : LISTE DES COMMUNICATIONS..... 342

ANNEXE 2 : RESUME COLLOQUE AGU, SAN FRANCISCO (USA)……. 344

ANNEXE 3 : RESUME COLLOQUE TRANSPORT SOLIDE, TOURS (FRANCE)…….. 345

ANNEXE 4 : RESUME COLLOQUE EGU, VIENNE (AUTRICHE)…… 346

ANNEXE 5 : RESUME COLLOQUE HYDRO-ECO, RENNE (FRANCE)…… 347

ANNEXE 6 : RESUME COLLOQUE ICSF, LEEDS (UK)……. 348

ANNEXE 7 : RESUME COLLOQUE ISRIVERS, LYON (FRANCE)…… 351

ANNEXE 8 : RESUME COLLOQUE ASF, PARIS (FRANCE)…….. 354

ANNEXE 9 : FASCICULE DE VALORISATION DU PLNG III…….. 355

Chapitre 1 : Contexte scientifique et problématique

Entretien d'un chenal seconadaire dans le Val de Monlouis-sur-Loire

1.1. Définition des concepts, objets et échelles spatio-temporelles

1.1.1. Concepts généraux et problématique environnementale global

Le bassin versant constitue l'unité fonctionnelle la plus grande pour un hydrosystème donné qui draine les eaux du ruissellement de surface délimité par les lignes de crêtes (bassin versant topographique) et les eaux souterraines (bassin hydrogéologique). S'ajoutent à ces flux hydriques des flux de matières (tels que les sédiments), des flux d'organismes et d'énergie.

Depuis ces 30 dernières années, la nature des interrelations entre les processus et les flux au sein des bassins versants on fait l'objet d'une conceptualisation mettant en exergue la continuité spatio-temporelle reliant les différents compartiments de ces unités hydrographiques.

Le *River Continuum Concept* (*RCC*) (Vannote *et al.*, 1980) caractérise ces échanges au sein de l'hydrosystème selon un *continuum* longitudinal vers l'aval ; le *Flood Pulse Concept* (*FPC*) (Junk, 1989) quant à lui définit les échanges entre le lit mineur et la plaine alluviale avec la notion de littoral mouvant en fonction de la géographie des inondations. Le concept d'hydrosystème fluvial, au sens d'Amoros et Petts (1993), reprend ces notions et les intègre dans une vision conceptuelle plus large prenant en compte le fonctionnement physique et biologique des rivières à plusieurs échelles de temps et d'espace. Les flux de matières, énergies et organismes surviennent donc selon des échanges longitudinaux amont-aval, transversaux au sein de la vallée, mais également verticaux entre la surface et le domaine sous-terrain, à travers des flux bidirectionnels (Figure 1-1). Les échelles de temps s'échelonnent entre l'instantané et pluri-séculaire.

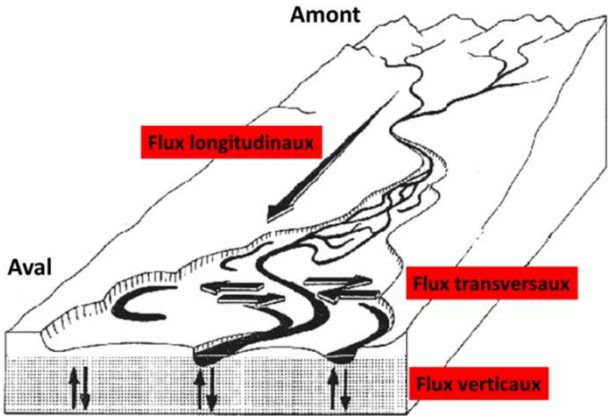


Figure 1-1 : Les flux d'échanges au sein de l'hydrosystème fluvial modifié d'après Amoros et Petts (1993).

Les échelles de temps et d'espace ont une relation d'interdépendance, l'augmentation de la temporalité d'un processus en augmente généralement son extension spatiale. Les différentes échelles peuvent s'emboîter permettant une hiérarchisation des processus à plusieurs niveaux. Les processus de rangs inférieurs sont contraints par ceux de rangs supérieurs et les processus de rangs supérieurs intègrent la résultante des processus de rangs inférieurs. Utiliser le concept d'hydrosystème fluvial dans l'étude des réseaux hydrographiques permet de les diviser en unités fonctionnelles et d'appréhender de manière systémique les interrelations qui les régissent. Ainsi, la notion d'éco-complexe a également émergé et est définie comme « un ensemble d'écosystèmes interactifs, et non pas seulement juxtaposés » (Piégay *et al.*, 2003).

Les aménagements et activités humaines ont profondément modifié les conditions de transferts et d'échanges au sein de l'hydrosystème fluvial soit en agissant sur les variables de contrôle à l'échelle du bassin versant soit en agissant directement sur le corridor fluvial. L'utilisation des ressources (bois, sédiments, eau, terre agricole) a modifié les bilans énergétiques et de matière au sein des rivières, participant ainsi à l'accélération des modifications morphologiques de celles-ci. De plus, la construction d'infrastructures transversales à l'écoulement (radiers, épis, barrages, ouvrages de franchissement) modifie, et le plus souvent entrave, les transferts longitudinaux. Les transferts latéraux quant à eux sont limités ou rendus impossibles par la présence d'ouvrages longitudinaux comme les digues et certains ouvrages de navigation par exemple. La ripisylve, partie intégrante de l'hydrosystème, a également subi l'influence de la modification de ces échanges, la biodiversité associée intra et interspécifique étant sous la stricte dépendance du régime de perturbation de la dynamique hydrosédimentaire.

Afin de préserver les richesses que représentent les hydrosystèmes fluviaux mais également de concilier les besoins des sociétés, et notamment la sécurité des biens et des personnes face au risque d'inondation, des instruments politiques européens ont été conçus tels que la Directive inondations, la Directive Cadre sur l'Eau (Water Framework Directive) et Natura 2000 (directives « habitats » et « oiseaux »). Des programmes de recherche internationaux émergent également (EU Life projects, EU Reform project, EU Interreg Freude am Fluss, European Center for river restoration, FAO Water, IGBP Global Water Systems Project, US Critical Zones Observatories) ainsi que des manifestations internationales ciblées sur l'analyse des hydrosystèmes fluviaux (conference on the status and future of the world's large rivers, Vienne [2011] et Manaus [2014], international River Symposium [2014]). Ils traduisent l'intérêt grandissant et la nécessité pressante d'atteindre une meilleure connaissance de ces systèmes et d'intégrer ces connaissances aux politiques publiques. Une fois encore, la notion de transfert apparaît comme fondamentale mais cette fois-ci entre les acteurs de la recherche et de la gestion des territoires afin de préserver ces environnements largement dégradés. De plus, dans un contexte de changement climatique qui risque d'imposer de nouveaux bouleversements à ces environnements fragilisés, il apparaît essentiel de s'attacher à l'analyse des hydrosystèmes fluviaux selon différentes échelles spatiales et temporelles.

1.1.2. Paramètres d'évolution morphologique des cours d'eau

L'hydrosystème fluvial est un système dynamique au sein duquel la morphologie des cours d'eau est contrôlée par des forçages s'exprimant à des échelles spatio-temporelles différentes, tels que le climat, la géologie (lithologie et tectonique), la topographie et l'occupation du sol ; ces forçages influencent deux variables majeures de contrôle de la morphologie des cours d'eau que sont le débit liquide et le débit solide. Les aménagements et activités anthropiques influencent également l'évolution morphologique des cours d'eau en modifiant ces variables de contrôle. Ainsi, le profil longitudinal, le tracé en plan et la géométrie de la section d'écoulement résultent des caractéristiques et modifications des variables de contrôles (Hey, 1978 ; Yang et Song, 1979 ; Richards, 1982 ; Alabyan et Chalov, 1998). Dans les rivières à fond mobile, ces variables s'ajustent à différentes échelles de temps et d'espace (Schumm, 1977 ; Knighton, 1998), respectant l'interrelation entre l'extension spatiale des processus et les échelles de temps, précédemment évoquées.

Ainsi, en règle générale, le profil en long s'ajuste à l'échelle des siècles et millénaires, les styles fluviaux à l'échelle des décennies et des siècles et la géométrie de la section transversale à l'échelle décennale, de la saison ou même de la crue (Knighton, 1998).

La balance de Lane (1955) (Figure 1-2) permet de hiérarchiser ces contrôles en identifiant les deux variables de l'évolution morphologique des cours d'eau, le débit solide et le débit liquide, auxquelles s'ajoutent deux variables d'ajustement que sont la taille des grains composant les sédiments et la pente d'énergie du cours d'eau.

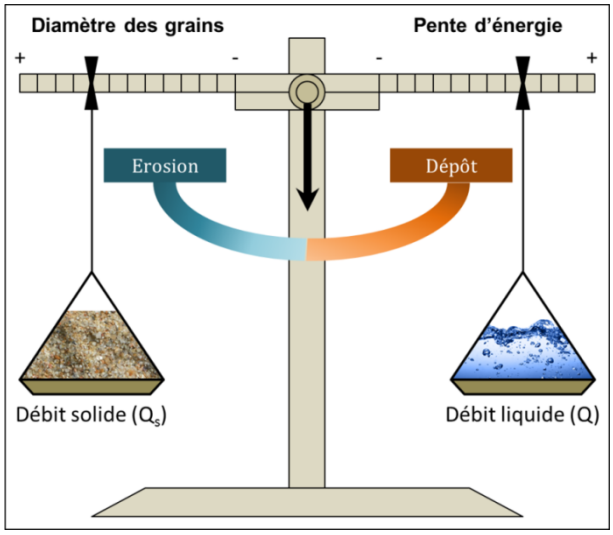


Figure 1-2 : La balance de Lane (1955) illustre le principe d'équilibre dynamique des cours d'eau.

Le débit solide est communément divisé en deux modes de transport, la suspension des particules fines sans contact avec le fond de la rivière (charge de lessivage ou *washload*) et les particules grossières transportées sur le fond (roulement, glissement, traction [*bedload*]) auxquelles il est possible d'intégrer les particules en saltation (contact épisodique avec le fond, *suspended bed material load*). Lorsque ces deux modes de transport coexistent, la morphologie est plus rapidement affectée par le charriage. Le transport en suspension des particules fines participe également à l'évolution morphologique des fonds de vallée en influençant la vitesse et les modalités de construction de la plaine alluviale (décantation en crue, interactions avec la végétation, colmatage et/ou comblement d'anciens chenaux) mais également la turbulence au sein des chenaux (modification de la constante de Von Karman) et donc, dans une certaine mesure, la dynamique de la charge de fond (Richards, 1982 ; Rodrigues *et al.*, 2012).

A l'échelle du bassin versant, le climat détermine la quantité et la forme des apports hydriques (*e.g.* pluie, neige), cependant en général peu de ces apports arrivent directement dans le réseau hydrographique et le transfert de ces apports, en terme de quantité et de vitesse, dépend des caractéristiques du bassin versant. Les principales caractéristiques du bassin versant influençant le débit liquide sont la pente, la lithologie (imperméabilité, réservoirs etc…), le couvert végétal (type, pourcentage de recouvrement, architecture, etc…), les propriétés physiques des sols (croûte de battance, composition, etc…). Les débits solides sont soumis aux mêmes variables de contrôles : climat (*e.g.* cryoclastie, érosion mécanique et chimique), lithologie (*e.g.* nature des sédiments), relief et notamment la pente (*e.g.* transport gravitaire), propriétés du sol (*e.g.* cohésion) et couvert végétal (*e.g.* protection contre le ruissellement, bioturbation). La taille des grains est principalement fonction de la nature des sédiments et des roches qui leur ont donné naissance ainsi que de la distance à la zone de production. La taille des grains a tendance à diminuer le long du *continuum* fluvial depuis les têtes de bassin jusqu'aux estuaires bien que la variabilité des litho-faciès puisse moduler cette grande tendance. La pente du cours d'eau à l'échelle du bassin versant dépend principalement du climat à l'échelle globale (*e.g.* niveau de base) et de la géologie (*e.g.* subsidence, faille).

Cependant, la balance de Lane (1955) ne fournit qu'une vision incomplète de l'ajustement morphologique. Les grandes tendances, évoquées ci-dessus, sont à nuancer par les facteurs locaux qui s'expriment au niveau de la section d'écoulement. Le modèle qualitatif proposé par Rubey (1933) combine le ratio d'aspect (largeur/profondeur) aux débits liquide, solide, taille des grains et pente d'énergie pour décrire l'équilibre entre les variables de contrôles globales et locales. Le modèle de Rubey (1933) est décrit par l'équation suivante :

$$S\beta \propto G^{a} {D_{50}}^{b} Q^{-c} \qquad (1\text{-}1)$$

Avec S correspondant à la pente, β le ratio d'aspect, G la charge sédimentaire, D_{50} la taille médiane des sédiments, Q le débit liquide et $a, b\ et\ c$ des paramètres de pondération. Il insiste sur l'interrelation entre les variables morphologiques et celles du transport solide en soulignant l'ajustement mutuel des paramètres pente et ratio d'aspect pour assurer la continuité du transport sédimentaire. Selon Morisawa (1968), un paramètre de rugosité *n* devrait être associé au premier terme de l'équation. La rugosité influence, avec la pente, la vitesse d'écoulement et par extension la stabilité des berges (donc le ratio d'aspect, Richards, 1982).

A l'échelle du chenal, le ratio d'aspect est un élément clé influençant le transport de la charge de fond, et spécifiquement le développement des barres sédimentaires migrantes (libres). Si le ratio d'aspect est trop faible (sous la valeur de β critique), elles ne se forment pas. Lorsque le ratio d'aspect devient fort, le mode (nombre de barres sur une section transversale donnée) augmente et influence la forme en plan du cours d'eau (tresse *vs* méandre, voir Crosato et Mosselman, 2009). Pour des valeurs spécifiques du ratio d'aspect un phénomène de résonance peut conduire à la mise en place de barres dites non-migrantes (ou forcées) en amont ou en aval d'une perturbation géométrique induite par la présence d'un obstacle (seuil, épis), ou par un changement rapide dans la direction des berges (Zolezzi et Seminara, 2001; Zolezzi *et al.*, 2005; Mosselman *et al.*, 2006).

Le ratio d'aspect est lui-même influencé par la possibilité d'érosion latérale du cours d'eau. En effet, si les berges ne sont pas érodables mais que le chenal l'est, ce dernier va s'inciser et le ratio d'aspect diminuera jusqu'à atteindre une pente d'équilibre. En revanche, dans le cas de berges facilement érodables, le chenal pourra s'élargir et le ratio d'aspect augmenter. La stabilité des berges est fonction de leur nature et des ciments qui y précipitent mais également de la végétation notamment ligneuse qui s'y développe (Kondolf et Curry, 1984 ; Aberthy et Rutherfurd, 2001 ; Pollen et Simon, 2005). Cette dernière participe à la modification et l'évolution du style fluviatile et notamment du nombre de chenaux, de leur forme et de la forme en plan (Hickin, 1984 ; Gran and Paola, 2001 ; Tal and Paola, 2010 ; Pietsch et Nanson, 2011 ; Van Dijk *et al.*, 2013). Récemment, Gibling et Davies (2012) ont avancé l'hypothèse d'une co-évolution des styles fluviatiles et des communautés de végétaux vasculaires (Figure 1-3).

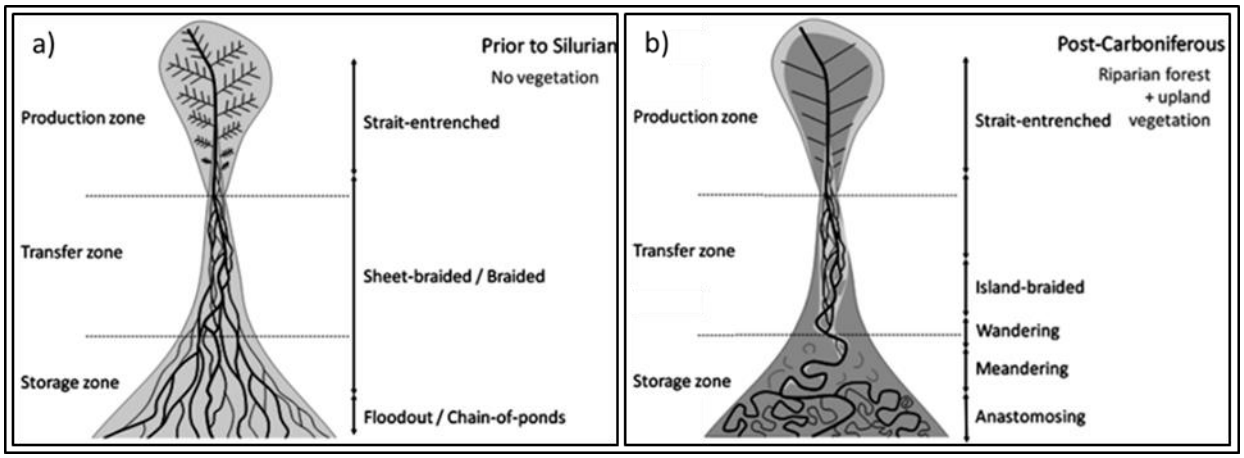


Figure 1-3 : Représentation schématique de la propagation de la végétation dans le système fluvial du Silurien inférieur au présent modifié d'après Corenblit *et al.* (2014).

Selon ces auteurs, l'apparition des systèmes racinaires aurait permis la fixation des berges et l'apparition de styles fluviaux « chenalisés » peu représentés avant le Silurien (les systèmes fluviatiles en tresses et peu profond semblent dominer dans les archives sédimentaires avant cette période [Figure 1-4]). Cependant, cette dominance dans les séries sédimentaires peut également être en lien avec un potentiel d'archivage plus important avec l'apparition de la végétation puisqu'elle module les processus d'érosion à différentes échelles spatiales au sein du bassin versant.

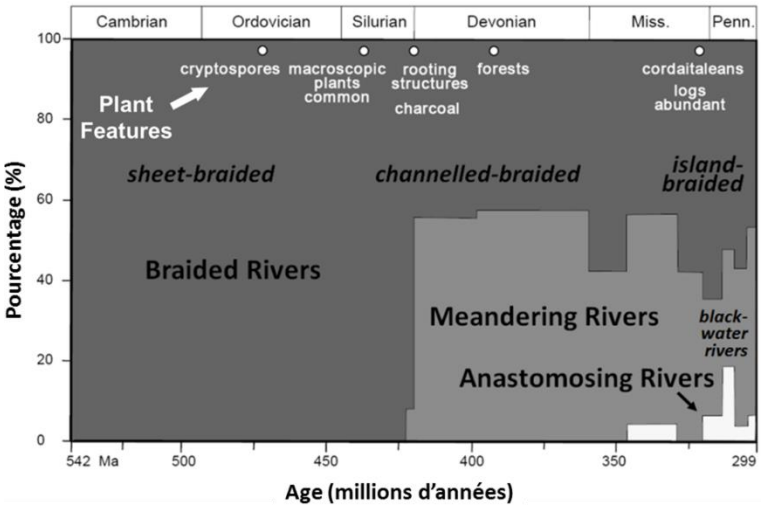


Figure 1-4 : Evolution du pourcentage relatif de styles fluviatiles du Cambrien au Carbonifère, modifié d'après Gibling *et al.* (2013).

1.1.3. La végétation ligneuse des hydrosystèmes fluviaux

En domaine tempéré, les bords de cours d'eau sont colonisés de formations ligneuses qui se développent au sein du lit majeur et constituent un écotone, milieu de transition entre le domaine aquatique et le domaine terrestre, soumis au régime de perturbation des crues et entretenant avec les autres composantes de l'hydrosystème des interrelations complexes (Naiman *et al.*, 2005). Communément, deux types d'association sont distingués, les associations de bois durs (*e.g.* chênes, frênes) et les associations de bois tendre (*e.g.* saules, peupliers, aulnes). Les associations à bois durs sont généralement topographiquement plus élevées où plus éloignées du chenal principal et leur évolution est principalement autogénique. Toutefois, les événements hydrologiques exceptionnels peuvent conduire à un rajeunissement de ces formations.

Les associations de bois tendre quant à elles peuvent être considérées comme des forêts pionnières qui se développent à proximité immédiate du chenal principal et de la nappe alluviale. Ces formations sont soumises aux régimes de perturbations par les crues qui les rajeunissent fréquemment engendrant des processus biologiques principalement allogéniques bien que, dès les premiers stades pionniers, des processus autogéniques se mettent également en place.

La dispersion au sein du corridor fluvial est principalement assurée par anémochorie et hydrochorie. Ce dernier moyen de dispersion engendre une structuration des populations en fonction de l'évolution de la ligne d'eau. Ces espèces sont capables de se reproduire par voie sexuée ou par voie végétative à partir de propagules détachées d'arbres « mères ».

L'extension spatiale sur laquelle peut se développer la végétation ligneuse dépend de la largeur de la vallée et la structure des peuplements dépend de la dynamique fluviale dont le régime de perturbation lié à ce système pulsé (Junk, 1989) est source de biodiversité en favorisant les hétérogénéités spatio-temporelles des éco-complexes (Schnitzler *et al.*, 2003). En conséquence, la ripisylve a tendance à être plus étroite en tête de bassin et à s'étendre et se diversifier vers l'aval comme décrit sur la rivière Tech par Pinay (1990).

Dans cette thèse nous allons particulièrement nous intéresser à la végétation ligneuse pionnière et donc aux espèces à bois tendre qui se trouvent sous nos latitudes principalement représentées par la famille des Salicacées. Ces espèces sont particulièrement adaptées à la

dynamique fluviale puisqu'elles sont capables de résister à la submersion (Ewing 1996 ; Stromberg, 1997 ; Gladwin et Roelle, 1998),

1.1.4. La végétation ligneuse « ingénieure » des hydrosystèmes fluviaux

Les études portant sur les interactions entre végétation ligneuse et la dynamique fluviale sont réalisées depuis plusieurs décennies (Bendix et Stella, 2013) et se sont appliquées à la fois à décrire les processus locaux qui se déroulent à l'échelle de la crue ou à plus long terme et qui participent à l'évolution de la morphologie fluviale.

La végétation au sein de l'hydrosystème agit sur les écoulements comme un frein et un déflecteur (Claude, 2015). D'un point de vue sédimentaire, la végétation exerce un effet de peigne qui piège les sédiments et les fixe en créant une protection contre l'érosion. L'effet de la végétation ligneuse sur les écoulements et le piégeage des sédiments dépend des caractéristiques morphologiques des individus (arborescent, arbustif, ramification), de l'âge et de l'espèce. Flexibilité de la tige principale et des rameaux secondaires, présence du feuillage et surface foliaire sont également des paramètres importants (Antonarakis *et al.*, 2010). La densité d'implantation de la végétation a également un impact sur les processus hydro-sédimentaires.

Le concept de *Fluvial Biogeomorphic Succession*, proposé par Corenblit (2007), caractérise les interactions entre les processus hydrogéomorphologiques et la dynamique de la végétation selon quatre phases (Table 1-1).

Table 1-1 : Les quatre phases du concept *Fluvial Biogeomorphic Succession* et la structure des interactions correspondantes entre les facteurs biotiques (dynamique de la végétation) et abiotiques (dynamique fluviale), modifié d'après Corenblit (2007).

Phases de succession	Principaux processus biotiques et abiotiques	Durée dans un contexte de climat tempéré	Structure des interactions entre processus hydrogéomorphologiques et dynamique de la végétation
Phase 1 : Géomorphologique	Destruction végétation Dispersion diaspores Evolution morphologique sans végétation	Quelques heures à quelques mois suivant une crue	Abiotique
Phase 2 : Pionnière	Recrutement végétation pionnière sur sédiments nus	Quelques heures à quelques mois	Abiotique → Biotique
Phase 3 : Biogéomorphologique	Installation végétation Successions allogéniques secondaires Accrétion unités morphologiques végétalisées (berges, îles, plaines d'inondation)	Quelques mois à quelques décennies	Abiotique ↔ Biotique
Phase 4 : Ecologique	Successions autogénique végétation Stabilisation des unités végétalisées Déconnection des perturbations hydrogéomorphologiques	Quelques décennies à quelques siècles	Abiotique ← → Biotique

La première phase correspond à la phase géomorphologique où les processus hydro-sédimentaires sont conduits par les variables de contrôle présentées dans le modèle de Rubey (1933). Dans cette phase, l'influence de la végétation est absente, cette phase peut réapparaître lorsque des événements hydrologiques suffisamment importants, ou les actions menées par l'homme, « remettent le système à zéro ». La seconde phase est la phase pionnière correspondant à la phase d'installation des espèces ligneuses pionnières par germination de graines sur les sédiments fraichement remaniés et déposés lors de la phase 1. Cette phase de recrutement est fortement dépendante de la dynamique fluviale. En accord avec le modèle de la *« recruitment box »* proposé par Mahoney et Rood (1998), le recrutement réussi d'une année donnée dépend de l'adéquation entre émergence des unités morphologiques colonisables et période de libération de graines (Stella *et al.*, 2006) ainsi que de l'adéquation entre abaissement de nappe et taux de croissance racinaire des espèces.

De nombreux travaux scientifiques se sont attachés à comprendre les liens entre la dynamique fluviale sur le recrutement des espèces ligneuses pionnières dans des contextes de rivières à style fluviatile varié mais en contexte climatique plutôt tempéré (*e.g.* Segelquist *et al.*, 1993 ; Scott *et al.*, 1996 ; Van Splunder *et al.*, 1996 ; Auble et Scott, 1998 ; Foussadier, 1998 ; Kranjcec *et al.*, 1998 ; Shafroth *et al.*, 1998 ; Rood *et al.*, 1998 ; Scott *et al.*, 1999 ; Johnson 2000 ; Shafroth *et al.*, 2000 ; Kalischuk *et al.*, 2001 ; Guilloy-Froget *et al.*, 2002 ; Dixon, 2003 ; Polzin et Rood, 2006 ; Ahn *et al.*, 2007 ; Kramer *et al.*, 2008 ; Gonzalez et Comin, 2010 ; Stella *et al.*, 2010 ; Guilloy *et al.*, 2011). Lorsque la phase biogémorphologique commence, les jeux de rétroactions entre dynamique fluviale et la végétation ligneuse pionnière se mettent en place. La végétation ligneuse va favoriser la stabilisation et l'accrétion des formes fluviales participant ainsi à la construction de la plaine alluviale, la formation des îles et l'obstruction des chenaux secondaires (*e.g.* Hupp et Osterkamp, 1996 ; Dykaar et Wigington, 2000 ; Gurnell *et al.* 2001 ; Rodrigues *et al.*, 2006 et 2007 ; Cabezas *et al.*, 2008 ; Stromberg *et al.*, 2010 ; Comiti *et al.*, 2011) jusqu'à l'atteinte de la phase écologique, dominée par les processus allogéniques.

Les nombreuses études menées sur les liens entre la dynamique fluviale et la végétation, notamment ligneuse ont également donné naissance à de nombreux articles de synthèses (*e.g.* Hupp et Osterkamp, 1996 ; Steiger *et al.*, 2005 ; Corenblit *et al.*, 2007, 2008, 2011, Gurnell, 2006, 2012, 2013 ; Osterkamp *et al.*, 2012) et à la notion de biogéomorphologie appliquée à cette thématique de recherche. De plus, elles ont permis de faire apparaître le concept « d'espèces ingénieures » (*sensu* Jones *et al.*, 1996) appliquées à la végétation des hydrosystèmes (Gurnell, 2013) consolidant son influence importante sur la dynamique fluviale ainsi que sur l'évolution des rivières.

De plus, les nombreuses études menées dans ce domaine ont souvent une visée de protection, restauration ou conservation vis-à-vis des menaces qui pèsent sur la ripisylve en raison des activités et aménagements anthropiques. Ainsi, ces études visent souvent à analyser l'influence de la régulation des rivières (*e.g.* débits, divagation latérale) à la fois comme cause de dégradation mais également comme élément de gestion (Auble *et al.*, 1994 ; Braatne *et al.*, 1996 ; Cabezas *et al.*, 2008 ; Burke *et al.*, 2009 ; Gonzalez *et al.*, 2010b ; Eekhout *et al.*, 2013 a et b).

Cependant, malgré une bibliographie relativement importante, la complexité des mécanismes d'interactions et rétroactions en fonction du style fluviatile, des espèces étudiées, du contexte climatique et anthropique font que **certaines zones d'ombres demeurent notamment sur le passage de la phase pionnière à la phase biogéomorphologique car les études qui portent sur la survie des semis dans les stades juvéniles** (Wilcox et Shafroth., 2013 ; Kui *et al.*, 2014) **sont rares**.

Nous proposons dans ce travail de nous attacher à **comprendre les mécanismes du passage de la phase pionnière à la phase biogéomorphologique sur une rivière sablo-graveleuse de plaine** qu'est la Loire, pour deux espèces de Salicacées : *Populus nigra* L. et *Salix alba* L. Le peuplier noir est notamment une des espèces pilotes du Programme National de Conservation des Ressources Génétiques Forestières engagé par le Ministère de l'Agriculture suite à la conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe (Strasbourg 1990 [Villar et Forestier, 2009]). La Loire est un fleuve du réseau de conservation *in situ* de cette espèce, réseau qui permet de conserver les ressources dans leur milieu naturel et de façon dynamique. La reproduction végétative permet aux populations de se maintenir mais ne permet pas une évolution et une adaptation de l'espèce. De plus, pour garder le potentiel d'adaptation aux changements de l'environnement, la conservation *in situ* se doit de maintenir une large diversité génétique, donc issue de brassage génétique et de sélection naturelle (reproduction sexuée). Dans ce contexte général, **cette thèse implique un travail focalisé sur du matériel végétal issu de graines plutôt que de rejets.**

Ce travail intègre une approche biogéomorphologique sur la phase pionnière de la végétation ligneuse à Salicacae (*Populus nigra* et *Salix alba*) et vise à déterminer (i) l'impact des processus hydro-sédimentaires et (ii) les caractéristiques propres de ces espèces, pour comprendre les capacités de survie des semis dès les premières crues suivant leur année d'installation jusqu'à l'atteinte de leur maturité sexuelle (environ 8-10 ans).

1.2. Concertation avec les gestionnaires

Cette thèse vise à répondre un objectif global qui est de mieux **comprendre les modalités de l'installation et de survie (dans ses premiers stades) de la végétation ligneuse pionnière par reproduction sexuée dans une rivière sablo-graveleuse de plaine, soumise à une pression anthropique forte.** Les activités humaines menées sur les cours d'eau influencent cette installation en modifiant l'hydrologie, les processus d'évolution de la morphologie fluviale et les interactions dynamique hydro-sédimentaire et végétation ligneuse. La gestion de la rivière fait partie intégrante du système et les enjeux socio-économiques et environnementaux associés à cette gestion sont à l'origine du financement de cette thèse. Nous avons souhaité dans ce travail ne pas dissocier artificiellement une recherche qui se voudrait « fondamentale » d'une recherche dite « appliquée ». A cet égard, nous avons intégré dans cette étude les différents facteurs d'évolution de la rivière dont l'Homme (politiques de gestion et d'action) fait partie. L'objectif de ce travail est d'améliorer les connaissances dans le domaine de la biogéomorphologie fluviale appliquée aux espèces ligneuses pionnières mais également transférer ces connaissances aux gestionnaires comme outil d'aide à la décision pour une meilleure gestion des environnements fluviaux et plus particulièrement du lit de la Loire.

Cette démarche s'insère dans la philosophie de la plateforme Recherche/Données/Information du Plan Loire Grandeur Nature III qui offre des possibilités d'échanges entre scientifiques et gestionnaires auxquels nous avons participé pour présenter nos résultats et nos démarches de concertation entreprises avec les services gestionnaires, notamment la DDT 45, la DREAL Centre et L'Agence de L'eau Loire-Bretagne.

Dans un souci de diffusion, nos objectifs et résultats ont été présentés au conseil scientifique de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin, à la DDT 37 ainsi qu'au Conservatoire d'Espaces Naturels de la région Centre.

Enfin, comme il sera abordé dans la partie « approche *in situ* et choix des sites », une part importante de nos travaux réalisés sur le site de Mareau-aux-Prés ont permis au service gestionnaire en charge de l'entretien du lit (DDT 45) d'affiner ses méthodes d'interventions en intégrant les exigences de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin.

Chapitre 2 : Démarche expérimentale : de l'*in situ* à l'*ex situ*

Mesures bathymétriques sur le site de Mareau-aux-Prés (RNN Saint-Mesmin)

2.1. Objectifs et synthèse du chapitre

Ce chapitre a pour objectif de présenter la démarche expérimentale développée dans cette thèse afin de répondre à la problématique posée. Quatre axes de recherche ont été identifiés :

Axe 1 : **Dynamique hydro-sédimentaire** des unités morphologiques propices à l'installation des ligneux pionniers, notamment des espèces *Populus nigra* et *Salix alba*, ainsi que l'influence des pratiques d'entretien du lit pour la remobilisation sédimentaires en Loire moyenne ;

Axe 2 : Impact de la dynamique hydro-sédimentaire sur la **recolonisation par les ligneux pionniers** après les travaux d'entretien du lit en Loire moyenne ;

Axe 3 : Influence des contraintes exercées lors des crues (érosion, force de traînée, enfouissement) sur la **survie des semis de des espèces pionnières dans leurs premiers stades de développement** ainsi que leur capacité à résister à ces contraintes ;

Axe 4 : **Vitesse et processus d'édification d'une île pionnière** à partir d'une unité morphologique colonisée par des semis de peupliers noirs dans une rivière sablo-graveleuse de plaine, la Loire moyenne.

Pour chaque axe, les hypothèses de travail et objectifs spécifiques seront détaillés dans ce chapitre. Une double approche a été choisie pour répondre à notre problématique :

- une **approche *in situ*** focalisée sur le suivi de la dynamique hydro-sédimentaire, couplée à la dynamique de la végétation ligneuse pionnière dans les premiers stades de développement et menée sur des sites de Loire moyenne ayant subi des travaux d'entretien du lit ;

- une **approche *ex situ*** ciblée sur le développement des semis de peupliers noirs et de saules blancs, et plus spécifiquement sur l'influence de la structure sédimentaire (taille des grains, organisation stratigraphique), ainsi que sur la détermination de seuils de tolérance des semis aux contraintes exercées en crue (force de traînée, érosion, enfouissement).

2.2. Présentation de la Loire et de son bassin versant

Cette partie est consacrée à la description du système ligérien dans lequel s'intègrent les sites d'étude. Les travaux de Babonaux (1970), Brossé (1982), Rodrigues (2004) et Latapie (2011) présentent des synthèses assez exhaustives de la Loire, de son bassin versant ainsi que de sa dynamique hydro-sédimentaire et morphologique. Le lecteur y est renvoyé pour plus de détails ainsi qu'aux travaux de Cornier (2002) concernant la biodiversité ligérienne.

2.2.1. Géographie et hydrographie

Le fleuve Loire est le plus long de France avec un cours de plus de 1000 km drainant un bassin versant de 117 000 km² correspondant à 1/5ème du territoire métropolitain (Figure 2-1). Le cours de la Loire est communément subdivisé en trois parties :

- Loire amont de sa source, au Mont Gerbier-de-Jonc en Ardèche (07), au Bec d'Allier en aval de Nevers (58) ;
- Loire Moyenne entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine, au niveau de la ville d'Angers (49) ;
- Loire aval (ou Basse Loire) du Bec de Maine à son embouchure au niveau de Saint-Nazaire (44).

La Loire s'écoule selon un axe sud sud-est/nord nord-ouest jusque dans l'Orléanais où son tracé s'infléchit pour suivre une direction est/ouest jusqu'à l'Océan Atlantique dans lequel le fleuve termine son parcours (Figure 2-1).

La Loire ne s'écoule pas au centre de son bassin versant mais à proximité des lignes de partage des eaux des bassins du Rhône et de la Seine, lui conférant une organisation particulière du chevelu hydrographique. Ainsi, seule la confluence avec la Maine se localise en rive droite du fleuve, les autres affluents principaux que sont l'Allier, le Cher, l'Indre et la Vienne se situent en rive gauche.

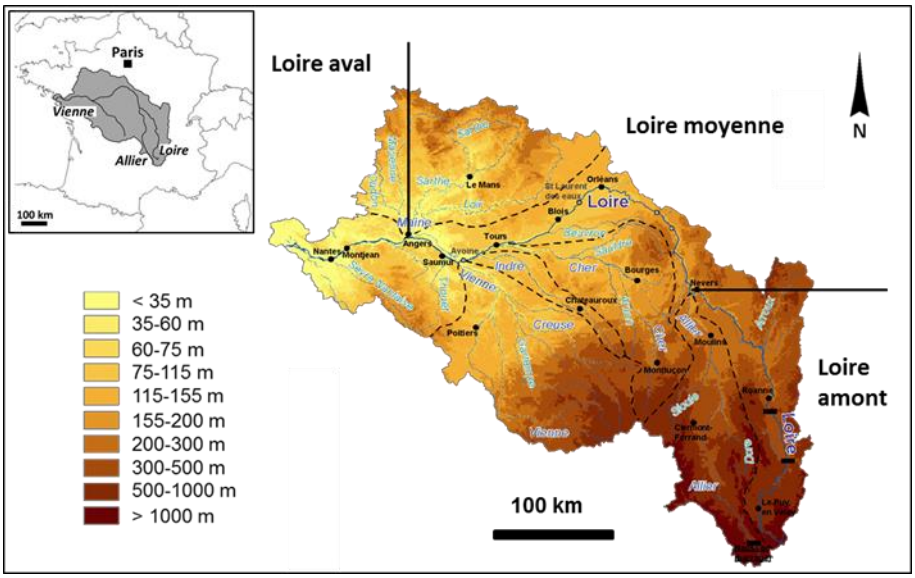


Figure 2-1 : Relief du bassin versant de la Loire avec les bassins versants des principaux affluents, les barrages et les centrales nucléaires d'après Andriamahefa (1999), modifié.

2.2.2. Lithologie

L'organisation spatiale spécifique du réseau hydrographique au sein du bassin versant de la Loire a pour origine sa géologie structurale et sa lithologie (Figure 2-2). Les natures de roche variées qui caractérisent le bassin versant ligérien influencent son tracé et la forme de sa vallée (Babonaux, 1970 ; Brossé, 1982). Trois grands ensembles sont identifiés d'amont en aval (Géosciences BRGM, 2010) :

- le Massif Central, caractérisé par des granites intrusifs dans des roches métamorphiques (gneiss, schistes) ainsi que par un remplissage sédimentaire tertiaire des fossés d'effondrement au sein desquels la Loire s'écoule selon une alternance de gorges et de plaines plus ou moins étendues ;
- le bassin de Paris, dont le massif central constitue le socle, où se succèdent des formations sédimentaires carbonatées et siliceuses, mésozoïques et cénozoïques ;
- le Massif Armoricain, de structure géologique complexe composé des dépôts sédimentaires de l'Ere Primaire et de roches métamorphiques.

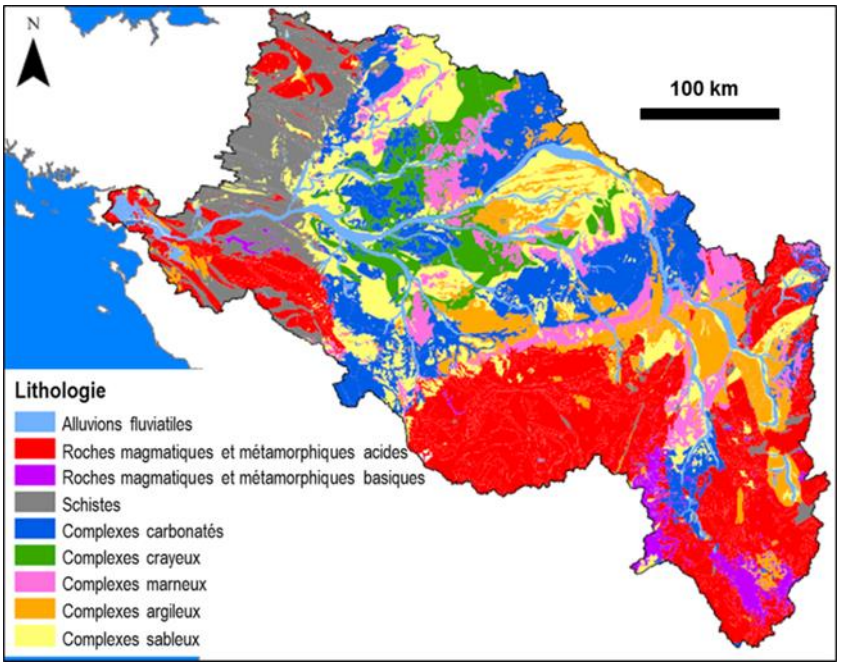


Figure 2-2 : Carte lithologique du bassin de la Loire d'après Blanchard (2007), modifié.

2.2.3. Régime hydrologique

Le régime hydrologique de la Loire est, principalement conditionné par les influences climatiques présentes sur le bassin et par son relief. Les deux influences majeures sont le Massif Central et l'Atlantique (Dacharry, 1996).

Dans la partie amont du bassin, les précipitations sont importantes (1000 mm/an au Puy de Dôme), délivrées sous forme de neige ou d'orages violents dits cévenols. L'influence Atlantique offre un climat plus doux et plus sec (600 mm/an à Nantes).

Ces deux influences et les pentes conditionnent le régime de crue de la Loire dont trois types sont identifiés (Dacharry, 1996) :

- les crues d'origine cévenole : crues brutales survenant au printemps et au début de l'automne ;
- les crues d'origine océanique : crues issues de précipitations abondantes et durables survenant surtout sur le cours moyen et aval du fleuve ;
- les crues mixtes : crues résultant de la conjonction des deux types précédents et pouvant atteindre des valeurs de débits exceptionnels.

Les hautes eaux se présentent durant la saison hivernale, même si des crues de printemps sont possibles. Les étiages survenant de juillet à octobre peuvent être sévères. Le régime hydrologique est aussi en grande partie influencé par la présence de barrages, comme Villerest dévolu à l'écrêtement des crues et au soutien d'étiage.

A Orléans, la Loire se caractérise par un module de 344 $m^3.s^{-1}$, avec un débit mensuel minimal (QMNA) biennal de 70 $m^3.s^{-1}$ et des crues de 1700 $m^3.s^{-1}$ pour une même période de retour, le débit décennal est quant à lui de 2700 $m^3.s^{-1}$ (Figure 2-3).

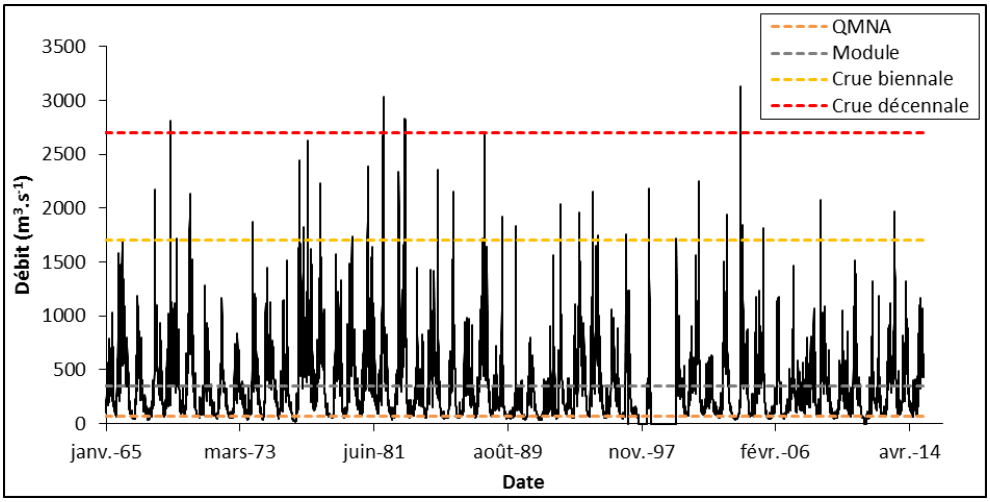


Figure 2-3 : Débits de la Loire à la station de jaugeage d'Orléans (source DREAL Centre) depuis janvier 1965 jusqu'à mars 2015.

2.2.4. Morphologie fluviale de la Loire

La Loire amont (entre la source et la confluence avec l'Allier) s'écoule dans des gorges caractérisées par une pente de 3,8 ‰ permettant le transport d'une charge sédimentaire grossière jusqu'au barrage de Grangent.

Plus en aval, la rivière atteint la plaine du Forez propice au développement d'un style méandriforme divagant (Figure 2-4a) avec une pente qui s'adoucit jusqu'à atteindre 0,7 ‰. Dans son secteur terminal, l'Allier adopte un style méandriforme divaguant et délivre une charge sédimentaire de fond significative à la Loire, expliquant ainsi son changement de style morphologique à l'aval de la confluence.

La Loire Moyenne (du Bec d'Allier au Bec de Maine) est endiguée de façon quasiment continue et se caractérise par une pente qui diminue de 0,5 à 0,4 ‰ et une largeur de bande active fluctuant entre 250 et 400 m jusqu'au Bec de Vienne. Plus en aval, la largeur de la bande active augmente pour osciller autour de 500 m (Latapie, 2011). La charge sédimentaire se compose de sables et de graviers siliceux majoritairement transportés depuis le Massif Central (Brossé, 1982, Macaire *et al.*, 2013) dont le D_{50} (médiane de la taille des particules) décroît de 4,6 mm à 0,63 mm entre le Bec d'Allier et Montjean-sur-Loire (Latapie, 2011). En conséquence, différents styles fluviatiles se succèdent entre Nevers et Montjean-sur-Loire : chenal unique relativement rectiligne (Figure 2-4d), chenal méandriforme (Figure 2-4c) et chenaux multiples (Figure 2-4b) définis comme un style « mixte » de tressage-anabranche (Malavoi, 2002). Certains chenaux multiples sont profonds, étroits et sinueux, séparés par des îles relativement stables (Grivel, 2008), d'autres secteurs présentent des barres sédimentaires peu végétalisées migrantes. Plus précisément, trois secteurs peuvent être distingués :

- du Bec d'Allier à Briare, la configuration morphologique présente des chenaux multiples nombreux, délimités par des îles et des barres sédimentaires ;
- de Briare à Tours, le chenal est plutôt rectiligne, même si dans l'Orléanais quelques grands méandres se dessinent dans le secteur de Guilly, le nombre de chenaux et la largeur des îles diminuent en comparaison avec le secteur amont ;
- en aval de Tours la configuration morphologique retrouve un style à chenaux multiples.

La Loire aval présente également une configuration en chenaux multiples séparés par des îles très larges (Figure 2-4e) et s'écoulant sur une pente de 0,2 ‰. Les marges de ces îles sont le plus souvent renforcées par des enrochements en vue d'éviter leur érosion.
Dans ce secteur, à l'instar de certains tronçons amonts, de nombreux ouvrages de navigation (*e.g.* épis, chevrette, dhuis), construits pour entretenir un chenal navigable, influencent la morphologie fluviale du fleuve et de son estuaire. Dans cette partie, la dynamique sédimentaire est également fortement soumise à l'influence de la marée dynamique, perceptible jusqu'à Montjean-sur-Loire (Brossé, 1982).

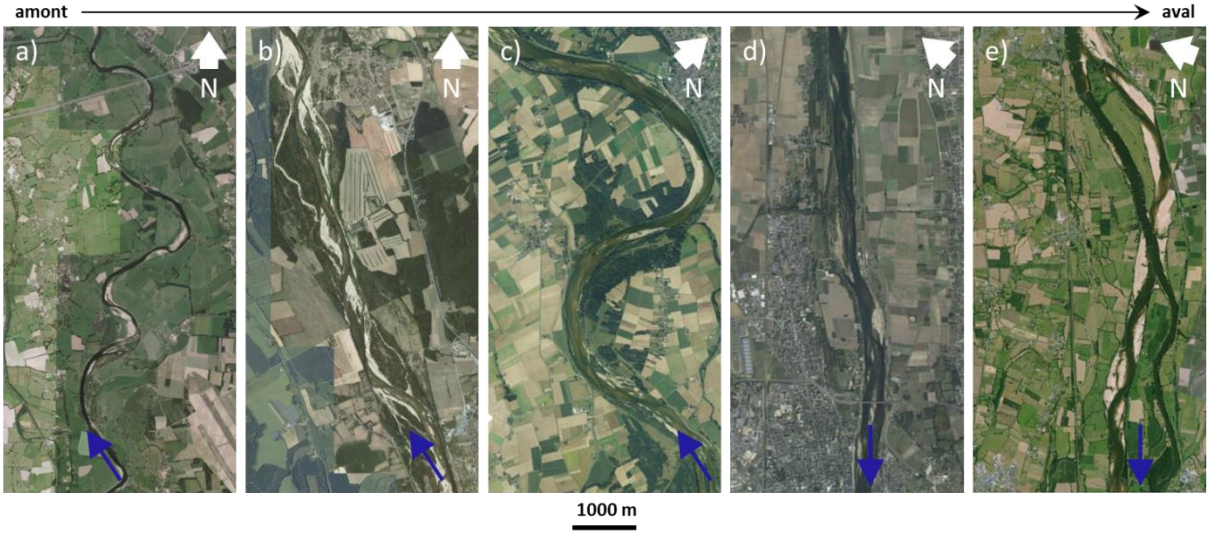


Figure 2-4 : Styles fluviatiles rencontrés sur la Loire : a) chenal à méandre en Loire amont (Digoin), b) chenaux multiples en Loire moyenne (La Charité-sur-Loire), c) chenal à méandre en Loire moyenne (Guilly), d) chenal rectiligne en Loire moyenne (Blois), e) chenaux multiples en Loire aval (Ingrandes). Les flèches bleues indiquent le sens d'écoulement. (Photographie issues du site internet http://www.geoportail.gouv.fr/)

2.2.5. Incision récente et conséquences sur la végétalisation du lit

La dynamique de sédimentation et la morphologie des cours d'eau sont naturellement influencées par les caractéristiques du bassin versant et l'alternance de phases d'incision et d'alluvionnement façonnant les vallées et plaines alluviales. Cependant, l'incision peut être renforcée par les activités anthropiques. L'aménagement de la Loire, ainsi que l'exploitation de ses ressources, ont participé à l'accélération du processus naturel d'incision au cours des 60 dernières années. Les principaux facteurs à l'origine de cet enfoncement sont :

- la réduction de l'espace de divagation par endiguement, principalement sur le cours moyen et aval du fleuve (Dion, 1961), concentrant les écoulements de crue sur une section réduite en comparaison avec le lit majeur naturel du fleuve ;
- la construction des ouvrages de navigation au XIXème siècle, favorisant l'auto-curage dans le chenal principal et la déconnexion des chenaux secondaires ;

- l'extraction massive des granulats, estimée à 220 millions de tonnes (Dambre et Malaval, 1993) entre 1949 et 1992, représente une ponction moyenne de 5 000 000 $t.an^{-1}$ alors que le débit solide total annuel était estimé à 1 000 000 t/an entre 1953 et 1968 (Berthois, 1971). Des estimations plus précises, réalisées pour l'année 2010 à partir de jaugeages solides couplés à de la bathymétrie multifaisceaux, permettent d'estimer à 480 000 t le débit solide par charge de fond en Loire Moyenne en amont de la confluence avec la Vienne (Claude, 2012 ; Claude *et al.*, 2012) ;
- la construction des barrages, seuils et ouvrages de franchissement empêchant/retardant le transit de la charge sédimentaire et influençant la dynamique hydrologique du fleuve.

En conséquence, la végétation ligneuse pionnière se développe dans les annexes hydrauliques épisodiquement connectées au chenal principal et sur les barres sédimentaires (Grelon, 1976). Malgré le fait que les espèces ligneuses pionnières peuvent se reproduire par voie sexuée sur ces surfaces (ce qui est un atout écologique pour l'hydrosystème ligérien), cette végétation fixe les sédiments et évolue rapidement vers des stades matures en raison d'une immersion et d'un « rafraîchissement » par la dynamique du fleuve peu fréquent. Ceci entraînant une banalisation écologique par la perte de diversité d'habitat ainsi qu'un réhaussement de la ligne d'eau de crue. Cedernier augmente le risque de rupture des ouvrages par surverse, notamment des digues, impliquant une mise en péril des personnes et des biens. L'incision s'est également accompagnée de l'abaissement de la ligne d'eau d'étiage qui a engendré la déstabilisation de certains ouvrages d'arts tels que les ponts (*e.g.* effondrement du pont de Tours en 1978) et certaines digues. L'abaissement de la ligne d'eau d'étiage s'est accompagné de celui de la nappe associée au fleuve modifiant les échanges au sein de l'hydrosystème ligérien et menaçant l'exploitation de certains puits d'alimentation en eau potable.

Les espèces ligneuses pionnières inféodées au corridor ligérien ne sont pas les seules à participer à la végétalisation du lit endigué. Plusieurs espèces invasives aquatiques (*e.g.* jussie, renoncule) et terrestres (*e.g.* érable négundo) participent également à cette végétalisation et engendrent des problèmes écologiques supplémentaires.

Cependant, ces problématiques ne concernent pas le travail présenté ici, bien que dans une certaine mesure étudier les conditions favorables au maintien des espèces non-invasives peut permettre de lutter contre les espèces invasives.

2.2.6. Gestion au sein du lit endigué

En réponse à l'incision et à la colonisation du milieu par les espèces ligneuses pionnières, des actions d'entretien du lit sont régulièrement entreprises par les services gestionnaires de l'Etat visant à :

- abaisser la ligne d'eau de crue,
- limiter la réduction de la bande active ;
- restaurer la capacité hydraulique du fleuve en crue ;
- atténuer (voire stopper) l'incision en rééquilibrant la balance débit liquide / débit solide ;
- maintenir une diversité et richesse d'habitat et veiller à la continuité des espèces et des sédiments.

A l'instar de la Loire, d'autres cours d'eau français, pour certains en cours d'incision (Allain-Jegou, 2002), donnent actuellement lieu à des investigations scientifiques afin d'évaluer la pertinence, durabilité et les conséquences environnementales des travaux d'entretien et de restauration entrepris sur la végétation ou l'incision de ces hydrosysètmes (Jourdain C, thèse en cours ; Claude, 2015 ; Parrot E., thèse en cours).

Pour répondre aux objectifs mentionnés ci-dessus deux grands types de travaux peuvent être effectués, des travaux de restauration ou d'entretien. La restauration vise à favoriser le retour à l'état antérieur d'un écosystème dégradé, par abandon ou contrôle raisonné de l'action anthropique (Lefloch et Aronson, 1994). L'entretien, quant à lui, désigne l'action de maintenir en état un système et par extension les soins et réparations qu'exige cette action.

Les travaux d'entretien succèdent généralement aux travaux de restauration et consistent le plus souvent en une gestion des boisements (Claude *et al.*, 2008) et des sédiments.

Les travaux concernent principalement trois types d'unités fonctionnelles, le chenal principal, les chenaux secondaires et les boires/bras morts (anciens chenaux en voie de comblement avancé, souvent colmatés par des sédiments fins, qui représentent un intérêt majeur pour la diversité écologique) ainsi que les zones d'implantation d'ouvrages de navigation.

Les travaux sur **le chenal principal** ont pour objectif de favoriser le libre écoulement des eaux en période de crue ainsi que la remobilisation des sédiments piégés par la végétation ligneuse pionnière. Les unités morphologiques type barre sédimentaire au sein du chenal principal sont principalement concernées par ces travaux qui consistent essentiellement à l'élimination de la végétation ligneuse pionnière (dévégétalisation) et par la scarification des sédiments afin de les ameublir pour promouvoir leur remobilisation durant les crues subséquentes. Ces travaux, très communs sur la Loire, manquent d'un retour d'expérience sur leur durabilité (capacité du fleuve à remobiliser ses sédiments après intervention, recolonisation par la végétation (indigène ou exotique).

Les actions entreprises sur **les chenaux secondaires** visent également à restaurer la capacité hydraulique du fleuve en crue en empêchant la végétalisation et le comblement de ces chenaux. Les principaux travaux entrepris sont donc la dévégétalisation, la scarification comme pour le chenal principal auxquels peut s'ajouter un reprofilage de la section d'écoulement en vue de rééquilibrer la balance des débits liquides entre les différents chenaux. Des expérimentations et suivis scientifiques menés sur des sites ateliers (*e.g.* Bréhémont [37], Ingrandes [49]) dans le cadre de ces interventions ont permis d'affiner les modalités et techniques employées pour ces travaux (Rodrigues, 2004 ; Rodrigues et Gautier, 2007 ; Claude, 2012, Nabet, 2013).

Les boires sont des annexes hydrauliques déconnectées du chenal principal pour des débits supérieurs au module, principalement alimentées par les relations avec la nappe ou connectées au fleuve par l'aval. Elles sont favorables à la reproduction de nombreuses espèces végétales et animales tenant de ce fait un rôle majeur dans le fonctionnement biologique de la rivière. A ce titre, elles constituent des zones d'intérêts concernant la diversité d'habitat de la Loire. La position topographique de ces unités est élevée par rapport au chenal principal, conséquence de son incision, limitant les interactions avec la dynamique du fleuve puisque les boires en sont généralement déconnectés sur une période longue de l'année.

Les travaux concernent le plus souvent le creusement des boires pour faciliter leur connexion au chenal principal et augmenter la durée des inondations. Parfois, une gestion de la végétation rivulaire peut également être envisagée.

Les travaux visent à améliorer le fonctionnement écologique ou au moins le maintien des peuplements présents. La notion d'amélioration est évidemment dépendante de l'état de référence ainsi que de l'état initial avant travaux (Thoby et Ricou, 2004).
Les actions menées sur **les ouvrages de navigation** (dhuis, épis, chevrettes) peuvent viser à la fois leur restauration, confortement, dévégétalisation ou arasement. Le but visé concerne essentiellement la remobilisation des sédiments et l'élargissement du lit en vue de diminuer les contraintes qui s'y exercent et donc l'incision du chenal principal. Ce point constitue un levier important dans la gestion de la charge sédimentaire du lit de la Loire. Des investigations ponctuelles menées sur différents sites par le passé (Givry-Fourchambault [54], Oudon [44]…) ont initiés une réflexion globale sur l'intérêt de conserver ces structures au sein du lit de la Loire. Depuis 2009, une expérimentation coordonnée par Voies Navigables de France (associant l'Agence de l'eau Loire Bretagne et le GIP Loire Estuaire) visant l'arasement/raccourcissement de 104 épis en vue de libérer le stock sédimentaire piégé sur un linéaire de 10 km a fait l'objet d'un suivi scientifique inédit (Handfus, 2011 ; Handfus *et al.*, 2013).

La dévégétalisation consiste le plus souvent en l'élimination de la végétation ligneuse pionnière comme frein à l'écoulement. Les techniques employées peuvent être diverses, coupe à blanc sans intervention sur le système racinaire, coupe à blanc avec scarification des sédiments (décompaction), coupe à blanc et abaissement de la cote topographique avec exportation dans le chenal principal des sédiments piégés par la végétation avec les systèmes racinaires (Bacchi et Berton, 1997). Le matériel végétal peut être broyé sur place, exporté hors du lit endigué, déposé dans le chenal principal ou laissé sur place. Les différentes techniques choisies dépendent des objectifs, des moyens et de l'accessibilité des sites concernés. Cependant, en fonction du matériel et des techniques, l'efficacité et la durabilité des travaux peuvent être discutées. La sous-soleuse (arrache-poireaux) est principalement utilisée, permettant de « griffer » et d'arracher les racines sur une profondeur de d'environ 0,5 m. La végétation ligneuse pionnière est capable de se propager efficacement par voie végétative (Figure 2-5), de développer un système racinaire dense ainsi que de densifier et ramifier sa partie aérienne en cas de recépage. De ce fait, certains travaux sont soupçonnés de favoriser la reproduction végétative.

Figure 2-5 : Repousse végétative de l'année n+1 à partir de fragments de peupliers noirs abandonnés sur site après travaux l'année n.

Ainsi des questions se posent sur l'aptitude des travaux à restaurer la capacité hydraulique du fleuve et surtout sur la durabilité de ces opérations. De plus, d'un point de vue écologique, la question de l'impact des travaux se pose également, suite au bouleversement brutal pour les communautés faunistique et floristique. L'évaluation des conséquences de tels travaux sur cette biodiversité est actuellement réalisée dans le cadre du projet Biomareau financé dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature (III) auquel la thèse présentée ici est reliée. Cette thèse vise également à apporter des réponses pour la gestion du lit endigué de la Loire, notamment comprendre l'impact des travaux sur la dynamique des sédiments et certaines espèces ligneuses pionnières qui s'y développent en vue d'évaluer leur efficacité.

2.3. Hypothèse de travail et objectifs

Afin de répondre aux questionnements scientifiques et appliqués énoncés dans la partie introductive, nous avons défini quatre axes de recherche. Ces quatre axes correspondent aux quatre chapitres suivants dont trois sont présentés sous la forme d'articles scientifiques (Figure 2-6). Chacun des chapitres permet à la fois de répondre aux questions générales adressées dans la thèse et de répondre à des questions plus ciblées sur des thématiques scientifiques spécifiques. Nous présenterons dans ce chapitre les questions, hypothèses et objectifs pour chacun des axes déterminés qui ont conduit notre réflexion pour répondre à la problématique générale de la thèse. Les questions scientifiques plus ciblées développées au sein des articles seront présentées au sein des chapitres suivants.

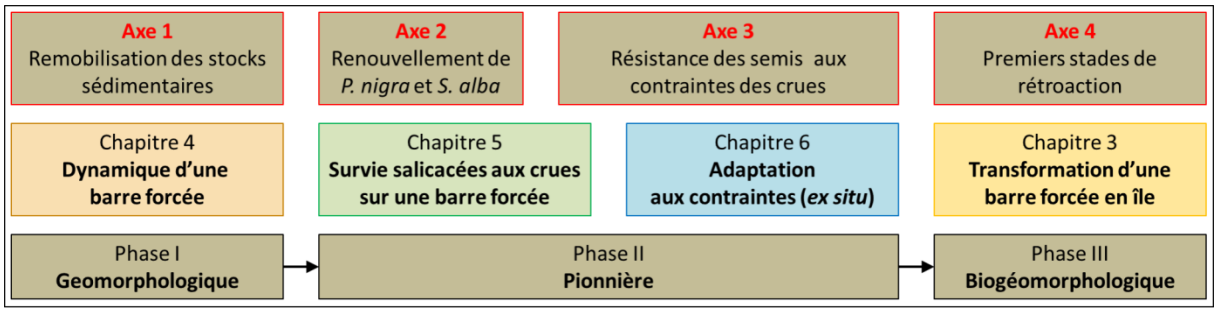


Figure 2-6 : Organisation des chapitres de la thèse en fonction des axes de recherche définis et des premières phases de la *Fluvial Biogeomorphic Succession* (Corenblit *et al.*, 2007).

L'**axe 1** concerne l'impact des pratiques d'entretien pour la remobilisation des stocks sédimentaires. Les questions émergentes sont : « quelle est l'influence des travaux sur la dynamique hydro-sédimentaire (modalités et intensité de déstockage des sédiments) ? Quelles sont les caractéristiques des nouvelles unités morphologiques créées ou rajeunies suite aux travaux et dans quelle mesure influencent-elles le recrutement et la survie de certains ligneux pionniers ? »

L'hypothèse *sous-jacente est que les travaux d'entretien modifient la distribution spatiale granulométrique (homogénéisation), la compaction des sédiments, la résistance à l'écoulement (suppression végétation) et les vitesses d'écoulement en crue favorisant ainsi la remobilisation et le renouvellement des sédiments.*

L'objectif de cet axe de recherche est de caractériser la dynamique hydro-sédimentaire sans végétation, correspondant à la phase définie comme biogéomorphologique (Corenblit *et al.*, 2007) ainsi que son influence potentielle sur la phase pionnière permettant la survie des semis de peupliers noirs et de saules blancs. Les objectifs spécifiques sont donc (i) de comprendre l'adaptation de la morphologie fluviale (*i.e.* réponse hydro-sédimentaire et morphologique aux travaux), (ii) obtenir un retour d'expérience sur les pratiques : atteinte de l'objectif de remobilisation et quantification, (iii) évaluer l'influence sur l'installation potentielle de nouveaux semis.

Le **second axe** se focalise sur l'influence des travaux d'entretien sur le renouvellement des populations de deux espèces de Salicaceae. La question associée à cet axe de recherche est : « des pratiques d'entretien adaptées peuvent-elles favoriser le renouvellement des populations de peupliers noirs et de saules blancs par reproduction sexuée ? »

L'hypothèse *de travail est que les modalités de pratiques d'entretien qui visent à limiter la propagation des espèces ligneuses pionnières par voie végétative après travaux, peuvent favoriser le renouvellement des populations de peupliers noirs et de saules blancs par reproduction sexuée en créant de nouveaux espaces potentiels de germination.*

L'objectif de cet axe est de comprendre dans quelle mesure les travaux d'entretien du lit peuvent-ils favoriser le développement d'une phase pionnière (Corenblit *et al.*, 2007) par l'installation de semis suite à une perturbation en estimant l'importance du type de reproduction après travaux et éventuellement l'influence du type de pratique.

Le **troisième axe** de recherche concerne la capacité des jeunes semis à survivre aux contraintes survenant au cours des épisodes de crues post recrutement. Cet axe de recherche vise à répondre à la question suivante : « quels sont les paramètres influençant le potentiel de résistance des semis entre l'année n et n+1 aux contraintes hydrauliques et sédimentaires exercées lors des crues ? »

L'hypothèse *est que les paramètres influençant la résistance sont une combinaison de facteurs biotiques et abiotiques. La structure sédimentaire (i.e. taille des grains et agencement stratigraphique) (i) conditionne la stabilité du substrat de germination (érosion) et (ii) influence le développement des systèmes racinaires et aériens des semis, également dépendant de la phénologie de dispersion des graines (i.e. l'influence de la date de libération des graines, qui s'échelonne entre mi-mai et fin juin) qui détermine leur résistance aux contraintes en crue.*

L'objectif de cet axe de recherche est de caractériser les processus de survie permettant le passage de la phase pionnière à la phase biogéomorphologique (Corenblit *et al.*, 2007). Les objectifs spécifiques de cet axe de recherche sont (i) d'enrichir les connaissances concernant le développement des semis de peupliers noirs et de saules blancs, (ii) de déterminer des adaptations phénotypiques (système aérien et racinaire) à la structure sédimentaire, (iii) d'identifier des seuils de tolérance aux contraintes, notamment en évaluant le rapport entre l'intensité des contraintes et les spécificités de développement des semis.

Enfin, un **quatrième axe** concerne les premiers stades de rétroactions entre la végétation ligneuse pionnière installée par voie sexuée et la dynamique fluviale. Les questions sous-jacentes sont : « quels sont les processus et les vitesses d'édification d'une île pionnière à partir d'une barre sédimentaire forcée après le recrutement de certains *Salicaceae* ? »

L'hypothèse *est qu'une barre forcée est propice à l'installation, la survie et donc l'évolution rapide vers une île pionnière à partir de l'installation de semis de ligneux pionniers, notamment les peupliers noirs.*

L'objectif est d'étudier la vitesse et les processus de transition de la phase pionnière aux prémices du stade écologique (Corenblit *et al.*, 2007) en étudiant la transformation d'une barre sédimentaire forcée en île pionnière. Ces éléments sont importants notamment pour la gestion permettant éventuellement de déterminer des fréquences de travaux combinant au mieux les besoins de limiter l'influence de la végétation sur le frein à l'écoulement et la nécessité de permettre au semis d'atteindre un stade mature pour la diversité génétique.

Afin de répondre à ces différents objectifs, nous avons retenu une approche *in situ* renforcée par des expérimentations *ex situ* ciblées sur le développement des semis et l'influence des facteurs « phénologie » et « structure sédimentaire » sur l'adaptation aux contraintes. Dans les deux parties suivantes de ce chapitre, la démarche appliquée au cours de la thèse sera présentée pour les deux approches. En revanche, les matériels et méthodes seront rapidement évoqués dans ces parties ; ils seront spécifiquement détaillés au sein de chacun des chapitres suivants.

2.4. Approche *in situ*

2.4.1. Choix des sites d'étude

Les sites d'étude ont été sélectionnés selon trois critères : (i) réalisation de travaux durant la première année de thèse, (ii) une configuration morphologique caractéristique de Loire moyenne (*i.e.* style fluviatile, évolution en lien avec la végétation), (iii) proximité avec les structures de recherche. La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Centre nous a fourni la liste des sites correspondant à nos critères.

Au total trois sites ont été retenus (Figure 2-7), d'amont en aval, Mareau-aux-Prés, Chaumont-sur-Loire et Montlouis-sur-Loire présentant une diversité de morphologie (Table 2-1) et assurant une représentativité de notre étude au sein de la Loire moyenne.

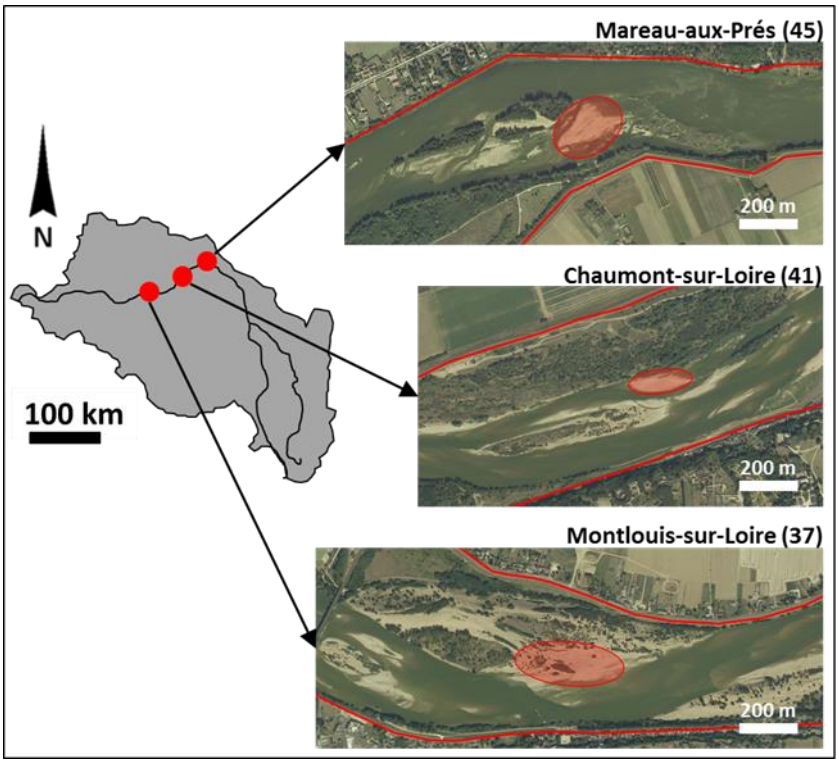


Figure 2-7 : Localisation sur le bassin et configuration morphologique des sites retenus. Les unités morphologiques choisies sont encerclés en rouge, les traits continus rouges matérialisent le lit endigués.

Table 2-1 : Caractéristiques morphologiques et évolution récente des sites choisis.

Sites	Evolution ligne d'eau d'étiage	Evolution bande active	Unités morphologiques	Tracé en plan	Travaux de gestion
Mareau-aux-Prés	Exhaussement	Réduction	Barre de centre de chenal	Zone d'élargissement incurvée	Broyage de la partie aérienne des ligneux ; retalutage avec export des sédiments et racines dans le chenal principal ; scarification et homogénéisation des sédiments
Chaumont-sur-Loire	Incision	Réduction	Barre de chenal secondaire	Zone d'élargissement avec début de méandre	Scarification
Montlouis-sur-Loire	Incision	Augmentation	Entrée de chenal secondaire	Sinuosité avec complexes de barres-îles-chenaux secondaires en rive convexe	Arrachage des ligneux et scarification (racines abandonnées sur place)

Le site de Mareau-aux-Prés, situé dans la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin avait fait l'objet de travaux de dévégétalisation en 2003. Un suivi de la végétation ligneuse pionnière installée par reproduction sexuée a débuté en 2004 auquel s'est ajouté un suivi morpho-sédimentaire depuis 2007.

La capitalisation de données (par l'INRA d'Orléans et l'Université de Tours) sur ce site représentatif de la configuration morphologique de la Loire dans son cours moyen a permis de comprendre la dynamique sédimentaire et biogéomorphologique avant intervention (transformation d'une barre végétalisée en île pionnière avant 2012).

L'intérêt et l'appui offerts par les gestionnaires de la réserve (Naturalistes Orléanais, M. Chantereau et D. Hemeray) et les services de l'état en charge des travaux d'entretien (Direction Départementale du Territoire du Loiret, T. Carrière) ont permis de faire émerger le présent travail de thèse.

Dans ce contexte, le site de Mareau-aux-Prés a été choisi pour constituer un site principal d'investigation, les sites de Chaumont-sur-Loire et de Montlouis-sur-Loire représentant des sites de suivis secondaires. Le suivi de trois sites s'est avéré trop important pour permettre la réalisation des mesures nécessaires pour répondre aux objectifs de la thèse. A la fin de la première année de mesure, il a été décidé de ne conserver uniquement les sites de Mareau-aux-Prés et de Monlouis-sur-Loire, présentant des contextes morphologiques à fort enjeux vis-à-vis de la problématique de végétalisation du lit. Malheureusement, le site de Montlouis-sur-Loire a également dû être abandonné en raison de problèmes de concertation avec les services gestionnaires du site malgré un investissement important en temps.

2.4.2. Suivi de la dynamique hydro-sédimentaire

2.4.2.1. Mesures à l'étiage

Les mesures réalisées pendant la période de basses eaux, illustrées sur la figure 2-8 et la table 2-2, étaient communes aux trois sites sélectionnés.

L'évolution morphologique et les bilans sédimentaires ont été appréhendés à partir de mesures **topographiques** réalisées au scan laser terrestre ainsi qu'au gps différentiel (DGPS). Les intensités de processus d'érosion-dépôt ont été appréhendées à l'aide de **chaines d'érosion**.

L'archivage sédimentaire, permettant de travailler sur les conditions de dépôt, ainsi que la vitesse d'enregistrement ont été appréhendés par des **coupes sédimentaires**. L'évolution de la granularité des sédiments a été estimée par les **analyses granulométriques** par tamisage à sec réalisés sur des échantillons prélevés au droit des chaines d'érosion. Des mesures de **photographies aériennes par ballon captif** ont également été prises pour déterminer de manière qualitative la répartition granulométrique des sédiments et l'évolution morphologique globale des sites. Cette approche a fait l'objet d'un encadrement de stage de master 1 sur le site de Montlouis-sur-Loire. En revanche, le site de Mareau-aux-Prés s'est révélé peu propice à l'utilisation des photographies par ballon captif pour caractériser la répartition granulométrique des sédiments, cette méthode n'a donc pas été utilisée sur ce site. L'évolution de **l'altitude de la ligne d'eau** a été enregistrée par des sondes de mesures de différentielles de pression (sondes Diver) nécessitant l'installation de piézomètres.

Table 2-2 : Mesures réalisées en fonction des sites et nombre de journées de terrain associés sur la durée totale de la thèse

Mesures	Mareau-aux-Prés	Chaumont-sur-Loire	Montlouis-sur-Loire
Topographie	Oui	Oui	Oui
Chaines d'érosion	Oui	Non	Oui
Analyses granulométriques	Oui	Non	Oui
Photographies par ballon captif	Oui	Oui	Oui
Suivi de la ligne d'eau	Oui	Non	Oui
Coupes sédimentaires	Oui	Non	Non
Jours de terrain pendant la thèse	28	4	16

2.4.2.2. Mesures en crue

Seul le site de Mareau-aux-Prés a fait l'objet d'un suivi de la dynamique hydro-sédimentaire au cours des épisodes de crue (Figure 2-8). Les trois sites étant distant d'environ 100 km, il n'était pas possible de suivre un même événement hydrologique sur plusieurs sites à la fois.

Des mesures de **bathymétrie mono-faisceaux et multifaisceaux** ont permis d'appréhender l'évolution (*i.e.* morphologie, migration) des formes du lit (*i.e.* barre, dune) au cours des épisodes de crue. Les vitesses et directions des écoulements ont également été mesurées à l'aide de profils **aDcp** (*acoustic Doppler current profiler*).

De plus, les sédiments transportés en charge de fond ont été échantillonnés à l'aide d'un cône berthois pour faire l'objet d'**analyses granulométriques**. Au total, 19 campagnes de mesures en crue ont été réalisées sur la durée de la thèse.

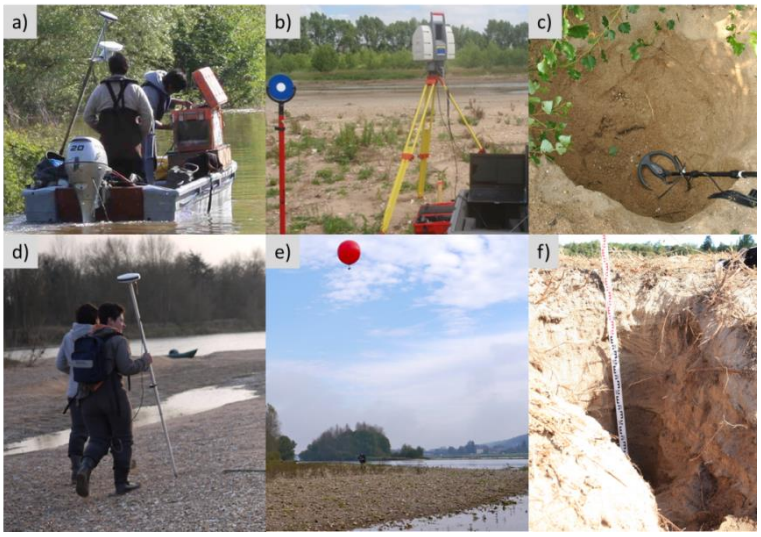


Figure 2-8 : a) Bateau équipé avec les appareils de mesures bathymétriques, courantométriques et granulométriques ; b) scan laser terrestre piloté par ordinateur ; c) recherche des chaines d'érosion à l'aide d'un détecteur de métaux ; d) topographie réalisées au gps différentiel ; e) photographies par ballon captif ; f) coupe sédimentaire.

2.4.3. Suivi de la végétation

Le site de Chaumont-sur-Loire a été abandonné avant de réaliser les mesures sur la végétation ligneuse pionnière. Sur le site de Montlouis-sur-Loire, les travaux de dévégétalisation et scarification ont été renouvelés sur les deux années de mesures avant que nous n'ayons eu le temps de réaliser les mesures sur la végétation ligneuse pionnière. **Ainsi, les résultats obtenus sur ce site ne concernant que la dynamique sédimentaire de l'entrée du chenal secondaire, ils ne sont pas intégrés à cette thèse**.

Sur le site de Mareau-aux-Prés, la végétation ligneuse pionnière a été suivie avant et après les travaux d'entretien du lit. Avant travaux, l'espèce *Populus nigra* dominait le couvert ligneux développé sur le site bien que quelques autres espèces aient été marginalement présentent (*e.g. Salix Purpurea*, *Acer negundo*). Une cartographie du pourcentage de recouvrement de la végétation ligneuse ayant été réalisée en 2011 (Wintenberger, 2011) seules des mesures ponctuelles ont été réalisées sur la végétation ligneuse pionnière pour caractériser l'état initial avant travaux (2012).

Des mesures de hauteur, de densité en fonction de la distance au plancher alluvial et de diamètre ont été réalisées sur des placettes, localisées au droit des chaines d'érosion. Ces mesures ont permis d'estimer le frein à l'écoulement engendré par la végétation ligneuse, appartenant exclusivement à l'espèce *Populus nigra*.

Les placettes localisées au droit des chaines d'érosion permettent de coupler la dynamique hydro-sédimentaire avec l'effet de la végétation ligneuse sur cette dynamique.

L'année suivant les travaux (2013), sur les mêmes placettes la densité de la végétation ligneuse pionnière ainsi que l'espèce et le mode de reproduction ont été identifiés. La localisation des placettes initiales ne permettant pas d'être représentative du recrutement de l'espèce *Populus nigra* qui domine sur la barre, des mesures sur cette espèce ont été réalisés sur des placettes supplémentaires. Sur ce site, la reproduction par voie végétative a été quasiment nulle et la croissance des semis relativement faible ce qui n'a pas permis de réaliser un suivi de la recolonisation de la barre par les ligneux pionniers à l'aide des photographies par ballon captif.

2.5. Approche *ex situ*

L'approche *ex situ* concerne des expérimentations entreprises sur la végétation ligneuse pionnière réalisées à partir de graines. Les deux espèces choisies pour réaliser ses expérimentations sont *Populus nigra* L. et *Salix alba* L.

Ces expérimentations visent à déterminer l'influence de la germination et de la structure sédimentaire sur la résistance aux contraintes exercées lors des crues. Deux contraintes ont été identifiées, **l'arrachage lié à la force de trainée exercée par les écoulements en crue et l'enfouissement lié au dépôt de sédiments** (Johnson, 2000).

Nous avons choisi de réaliser une fosse expérimentale en conditions semi-contrôlées localisée dans la pépinière expérimentale de Guémené-Penfao [44]. **L'influence de la variation de la nappe étant un facteur bien documenté pour les espèces ligneuses pionnières (voir introduction), nous avons fait le choix d'exclure ce facteur de notre dispositif expérimental afin d'isoler les autres paramètres dont nous souhaitions déterminer l'influence**. Ainsi, aucun stress hydrique, sécheresse ou battement de nappe, n'a été appliqué aux jeunes semis.

Trois expériences ont été définies, (i) une expérience témoin, (ii) une expérience d'arrachage et (iii) une expérience d'enfouissement. L'expérience témoin vise à étudier le développement des semis (système racinaire et aérien) en fonction de leur date de germination et de leur substrat de germination. L'expérience d'arrachage a pour objectif de déterminer la force maximale nécessaire à l'arrachage en fonction du substrat et de la date de germination. Enfin, le but de l'expérience d'enfouissement est de déterminer des seuils de profondeur d'enfouissement supportés par des semis enfouis pendant l'hiver suivant leur germination.

Pour chacune de ces expériences, trois substrats de germination ont été choisis (i) un substrat sableux, (ii) un substrat sablo-graveleux et (iii) un substrat évoluant verticalement : surface de sable reposant sur un substrat sablo-graveleux. Ces différents substrats sont représentatifs des environnements (barres sédimentaires ou chenaux secondaires) de Loire Moyenne habituellement colonisés par les semis de peupliers noirs et de saules blancs. La spécificité des substrats sera détaillée dans le chapitre consacré aux résultats obtenus à partir de ces expériences.

Le paramètre phénologie de dispersion des graines a été testé uniquement sur le peuplier noir, avec deux dates de récolte de graines. La récolte des graines a été effectuée sur des peupliers et saules femelles de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin. En réalité, ce sont les inflorescences qui ont été récoltées lorsqu'elles arrivaient à maturité. Ne souhaitant pas intégrer spécifiquement la diversité génétique comme facteur supplémentaire, nous avons choisi de récolter les graines sur deux individus maximum et de les mélanger lors de l'ensemencement.

Pour chaque expérience, il y avait trois types de substrats sur lesquels étaient ensemencés trois modalités de matériel végétal (*i.e.* espèce et phénologie). Il a été prévu pour chaque combinaison de modalités quatre répétitions. Ainsi la fosse a été décomposée en 108 quadrats (3 substrats x 3 modalités végétales x 4 répétitions x 3 expériences) de 1 m de long sur 1,2 m de large et 1,2 m de profondeur (Figure 2-9). Les quadrats sont alignés en trois blocs correspondant aux expériences témoin, arrachage et enfouissement ; la correspondance entre le bloc et l'expérience a été tirée au sort. Dans chacun des blocs, les trois substrats ont été déposés pour correspondre à douze casiers (3 modalités végétation x 4 répétitions). La localisation des substrats a également été déterminée aléatoirement. Enfin, la localisation de chaque modalité de végétation a également été tirée au sort au sein de chaque substrat.

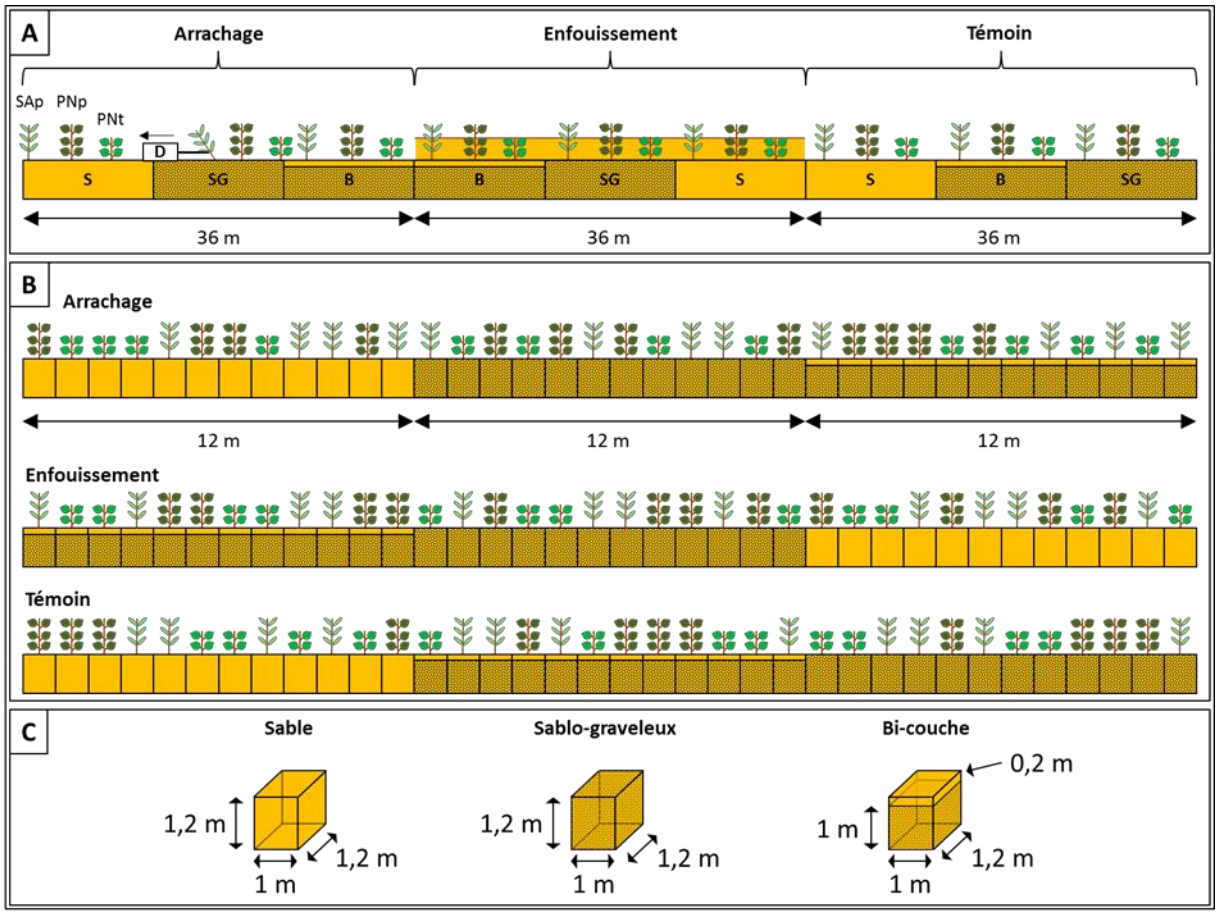
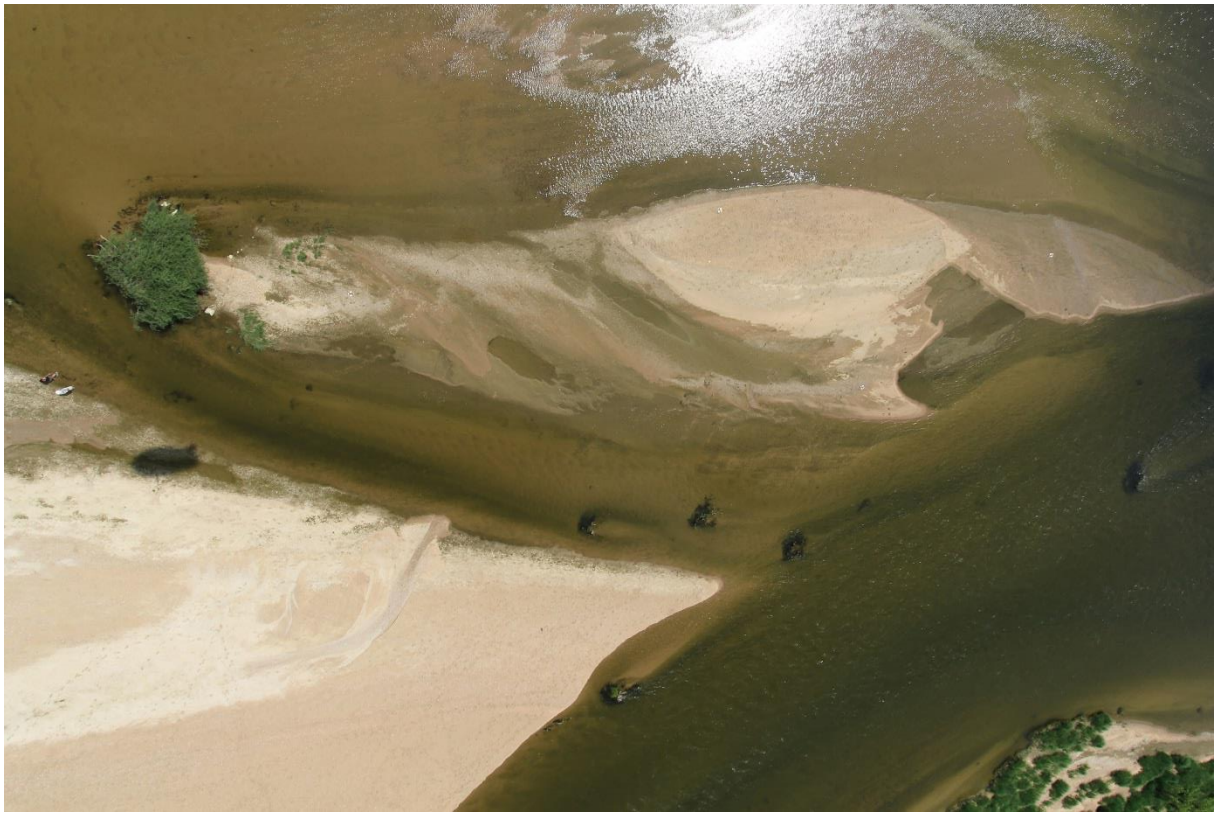


Figure 2-9 : Organisation et dimension du dispositif expérimental. Répartition des substrats en fonction de l'expérience avec trois modalités de végétation (i) saule blanc précoce (SAp), peuplier noir précoce (PNp) et peuplier noir tardif (PNt) chacun (A). Répartition des modalités végétation sur chaque casier uniataire de chaque substrat et pour chaque expérience (B). Dimension des casiers uniataire pour chaque substrat (C).

Sur chaque quadrat **une densité de semis de 345 plants/m², correspondant à des valeurs de densité relevées en Loire Moyenne** a été appliquée. Il est probable que la densité des semis ait eu une influence sur le développement racinaire ainsi que sur la croissance en raison de mécanismes de compétition qui ne concernent pas notre étude. L'objectif était de se placer dans des conditions proches de celles *in situ* afin d'identifier l'influence des facteurs de contrôle liés à la phénologie et la structure sédimentaire dans le développement des semis, la résistance à l'arrachage et notamment la force nécessaire pour arracher les semis et enfin la résistance à l'enfouissement.

Toutefois, le pourcentage de germination des graines de peupliers noirs et de saules blancs n'a pas toujours été suffisant pour permettre le maintien de ce dispositif en l'état et des adaptations ont dû être opérées au cours de la thèse. Ces adaptations seront détaillées dans le chapitre consacré à la description des résultats de ces expériences.

Chapitre 3 : Transformation d'une barre sédimentaire non-migrante (forcée) en île : premier stade de développement et interactions avec la végétation ligneuse



Trainée sédimentaire engendrée par la présence d'un saule arbustif, Mareau-aux-Prés (RNN Saint-Mesmin)

3.1. Objectif et synthèse du chapitre

Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article soumis à la revue *Geomorphology*. L'article a été accepté avec révisions majeures et la version présentée dans ce manuscrit correspond à la version corrigée sur la base des remarques et conseils des *reviewers*.

Ce chapitre présente l'évolution de la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés, barre non-migrante (forcée) de centre de chenal, localisée à l'aval d'Orléans dans la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin (45). Cet article permet de détailler le fonctionnement sédimentaire et l'évolution morphologique influencés par la végétation ligneuse pionnière avant les travaux de 2012. Il permet de dresser un état des lieux du système avant perturbation qui pourra être comparé à la réponse morphologique et l'évolution après travaux (chapitre suivant). Les processus morpho-sédimentaires ainsi que leur apparition dans le temps sont identifiés, permettant de détailler les premiers stades de la phase biogémorphologique faisant suite à la phase pionnière et répondant ainsi aux questions posées dans l'axe 4 de cette thèse. Cette transition s'illustre par la transformation rapide de la barre sédimentaire en île pionnière.

Pendant six années, l'analyse des changements topographiques de la barre, de la densité et rugosité de la végétation, des intensités de processus d'érosion-dépôt (hauteurs de sédiments érodés et déposés), de la granularité et de l'architecture sédimentaire (archivage) ainsi que l'excès de contrainte de cisaillement ont permis de mettre en évidence une signature spécifique des jeunes arbres sur la topographie et la ségrégation des tailles de grain composant les sédiments. Deux processus de dépôts combinant la formation de figures d'obstacle (traînées sédimentaires) dans un premier temps puis une tendance au dépôt régressif (vers l'amont) dans un second temps conduisent à l'accrétion verticale de la barre végétalisée et à la définition des contours préfigurant les berges futures de l'île. Pendant une première phase d'accrétion, la quantité et la distribution des apports sédimentaires de fond provenant des chenaux environnants pendant les épisodes de crues apparaissent comme un paramètre clé de l'évolution de la barre modulé par la présence de la végétation et l'effet de déflection induit par la topographie préexistante. L'hétérogénéité des apports sédimentaires explique pourquoi les intensités de dépôt de sédiments et la densité de végétation ne présentent pas une stricte corrélation entre elles. De plus, une ségrégation de la granularité des sédiments entre les zones végétalisées et non-végétalisées a également été observée.

Elle est interprétée comme un processus important dans la dynamique d'évolution des sous-chenaux environnant les zones végétalisées ainsi que sur le degré de connexion et la vitesse de croissance d'une île.

A partir de cette étude, un modèle conceptuel général détaillant les premiers stades d'évolution d'une barre non-migrante vers une île établie est proposé pour des rivières de plaine sablo-graveleuses relativement larges.

Du point de vue de l'articulation de cette contribution dans la thèse, cet article permet de connaître les processus d'évolution morpho-sédimentaire de cette barre non-migrante de centre de chenal entre 2007 et 2012 colonisée par des semis de l'espèce pionnière *P. nigra* entre 2004 et 2005 après des travaux d'entretien de lit déjà réalisés en 2003 (M . Chantereau, Loiret Nature Environnement, comm. pers.). La réalisation de nouveaux travaux d'entretien du lit en 2012 nous a permis de suivre cette phase pionnière (chapitre 5) et de confronter dans la partie synthèse la dynamique d'évolution de la barre en île avant les travaux de 2012 au potentiel d'évolution de la barre après ces travaux. Cette confrontation nous permettra à la fois de consolider nos interprétations sur l'influence des travaux sur le renouvellement des populations de ligneux pionniers ainsi que de discuter des liens entre la dynamique des barres migrantes/non-migrantes et l'installation des ligneux pionniers par voie sexuée renvoyant à des questions plus larges à la fois sur la biodiversité associée aux forêts de bois tendre et l'évolution morphologique des cours d'eau.

Chapter 3: Fluvial islands: first stage of development from non-migrating (forced) bars and woody-vegetation interactions

Coraline Wintenberger[a], Stéphane Rodrigues[a], Jean-Gabriel Bréhéret[a], Marc Villar[b]

[a]Université François Rabelais de Tours, E.A. 6293 GéHCO, GéoHydrosystèmes Continentaux, Faculté des Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37200 TOURS, FRANCE.
[b]INRA, UR 0588, Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, 2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 Ardon, 45075 ORLEANS Cedex 2, France.

Abstract

Fluvial islands can develop from the channel bed by interactions between pioneer trees and bars. Although vegetation recruitment and survival is possible on all bar types, it is easier for trees to survive on non-migrating bars developed due to a change in channel geometry or to the presence of a steady perturbation. This field study details the first stages of development of a vegetated mid-channel non-migrating (or forced) bar and its evolution towards an island form. Over six years, analysis of bed topographical changes, vegetation density and roughness, scour and fill depths, sediment grain size and architecture and excess bed shear stress highlighted a specific signature of trees on topography and grain size segregation. Two depositional processes combining the formation of obstacle marks and upstream-shifting deposition of sediments lead to the vertical accretion of the vegetated bar. During the first stage of the bar accretion, bedload sediment supply coming from surrounding channels during floods was identified as a key process modulated by the presence of woody vegetation and a deflection effect induced by the pre-existing topography. A grain size segregation between vegetated and bare areas was also highlighted and interpreted as an important process affecting the development of surrounding channels and the degree of disconnection (and hence the speed of development) of a growing island. The heterogeneity of bedload supply can explain why sediment deposition and density of trees are not strictly related. A general conceptual model detailing the first stages of evolution from a bar to an established island is proposed for relatively large lowland rivers.

Keywords: woody-vegetation, *Populus nigra*, bars, island, low gradient, sandy-gravelly rivers.

3.2. Introduction

Fluvial vegetated islands are key components of fluvial systems as they influence the planform (Gibling and Davies, 2012; Gibling *et al.*, 2013; Iepi *et al.*, 2014, Tal and Paola, 2007) and the biodiversity of these hydrosystems (Corenblit *et al.*, 2014). Processes involved in their creation participate to the morphological evolution of multiple-channel rivers as well as sediment archiving. Although many studies have been carried out on the interactions between woody vegetation and sedimentary processes in alluvial rivers (McKenney *et al.*, 1995; Nanson and Knighton, 1996; Abbe and Montgomery, 2003; Gurnell *et al.*, 2005; Corenblit *et al.*, 2009; Gurnell *et al.*, 2012), investigations carried out on the zone of intense interactions between plants and physical processes (active part of the channel) remain rare (see Corenblit *et al.*, 2011; Figure 3 in Gurnell *et al.*, 2012). Specifically, for mid-channel bars, the first steps of evolution from the bar state to the island state are not known in terms of velocity, sedimentary processes involving young pioneer woody vegetation, and vertical/lateral accretion rates under quasi unlimited sediment supply conditions.

From a morphological perspective, excluding sedimentary processes and botanical specificities, fluvial islands were defined by Osterkamp (1998, pp. 530-531) as "*geomorphic features surrounded by channel, that is higher than mean water level (or the principal network of adjacent ephemeral or intermittent stream channels) and that persists sufficiently long to permit the establishment of a permanent vegetation cover if adequate moisture is available*". However, and as stated by Brice (1964) and Bridge (2003, p.149), the distinction between vegetated bars and islands remains an issue; specifically, mid-channel bars were defined as unvegetated and submerged at bankfull flow, whereas islands emerge under these flow conditions. As shown by Osterkamp (1998) and Gurnell *et al.* (2001), established fluvial islands can result from several processes among which excision of floodplain deposits or building involving dead or living woody vegetation present on channel bars (Osterkamp, 1998; Kollmann *et al.*, 1999; Gurnell *et al.*, 2001; Nakayama *et al.*, 2002; Bertoldi *et al.*, 2011; Gurnell *et al.*, 2012; Mikuś *et al.*, 2013).

For this latter case, the regeneration process of vegetation on flow resistance and sediment deposition influences the island creation: sprouting from living driftwood exerts a rapid and strong feedback on physical parameters whereas seedlings impact is reduced during their first stage of development (Moggridge and Gurnell, 2009).

Woody pioneer vegetation can recruit or sprout on two general types of alluvial bars, namely free (or migrating) and forced (non-migrating) bars (see review in Rodrigues *et al.* in press).

Non-migrating bars (*e.g.* point bars, mid-channel bars) correspond to sediment accumulation developing due to a discontinuity in the channel geometry (Olesen, 1984; Struiksma *et al.*, 1985; Parker and Johanneson, 1989; Crosato *et al.*, 2011) while free bars arise because of morphodynamic instability (Tubino, 1991; Tubino *et al.*, 1999). Since the latter are rather "unstable" and rapidly migrating units (Claude *et al.*, 2014), the development of vegetation and its resistance to physical stresses on these macroforms is rare. Contrarily, due to their conditions of formation, non-migrating bars are relatively stable units on which woody vegetation can recruit and survive even in morphologically very active rivers (Nakayama *et. al.*, 2002; Charron *et al.*, 2011; Crouzy *et al.*, 2013). Large-woody debris and vegetation can sometime trigger a local nursing effect interesting for the development of other seedlings (Gurnell *et al.*, 2005).

Anyhow, once established on bars, the permeable obstacle constituted by the vegetation influences their morphological development by increasing flow resistance (Fathi-Maghadam and Kouwen, 1997; McKenney *et al.* 1995; Darby and Simon, 1999; Freeman *et al.*, 2000, Antonorakis, 2010), decreasing flow velocity (Li and Shen, 1973, Wu *et al.*, 1999; Copeland, 2000) and enhancing deposition and fixing of sediments (Graf, 1978; Fielding *et al.*, 1997; Wende and Nanson, 1998; Kollmann *et al.*, 1999; Gurnell *et al.*, 2001; Nakayama *et al.* 2002; Francis *et al.*, 2006; Euler and Herget, 2012; Euler *et al.*, 2014; Manners *et al.*, 2014). More specifically, the presence of shrubs and trees often creates obstacle marks (horseshoe scour hole, sediment ridge) which constitute a first step in the metamorphosis process from a bar to an island (Nakayama *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2007, Euler *et al.*, 2014). As a consequence of merging of these obstacle marks and vertical accretion, the morphology of bars evolves from a relatively flat bed to a ridge-and swale topography. This process induces a biotic signature in the bar topography as shown by Bertoldi *et al.* (2011) for the Tagliamento River. At this stage, the increase of the deflection power of tree bands, the decrease in flooding duration of the bar and its progressive disconnection from surrounding channels induce a decrease in sediment supply (in terms of quantity and grain size).

As a consequence, deposition of small quantities of fine sediments mainly transported as suspended and washloads and a smoothing of the bar/island topography is observable (Rodrigues *et al.*, 2007). Anyway, the time needed to create a fluvial island (see definition above) from a mi-channel non-migrating bar has never been documented.

This paper focuses on the first stage of development of an island from a mid-channel non-migrating bar of the River Loire colonized by the black poplar (*Populus nigra, L*).

This tree species has been recognized to modify its physical environment and the riparian community structure, function, resistance and resilience (see review by Corenblit *et al.*, 2014). Detailed surveys conducted over six years on channel bed topography, scour and fill processes, sediment grain size evolution and physical features of in-channel woody vegetation are presented. In terms of chronology of floodplain development this study covers the stages 1 (active river bed), 2 (stabilizing bar) and 3 (incipient floodplain) as proposed by Reinfelds and Nanson (1993). In terms of fluvial biogeomorphological succession (Corenblit *et al.*, 2014) it corresponds to the "pioneer and biogeomorphological" stages.

The general scientific goal addressed here concerns the mechanistic understanding of the first stages of evolution of an island from a mid-channel bar where woody pioneer vegetation recruited. Specifically, the time needed to create a fluvial island from a mid-channel non-migrating bar is documented. More precisely, the paper addresses the following points:

- How the tree signature in the topography of a bar evolves since the year of recruitment?
- To what extent bedload sediment supply affects the morphological evolution of the vegetated bar?
- We propose a conceptual model of the evolution of a mid-channel bar to an island for large sand and gravel bed rivers. In our model we identify those variables important for the morphological evolution of a bar to an island, specifically highlighting the influence of vegetation on sediment archiving?
- Material, methods and study site

3.2.1. Loire River islands

The Loire River drains a watershed of 117,000 km^2 which experiences an irregular flow regime. Floods are caused by storms occurring in the upstream part of the river during winter and spring (Dacharry, 1996; Duband, 1996) and by intense rainfall coming from the Atlantic Ocean. The Loire has been heavily influenced by human activities such as damming, embanking, building of groynes for navigation and intense sediment mining which stopped in 1995 (Latapie *et al.*, 2014).

The resulting incision of the main channel and the end of pasture activity triggered a development of woody pioneer vegetation as well as a rapid morphological evolution of the river from an island-braided to anabranching style.

The recent incision of the main channel in the last fifty years has led to significant channel bank erosion (Latapie *et al.*, 2014), adjustment of secondary channels (Rodrigues *et al.*, 2006) and islands width by inducing bank retreat (Gautier and Grivel, 2006; Détriché *et al.*, 2010).

In the middle reaches of the Loire, established islands are covered by forested areas or former pastures where fine sediments, potentially affected by polymetallic contamination (Grosbois *et al.*, 2012; Dhivert *et al.*, 2015), settle during floods. Trenches made on the banks of these islands show a typical stratigraphical sequence, comparable to some extent to gravel-bed rivers, made of two main units developed on several meters (3 to 5 m usually) above the low flow water level. Typically, the basal unit was deposited briefly as channel deposits and covered by a finer unit composed by suspended sediments deposited over long time periods.

3.2.2. Study site

The site of Mareau-aux-Prés is located near Orléans in the middle reaches of the Loire, approximately 1.2 km from the confluence of the Loire and the Loiret Rivers. In this area the bedrock consists of Tertiary lacustrine limestone overlaid with the siliceous sediments of the Loire coming from the upper reaches. Outcrops of the bedrock can appear in the main channel due to intense past sediment mining (Figure, 1; Latapie *et al.*, 2014).

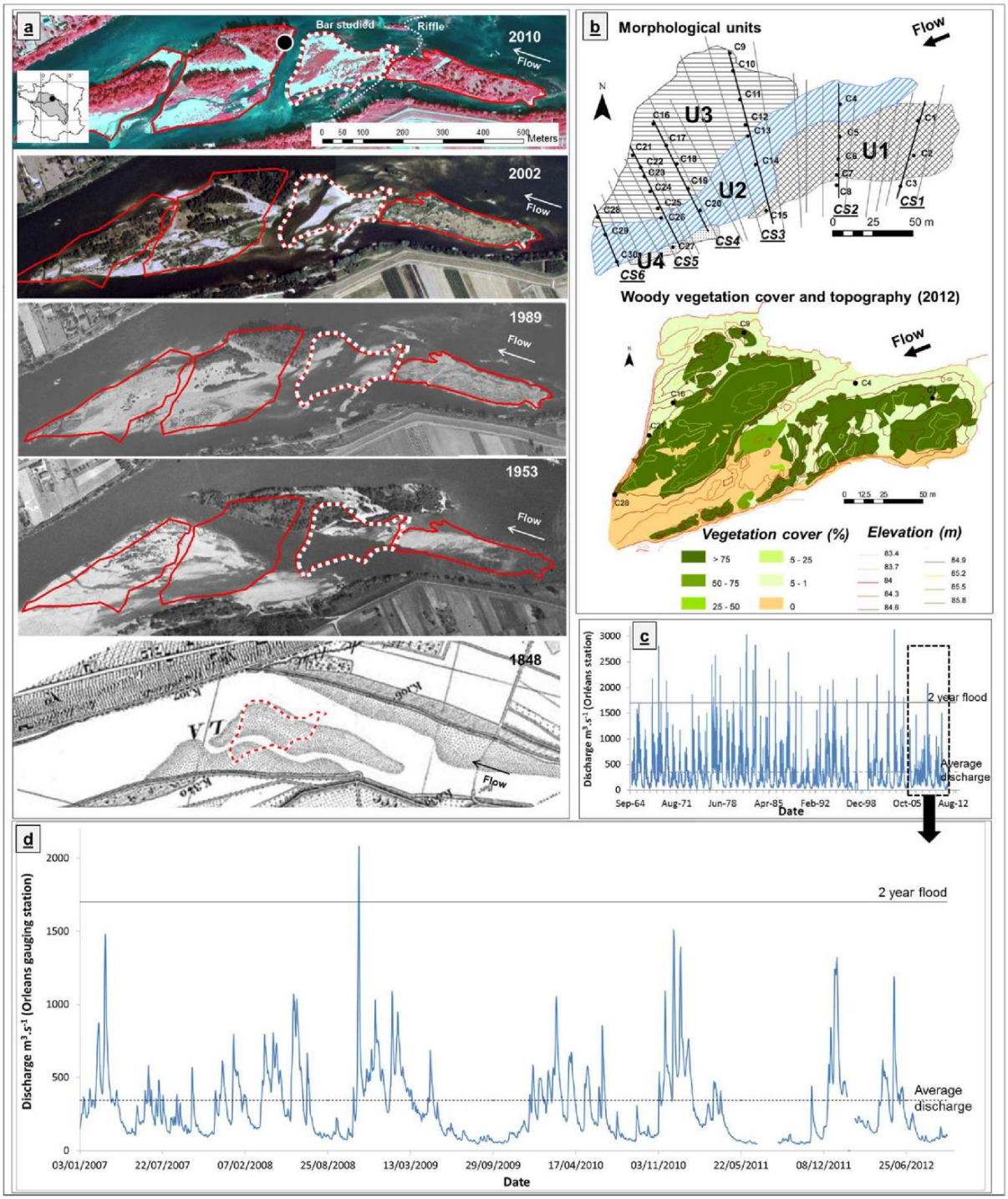


Figure 3-1: Location of the study site of Mareau-aux-Prés. A regional view of the site is available from Google earth (47°51'50.90"N, 1°46'59.92"E). (a)Morphological evolution of the study site between 1848 and 2010 (photo courtesy of DREAL Centre, IGN and Richard Chevalier, IRSTEA). The black point on the aerial photograph of 2010 and the dotted lines corresponds to the trench presented in Figure 3-2b and to the bar studied respectively. (b) Morphological units of the bar, location of the cross sections surveyed (grey lines) and coupled with scour chains (black lines and points). (c,d) Hydrograph of the Loire between 1965 and 2012 (c) and during the study period (d).

In this area the river is characterised by a low amplitude meander planform combined with a large cross section (embanked width ranges from 370 m upstream to 760 m downstream the study site). The average channel slope in the study reach is 0.000226 $m.m^{-1}$ and mean annual discharge equals 344 $m^3.s^{-1}$ (gauging station of Orleans, 10 km upstream). The specific stream power at bankfull flow equals 22 $W.m^{-2}$ (see Latapie, 2011 and Figure 3-9 in Latapie *et al.*, 2014).

Several islands of different ages and sizes are present in this sinuous part of the river. These islands developed in the past from a colonization by woody vegetation of previously existing bars mentioned on the map of 1848 (Figure 3-1a). The presence of those bars are associated with the lee effect provided by the presence of the bedrock which appears just upstream the study site. This riffle is also responsible for the increase in width of the cross section resulting in a decrease in sediment transport capacity (Wintenberger, 2011).

Before 1989, an island was present at the location of the bar (remnants of this island, located NW from the bar is visible in 2010); this island has been partially eroded. Basically, the whole bar appeared in its current form in years 2003 and 2004 (Figure 3-1).

The bar studied has a triangular planform (with an area of *ca.* 20 000 m² and length of 260 m); its average elevation equals 84.5 m above sea level. The sediments consist mainly of a mixture of siliceous particles ranging from pebbles to fine sands even if some flint cobbles resulting from the weathering of the calcareous bedrock are present. Armour layers are located between vegetation patches while finer sediments are located in the tree bands.

In 2004, the bar was colonized by seedlings which developed into a very dense stand of *Populus nigra L.* between 2005 and 2012 (Villar, 2011). As commonly seen on the Loire, the preservation potential of this type of vegetation is very high: if no important stress (flood, severe drought) occurs during the first year of development this type of vegetation will not be removed even for very high magnitude floods. Other species such as *Salix purpurea* L. and *Acer negundo* L. were present but very rare. *Carex spp.* were sparsely distributed on the margins of the bar.

Vegetation bands developed on four morphological units were distinguished on the bar since the beginning of the study in 2007 (Figure 3-1b). Units 1, 3 and 4 correspond to very dense tree bands whereas unit 2 is a chute channel located at lower elevation and submerged during medium to low flows. Coarse sediments, namely pebbles and cobbles, are located in unit 2 while sands and gravels dominate units 1, 3 and 4.

Between 1965 and 2012, the highest discharge recorded was equal to 3 230 $m^3.s^{-1}$ and occurred on December 2003. During this time-period the 2-year flood was reached 31 times. Between 2007 and 2012, the average discharge value (344 $m^3.s^{-1}$) was exceeded 31% of the time. Only one flood event (November 2008, maximum discharge recorded equal to 2080 $m^3.s^{-1}$) exceeded the 2-year flood discharge (1 700 $m^3.s^{-1}$). No flood peak reached the five-year flood (2 300 $m^3.s^{-1}$) and 11 flood peaks equal to 1000 $m^3.s^{-1}$ occurred in Orléans (Figure 3-1d).

3.2.3. Topographical survey

Between 2007 and 2012, the bar topography was annually surveyed with a centimetrical accuracy using a Trimble M3 total station and a Magelan Proflex 500 DGPS.

A total of 25 cross sections located 10 m apart in average was surveyed (Figure 3-1b). As recommended by Heritage *et al.*, 2009, additional points were surveyed on the bar at morphological outlines, slope breaks and cut banks to reduce error during the construction of Digital Elevation Models (DEMs). The number of points recorded during measurements reached a maximum of 8 299 points and varied according to the emerged surface of the bar; density of survey points on the bar was 1 point per 7.7 m² on average.

LiDar data provided by the DREAL Centre in 2003 (measurements done during low flows), were also analysed. The measurements were not strictly located on the abovementioned cross sections but were useful to determine the morphology of the bar 2 years before vegetation recruitment.

All the points acquired during the field surveys were combined to create DEMs using the linear interpolation TIN (Triangular Interpolation Network) function of Arcgis 10 software. This interpolator was demonstrated to be a reliable tool to describe the morphology of alluvial bars (Fuller and Hutchinson, 2007; Moore *et al.*, 1991). The DEMs were compared to obtain sediment balance and slope maps and eroded/deposited volumes using the Spatial Analyst function of Arcgis 10. The liDar data were not compared in terms of sediment balance since the bar was smaller in 2003 (*ca* 11800 m²).

Since the data sets differed in sample size, we decided to randomly sample our data in order to compare statistically one data set to another. Hence, all the data sets were randomly sampled on the cross sections (points not located on cross sections were excluded) using the alea function of Excel 2010 to obtain n= 630.

Frequency distributions of the bed elevation were plotted for all the data sets of n=630 to assess the influence of vegetation development on the bar morphology (Bertoldi *et al.*, 2011). As initially proposed by Paola (1996) to study the transversal variability of shear stress in braided rivers and developed by Bertoldi *et al.*, 2011 to describe the bed elevation frequency for bare and vegetated areas, we fitted a gamma density function:

$$p(H) = \frac{\alpha^{\alpha} H^{\alpha-1} e^{-\alpha H}}{\Gamma(\alpha)} \tag{3-1}$$

H is the dimensionless bed elevation (elevation above the lowest point divided by the mean value), α describes the shape of the distribution and Γ is the Euler gamma probability density function. As proposed by Bertoldi *et al.*, 2011, the best fit value of α was obtained by minimizing the squared error between the measured data and data resulting from the gamma distribution.

3.2.4. Scour chains and grain size analysis

Scour and fill processes occurring on the bar were investigated using the scour chain method (Hassan, 1990; Laronne *et al.* 1994; Hassan *et al.* 1999; Laronne and Sholmi, 2007). Since 2008, 31 metal-linked chains were inserted vertically, anchored into the stream bed, and located in x, y, z axes using a DGPS. Scour chains were located on the above-mentioned cross sections (Figure 3-1b) and distributed on morphological units 1 to 4 in order to link the annual topographical changes of the bar to the scour and fill processes. Each year, during low flows, scour chains were relocated by digging the bar sediments using the DGPS and a metal detector. The scoured and filled depths of bed material were determined on each chain by measuring the length of the chain above the elbow (maximum scour depth) and the distance between the elbow and the new bed level (subsequent sediment deposition).

Grain size analyses were performed using the standard method of dry sieving Ro-Tap on surface sediments sampled (in 2008, 2009, 2010, 2011 and 2012) at each scour chain location during insertion and relocation of scour chains. When armour layers were present, subsurface sediments were also sampled and analysed.

The critical bed shear stress was obtained using the Shields entrainment function (Shields, 1936):

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)gD} = fct\frac{u * D}{v} \tag{3-6}$$

Where θ_c is the critical dimensionless shear stress, here taken as 0.047, τ_c is the critical boundary shear stress (N.m^{-2}), ρ_s and ρ_w are respectively the density of sediment grains (2650 kg.m^{-3}) and water (1000 kg.m^{-3}), g is the acceleration due to gravity (9.81 m.s^{-2}) and D is the grain diameter (here D_{10}, D_{50} and D_{90} in m). θ_c is a function of the Reynolds' grain number $Re_* = u^*D/v$, where u^* is the shear velocity (m.s^{-1}) and v is the kinematic viscosity (m^2.s^{-1}).

For the higher-magnitude flood of 2008, an adimentionnal normalized excess bed shear stress (τ_{norm}) was calculated for the D_{10}, D_{50} and D_{90} parameters (before the flood) as follows:

$$\tau_{norm}D_{10} = \frac{\tau - \tau_{cD_{10}}}{\tau_{max}} \tag{3-2}$$

$$\tau_{norm}D_{50} = \frac{\tau - \tau_{cD_{50}}}{\tau_{max}} \tag{3-3}$$

$$\tau_{norm}D_{90} = \frac{\tau - \tau_{cD_{90}}}{\tau_{max}} \tag{3-4}$$

where τ is the bed shear stress during the flood peak of 2008 (2080 m^3.s^{-1}) calculated at each scour chain location, $\tau_{cD_{10}}$, $\tau_{cD_{50}}$, $\tau_{cD_{90}}$ are values of the critical bed shear stress for D_{10}, D_{50} and D_{90}, respectively and τ_{max} is the maximum value of τ reached on the bar during the flood (here 7.8 N.m^{-2}).

The bed shear stress τ was obtained using the general equation:

$$\tau = \rho g R_h S \tag{3-5}$$

where τ is the bed shear stress (N.m^{-2}), ρ is the density of water (kg.m^{-3}), g is the acceleration due to gravity (m.s^{-2}), R_h is the hydraulic radius (taken here as water depth on each point during the flood obtained by subtracting the elevation each point to the water level during the flood [data from DREAL Centre], in m), S is the water surface slope (here taken as a constant 0.000226 m.m^{-1}, [Latapie, 2011]).

3.2.5. Stratigraphical analysis of deposits

During summer 2012, 4 sections were dug on the bar for the analysis of the sedimentary sequences at several scour chains locations and on the bank of two established islands (located near the bar studied [see Figure 3-1] and 150 km downstream for comparison [see Détriché *et al.*, 2010 for location]). For each section the stratigraphy of deposits was described in terms of thickness, bedding nature and orientation and grain size; the elevation of each layer was recorded using a DGPS and sediments were collected for grain size analysis. The presence of thin silty and muddy dark layers rich in organic matter fragments and roots was noted. Such layers were shown by several previous studies carried out on the Loire (Rodrigues *et al.*, 2006, Rodrigues *et al.*, 2007, Rodrigues *et al.*, 2012) to be suitable markers for emersion periods of the river bed.

3.2.6. Vegetation analysis

Woody vegetation patches present on the bar were mapped using a DGPS. Coefficients of cover-abundance (Braun Blanquet, 1964; Figure 3-1b) were determined in 2012 using the percentage of vegetation cover (Combroux *et al.*, 2002) estimated from low-altitude aerial photographs and field observations.

Physical parameters of woody vegetation were analysed in 2012 to estimate its influence on flow resistance, sediment trapping and retention. As performed by several authors (Kollmann *et al.*, 1999; Rodrigues *et al.*, 2006; Gilvear and Willby, 2006; Vreugdenhil *et al.*, 2006; Corenblit *et al.*, 2009) measurements were carried out on 4 m² plots centred on the scour chains. For each plot, stems originating from the bar surface were counted and the size (height, diameter) of the five tallest and smallest trees was measured. The diameter of the five tallest and smallest trees was measured at respectively 1.2 m, 0.5 m and 0 m from the bar surface.

The Manning's roughness parameter for each plot was calculated using the equation of Petryk and Bosmajian (1975) suitable for the areas covered with emerged vegetation:

$$n_{veg} = K_n R_h^{2/3} \sqrt{\frac{C_d \sum Ai}{2gAL}} \quad (3\text{-}7)$$

n_{veg} is vegetation roughness, K_n is a factor of conversion equal to 1 for SI units, R_h is the hydraulic radius, in m, C_d is the drag coefficient (herein assumed to be equal to 1), ΣAi is the total frontal area of vegetation projected onto a plane perpendicular to the direction of flow, in m², g is the force of gravity, in m s^{-2}, A is the cross-sectional flow area, in m², L is unit length of the channel reach, in m.

This parameter, calculated for a unit surface of 1 m² has already been used by McKenney *et al.* (1995) on small streams in North America and by Rodrigues *et al.* (2006, 2007) on the Loire.

The computation of the n_{veg} roughness coefficients was performed using the physical parameters of the five tallest trees of each plot. The smallest trees, which were fully submerged and which tend to bend downstream during floods, were excluded from this analysis. Therefore, the n_{veg} parameters presented in this study refer to maximum roughness coefficients. Obviously, this corresponds to an approximation. Many studies have shown that pronated submerged plants do, in fact, contribute substantial roughness (for example see, Nepf and Ghisalberti, 2008; Västilä *et al.*, 2013).

3.3. Results

3.3.1. Typical stratigraphical architecture of island banks

On the Loire, the classical sedimentological architecture of islands presents two main units.

A basal bar unit made of poorly sorted sandy-gravelly sediments is observable on the lower part of trenches (Figure 3-2). The stratae present in this unit are characterized by cross bedding, by the presence of roots of former plants developed on the bar and by thin layers (one centimeter thick) of silts and mud intercalating with coarse sediments. This bar unit is overlaid by a relatively thin unit made of fine sediments (fine sands and silts, eventually mud) enriched in organic matter which can be compared to floodplain sediments transported as suspended load and deposited during flood events (Haschenburger and Cowie, 2009).

Optically stimulated luminescence (OSL) datings done on one of these islands (Figure 3-2a) shows that bar units can be rapidly deposited (2.5 m/14 years) compared to floodplain units which correspond to lower sedimentation rates (1 m/192 years assuming that no vertical erosion occurred [see Detriché *et al.*, 2010 for details]).

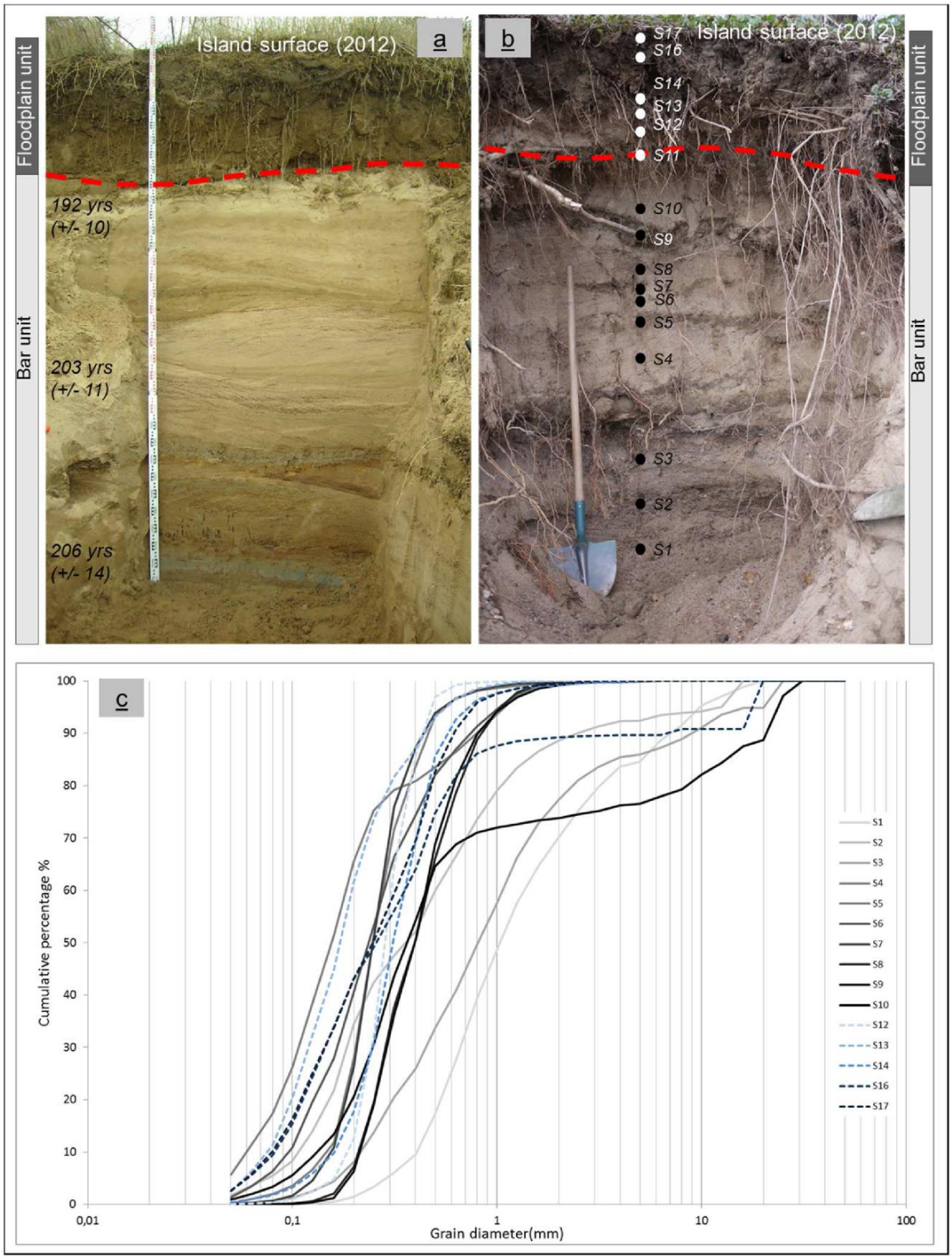


Figure 3-2: Typical stratigraphy of islands of the middle reaches of the Loire River. Trenches dug on two islands located in the study sites of Bréhemont (Figure 3-2a, see Detriché *et al.* 2010 for details) and Mareau-aux-Prés (Figure 3-2b) located respectively 800 km and 648 km from the sources. For the site of Bréhémont, OSL datings were performed. Figure 3-2c corresponds to cumulative curves of the sediments of the trench presented in Figure 3-2b.

3.3.2. Pioneer woody vegetation developed on the bar

In 2012, the height of the pioneer trees ranged between 0.05 and 3.75 m.

For taller trees, a clear relationship is established between diameter and height. This trend is not perceptible for small trees. Some of them, relatively thick, are trees broken during floods or cut by beavers.

The density of the vegetation stands developed on the bar is significant and varies according to the distance from the bed (Figure 3a and c).

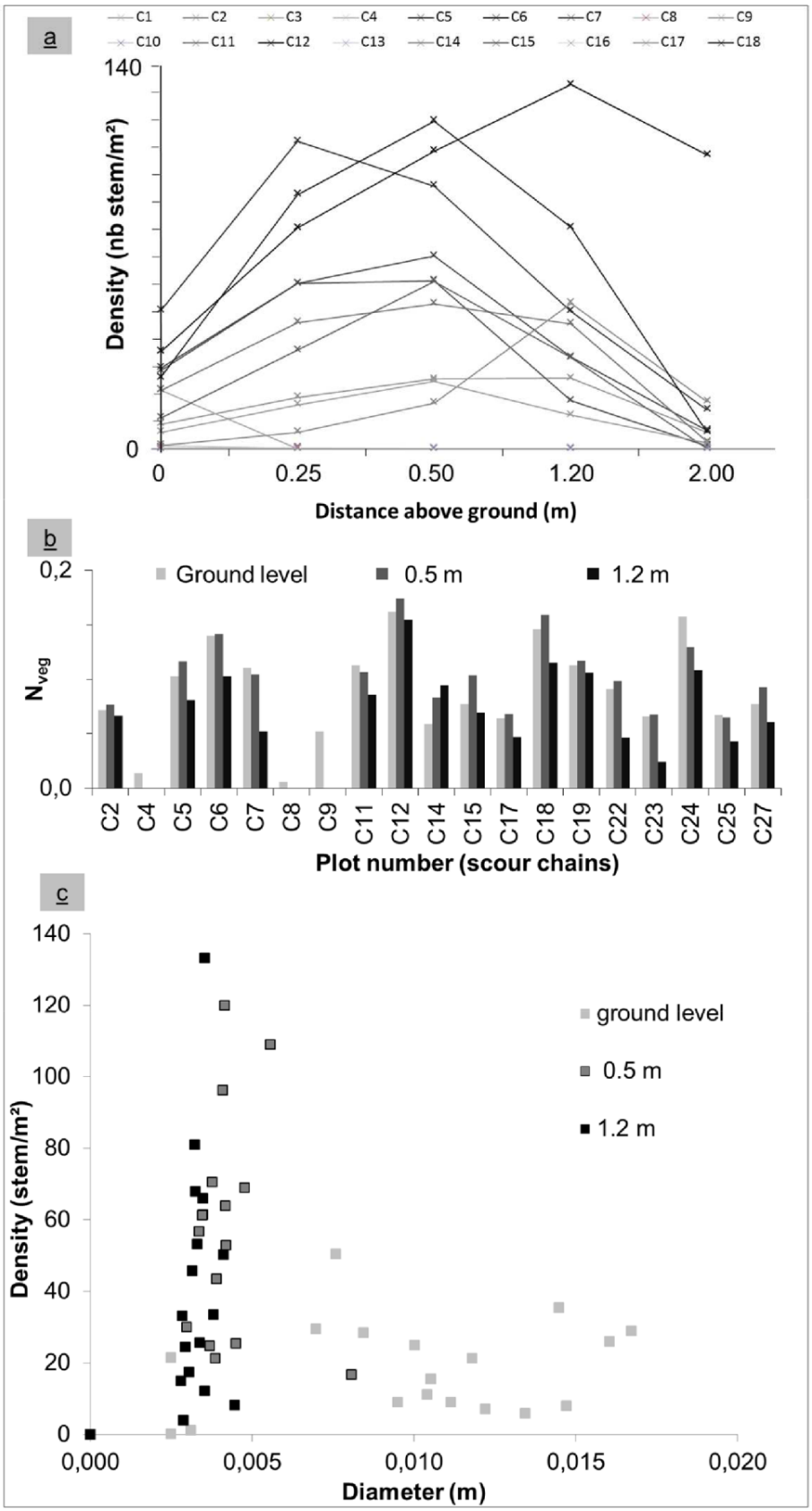


Figure 3-3: a. Number of stems and branches measured at 0, 0.25, 0.5, 1.2 and 2 m above the bed. b. Manning's vegetation flow resistance parameter for each vegetated plot. c. Relationship between tree diameter and number and stem/m².

Stems and branches density (number/m²) was often found to be at its maximum at 0.5 m above the bed; it decreased upward and downward. This explains the high values of vegetation resistance to flow (Figure 3b). The high values of vegetation density at the elevation of 0.5 m can be explained by sprouting subsequent to tree breakage by flood flows or cutting by beavers.

3.3.3. Topographical and morphological evolution of the bar

Randomly sampled bar elevations measured between 2003 and 2012 were analysed in terms of frequency distribution (Figure 3-4).The liDar data set of 2003 is characterized by a compact, unimodal, and rather symmetrical distribution. So, in 2003 the bar was rather smooth with a mode equal to 84.5 m. After the establishment of pioneer vegetation (data sets of 2007 to 2012), the distribution displays smaller peaks and spreads. A similar process has been described for the Tagliamento River by Bertoldi *et al.*, 2011. In the present study, smaller peaks of the distribution testify to the increased variability in bed elevation during time.

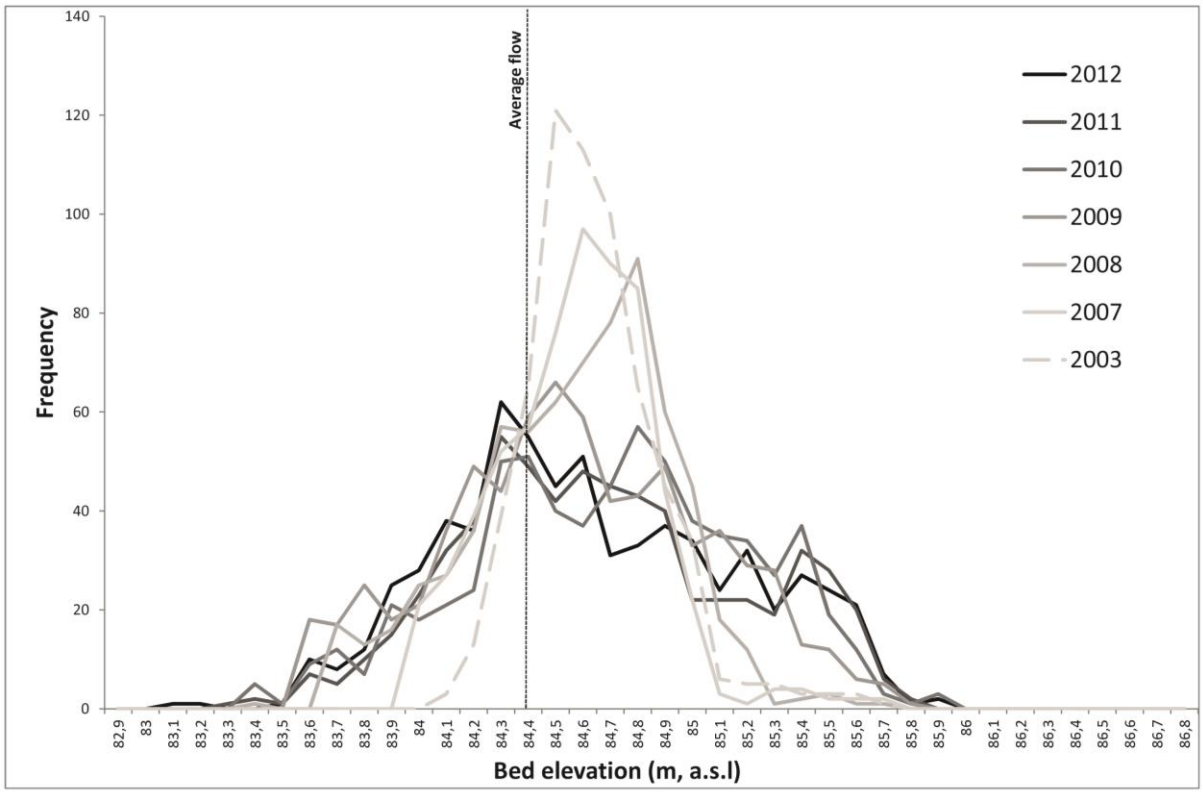


Figure 3-4: Frequency of randomly sampled bed elevation from the years between 2003 and 2012 (n=630 points). Data of 2003 correspond to the liDar data (courtesy of DREAL Centre) before vegetation development (2004). Data of surveys 2007 to 2012 correspond to field measurements.

The shape of the distribution (Table 3-1) evolved from very leptokurtic (2003) to very platykurtic (2012). The skewness ranged between 0.9 and -0.3.

Table 3-1 : Kurtosis and skewness calculated on randomly sampled topographical data sets (n=630 points).

	2003	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Kurtosis	1,9	1,0	-0,1	-0,6	-0,5	-0,6	-0,7
Skewness	0,9	0,3	-0,3	0,0	-0,2	0,1	0,2

A shifting of the distribution towards the right during time highlights an aggradation process on the bar (Figure 3-5). The development of the vegetation since 2004 modifies the rather simple pattern of the distribution that existed before its development. The α value, which varied between 1.9 and 13.8 (7.1 in average) is higher than proposed by Bertoldi *et al.*, 2011 for the Tagliamento River.

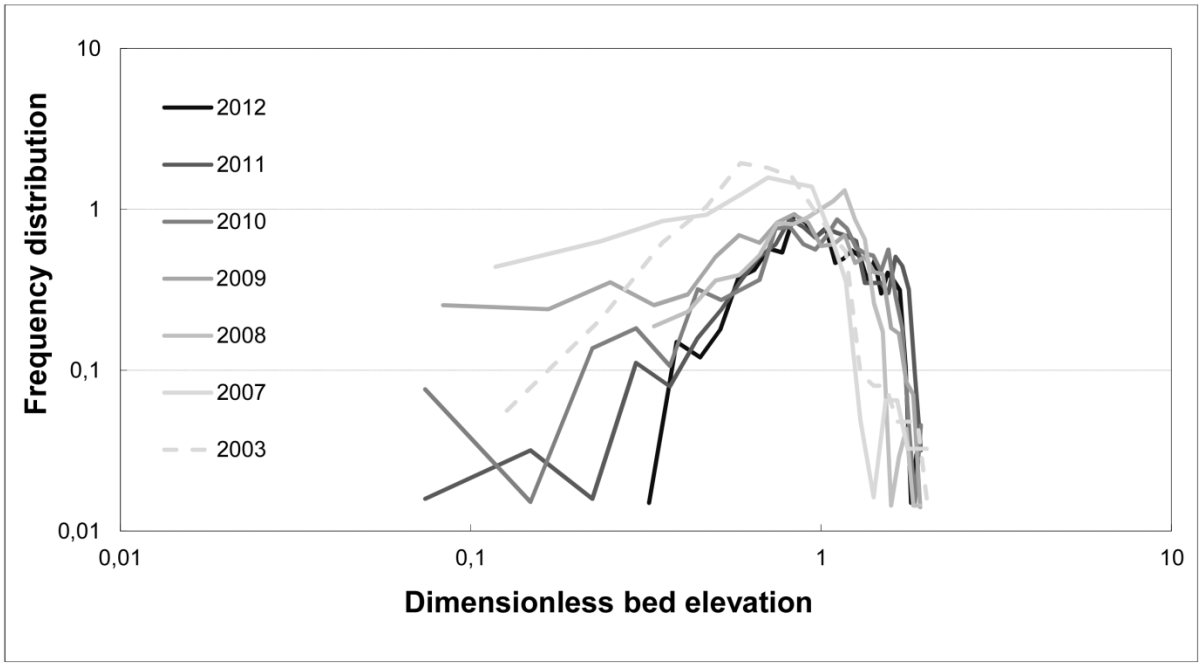


Figure 3-5: Gamma function based on randomly sampled bed topography data between 2003 and 2012. Data of 2003 correspond to the liDar data (courtesy of DREAL Centre) before vegetation development (2004). Data of surveys 2007 to 2012 correspond to field measurements.

Digital Elevation Models (Figure 3-6) show a relatively plane surface of the bar in 2007 with superimposed low-amplitude longitudinal obstacle marks (Nakayama *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2007; Euler and Herget, 2011; Euler *et al.*, 2014) caused by the presence of patches of young trees.

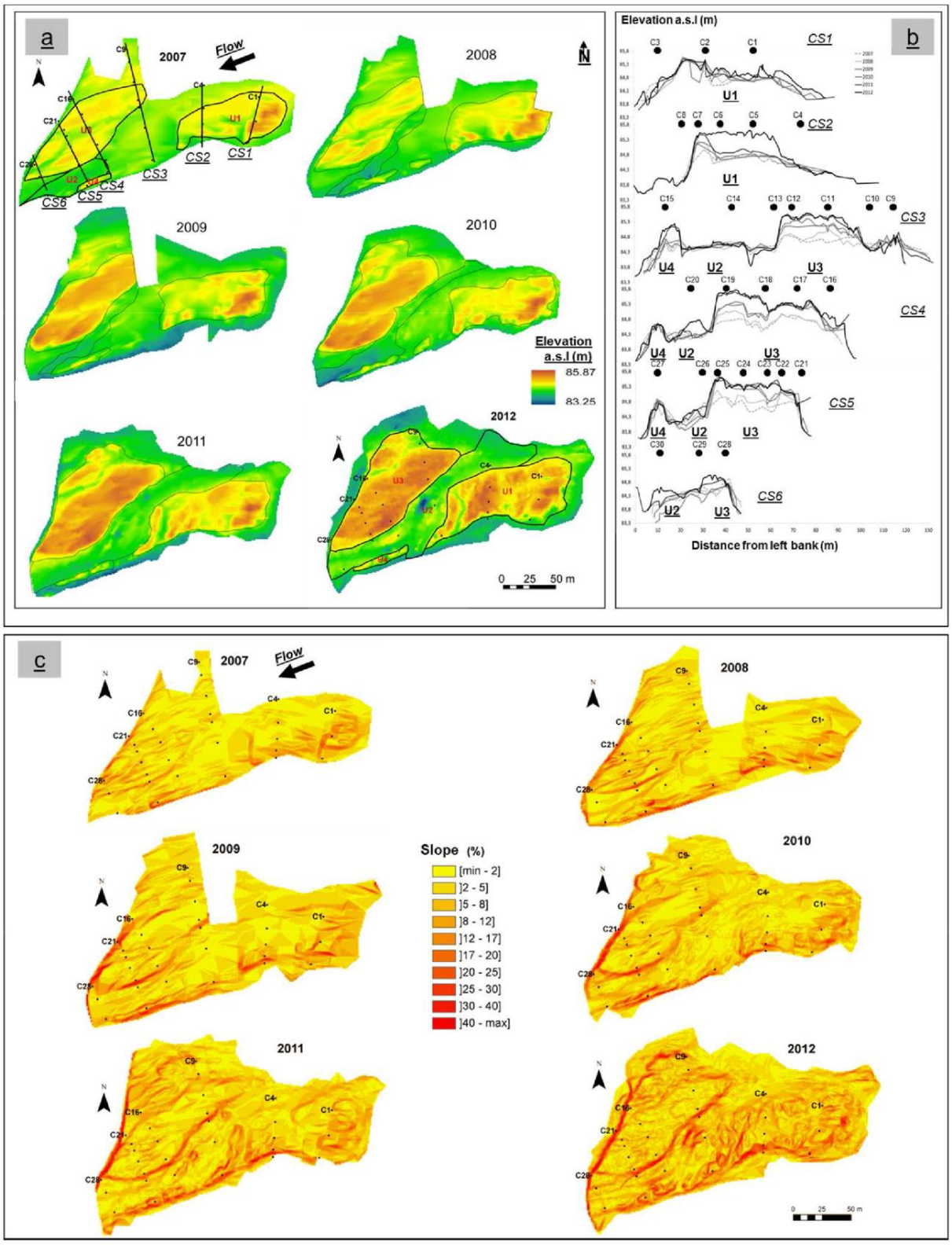


Figure 3-6: morphological evolution of the vegetated bar assessed from topographical surveys. Digital Elevation Models (DEMs) obtained on the bar (a), cross sections CS1 to CS6 with location of scour chains (C1 to C30) (b), slope maps (c).

The highest area of the bar was located at the upstream end of U1 unit at approximately 84.9 m a.s.l. in 2007 and on unit U3 (Z>85 m) in 2012. Between 2007 and 2012, the topographical contrast between units increased. Basically, the slope breaks on the margins of units U1, U3 and U4 were reinforced, distinguishing each unit from unit U2.

On unit U1, most of the sediments were trapped due to the lee effect exerted by the upstream and higher part of this unit. In 2012, a significant sediment deposition occurred downstream of unit U1.

On unit U3, the merging of obstacle marks was accelerated by large volumes of coarse sediments coming from the main channel. The quantities of sediments deposited varied transversally during the survey according to flood events (magnitude and duration). The low-amplitude ridge and swale topography of 2007 associated with obstacle marks evolved towards a higher, smoother and well defined unit. Between, 2010 and 2011, the longitudinal chute located in the downstream part was filled while another, separating unit U3 from an obstacle mark located at the north appeared. The topographical survey also highlighted that steep slopes visible on the margins of unit U3 developed upstream between 2007 and 2012.

Changes in bed topography visible on unit U2 are relatively small compared to units U1, U3 and U4. Although the upstream part of unit 2 is subject to scouring, this chute channel is stable in terms of elevation. The bed channel changes visible in the downstream part of the chute correspond to sediment by-passing.

The analysis of the cross sections (Figure 3-6b) shows highly variable deposition rates over time in the unit U3. On section CS4 for instance, the left part of the bar did increase regularly in elevation except between 2009 and 2010. Conversely, large quantity of sediment was deposited between 2008 and 2009 on the right part of the cross-section.

The cross sections also show longitudinal evolution pattern of the bar margins as the increase of the slope of the banks shifted upstream during time. Comparing CS5, CS4 and CS3 shows that the asymmetry between the bar and the surrounding channels (namely unit U2 and the main channel located to the north) was higher on CS5 in 2007.

Since 2007, 8694 m^3 of sediments were deposited on the bar while 4535 m^3 were eroded (Figure 3-7). Hence, the budget between 2007 and 2012 was clearly positive (+ 4 159 m^3).

Figure 3-7b shows the phasing of deposition of bedload sediments on cross sections CS2 to CS5. Between 2008 and 2009 (Figure 3-7b), median elevation of CS4 and CS5 increased strongly highlighting a significant deposition on these two cross sections. Between 2009 and 2011, sediment deposition was higher on CS3.

Between 2011 and 2012, median elevation of CS2 increased drastically due to a large amount of sediments coming from upstream. These observations suggest that the deposition of sediments was directed upstream during the period surveyed.

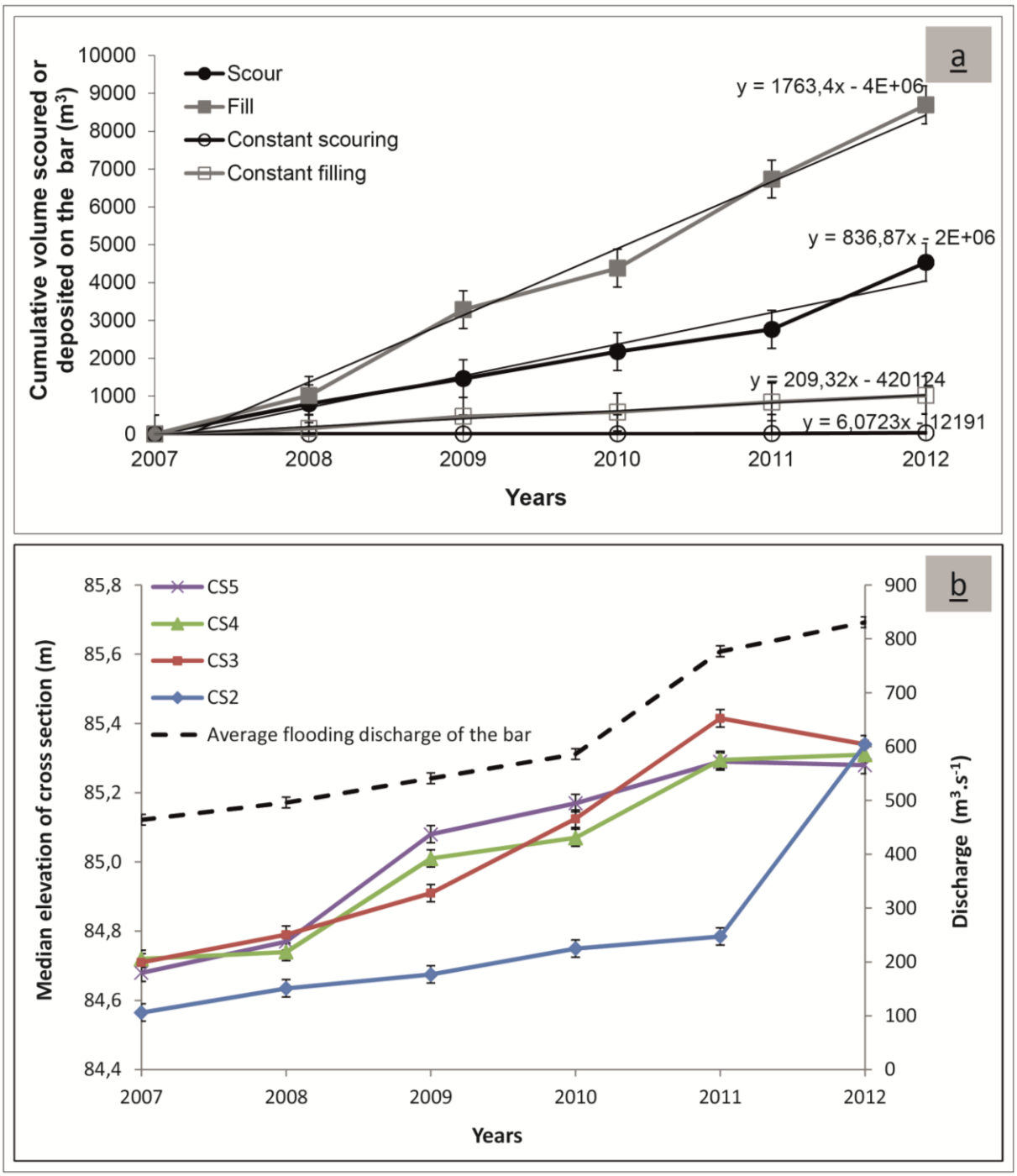


Figure 3-7: a. Cumulative curves of sediment deposition and scouring since 2007 on the entire bar (filled symbols) and on areas only affected by sediment deposition and erosion (empty symbols). b. Median elevation (a.s.l.) of cross sections CS2 to CS5 and average value of the discharge able to inundate the bar.

The topographical surveys have shown that some areas of the bar were subject to a univocal sedimentary trend. In other words, these areas exhibited either a positive sediment budget (units U1, U3 and U4) or a negative budget (unit U2 and the northern margin of unit U3) since 2007. The volumes of sediments trapped between 2007 and 2012 in the areas of continual deposition were estimated to 1 023 m^3. The quantity of sediments trapped in the areas of continual deposition varied over time; between 2007-2008 and 2008-2009 it represented 25% of the sediments deposited on the whole bar while it decreased to 15% between 2009 and 2010 and 16.5% between 2011 and 2012.

3.3.4. Scour and fill processes on the bar

On the bar, the depth of scour decreased with time (Figure 3-8). The maximum scour and/or fill depths recorded were approximately of 0.8 m.

Morphological units U1, U3, U4 were subject to sediment deposition whereas scour was reduced due to the presence of vegetation. The morphological unit U2, bare sub-channel, was characterized by intense sediment remobilization even if the average elevation did not change. The analysis of several cross-sections (Figure 3-8) shows that the scour and fill processes varied according to the morphological units and their average elevation. In several places (*e.g.* scour chains C17, C24 and C25), a considerable accretion of sediment took place between 2008 and 2009 whereas no sediments were deposited after. This can be associated with the occurrence of a high-magnitude flood (Figure 3-1). This is clearly different from what occurred in other places of the same morphological units where sediment deposition occurred progressively during time.

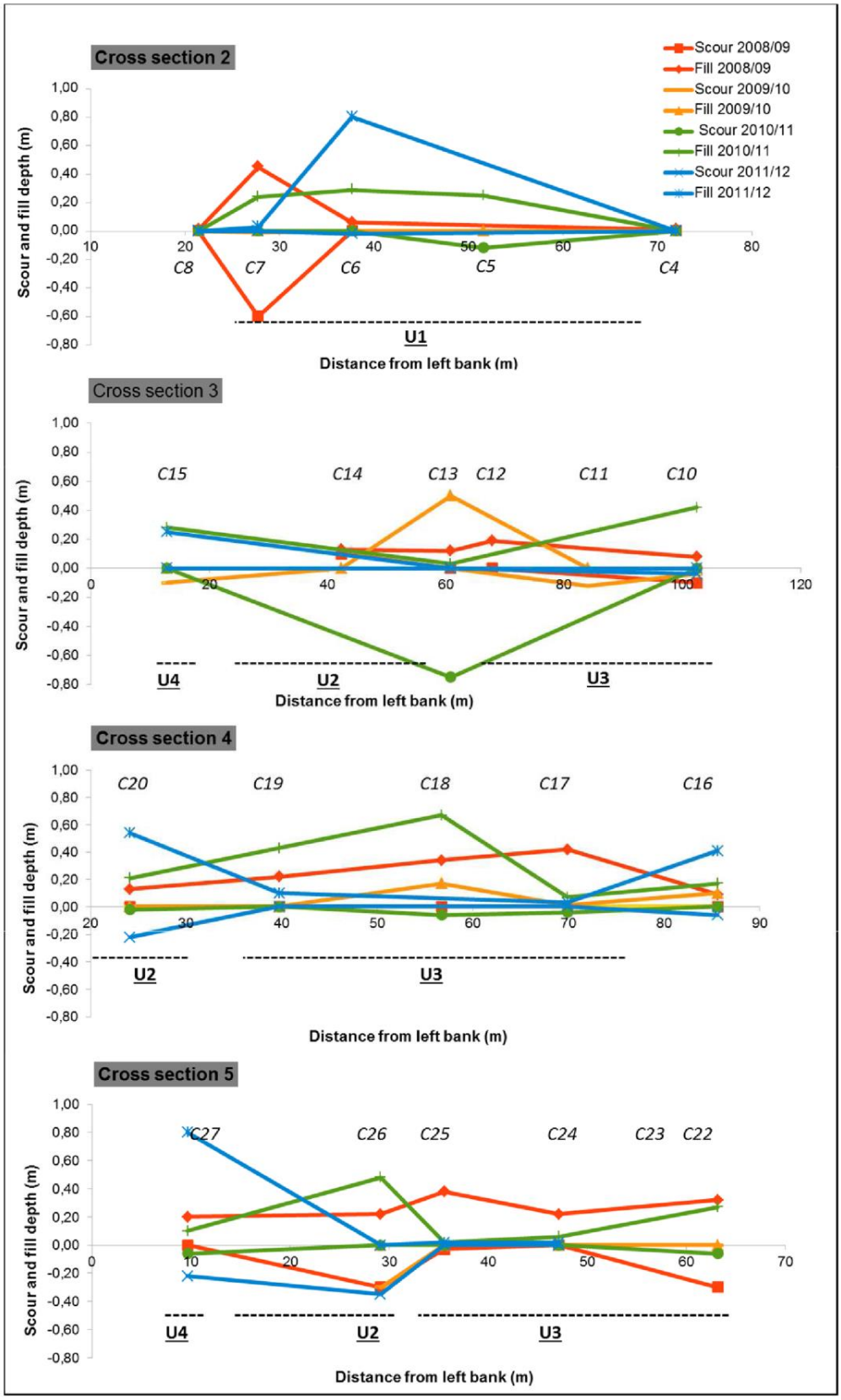


Figure 3-8: Scour and fill depths recorded on cross sections 2, 3, 4 and 5. Dashed lines correspond to morphological units on the mid-channel bar of Mareau-aux-Prés and C4 to C27 correspond to the scour chain number.

3.3.5. Bar depositional architecture

Figure 3-9 shows that the archiving of sediments on the bar was not continuous over time. For the same year, the archiving of sediments on the bar differed between morphological units considered (Rodrigues *et al.*, 2012) depending on the presence or lack of vegetation. For instance, densely vegetated areas (C12, see Figure 3b) were constantly characterized by vertical accretion of sediment that was rapidly fixed by tree roots.

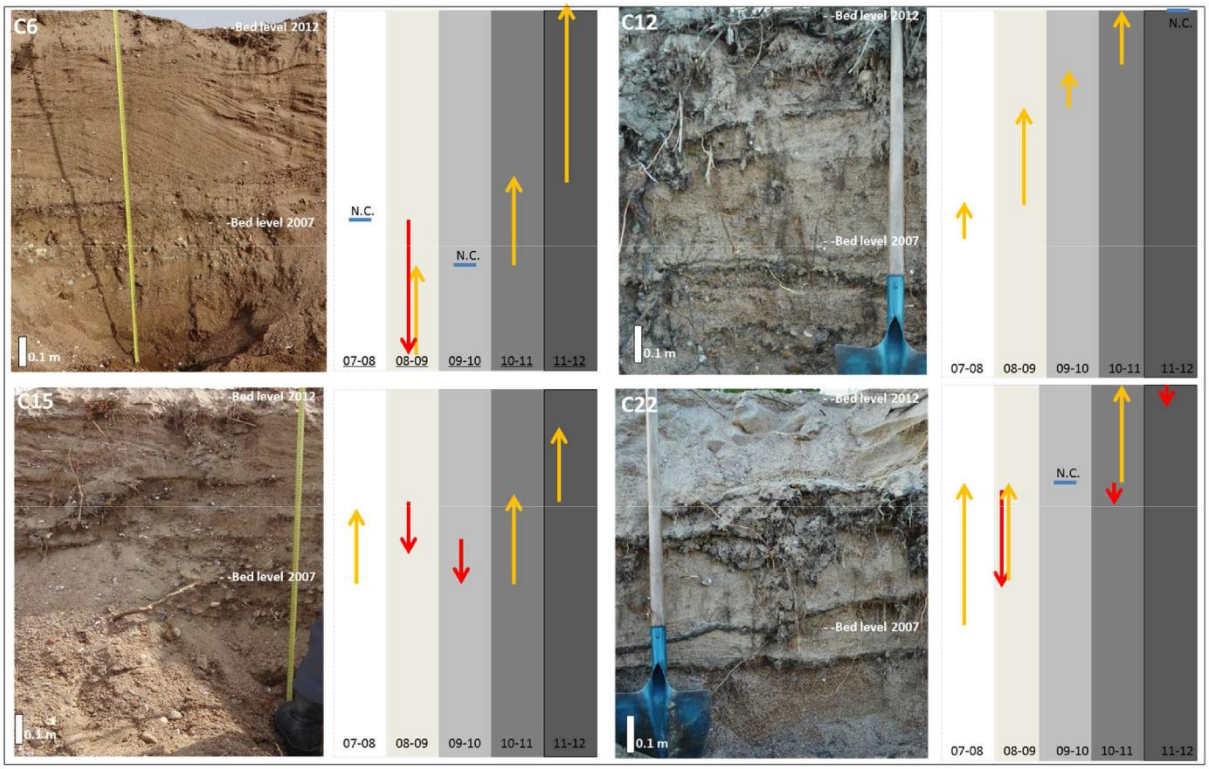


Figure 3-9: Sediment architecture at four locations (representative of the morphological units of the bar) associated with scour and fill depths (arrows) measured using scour chains between 2008 and 2012. Results for year 2007 are based on topographical surveys only. Indication "N.C." means "no changes".

Trenches show classical general trend up fining upwards of sedimentary sequences. The internal structure consists mainly of poorly sorted bedload sediments at the base and planar cross-strata originating as a result of dune migration over the bar during flood events (*e.g.* upper parts of C6 and C15). Thin layers of fine sediments (mainly silts) enriched in organic matter and penetrated by roots are found in the densely vegetated areas (C12 and C22). These thin layers are markers of emersion phases and fixing of sediments by pioneer trees or herbs growing on obstacle-marks (Rodrigues *et al.*, 2007; Euler *et al.*, 2014).

3.3.6. Grain size changes on the bar

Sediments present on the bar are mainly poorly sorted siliceous sands and gravels. Two populations of grains are clearly visible in Figure 3-10a. Low-slope cumulative curves located in the right part of the graphs (Figure 3-10a) correspond to very poorly sorted bedload sediments located in unit U2 or on the margins of vegetated areas. Higher-slope cumulative curves (on the left in graphs of Figure 3-10a) were sampled in the vegetated morphological units, namely U1, U3 and U4. Comparison between years 2008-09, 2009-10, 2010-11 and 2011-12 shows a shift of the curves (Figure 3-10a) towards the right for the low-slope cumulative curves and towards the left for the high-slope cumulative curves. This phenomenon indicates a fining of sediments trapped in the vegetation stands while sediments located in the lower areas and on the margins of vegetation bands become generally coarser. For these areas, although the D_{90} remains constant, the whole mixture becomes coarser due to the washing out of smaller grains downstream. This process leads to the development of armour layers on the margins of the vegetated areas.

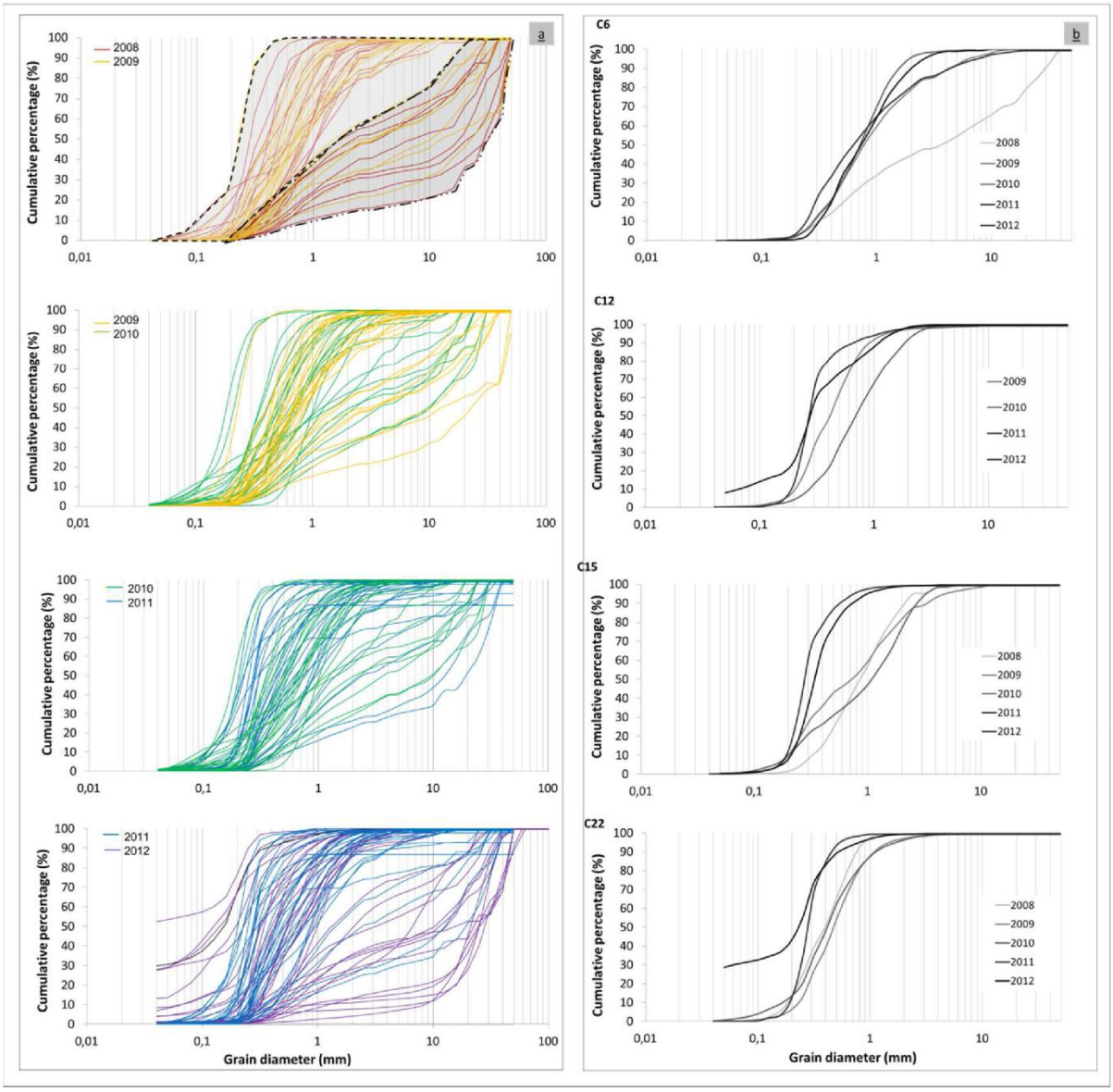


Figure 3-10: Grain size evolution on the bar (all plots) between 2008 and 2012 (a); note the two populations of grains on the first graph. Grain size evolutionat locations of trenches presented in Figure 3-9 (b). No data for C12 in 2008.

Figure 3-10b also shows that slope of cumulative curves of the sediments deposited in densely vegetated areas (namely C6, C12 and C22) increased during time. This indicates a better sorting and is explained by the increase of settling of suspended sediments as the vegetation developed and as mean elevation increased (less bedload sediments being deposited). In this case, the role played by vegetation on flow resistance and fine sediment settling is significant. If vegetation was absent the intensity of fine sediment settling would not be so important

The critical bed shear stress needed to entrain D_{50} and D_{90} particles was determined for all years between 2008 and 2012 (Figure 3-11).

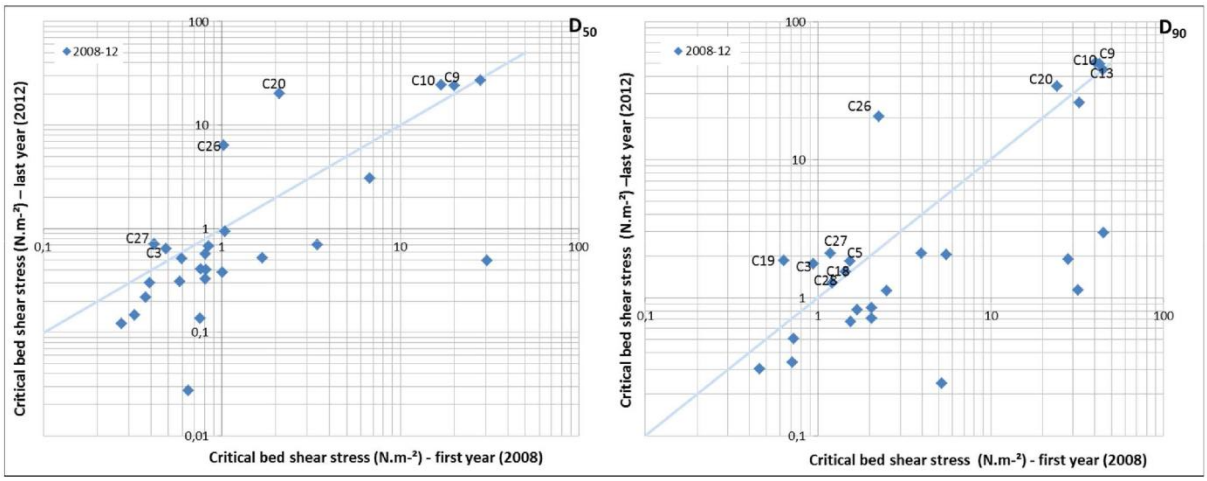


Figure 3-11: Changes of the critical bed shear stress calculated for D50 (left graph) and D90 (right graph) of surface bar sediments between between 2008 and 2012. The bisector indicates the same values of critical bed shear stress in both compared years.. See Figure 3-1 for location.

Depending on the grain size, the critical bed shear stress needed to initiate sediment motion ranges between 0.02 to 50.3 $N.m^{-2}$. The latter value corresponds to large particles constituting armour layers present on the bar. For each year of comparison, the scatter of points increased and two groups of points can be identified. Points located above the bisector (larger grain size, higher critical bed shear stress) correspond to the sites located in Unit 2 or on the margins of vegetated units whereas points located below the bisector correspond mainly to vegetated areas.

3.3.7. Threshold for sediment motion vs vegetation

Table 3-2 and Figure 3-12 compare the excess in bed shear stress responsible for sediment mobilization to the results of the scour and fill depths recorded in bare and vegetated areas.

Table 3-2 : Normalized excess bed shear stress (for D10, D50 and D90) calculated for each scour chain for the flood of 2008 (2080 m3.s-1at the gauging station of Orléans) compared to scour chains results between 2008 and 2009 and to the vegetation characteristics (density, stems.m-^{2} and Nveg). For the normalized bed shear stress, light grey colour cells mean that sediments are theoretically in motion while dark grey cells mean no movement. For the vegetation, light grey colour cells correspond to bare areas, medium grey to small densities of trees (less that median) and dark grey to high densities of trees (more than median). The * indicated the presence of armour layer before the flood of 2008.

	Normalized excess bed shear stress			Scour / fill		Vegetation	
Location	$(\tau - \tau c_{D10})/\tau_{max}$	$(\tau - \tau c_{D50})/\tau_{max}$	$(\tau - \tau c_{D90})/\tau_{max}$	*Scour*	*Fill*	*Density at 0.5 m*	N_{veg} at 0.5 m
C1	0,7	-3,1	-5,0	-0,20	no data	0	0,000
C2	0,6	0,6	0,5	0,00	0,15	25,5	0,077
C3	0,9	0,9	0,8	-0,27	0,25	0	0,000
C4*	0,8	0,0	-3,3	0,00	0,01	0	0,000
C5*	0,7	0,6	0,5	0,00	0,00	70,5	0,116
C6	0,8	0,4	-2,8	0,00	0,06	96,25	0,142
C7	0,6	0,5	0,3	-0,60	0,45	61,5	0,104
C8*	1,0	0,9	0,3	0,00	0,00	0	0,000
C9*	0,7	-1,8	-4,7	no data	no data	0	0,000
C10*	0,8	-1,3	-4,4	-0,10	0,08	0	0,000
C11*	no data	no data	no data	no data	no data	53	0,106
C12	no data	no data	no data	0,00	0,19	109	0,176
C13*	0,8	-2,7	-4,8	0,00	0,12	0	0,000
C14*	no data	no data	no data	0,10	0,13	16,75	0,083
C15*	0,7	0,7	0,5	0,00	0,00	61,25	0,104
C16*	0,8	0,7	-3,2	0,00	0,09	0	0,000
C17	0,7	0,6	0,5	0,00	0,42	24,75	0,068
C18	0,8	0,7	0,7	0,00	0,34	120	0,159
C19	0,7	0,6	0,6	0,00	0,22	64	0,117
C20*	0,9	0,7	-2,2	0,00	0,13	0	0,000
C21	no data	no data	no data	no data	no data	0	0,000
C22	0,6	0,6	0,6	-0,30	0,32	56,75	0,099
C23	0,8	0,7	0,6	no data	no data	30	0,068
C24	0,7	0,6	0,0	0,00	0,22	69	0,129
C25	0,6	0,6	0,6	-0,03	0,38	21,25	0,065
C26	0,8	0,7	0,6	-0,30	0,22	0	0,000
C27	0,8	0,8	0,7	0,00	0,20	43,5	0,093
C28	0,7	0,7	0,6	-0,55	0,46	0	0,000
C29	0,8	0,7	0,6	-0,60	0,51	0	0,000
C30	1,0	0,9	0,5	-0,30	0,16	0	0,000

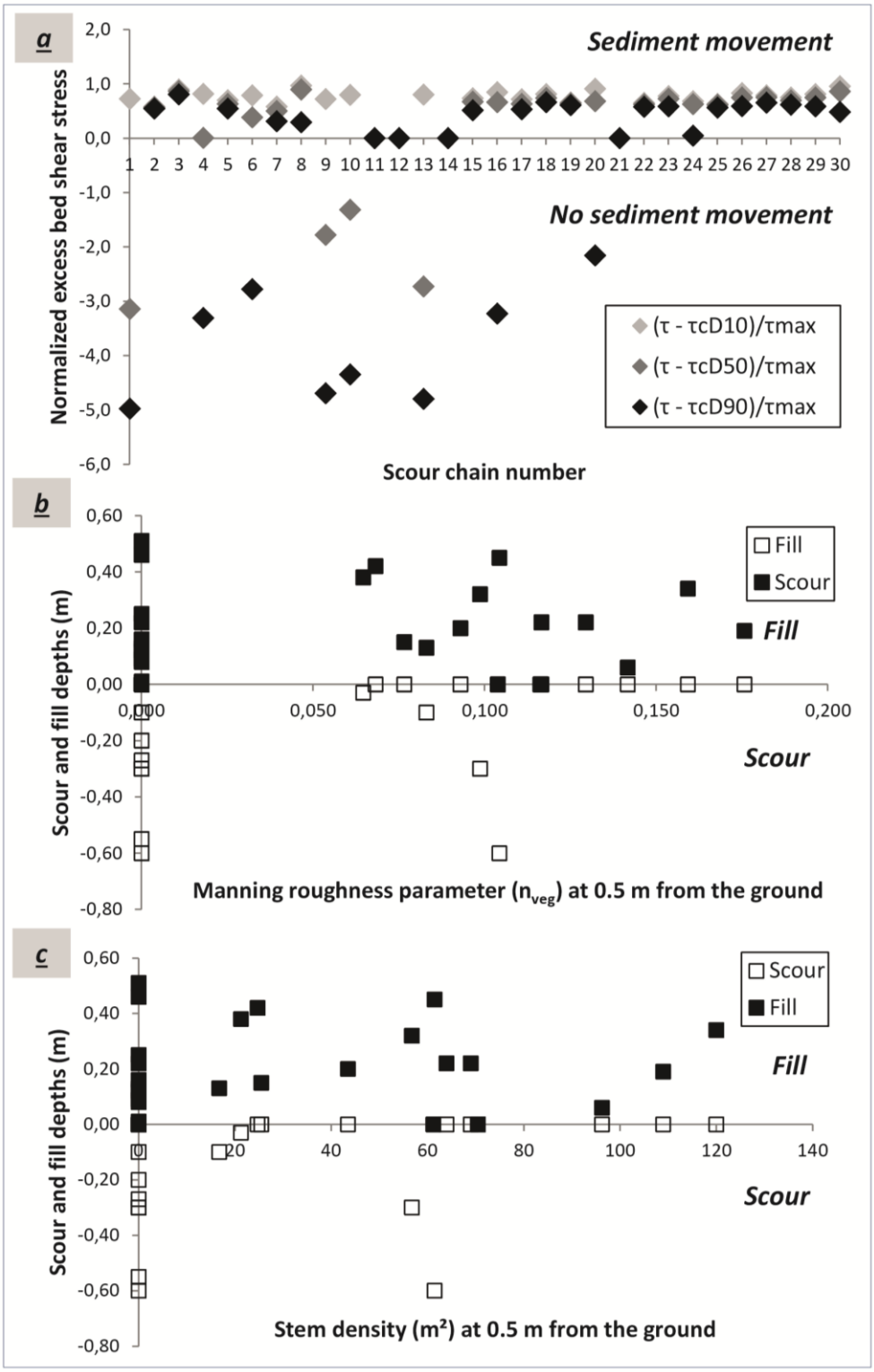


Figure 3-12: Normalized excess bed shear stress and scour/fill depths observed and compared to the vegetation parameters (nveg, stem density).

For bare areas, the normalized excess bed shear stress is in good agreement with the scour depth indicated by the scour chains (except for C10 and C8 where well-developed armour layers were present) as scouring occurred when excess bed shear stress was positive.

For vegetated areas, positive values of normalized excess bed shear stress are often associated with the lack of sediment scouring. This highlights the protection of sediments by the vegetation during flood events.

3.4. Discussion

3.4.1. Scour and fill processes during a flood are not directly interrelated to vegetation density or roughness parameter

The comparison between slightly and highly vegetated areas shows that the vegetation density or N_{veg} parameters are not correlated to the thickness of sediments deposited during the flood (Figure 3-12). Due to the fact that we calculated total boundary shear, not grain stress it is difficult to make any meaningful conclusions about the relationship between shear stress, vegetation, and scour/fill. Anyway, the spatial distribution of sediment deposition clearly highlights the role played by the sediment supply on accretion of the bar during floods. This also suggests that other controlling factors are playing a role at a global scale (floods intensity-frequency-duration and associated sediment supply), and local scale (average elevation of the bar, bar surface form, deflection effect, sediment grain size).

3.4.2. Upstream-shifting accretion and grain size segregation processes during first stages of island development

The topographical survey highlighted a change in the distribution of elevation of the bar during time (Figures 4, 6 and 13a), evolving from very leptokurtic (2003) to very platykurtic (2012). In terms of morphology, the topography of the bar accreted and varied due to the presence of obstacle marks. Figure 3-13a, steps 1, 2a and 2b, shows the spreading of the distribution of elevations towards higher ones (dominant trend, due to sediment trapping) and lower ones (due to scouring near the margins of tree bands).

The vertical accretion of the bar can be analyzed at the local scale (tree band) and at the bar scale. At the local scale, sediment deposition results from the combination of two sedimentary processes. The first one, corresponds to the development of obstacle marks growing downstream and laterally and is clearly visible on Figure 3-6 for years 2007 and 2008. The second process corresponds to global deposition events at the bar scale (*i.e.* year 2009, see cross sections CS3 to 5, unit U3 on Figure 3-6 and Figure 3-4; see also Wintenberger, 2011).

Such event allowed sediment deposition in the space between previously existing obstacle marks. In other words, in the present study, obstacle marks developed principally when bedload supply was reduced whereas large deposition events which highlight a significant bedload sediment supply coming from the main channel during the higher magnitude flood reached during the study period.

At the bar scale, it appears that the aggradation process evolved in the upstream direction during time (Figure 3-7b). We assume that the sediment deposition occurring in the downstream part of the bar results in backwater effect that facilitates sediment deposition immediately upstream during subsequent flood events. This regressive process led to the building of high-slope margins for unit U3 in the upstream direction between 2007 and 2012 (Figure 3-6). The analysis of the median elevation of cross sections CS2 to CS5 shows that the presence of unit U3 contributed to a strong deflection of bedload sediment fluxes in 2012 which allowed a significant sediment deposition on unit U2 (median elevation on CS2 being similar to the other cross sections, Figure 3-7b). So, during the first stages after woody vegetation establishment, the accretion process seems to be principally governed by i) space available between tree bands, ii) bedload sediment supply and iii) vegetation type.

Generally, sediment sorting improved downstream. A segregation was observed between sediments surveyed on the vegetated and on the bare areas: the size of sediments trapped in the vegetation decreased (and their sorting increased) while sediments present in unit U2 or on the margins of the vegetated units get generally coarser (even if the D_{90} did not evolved significantly) mainly due to the development of armour layers (Figure 3-13b). This grain size segregation process is a striking phenomenon which can be extrapolated to many sandy-gravelly fluvial systems. We assume here that the development of armoured layers as well as the general coarsening of sediments close to the vegetation bands can influence the incision process acting on surrounding channels. Comparing this study with the findings of Gurnell and Petts (2006) and Rodrigues *et al.* (2006), we suggest that the effect of vegetation on surrounding channels (deflection, turbulence) will differ according to the average grain size and the sorting of sediments. In sandy sites, incision of surrounding channels will be easier and not being significantly influenced by by flow dynamics rather than sediment grain size. In sandy-gravelly sites, incision of surrounding channels will be slower due to this coarsening effect. As a consequence, the morphological evolution of developing islands and surrounding channels should be different (in terms of time-response) for these two types of sites. Further investigations should be done in the future to detail this point.

The upward fining stratigraphical sequences observed for vegetated areas can be occasionally disturbed by deposition of coarser sediments during high-magnitude flood events (increase of bedload sediment supply). During these events, coarser sediments can be transported towards distal and high-elevation sites, and hence, intercalate with finer sediments. Even though sediments in the vegetated filter are relatively fine as a result of lower critical bed shear stress, they were not eroded during subsequent floods due to the high flow resistance. Specifically, the normalized excess bed shear stress associated with the flood of 2008 (higher magnitude flood event recorded) was not able to reach the threshold of sediment motion due to the vegetation presence (Table 3-2).

3.4.3. Conceptual model: from the vegetated bar state to the island state in low gradient sandy-gravelly rivers

Results presented in this paper hold for relatively large low-gradient sandy gravelly rivers and for sexually reproduced vegetation. The study reach is characterized by an average specific stream power (22 $N.Wm^{-2}$) smaller than the theoretical value of 30 $W.m^{-2}$ described by Francis *et al.,* 2009, Corenblit *et al.,* 2009 and Corenblit *et al.,* 2014 as the energy value allowing a durable biotic-abiotic reciprocal linkage. Rodrigues *et al.* (2007) suggest that this threshold value should be interpreted with care and modulated by the local physical and biological conditions. Anyhow, during the study period, the pioneer island was not renewed and a univocal building of a pioneer island occurred. This can be associated with the link between hydrology (several floods occurred but the 2 year flood was only reached in 2008) and the biological traits of *Populus nigra*, L (Villar, 2011). During the study period (discharge did not reach high values), the small seedlings of *P. nigra* recruited in 2004 were able to withstand the physical stresses and influence rapidly their environment. This makes a strong difference compared to highly morphogically highly active rivers such as braided rivers (*e.g.* Tagliamento), where 30 % of the islands are renewed every 2.5 years (Van der Nat *et al.,* 2002) and island turnover takes between 12 and 24 years (Zanoni *et al.,* 2008).

Scour chains and topographical surveys have shown non-linear sediment archiving during the floods. Basically, sediment deposition rates are high during the first stages of development of vegetated bars, mainly influenced by the sediment supply (linked to the hydrology) coming from the main channel and by vegetation which modulates scour and fill processes at both local and bar scale (Figure 3-13b, stage I).

The spatial distribution of vegetation bands can influence the formation of obstacle and their ability to store sediments increasing the deflection power of the bands during subsequent floods. Tree cutting by beavers can result in sprouting of numerous shoots that will in turn increase their flow resistance. As aggradation is going on (Figure 3-13b, stage II), the deflection of flow by the bar increases and the sediment deposition rates decrease due to the fact that average elevation increases and inundation of the island becomes rare. As well known in literature, the deposition of bedload sediments decreases and is progressively replaced by settling of fine material transport as suspended load. However, during high-magnitude flood events, coarser sediments can be deposited on the fine sediments and then interbedded with these sediments. When the island is established (elevation is rather important and vegetation cover changed; Figure 3-13b, stage III), fine sediment deposition occurs only during very high-magnitude (or exceptional) flood events. The low accretion rates during this step of island evolution and the deposition of autochthonous organic matter allows the building of the floodplain stratigraphical unit over decades (see Figure 3-2). When the island banks are high, gravitational destabilization can occur, giving large quantity of sediments to the channel and then, reducing the sediment volume stored in the island. During this step, riparian vegetation can stabilize the sediments on the banks or increase their erosion due to surcharging (Figure 3-13b, stage IIIb; Thorne, 1990). During this stage IIIb, channel incision, changes in channel planform and cattle activity can also trigger significant bank erosion. The trend is different for rip-rapped islands (Figure 3-13b, stage IIIa).

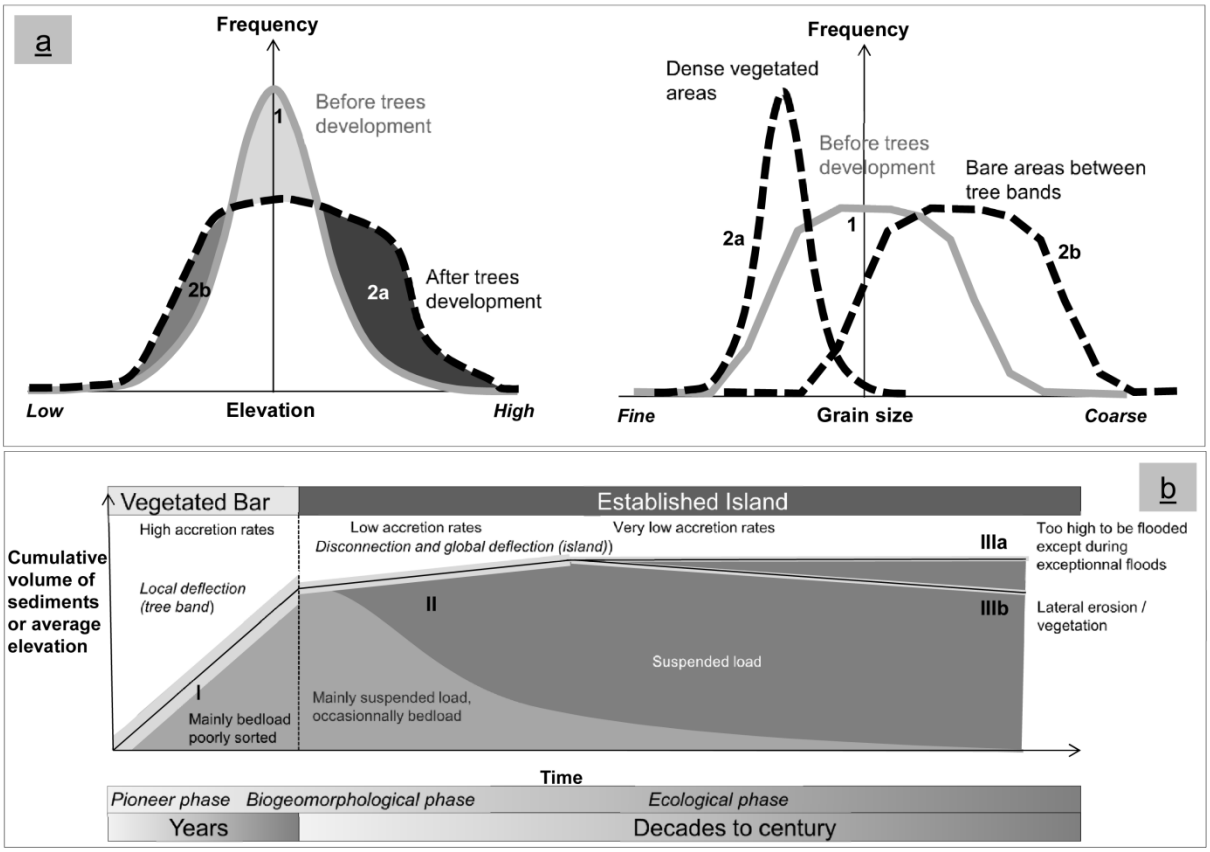


Figure 3-13: Conceptual model of evolution from a vegetated bar to an established island state. Consequences of the first stages of development of pioneer trees on topography and grain size during years following colonization (a). Transition (longer time scale) between a vegetated bar and an established island (b). Comparison is made with the fluvial biogeomorphological succession of Corenblit *et al.*, 2014.

3.5. Conclusions

The working hypothesis of this field study has been that non-migrating (or forced) bars in relatively large and low-gradient sandy-gravelly rivers can constitute a preferential area for woody vegetation recruitment and survival. The feedback exerted by the black poplar (*Populus nigra*, L) on these bars can trigger a rapid evolution towards an island form. Detailed field surveys done of one of these non-migrating bars of the Loire River lead us to the following conclusions:

- The dense vegetation bands trapped and fixed sediments during floods and induced a specific signature on topography and grain size (which evolved during the study period, Figure 3-13a);

- A combination of two deposition processes was identified: (i) generation of obstacle marks in the downstream direction leading to a (ii) global regressive accretion of the bar and development of well-defined margins prefiguring the future island banks;
- The morphological changes noted on the bar were controlled by the bedload sediment supply coming from the main channel deflected by the previously established tree bands;
- The development of tree bands triggers a grain size segregation (finer sediments in the vegetated areas *vs* generally coarser sediments in the surrounding channels) which is assumed to influence the timing of disconnection between a growing island and the surrounding channels, specifically in gravelly sites;
- The use of a normalized excess bed shear stress parameter showed that the fixing of sediments is significantly influenced by the characteristics of vegetation whereas the amount of sediments deposited during the flood is not directly related to vegetation density or roughness parameter;
- The conceptual model proposed in this study suggests that the archiving of sediments and the morphological changes are rapid during the first stage of development of a vegetated bar whereas, since the bar is high enough to be submerged only during high-magnitude floods, it slowly evolves towards an island form. In relatively large sandy-gravelly rivers, woody pioneer vegetation significantly increases the preservation potential of sediments leading to quasi continuous sediment deposition rates.

Acknowledgements

This study constitutes the main part of the Master Thesis in Geosciences of the author defended in 2011. The paper was written jointly by the first two authors and this work was initiated by the second author in 2007; it recently benefited support from the Masterplan Plan Loire Grandeur Nature (BioMareau Project, FEDER / Région Centre / INRA, Coord. M. Villar).

The authors wish to thank J.P. Bakyono, R. Delancret, B. Deleplancque, H. El Abida, L. Gouny, P. Jugé, M. Lemay, I. Pene, M. Rincel (University F. Rabelais – Tours) for their valuable field assistance and analytical operations. M. Chantereau and D. Hemeray (Réserve naturelle de St Mesmin) are thanked for their support and interest. C. Pasquier (Inra Orléans) is also acknowledged for her help during topographical measurements in summer 2009. W. Bertoldi (University of Trento) is warmly thanked for his advices during the analysis of topographical results.

References

Abbe, T.B., Montgomery, D.R., 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. Geomorphology 51, 81-107.

Antonarakis, A.S., Richards, K.S., Brasington, J., Muller, E., 2010. Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning. Water Resources Research, 46, W06510.

Bertoldi, W., Gurnell, A.M., Drake, N., 2011. The topographic signature of vegetation development along a braided river: results of a combined analysis of airborne lidar, colour air photographs and ground measurements. Water Resources Research, 47, W06525.

Blott, S. J., Pye, K., 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 1237-1248.

Braun-Blanquet, J., 1964. Flanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde3rd ed. Springer-Verlag, Wien.

Brice, J.C., 1964. Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska. U.S. Geological Survey Prof. Paper, 422D, 1-41.

Bridge, JS., 2003. Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record. Blackwell, Oxford, ISBN 978-0-632-6489-2, 491 pp.

Charron, I., Johnson, E., A., Martin, Y., E. 2011. Tree establishment on bars in low-order gravel-bed mountain streams. Earth Surface Processes Landforms, 36, 1522–1533.

Claude, N., Rodrigues, S., Bréhéret, J-G., Bustillo, V., Jugé, P. (2014). Interactions between flow structure and morphodynamics of migrating bars in a channel widening/narrowing of the Loire river (France). Water Resources Research. DOI: 10.1002/2013WR015182).

Combroux, I., Bornette, G., Amoros, C., 2002. Plant regenerative strategies after a major disturbance : the case of a riverine wetland restoration. Wetlands, 22, 234-245.

Copeland, R.R., 2000. Determination of flow resistance coefficients due to shrubs and woody vegetation., US army corps of engineers, ERDC/CHL HETN-II-3, 8 p.

Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A.M., Tabacchi, E., Roques, L., 2009. Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1790-1810.

Corenblit, D., Baas, A.C.W., Bornette, G., Darrozes, J., Delmotte, S., Francis, R.A., Gurnell, A.M., Julien, F., Naiman, R.J., Steiger, J., 2011. Feedbacks between geomorphology and biota controlling Earth surface processes and landforms: a review of foundation concepts and current understandings. Earth-Science Reviews, 106, 307-331.

Corenblit, D., Steiger, J., González, E., Gurnell, A.M., Charrier, G., Darrozes, J., Dousseau, J., Julien, F., Lambs, L., Larrue, S., Roussel, E., Vautier, F., Voldoire, O., 2014. The biogeomorphological life cycle of poplars during the fluvial biogeomorphological succession: a special focus on *Populus nigra* L.

Crosato, A., Mosselman, E., Desta, F.B., Uijttewaal, W.S.J., 2011. Experimental and numerical evidence for intrinsic nonmigrating bars in alluvial channels, Water Resources Research, 47, W03511.

Crouzy, B., Edmaier, K., Pasquale, N., Perona, P., 2013. Impact of floods on the statistical distribution of riverbed vegetation. Geomorphology, 202, 51-58.

Dacharry, M., 1996. Les grandes crues historiques de la Loire. La Houille Blanche, 6/7: 47-53.

Darby, S.E., Simon, A., 1999. Incised river channels. Processes, forms, engineering and management. Wiley, Chichester, 442 pp.

Detriché, S., Rodrigues S., Macaire, J.J., Bonté, P., Bréhéret, J.G., Bakyono, J.P., Juge, P., 2010. Caesium-137 in sandy sediments of the River Loire (France): assessment of an alluvial island evolving over the last fifty years. Geomorphology, 115, 11-22.

Dhivert, E., Grosbois, C., Rodrigues, S., Desmet, M. (2015). Influence of fluvial environments on sediment archiving processes and temporal pollutant dynamics (upper Loire River, France). Science of the total Environment, 505, 121-136.

Duband, D. 1996. La genèse des crues dans le bassin de la Loire. La Houille Blanche, 6/7: 54-62.

Euler T., Herget J., 2012. Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments. Catena 91, 35–46.

Euler T., Zemke, J., Rodrigues, S., Herget J., 2014. Influence of inclination and permeability of solitary woody riparian plants on local hydraulic and sedimentary processes. Hydrological Processes, 28, 1358–1371.

Fathi-Maghadam, M., Kouwen, N., 1997. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. Journal of Hydraulic Engineering, 123: 51-57.

Fielding, C.R., Alexander, J., Newman-Sutherland, E., 1997. Preservation of in-situ, arborescent vegetation and fluvial bar construction in the Burdekin River of north Queensland, Australia. Paleogeogr., Paleoclimatol., Palaeoecol., 135, 123-144.

Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos river bar: a study of the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 1, 3-26.

Francis, R.A., Gurnell, A.M., Petts, G.E., Edwards, P.J., 2006. Riparian tree establishment on gravel bars: interactions between plant growth strategy and the physical environment. In: Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Bristow, C.S., Petts, G.E., Jarvis, I. (Eds.), Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management. International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 36. Blackwell, Malden, MA, pp. 361–380.

Francis, R., Corenblit, D., Edwards, P., 2009. Perspectives on biogeomorphology, ecosystem engineering and self-organisation in island-braided fluvial ecosystems. Aquatic Sciences 71: 290–304.

Freeman, G.E., Rahmeyer, W.H., Copeland, R.R., 2000. Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation, US Army corps of engineers, ERDC/CHL TR 00-25, 33 pp.

Fuller, I.C., Hutchinson, E., 2007. Sediment flux in a small gravel-bed stream: response to channel remediation works. New Zealand Geographer 63, 169–180.

Gautier, E., Grivel, S., 2006. Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River, France, In J.S. Rowan, R.W. Duck, A. Werrity, Sediment dynamics and the hydromorphology of fluvial systems, IAHS, Publ., 306, 179-187.

Gibling, M.R., Davies, N.S., 2012. Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution. Nature Geoscience, 5, 99-105.

Gibling, M.R., Davies, N.S., Falcon-Lang, H.J., Bashforth, A.R., DiMichele, W.A., Rygel, M.S., Ielpi, A., 2013. Palaeozoic co-evolution of rivers and vegetation: a synthesis of current knowledge. Proceedings of the Geologists' Association.

Gilvear, D., Willby, N., 2006. Channel dynamics and geomorphic variability as controls on gravel bar vegetation; river Tummel, Scotland. River Research and Applications 22 : 457-474.

Graf, W.L., 1978. Fluvial adjustments to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. Geological Society of America Bulletin, 89: 1491-1501.

Grosbois, C., Meybeck, M., Lestel, L., Lefèvre, I., Moatar, F. 2012. Severe and contrasted polymetallic contamination patterns (1900–2009) in the Loire River sediments (France). Science of the Total Environment, 435-436, 290-305.

Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V., Tockner, K. 2001. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. Earth Surface Processes and Landforms, 26: 31-62.

Gurnell, A.M., Tockner, K., Edwards, P.J., Petts, G.E., 2005. Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. Frontiers in Ecology and Environment, 3 (7), 377 – 382.

Gurnell, A.M., Petts, G.E., 2006. Trees as riparian engineers: the Tagliamento river, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 31: 1558–1574.

Gurnell, A.M., Bertoldi, W., Corenblit, D., 2012. Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. Earth-Science Reviews, 111, 129-141.

Hassan MA. 1990. Scour, fill, and burial depth of coarse material in gravel bed streams. Earth Surface Processes and Landforms, 15, 341–356.

Hassan, M.A., Schick, A.P., Shaw, P.A., 1999. The transport of gravel in an ephemeral sandbed river. Earth Surface Processes and Landforms 24: 623–640.

Haschenburger, J.K., Cowie, M., 2009. Floodplain stages in the braided Ngaruroro River, New Zealand, 103, 466-475.

Heritage, G.L., Milan, D.J., Large, A.R.G, Fuller, I.C., 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. Geomorphology 112, 334-344.

Ielpi, A., Gibling, M.R., Bashforth, A.R., Lally, C., Rygel, M.C., Al-Silwadi, S., 2014. Role of vegetation in shaping Early Pennsylvanian braided rivers: Architecture of the Boss Point Formation, Atlantic Canada. doi: 10.1111/sed.12109

Kollmann, J., Vieli, M., Edwards, P.J., Tockner, K., Ward, J.V., 1999. Interactions between vegetation development and island formation in the Alpine river Tagliamento. Applied vegetation science, 2: 25-36.

Laronne, J.B, Outhet, D.N., Carling, P.A., McCabe, T.J., 1994. Scour chain employment in gravel bed rivers. Catena 22: 299–306.

Laronne, J.B, Sholmi Y., 2007. Depositional character and preservation potential of coarse-grained sediments deposited by flood events in hyper-arid braided channels in the Rift Valley, Arava, Israel. Sedimentary Geology 195, 21–37.

Latapie, A., 2011. Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne, PhD thesis, University of Tours – Irstea, 277 pp.

Latapie, A., Camenen, B., Rodrigues, S., Moatar, F., Paquier, A., 2014. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. Catena, 121, 1-12.

Li, R.M., Shen, H.W., 1973. Effect of tall vegetations on flow and sediment. Journal of hydraulic division, 99: 793-814.

Manners, R.B., Schmidt, J.C., Scott, M.L. 2014. Mechanisms of vegetation-induced channel narrowing of an unregulated canyon river: Results from a natural field-scale experiment. Geomorphology, 211, 100-115.

McKenney, R., Jacobson, R.B., Wertheimer, R.C., 1995. Woody vegetation and channel morphogenesis in low gradient, gravel-bed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas. Geomorphology, 13, 175-198.

Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes 5, 3–30.

Mikuś, P., Wyżga, B., Kaczka, R.J., Walusiak, E., Zawiejska, J., 2013. Islands in a European mountain river: Linkages with large wood deposition, flood flows and plant diversity. Geomorphology, 202, 115-127.

Moggridge, H.L., Gurnell, A. M., 2009. Controls on the sexual and asexual regeneration of Salicaceae along a highly dynamic, braided river system. Aquatic Sciences 71: 305-317.

Nakayama, K., Fielding, C.R., Alexander, J., 2002. Variations in character and preservation potential of vegetation-induced obstacle marks in the variable discharge Burdekin River of north Queensland, Australia. Sedimentary Geology, 149: 199-218.

Nanson, G.C., Knighton, A.D., 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. Earth Surface Processes and Landforms, 21, 217-239.

Nepf, H., Ghisalberti, M. 2008. Flow and transport in channels with submerged vegetation Acta Geophysica 56 (3), 753-777.

Olesen, KW., 1984. Alternate bars in and meandering of alluvial rivers. In: River Meandering, Proc. Conf. Rivers 1983, New Orleans, Ed. C.M. Elliott, ASCE, 1984, pp.873-884.

Osterkamp, W.R., 1998. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake river, Idaho. Wetlands, 18: 530-545.

Paola, C., 1996. Incoherent structure: turbulence as a metaphor for stream braiding. In: *Coherent flow structures in open channels*, eds. Ashworth, P.J., Bennett, S.J., Best, J.L., Mc Lelland, S.J. John Wiley and Sons, pp. 706-723.

Parker, G., Johanneson H., 1989. Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels. In: River meandering, Water Resources Monograph 12, Eds. S. Ikeda and G. Parker, pp.379-415.

Petryk, S., Bosmajian, G., 1975. Analysis of flow through vegetation. Journal of the Hydraulics Division, 101: 871-884.

Reinfelds, I., Nanson, G.,1993. Formation of braided river floodplains,Waimakariri River, New Zealand. Sedimentology, 40, 1113–1127.

Rodrigues, S, Bréhéret, J.G., Macaire, J.J., Moatar F., Nistoran D., Jugé P., 2006. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: the Loire River (France). Sedimentary Geology, 186, 89-109.

Rodrigues, S., Bréhéret, J.G., Macaire, J.J., Greulich, S., Villar, M., 2007. In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire (France). Sedimentology, 54, 223-242.

Rodrigues, S., Claude, N., Jugé, P., Bréhéret, J.G., 2012. An opportunity to connect the morphodynamics of alternate bars with their sedimentary products. Earth Surface Processes and Landforms, 37, 240–248.

Rodrigues, S., Mosselman, E., Claude, N., Wintenberger, C., Jugé, P. In Press. Alternate bars in a sandy gravel bed river: generation, migration and interactions with superimposed dunes. Earth Surface Processes and Landforms.

Shields, A., 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung., Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, 26 pp.

Struiksma, N., Olesen, K.W., Flokstra, C., de Vriend, H.J., 1985. Bed deformation in curved alluvial channels. Journal of Hydraulic Research, 23, No.1, 57-79.

Tal, M., Paola, C., 2007. Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation. Geology, 35;347-350.

Thorne, C.R., 1990. Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. In: Vegetation and erosion: processes and environments. (Ed J.B. Thornes), pp. 125-144. Wiley, New York.

Tubino, M., 1991. Growth of alternate bars in unsteady flows. Water Resources Research, 27: 37-52.

Tubino, M., Repetto, R., Zolezzi, G., 1999. Free bars in rivers. Journal of Hydraulic Research, 37: 759-775.

Van der Nat, D., Schmidt, A.P., Tockner, K., Edwards, P.J., Ward, J.V., 2002. Inundation dynamics in braided floodplains (Tagliamento River, northeast Italy). Ecosystems 5: 636–647.

Västilä, K., Järvelä, J., Aberle, J. 2013 Characteristic reference areas for estimating flow resistance of natural foliated vegetation. Journal of Hydrology 492, 49-60.

Villar, M., 2011. Conservation des ressources génétiques du peuplier noir dans son habitat : bases biologiques, génétiques et écologiques, Habilitation Dissertation, 112 pp.

Vreugdenhil, S.J., Kramer, K., Pelsma, T., 2006. Effects of flooding duration, -frequency and –depth on the presence of saplings of six woody species in north-west Europe. Forest Ecology and Management 236: 47-55.

Wende, R., Nanson, G.C., 1998. Anabranching rivers: ridge-form alluvial channels in tropical northern Australia. Geomorphology, 22, 205-224.

Wintenberger, C., 2011. Transformation d'une barre sédimentaire de la Loire Moyenne en île : influence de la végétation ligneuse. Master's Thesis, University of Tours, 50 p.

Wu, F.C., Shen, H.W., Chou, Y.J., 1999. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. Journal of Hydraulic Engineering, 125: 934-942.

Zanoni, L., Gurnell, A.M., Drake, N., Surian, N., 2008. Island dynamics from analysis of historical maps and air photographs. River Research and Applications 24: 1141–1159.

Chapitre 4 : Dynamique hydro-sédimentaire d'une barre non-migrante de centre de chenal et des dunes superposées sur une rivière sablo-graveleuse (Loire, France)

Barre sédimentaire forcée de Mareau-aux-Prés (RNN Saint-Mesmin)

4.1. Objectifs et synthèse du chapitre

Ce chapitre est consacré à la remobilisation sédimentaire au cours des épisodes de crue faisant suite aux travaux d'entretien du lit réalisés sur la barre forcée de centre de chenal de Mareau-aux-Prés, localisée dans la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin en aval de la ville d'Orléans (45). Il vise à répondre aux objectifs spécifiques définis dans l'axe 1 de cette thèse relatif à l'adaptation de la morphologie fluviale et l'efficacité de la remobilisation sédimentaire suite aux travaux. A l'instar du précédent chapitre, celui-ci est présenté sous la forme d'un article accepté (révisions mineures) pour publication dans la revue *Geomorphology* et vise à répondre à une problématique en plein essor concernant la dynamique des barres sédimentaires forcées et la morphologie des chenaux fluviaux. L'objectif spécifique de l'article est de comprendre l'évolution morphologique d'une barre forcée de centre de chenal et des dunes superposées développées à partir d'un lit plan artificiellement créé par les travaux au cours des épisodes de crues. Pour atteindre cet objectif, deux questions scientifiques ont été posées. Premièrement, quelle est l'influence de la variation des débits sur la dynamique de la barre forcée, associée à la présence d'une perturbation stationnaire dans le lit (seuil), sur laquelle des dunes superposées se développent ? Plus précisément, comment l'apport et la disponibilité en sédiments influencent l'allongement de la barre, son extension latérale et le développement des dunes superposées ? Deuxièmement, comment la variation des débits influence-t-elle le poids relatif des paramètres de forçage de la barre (seuil *vs* inflexion et élargissement) à l'origine de sa formation et de sa dynamique ? Plus précisément, comment, en comparaison les autres types de barres forcées, une barre non-migrante engendrée par une perturbation statique, influence l'évolution morphologique d'un tronçon de rivière ?

Pour répondre à ces questions, un suivi à haute résolution temporelle en crue a été effectué combinant des mesures de bathymétrie mono-faisceaux et multifaisceaux, des mesures de courantométrie (vitesse et direction) par *Acoustic Doppler Profiler* (ADP) et de granularité des sédiments. Ce suivi a permis à la fois de détailler l'évolution de la barre pour des intensités de débits et phases de crues variées. Un état initial, avant submersion, et final (après la période de crues) ont également été réalisés avec des mesures de topographie levée au scan laser terrestre (TLS) et au gps différentiel (DGPS) couplées avec des analyses granulométriques.

En crue, un allongement significatif du front de barre, associé à un étalement latéral et au développement d'une morphologie convexe (en coupe), a été montré en opposition avec une zone stable (absence de changements significatifs) localisée à proximité du seuil situé à l'amont de la barre. En phase de décrue, les sédiments localisés sur le sommet de la barre sont remaniés et lorsque les débits sont suffisamment faibles, l'érosion latérale des marges de la barre s'opère par les chenaux environnements. Les variations hydrologiques contrôlent l'apport sédimentaire en crue (en termes de phasage, de quantité et de taille de grain) provenant du chenal principal et ainsi le développement des dunes superposées. Leur développement est également fonction de la disponibilité des sédiments (armure, proximité du seuil). Les dunes présentes ont tendance à avoir une hauteur relativement qui évolue peu suggérant que les modifications des conditions hydrauliques et sédimentaires se répercutent préférentiellement sur leur longueur au cours de leur croissance.

Le rôle de chacun des paramètres de forçage (seuil vs inflexion et élargissement) sur la dynamique de la barre et son évolution dépend de la phase de la crue ; la forme, la dynamique et l'évolution morphologique « à long terme » de la barre et du tronçon de rivière dépend principalement de la présence du seuil naturel.

Les interprétations issues de cet article seront reprises dans le chapitre 5 afin de comprendre l'influence de la dynamique hydro-sédimentaire sur la survie de semis des ligneux pionniers au cours des épisodes de crue survenant après leur recrutement. Plus précisément, nous utiliserons ces résultats pour déterminer les influences des spécificités sédimentologiques héritées avant recrutement, de l'intensité et du phasage des processus d'une barre non-migrante de centre de chenal.

Chapter 4: Dynamics of non-migrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France)

Wintenberger, C. [1], Rodrigues, S. [1], Claude, N.[2] Bréhéret, J.-G. [1], Jugé, P. [3], Villar, M[4].

[1] Université François Rabelais – Tours, E.A. 6293 GéHCO – GéoHydrosystèmes Continentaux, UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37 200 FRANCE.
[2] Université Paris-Est, Laboratoire d'hydraulique Saint-Venant, ENPC, EDF R&D, CETMEF, Chatou, 78 400 FRANCE
[3] Université François Rabelais – Tours, CETU ELMIS, 11 quai Danton, 37 500 FRANCE.
[4] INRA Orléans UR 0588, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, BP 20619, Ardon, 45 166 Olivet Cedex, FRANCE.

Abstract

A field study was carried out to investigate the dynamics during floods of a non-migrating mid-channel bar of the Loire River (France) forced by a riffle and renewed by fluvial management works. Interactions between the bar and superimposed dunes developed from an initial flat bed were analyzed during floods using frequent mono- and multi-beam echosoundings, Acoustic Doppler Profiler measurements and sediment grain size analysis. When water left the bar, terrestrial laser scanning and sediment sampling documented the effect of post-flood sediment reworking.

During floods a significant bar front elongation, spreading (on margins) and swelling was shown whereas a stable area (no significant changes) was present close to the riffle. During low flows and falling limbs of floods intense sediment reworking on the top of the bar and lateral scouring occurred. Hydrological variations controlled the sediment supply (in terms of phasing, quantity and grain size) delivered by surrounding channels during floods, and thus superimposed dune development. Their development was also linked to the sediment availability (armour layers, riffle proximity). Their relatively constant height highlights a preferential adaptation on dune length during floods.

The role of each morphological forcing parameters (riffle *vs* channel widening and curvature) on the bar dynamics and evolution is stage dependent; the shape, dynamics and "long term" morphological evolution of the bar and of the river reach (surrounding islands, channel translation) mainly depends on the presence of the natural riffle.

Keywords: sandy-gravelly rivers; non-migrating (forced) bar; field study; superimposed dunes; sediment supply; bedforms.

4.2. Introduction

4.2.1. Background

In sandy-gravelly rivers, the development of bars is commonly observed. The height and width of these bedforms are of the same order of size as the water depth and channel width, respectively (Jackson, 1975). Bars can influence the morphological evolution of rivers through their interaction with the flow and sediment transport (Parker, 1976; Blondeaux and Seminara, 1985; Struiksma *et al.*, 1985; Crosato and Mosselman, 2009; Hooke and Yorke, 2011, Kleinhans and Van den Berg, 2011; Eekhout *et al.*, 2013).

In rivers, migrating bars and non-migrating bars (corresponding to the free and forced bars of Seminara and Tubino, 1989; see review in Rodrigues *et al.*, in press) can be distinguished. The first type results from the instability of turbulent flows occurring on an erodible bed and depends mainly on the aspect ratio of the channel (Callander, 1969; Colombini *et al.*, 1987; Seminara and Tubino, 1989; Tubino, 1991; Eekhout and Hoitink, 2013). Non-migrating bars (or forced bars) are basically stationary within the bed and develop due to changes in the channel planform or variations of the channel width (Bittner (1994), Repetto *et al.* (2002), and Wu et Yeh (2005). In this case, the separation of the flow associated with an energy loss favour sediment deposition and even lateral migration of bars coming from upstream (Claude *et al.*, 2014). Non migrating bars can also be induced by the presence of a steady local perturbation (riffle, groyne, vegetation). In this case, bar deposition occurs downstream of the forcing if the width-to-depth ratio is smaller than a value of resonance and upstream if the width-to-depth ratio is larger (Zolezzi and Seminara, 2001; Zolezzi *et al.*, 2005; Mosselman *et al.*, 2006).

The two types of bars (migrating and non-migrating) can coexist in river channels (Lanzoni, 2000a, 2000b; Wu *et al.*, 2011). Crosato *et. al.* (2012) shown that slowly growing non-migrating bars can develop and replace migrating bars on a long-term perspective if discharge remains constant. Contrarily, Rodrigues *et al.* (in press) suggested that flow variations, specifically at low flows, can generate new migrating alternate bars.

Migrating mid-channel bars and their interactions with bed morphology have been studied extensively both in the field (Leopold and Wolman, 1957; Ashworth *et al.*, 1992; Bridge and Gabel, 1992; Richardson *et al.*, 1996; Richardson and Thorne, 1998, 2001; McLelland *et al.*, 1999; Reesink and Bridge, 2011) and experimentally (Ashmore, 1982, 1991; Ashworth, 1996; Federici and Paola, 2003; Reesink and Bridge, 2007, 2009). However, investigations performed on non-migrating mid-channel bars and superimposed dunes are rare. The feedback loops which link dunes with migrating bars have been recently investigated in studies which highlighted contrasted hydro-sedimentary processes according to the study context. For example, the presence of bars influences flow depth and sediment availability which will impact the development of dunes (Tuijnder *et al.*, 2009; Claude *et al.*, 2012, 2014). Villard and Church (2005) and Claude *et al.* (2012) observed on migrating bars on the Fraser River (Canada) and the Loire River (France) respectively, that the largest dunes can be found superimposed on bars suggesting that sediment supply or availability can sometimes govern dune size in a stronger way than water depth. This is contrasting with many field studies which attributed the largest dunes to reaches where water was deepest (Coleman, 1969; Thorne *et al.*, 1993; Dalrymple and Rhodes, 1995; Ashworth *et al.*, 2000) as reduced water depth causes a reduction in the boundary layer involved in dune development. In return, the dunes affect the bar formation and morphological evolution by modulating their vertical and lateral accretion (Bristow, 1987; Bridge, 1993; Ashworth *et al.*, 2000; Villard and Church, 2005; Rodrigues *et al.*, 2012, Rodrigues *et al.*, in press).

The present study investigated the interactions between a non-migrating bar and superimposed dunes. The bar considered is principally forced by the presence of a riffle, and in a lesser way, by an expansion area and by a low-degree of curvature of the channel. Before the surveys, an initial smooth flat-bed made of a mixture of sands and gravels was ensured by fluvial management works. Surveys were performed just after works carried out on the bar which ensured a monitoring of the bar response to the disturbance. This large dataset allows to study the bar response to the discharge fluctuation and to consider whether the development is purely stage related or also dependent on the antecedent morphology and local morphological factors.

As a general objective, this paper aims to understand and quantify the morphological evolution of a non-migrating mid-channel bar during flood events and after fluvial maintenance operations which ensured homogenised initial conditions in terms of topography and grain size distribution. To reach this objective, two scientific questions are addressed.

Firstly, what is the influence of discharge variations on the dynamics of a non-migrating bar associated with a steady perturbation (riffle) and covered by superimposed dunes during high-magnitude floods and over several flood events? More precisely, how sediment availability/supply, influence the bar elongation, spreading, and the development of superimposed dunes?

Secondly, how discharge variations do affect the relative weight of forcing parameters (riffle vs expansion and curvature) responsible for a mid-channel non-migrating bar formation and dynamics and how, comparatively to other forced bars, do non-migrating bars induced by a steady perturbation influence the morphological evolution of a river reach?

4.2.2. Loire River and study site

4.2.2.1. The Loire River

The Loire river is 1 012 km² in length and drains a catchment area of 117 000 km² in France. At Orleans (638 km from the source), the river flows through sedimentary rocks of the Paris basin and shows a range of fluvial patterns from single channel (straight or meandering) to anabranches. For bankfull discharge rates, the width-to-depth ratio ranges between 50 and 150 (Latapie *et al.*, 2014). Two climatic influences determine the regime of the Loire: rainfall coming from the Atlantic Ocean (mainly during winter) or rain storms in the upper mountainous reaches which occur during spring.

A severe incision of the main branch of the river, due to a combined effect of the groynes for navigation (19th-20th centuries) and intense sediment extraction (1950-1995), led to exposure of the bedrock, affecting the slope and thus the morphology of the Loire River. Bank erosion and lateral shifting is also constrained by artificial levees built for flood prevention.

As a consequence, associated with a decrease in flooding, side channel and alluvial bars were rapidly colonized by woody vegetation which enhances sediment deposition (Rodrigues *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2007; Wintenberger *et al.*, in press), and reduces habitat diversity and flow capacity during floods.

4.2.2.2. Study site

The study site of Mareau-aux-Prés (Figure 4-1) is located about 10 km downstream of Orleans (649 km from the source), downstream of the confluence with the Loiret River which is a resurgence of the Loire River. At the Orleans gauging station, the average discharge of the Loire is 344 $m^3.s^{-1}$, and its 2-year flood discharge is 1,700 $m^3.s^{-1}$.

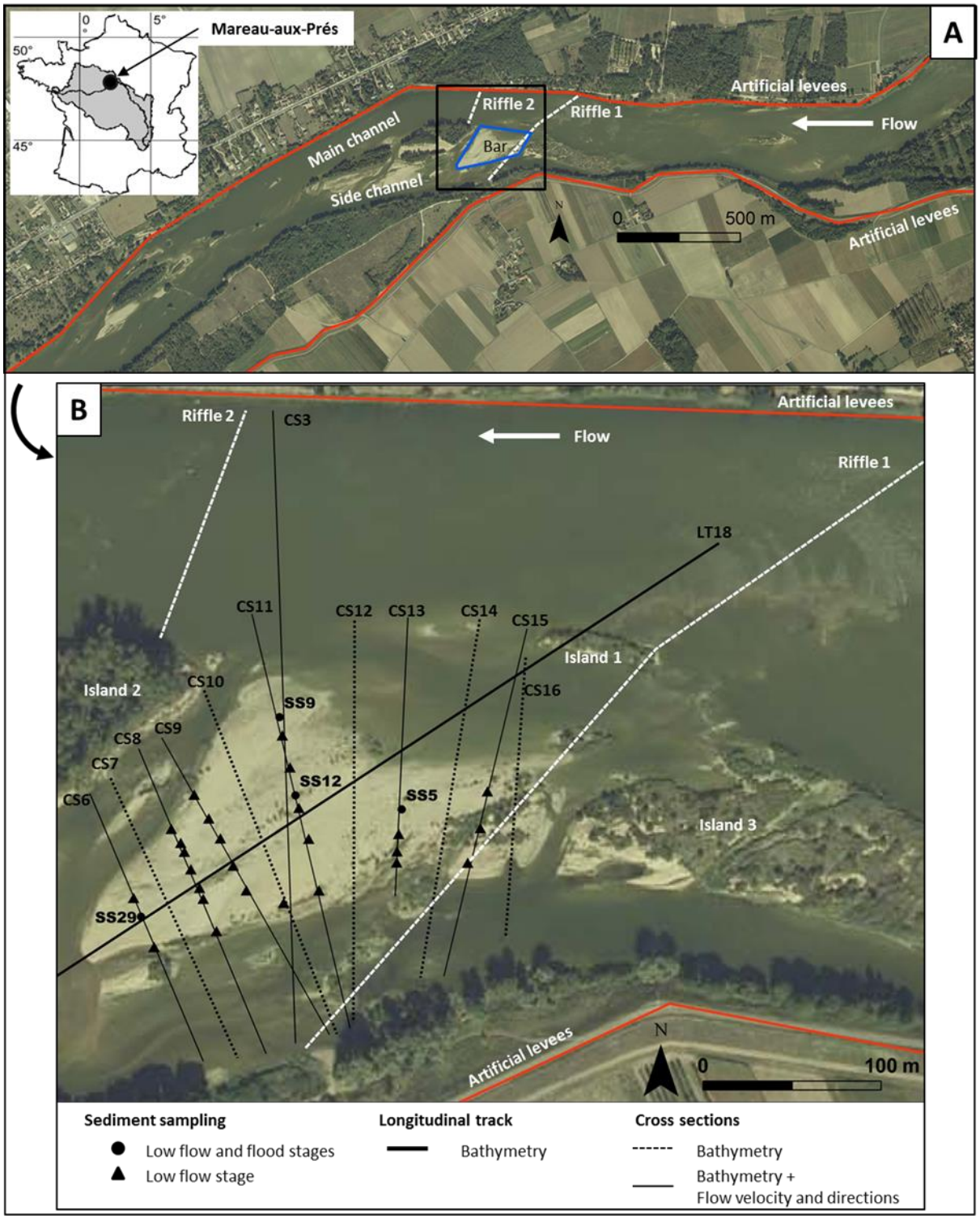


Figure 4-1: Study site of Mareau-aux-Prés, located in the middle reaches of the Loire River (aerial photographs from DREAL Centre). (A) The morphological context in a contraction-expansion area associated with channel curvature and natural riffles due to the bedrock exposure of where the non-migrating mid-channel bar developed. (B) Cross sections and longitudinal track followed for bathymetric and hydraulic surveys associated with sediment sampling.

At Mareau-aux-Prés, the anabranching fluvial pattern is characterized by a set of islands present for several decades (Figure 4-1). This reach is characterized by a contraction-expansion area with a channel width varying from 270 m to 430 m between artificial levees preventing lateral erosion and lateral sediment supply. On the right bank, an artificial curvature deflects the main channel course towards the south-west while a side channel flows straight near the left bank. This river reach has a sinuosity index of 1.04 and an average slope of 0.00023 $m.m^{-1}$ (Latapie, 2011). The water surface is locally modified due to two natural bedrock riffles (Figure 4-1) and a non-migrating mid-channel bar consisting of siliceous sands, gravels and pebbles which developed between these two riffles. This bar constitutes the central part of an asymmetrical bifurcation splitting two channels of different sizes (main and secondary channels, Figure 4-1) as commonly shown in the literature (Miori *et al.*, 2006; Zolezzi *et al.*, 2006). During floods, flow coming from the main channel is divided by the small island 1 (Figure 4-1B). The mid-channel bar was colonized by pioneer trees (*Salicaceae*) in 2005 and evolved rapidly as an island until 2012. In September 2012, fluvial management works (FMW) were carried out. They consisted in cutting down the vegetation, extracting the root systems and lowering the average elevation of the island by exporting the bar sediments into the main channel. After this work, the alluvial bar was characterized by a flat surface of 26,700 m^2; no bedforms were present anymore, except for some small ridges and swales mostly oriented in the flow direction. Sediments were homogenized on the bar to a depth of 0.5 m disturbing the initial spatial organization of grain size. Following the management works, the bar was submerged at a discharge value of 300 $m^3.s^{-1}$ (Orléans gauging station, 10 km upstream).

4.3. Material and methods

During low flow stages and flood periods, data were collected to characterize the hydrodynamic and morphological evolutions and the sedimentary conditions over the mid-channel bar. Seventeen field surveys were carried out between December 2012 and June 2013 for discharge values ranging from 400 to 1,900 $m^3.s^{-1}$ (Figure 4-2). The discharge was given at the gauging station of Orléans by the DREAL Centre (environmental agency).

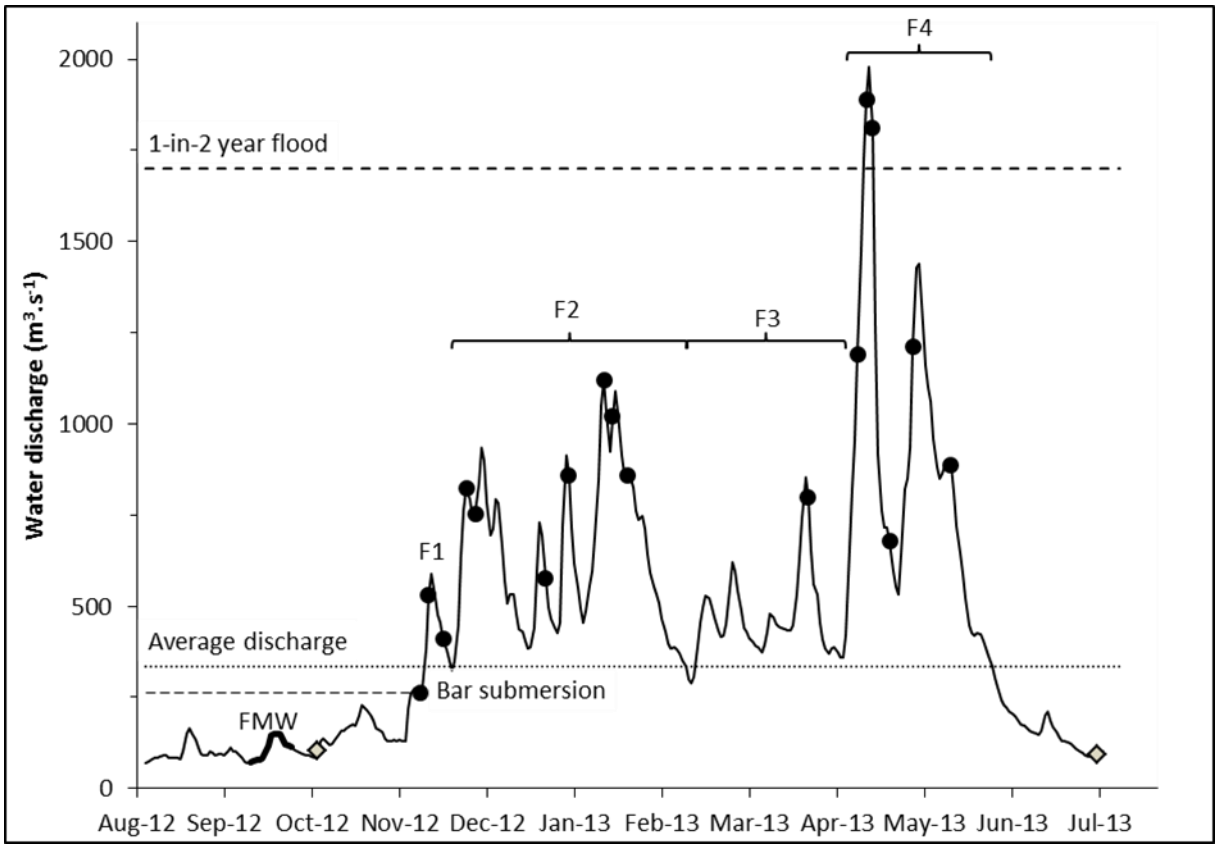


Figure 4-2: Four floods occurred during the study period. For each flood one to four surveys were done to document rising, peak and falling stages. The fluvial management works (FMW) were done during low-flow conditions. Grey diamonds and black circles refer respectively to the topographic and bathymetric surveys.

The methodology applied in this study is similar to the approach detailed in Claude *et al.* (2012). The reader is invited to refer to this publication for more details. Average parameters of hydraulic conditions on the bar during surveys are available in the Table 4-1 (see top of the results section).

4.3.1. Hydraulics

Flow velocities were acquired using a M9 ADP (Sontek) which has two sets of four profiling beams (at 3 MHz and at 1 MHz) and connected to a DGPS over seven cross-sections (Figure 4-1B). During each survey, the flow velocities on cross-sections were measured four times at a boat speed of approximately 1 m.s^{-1}. The method detailed in Claude *et al.* (2014) which used the same equipment, was applied to obtain the mean flow velocity on vertical of 3 m-wide and the bottom velocity located near the bed.

The bed shear stress was calculated in relation to the flow velocity profile and the law of the wall (Sime *et al.*, 2007), over the bar area using the following equation:

$$\tau = \rho \left[\frac{ku}{ln\left(\frac{z}{(z_0)_{SF}}\right)} \right]^2 \tag{4-1}$$

where u is the flow velocity at height z over the bed, k is the von Karman constant equal to 0.4 for clear waters, and $(z_0)_{SF}$ is the grain roughness (or the height at which u = 0), equal to 0.095 D_{90} (Wilcock, 1996).

The averaged flow velocities for each vertical and bed shear stress associated, derived from the law of the wall, allowed to calculate a mean value for each cross-section for each survey. Then, the mean values by cross-sections were used to calculate the mean flow velocity and the mean bed shear stress (Table 4-1).

4.3.2. Bed morphology and sediment transport

When the bar was emerged, topographic surveys were conducted (Figure 4-1). In 2012, topographic measurements were done using a Differential Global Positioning System (DGPS) Magellan ProFlex 500. An average of six points per square meter was recorded to provide an appropriate representation of the slope breaks on the bar. The Triangular Interpolation Network tool of ArcGis10 software was used to obtain digital elevation models (DEMs) with a 1 m mesh. In 2013, a terrestrial laser scanner (TLS) survey was done (800 points/square meter). A Leica HDS 3,000 station driven by the Cyclone 7.3 software (Leica Geosystems) was used and DEMs were obtained using the above-mentioned method.

During floods, bathymetric surveys were performed using a mono-beam echo-sounder (Tritech PA500 - 500 kHz) over twelve cross-sections (Figure 4-1) and one longitudinal track (LT18) for discharges lower than the 1-in-2 year flood (Figure 4-2). The longitudinal track was surveyed twice during a single survey (less than one hour between two crossings) allowing the calculation of dune celerity (Simons *et al.*, 1965; Peters and Sterling, 1975, Peters, 1978). For discharge values higher than the 1-in-2 year flood (Figure 4-2), bathymetric surveys were performed using an Odom ES3 multi-beam echo-sounder with 240 beams (240 kHz with 120° opening). The two echo-sounders were connected to a DGPS Magellan ProFlex 500 and driven by Hypack 2009 software.

Accuracy of the measurements was 0.1 m in during navigation and densities of points ranged from 0.2 to 0.6 points.m^{-2} for the mono-beam surveys and 2 points.m^{-2} for the multi-beam surveys. Bathymetrical cross-sections were compared using Hypack 2009 and ArcGis 10 softwares. The transversal scour and fill areas between each survey were quantified in terms of sediment budget using the Average End Area 3 function of Hypack 2009 (Rodrigues *et al*, 2012). The longitudinal integration of these budgets over the non-migrating bar documented the dynamics of the bedload sediment supply delivered by the main channel. The dune heights (H_d) and lengths (L_d) were determine using the Matlab code Bedform Tracking Tool (BTT), based on a zero-crossing method (Van der Mark and Blom, 2007; Van Der Mark *et al*., 2008). This method was applied on a part of LT18 (160 m – 300 m) delimited downstream by the front of the bar (which could distort the adjustment of the trend line) and by the upstream limit of dune development. Using the BTT results, evolution of the dune shape were studied using the steepness value defined as the ratio between dune height and length.

The bedload transport rate related to bedform migration (Simons *et al.*, 1965; Van Den Berg, 1987; Kostaschuk *et al.*, 1989; Ten Brinke *et al.*, 1999; Hoekstra *et al.*, 2004; Gaeuman and Jacobson, 2007) was calculated using the classical equation of the dune tracking method:

$$qb_{DTM} = \rho_S \varepsilon \beta c_D H_D \tag{4-2}$$

where qb_{DTM} is the unit bedload (kg.s^{-1}.m^{-1}); c_D is the dune celerity (m.s^{-1}); H_D is the dune height (m); ε porosity of sediment; ρ_S density of sediment and β is the bedload discharge coefficient taking account the deviation of the bedform shape (Gaeuman and Jacobson, 2007). This coefficient varies between 0.46 and 0.66 (Van Den Berg, 1987; Villard and Church, 2003; Hoekstra *et al.*, 2004; Pinto Martins *et al.*, 2009). On the middle reaches of the Loire it ranges between 0.46 to 0.56 (Claude *et al.*, 2012).

4.3.3. Grain size analyses

A total of 30 plots (Figure 4-1B) of surface bed sediments located using the DGPS were sampled for grain size analysis immediately after the fluvial management works and one year later during low flows. When armour layers were present, the surface and sublayer sediments were sampled independently. During floods, four of these plots were surveyed using a grab (Figure 4-1B).

Sediment samples were analysed by dry sieving using a vibratory sieve shaker (Retsch 3D - AS450). The fraction finer than 63 µm (negligible in the river bed of the Loire [Macaire *et al.*, 2013]) was excluded. The classical grain size parameters were obtained using the Gradistat 4.0 spreadsheet (Blott and Pye, 2000).

4.4. Results

Table 4-1 contains average hydraulic and sediment transport parameters as a function of the stage of flood for each survey.

Table 4-1: Average hydraulic and sediment transport parameters for each survey on the bar. The water depth is the depth in the intersection between the longitudinal track LT18 and the cross-section CS3. For survey S1, navigation was impossible due to insufficient flow depth. Discharge values were provided by the DREAL Centre (environmental agency) for the Orleans gauging station (10 km upstream).

Flood	Flood stage	Survey number	Discharge ($m^3.s^{-1}$)	Average water depth (m)	Mean flow velocity ($m.s^{-1}$)	Average bed shear stress ($N.m^{-2}$)	Number of Dunes	Dune celerity ($m.s^{-1}$)	qb_{DTM} ($kg.s^{-1}.m^{-1}$)
F1	Rise	S1	264	< 0.7	no data	no data	24	45.10^{-5}	0.05 – 0.07
	Rise	S2	527	no data	no data	no data	22	44.10^{-5}	0.07 – 0.1
	Fall	S3	400	no data	no data	no data	50	50.10^{-5}	0.08 – 0.12
F2	Peak	S4	790	1.43	1.2	4.8	46	43.10^{-5}	0.09 – 0.12
	Fall	S5	729	1.22	1.1	2.1	28	24.10^{-5}	0.04 – 0.06
	Fall	S6	576	0.9	0.9	2.7	66	43.10^{-5}	0.08 – 0.11
	Fall	S7	860	1.19	1.1	5.3	30	48.10^{-5}	0.1 – 0.14
	Peak	S8	1120	1.55	1.1	5.7	36	65.10^{-5}	0.13 – 0.18
	Rising	S9	1020	no data	no data	no data	38	39.10^{-5}	0.08 – 0.11
	Fall	S10	860	1.28	1	4.2	34	42.10^{-5}	0.06 – 0.08
F3	Fall	S11	797	1.21	1	4.2	no data	no data	no data
F4	Rise	S12	1190	1.81	1.4	6.6	no data	no data	no data
	Rise	S13	1890	2.79	1.6	12	6	80.10^{-5}	0.16 – 0.23
	Fall	S14	1810	2.43	1.6	7.6	no data	no data	no data
	Fall	S15	677	0.92	1	2.6	56	60.10^{-5}	0.1 – 0.15
	Rise	S16	1210	1.7	1.3	4.3	26	76.10^{-5}	0.15 – 0.21
	Fall	S17	886	1.13	1.1	5.3			

4.4.1. Hydrological history

After the fluvial management works (2012), four subsequent winter and spring floods occurred. In this paper, a flood is defined as the hydrologic variations higher than the average discharge. These flood events were responsible for the morphological evolution of the bar after the management works. The ridge and swale morphology was replaced by bedforms for which elevation varied between 84-84.9 m (Figure 4-3). The flood F1 is a single-peak flood whereas the others are multiple-peak floods. During F1 and F4, rising and falling limbs and peak discharges were captured. For floods F2 and F3, the rising limb was not surveyed. The maximum discharge of the F3 flood is comparable with the discharge of the winter floods. The flood F4 exceeds the 1-in-2 year flood value. The effect of the highest peak discharge (F4) was detailed using two surveys performed during the rising stage (middle and end) and two surveys done during the falling stage (beginning and end).

During floods, the water depth increases with the discharge for the range of 576 to 1,810 $m^3.s^{-1}$. So the water depth depends mainly on the fluctuations of discharge. However, the vertical deformation of the non-migrating bar during floods occasionally disturbs this trend.

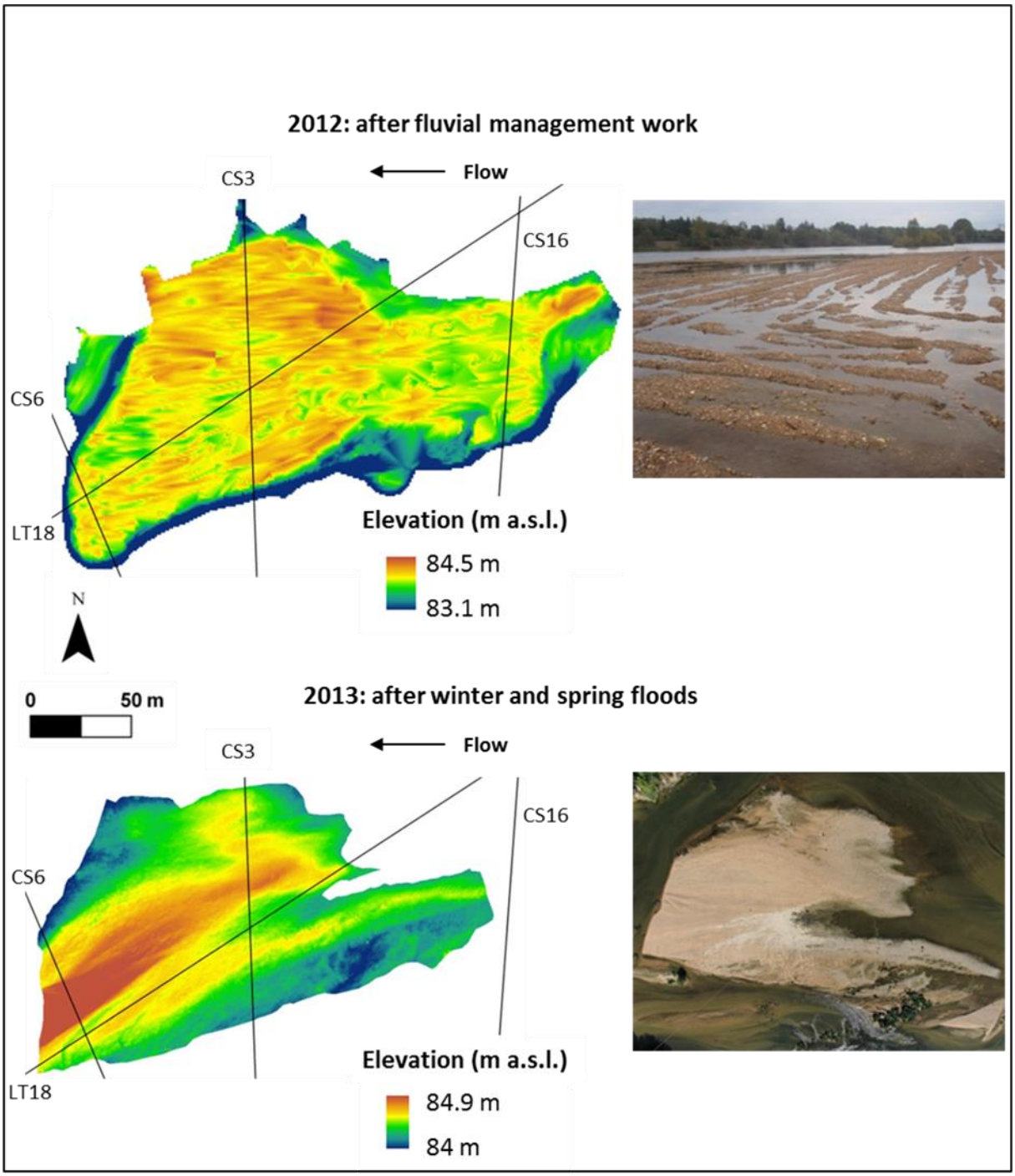


Figure 4-3: Digital elevation models (DEM) after fluvial management works with ground picture oriented downstream illustrating the ridge and swale topography (2012), and after floods of 2013 (aerial picture, smooth topography).

4.4.2. Effects of discharge conditions on flow velocity and bed shear stress

On the bar, mean daily flow velocities varied between 0.9-1.6 $m.s^{-1}$. Globally, the flow velocities decrease from the main channel to the left side and from upstream to downstream. The spatial distribution is determined by the site morphology but this influence decreases as the discharge increases. The mean flow velocity and the flow velocity near the bed follow the same trend: increasing with discharge (Figure 4-4B). In the upstream part of the bar, established islands and riffles create lee areas with low flow velocities and narrow channels with high flow velocities. For high discharge values (1,810 $m^3.s^{-1}$, survey S14), flow velocities are high and show a more homogeneous distribution over the bar compared with lower discharges. Associated bed shear stress calculated range from 0 to 20 $N.m^{-2}$; mean and median values equal to 4.6 $N.m^2$ and 3.3 $N.m^2$, respectively. The shear stress is higher in the upstream part of the bar than downstream.

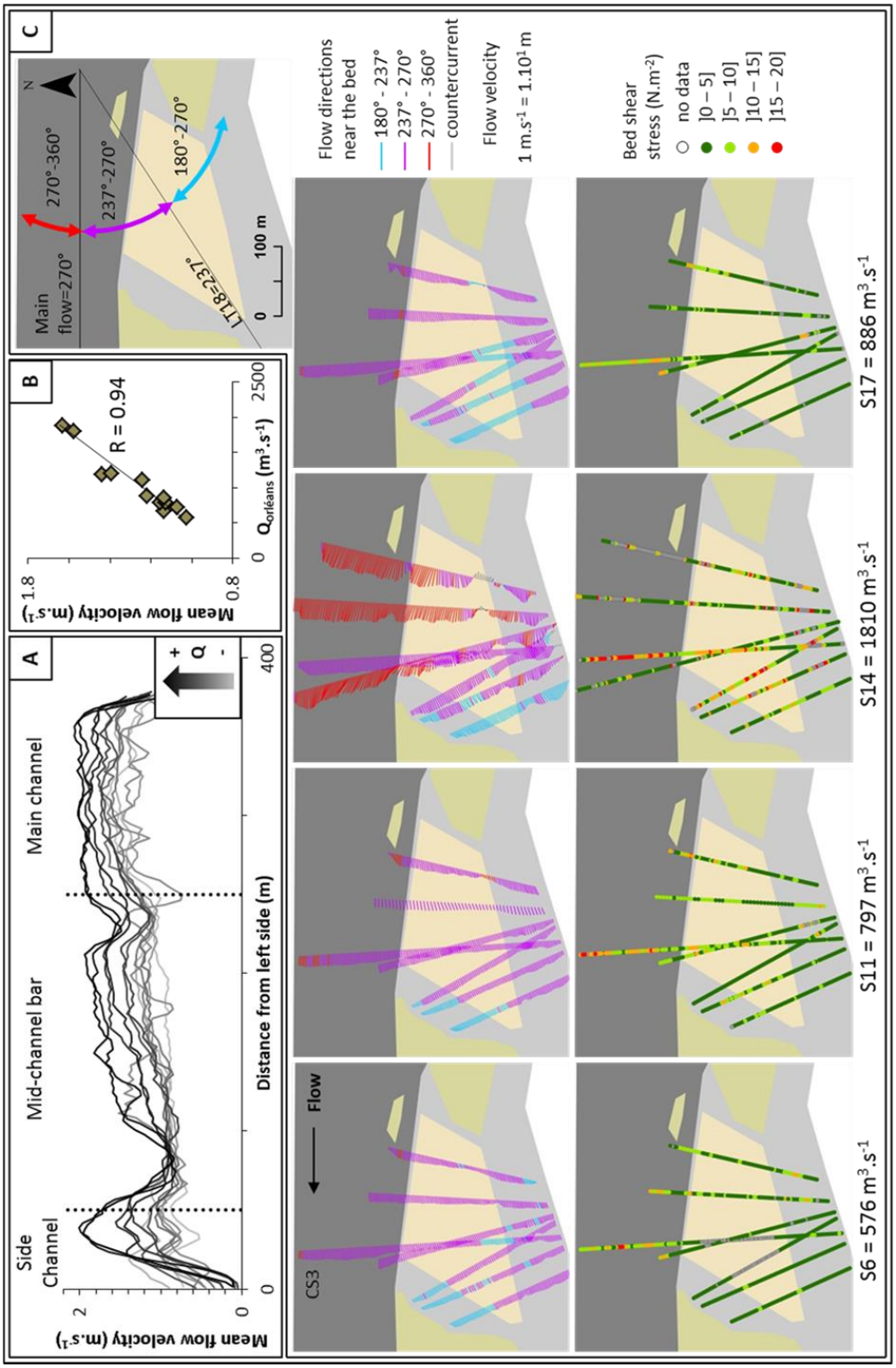


Figure 4-4: Mean flow velocities along the cross section CS3 (see location on this figure, C) with darker curves for high flows and pale grey for the lower (A). The mean flow velocities measured on the bar are averaged and compared to water discharge on the cross section CS3 (B). Mean directions and flow velocities measured on all cross sections for height surveys and associated bed shear stress (C). Directions are classified according to their deviation from the direction of the longitudinal track LT18 (237°) and the main flow (270°).

On the bar, the flow directions are oriented south-west (between 270° [main channel direction] and 237° [LT18 direction]) due to the deflection of the channel curvature. The flow on the downstream part of the bar is deflected towards the side channel due to the presence of the downstream island and the riffle. However, during high discharges, the deflection effect decreases in the upstream part of the bar and flow directions are oriented towards the concave bank of the main channel (Figure 4-4C, S14). For low discharges occuring during the falling stage, the flow directions oriented towards the side channel appear close to the middle part of the bar (Figure 4-4C, S17). At this stage, the elevation of water in the main channel is higher than in the side channel, intensifying the deflection effect.

4.4.3. Effects of discharge variation on bar morphology

During the rising stage of the first flood, the front and the back of the bar are stable (Figure 4-5a). At the falling stage, the bar front spreads 15 m downstream but the back of the bar is not modified (Figure 4-5a). During flood F2, the bar-top becomes convex while the front slope decreases (Figure 4-5b). The front and the upstream part of the bar are stable reflecting sediment storage. During flood 3, the bar-top recovers a flat surface and a high slope of the front bar (Figure 4-5c). During the last flood F4, in a first time the bar becomes convex again (Figure 4-5d). Since the first falling stage, the bar-top becomes flat with a well-developed front which spread downstream over a hundred meters. In contrast with the previous morphologies, this resulting flat morphology is set up at a high topographic elevation. Between the first and last surveys of two consecutives floods, flood 1-flood 2 (Figure 4-5e) and flood 3-flood 4 (Figure 4-5g), the inherited morphology of the previous flood is preserved at the beginning of the rising stage of the following flood. The evolutions are very small, only the bar front reveals a spread of a few meters. In contrast, the inherited morphology at the end of flood 2 is convex (Figure 4-5f). The lower topography surveyed during flood 3 shows erosion between the two consecutives floods separated by a falling stage driving to the emersion of the bar.

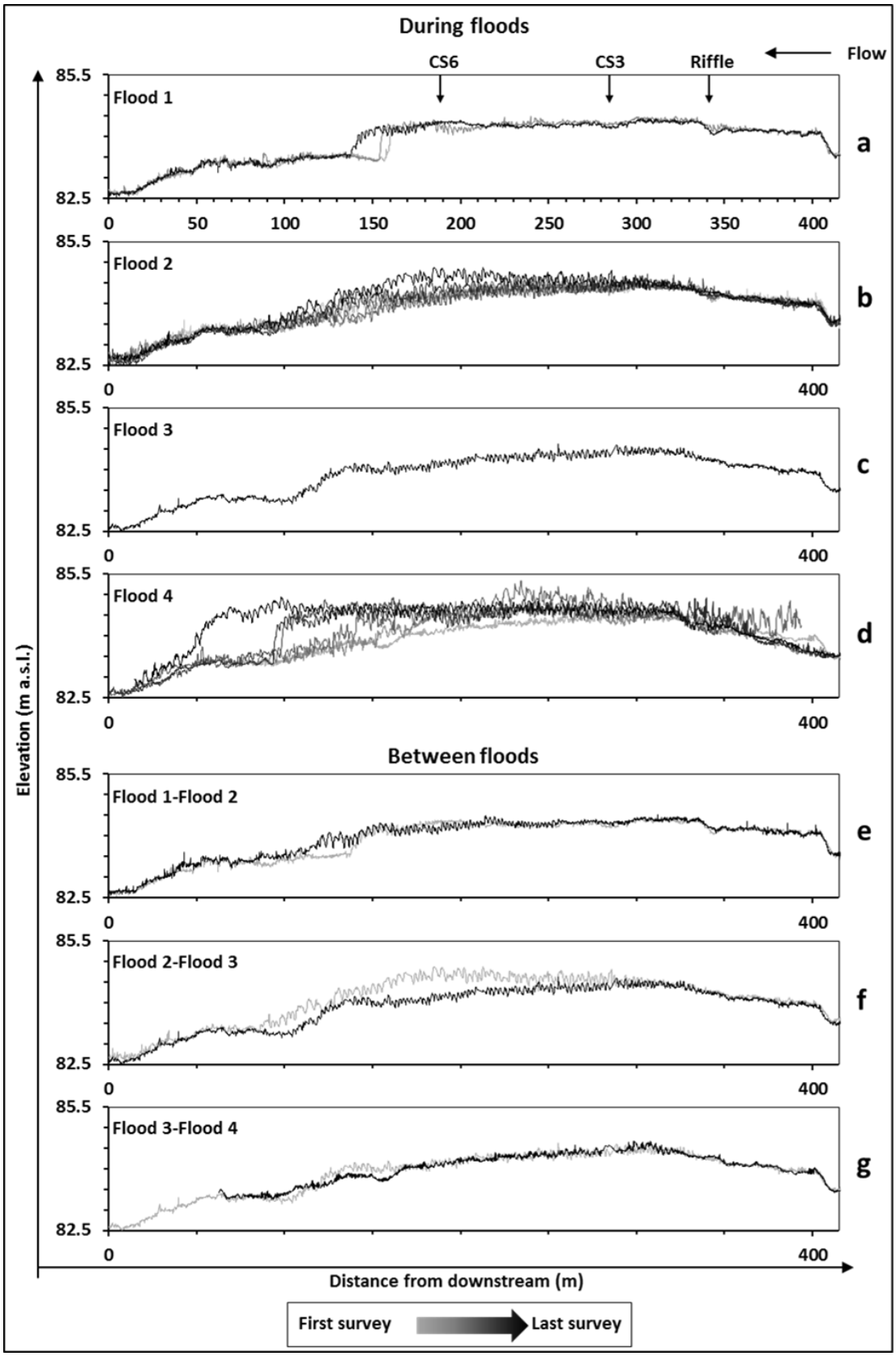


Figure 4-5: Longitudinal bathymetrical (LT18) evolution of the bar during floods (a, b, c, d) and between floods (e, f, g) with darker curves for more recent surveys and pale grey for older surveys.

The 84.2 m isoline was defined as representative of the contour of the bar and is used to determine the evolution of the bar planform during flood events (Figure 4-6).The total surface area over which the bar evolves is 38,000 m²; the position of bar edges fluctuates downstream and laterally over an area of 29,000 m² around a “fixed” area of 9,000 m² (Figure 4-6h). During flood 1, the elongation observed on the longitudinal track (Figure 4-5a) is limited to the right side of the front of the bar (Figure 4-6a). Bar edges located upstream of cross section CS3 and south of LT18 are stable. During flood 2, lateral edges vary with an elongation of the bar front (Figure 4-6b) but no significant lateral spreading occured. As observed on the longitudinal track, the front elongates during flood 4, in a first stage only in downstream direction. In a second stage, the bar spreads towards the side channel in the south. During the flood, the downstream elongation velocities range from 0.5 $m.d^{-1}$ to 5 $m.d^{-1}$. The upstream part is more stable with non-regular lines in the riffle location. The bar edges evolutions between successive floods (Figure 4-6e, f, g) confirm the trend observed on the longitudinal track (Figure 4-5e, f, g). There are low variations between flood1-flood 2 (Figure 4-6e) and flood 3-flood 4 (Figure 4-6g). However, front erosion is revealed on the left side that not appears on the longitudinal track. Between the flood 2-flood 3, the erosion is observed on the entire front of the bar and on the south bar edges located close to the side channel (Figure 4-6f). During the study the location of the front varied of 100 m, the left-bank by 50 m and the upstream limit by 25 m during floods (Figure 4-5 and 6).

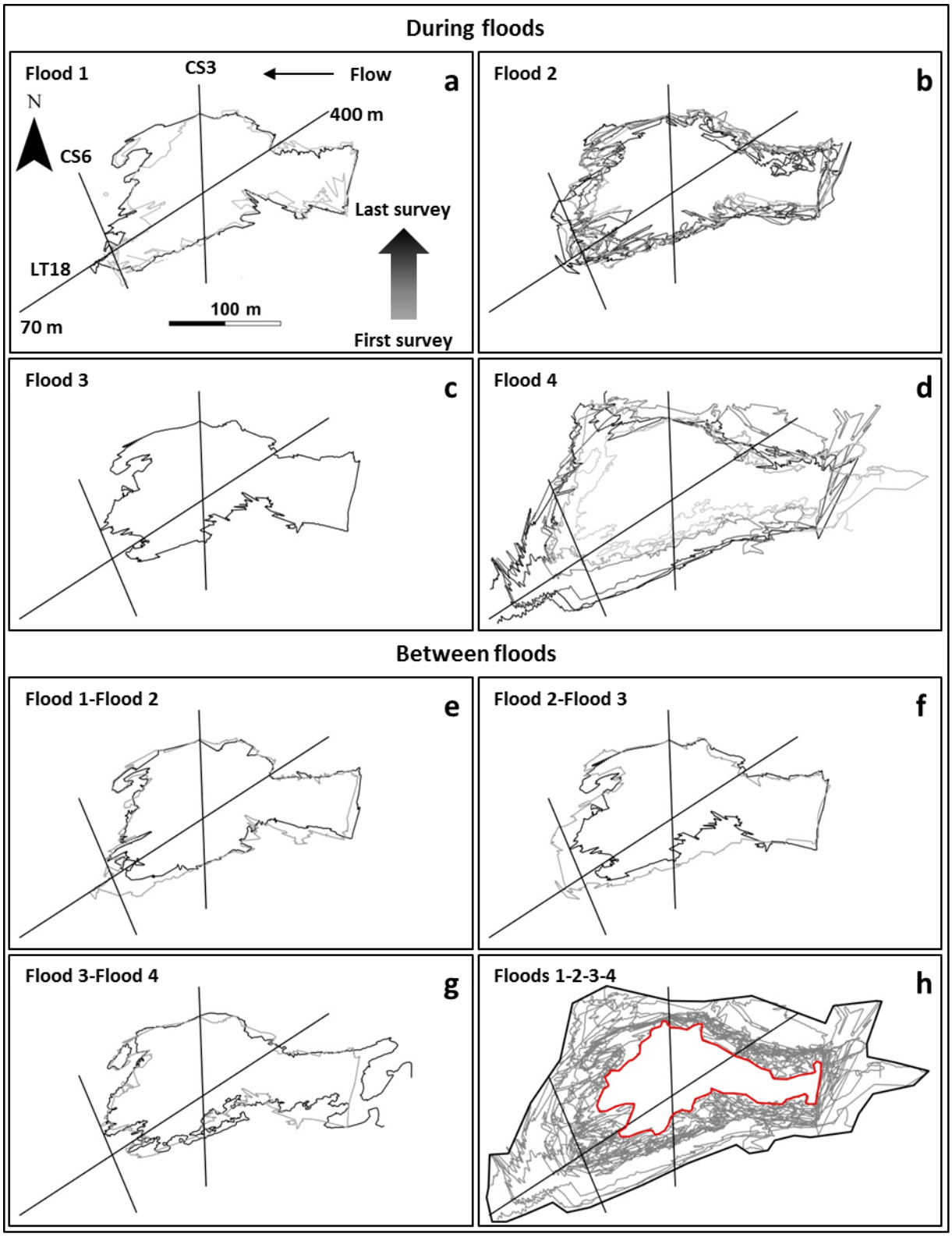


Figure 4-6: Bar edges, characterized by the isoline 84.2 m, evolution during floods (a, b, c and d) and between successive floods (e, f, g and h). Distances on the longitudinal track LT18 refer to distance from downstream in Figure 4-5.

The deposition heights vary from a few centimetres to more than two meters (Figure 4-7). The variations of elevation are more important during flood 4 than the floods of lower discharges. Over the study, deposition of 0.5 m to 2.5 m is observed in the front area and on the bar edges (left side). In contrast, the erosion heights rarely exceed 0.5 m. The stronger erosion appeared between flood 2-flood 3.

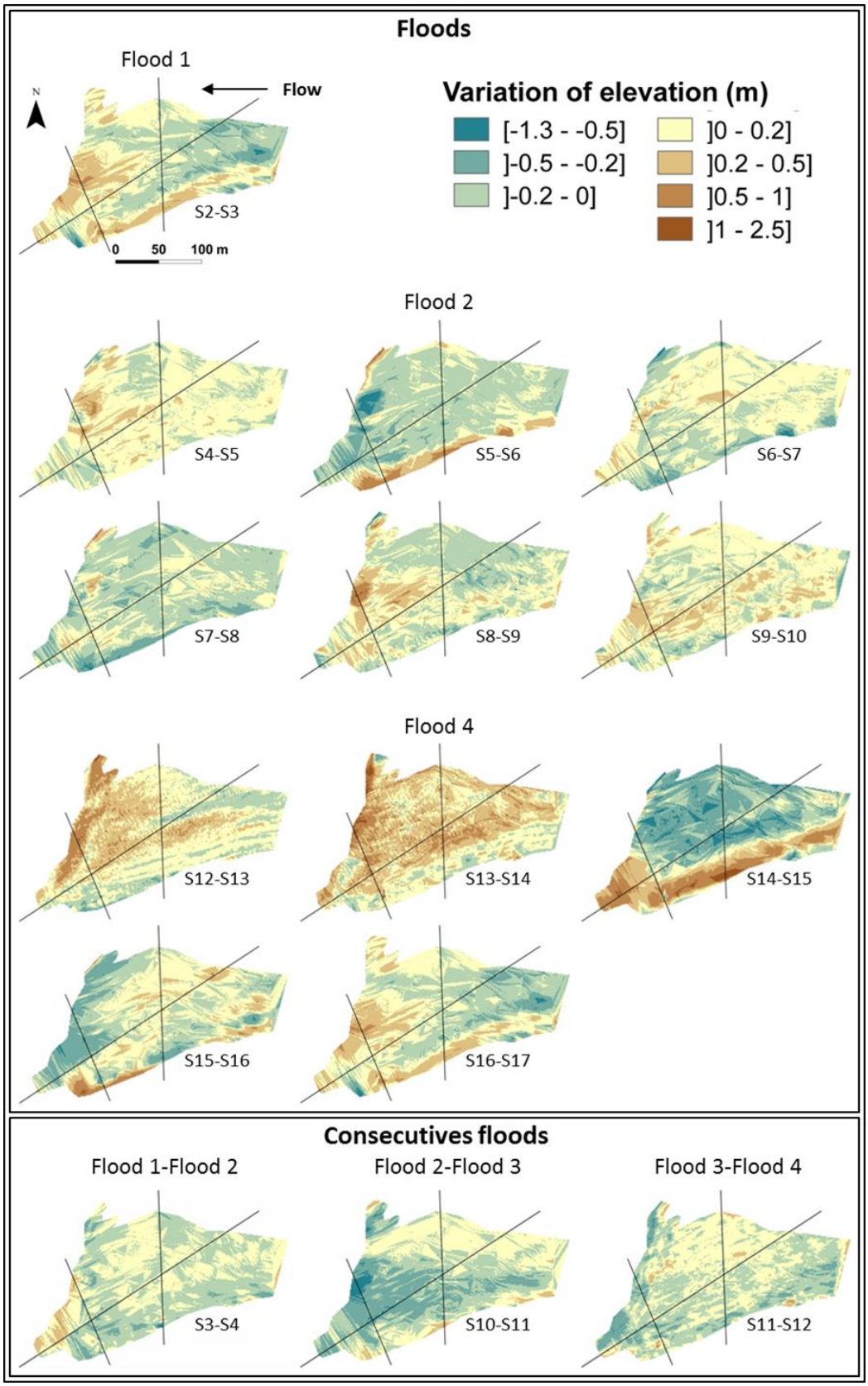


Figure 4-7: Elevation variations between two successive surveys during floods for flood 1, 2 and 4 and between successive floods between the four floods. The maps are ordered by chronological of the successive surveys.

Deposition on the bar-top and bar front is correlated with sediment supply from the main channel. The stability of the upstream part of the longitudinal track (Figure 4-6) and the absence of marked erosion on elevation maps (Figure 4-7) or on cross-sectional sediment budget curves (Figure 4-8) suggest a supply from the main channel. At the beginning of sediment supply occurring during floods, sediments are coming laterally from the main channel, as highlighted by the increase of the downstream cross-sectional volumes (Figure 4-8a and 8c). In a second time, sediments come from upstream (Figure 4-8b and 8dFor low discharges, the lateral supply is delivered at the beginning of the falling limb and then followed by the upstream supply. In contrast, for high discharges, the lateral supply occurs during the rising stage and the upstream supply since the beginning of the falling stage. During time intervals flood1-flood 2 and flood 3-flood 4, volumes of eroded and deposited material have the same order of magnitude (Figure 4-8e and 4-8g). Between flood 2-flood 3, volumes of erosion are important and grow downstream (Figure 4-8f).

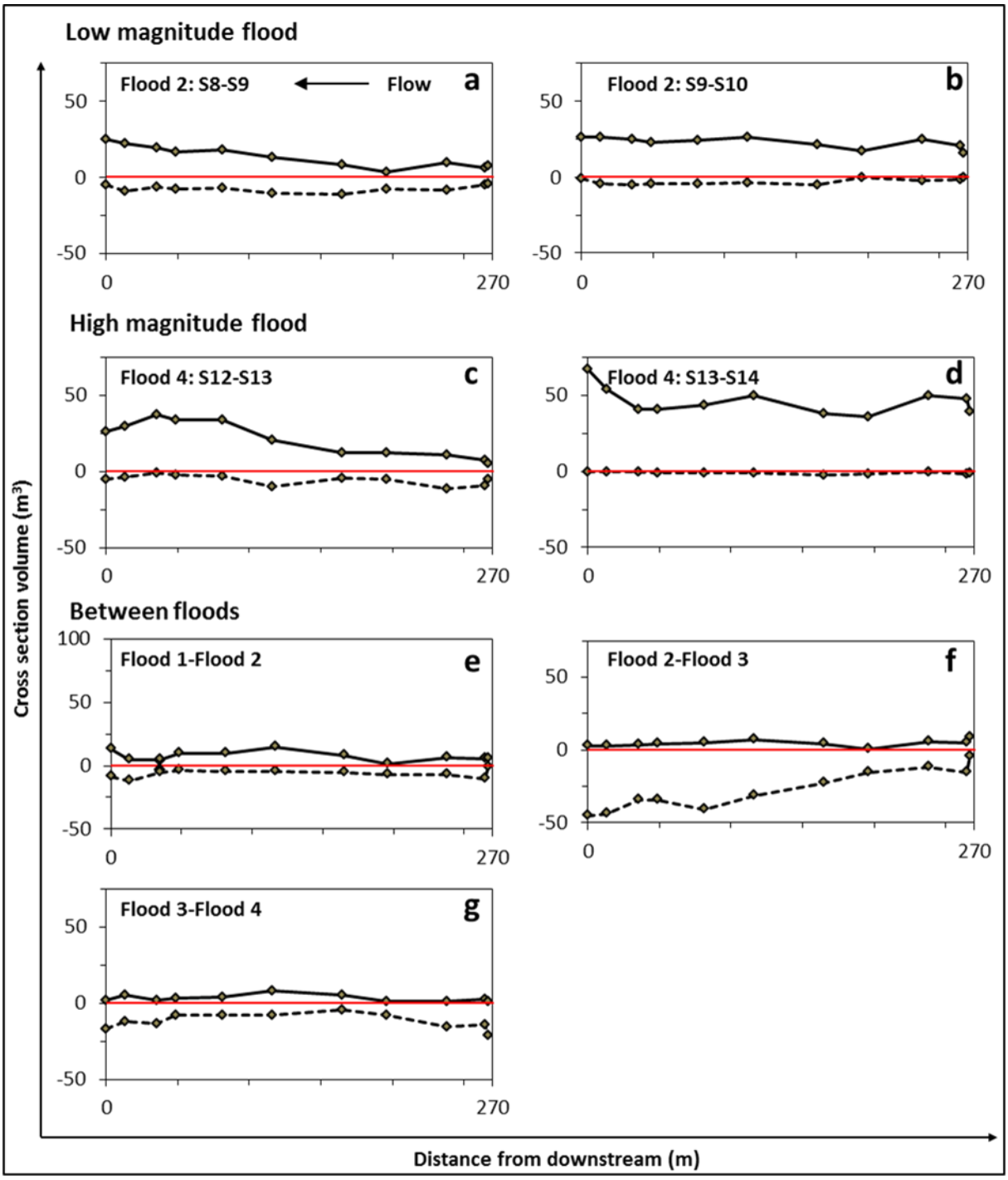


Figure 4-8: Sediment budget calculated between two successive surveys on each cross section. Grey diamonds refer to the cross sections location, from CS16 (270 m upstream) to CS6 (0 m).

4.4.4. Sediment grain size

During the engineering works of 2012, sediments were mixed and no previously existing sedimentary structures remained. Two sediments populations can be distinguished (Figure 4-9A) and were still present in 2013. Sediments of the first group are finer and better sorted. The two populations are finer in 2012 than in 2013. In 2012, the mean grain size corresponds in majority to coarse sands whereas in 2013 only for sediments of the first group. Sediments of the second group have mean grain sizes corresponding to the gravel class. While sediments in 2013 are coarser, four sediments samples on the middle part of the bar have finer grain sizes and switched from group 2 to group 1 (Figure 4-9B). Two sediment samples on bar edges have an opposite trend which highlights a reorganization of the sediments on the bar (Figure 4-9B) leading to a fining distribution from upstream to downstream.

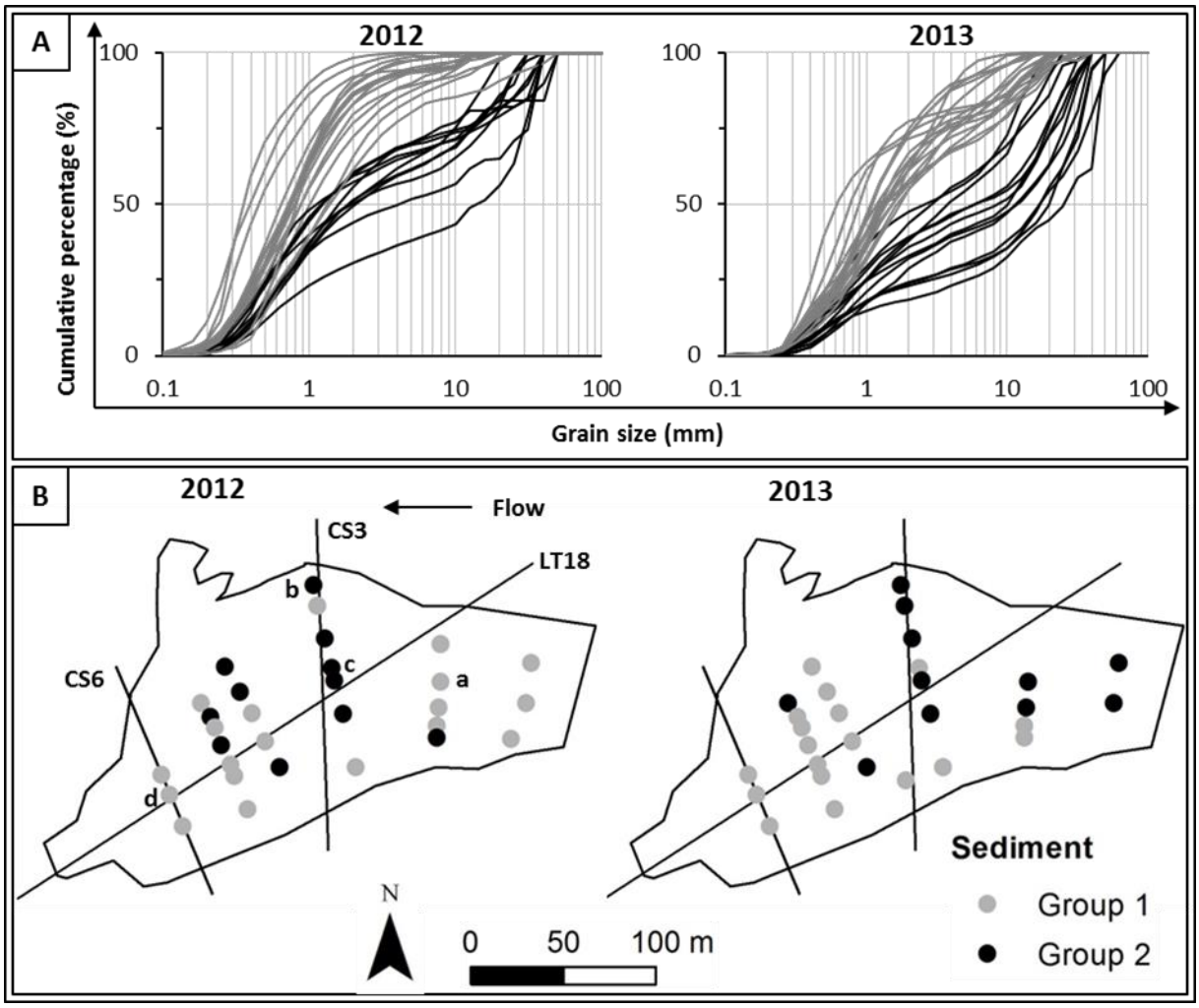


Figure 4-9: Grain size of sediments sampled on the bar (grey cumulative curves for group 1, a black lines for group 2) in 2012 and 2013 (A). Spatial distribution of sediments on the bar in 2012 and 2013 (B).

During the first peak of flood 4, sediments SS5 (Figure 4-10a) and SS9 (Figure 4-10b) become finer after the peak whereas sediments SS12 (Figure 4-10c) and SS29 (Figure 4-10d) become coarser. During the second peak of flood 4, sediments SS12 and SS5 become finer during the falling stage whereas sediments SS9 and SS29 become coarser. On SS9 location, the falling stage promotes armour layer development with grain size mixture similar to the sediments of 2012. Sandy sediments correspond to particles supplied by the main channel during floods (and highlighted but the bathymetrical surveys). In 2013, armour layers developed on SS9 and SS5 locations. However, SS5 shows a lag time in armour layer development during falling stage and fining during rising stage. Sediment grain size depends on lateral sediment supply on SS29 and SS9 and on the upstream supply on SS5 and SS12.

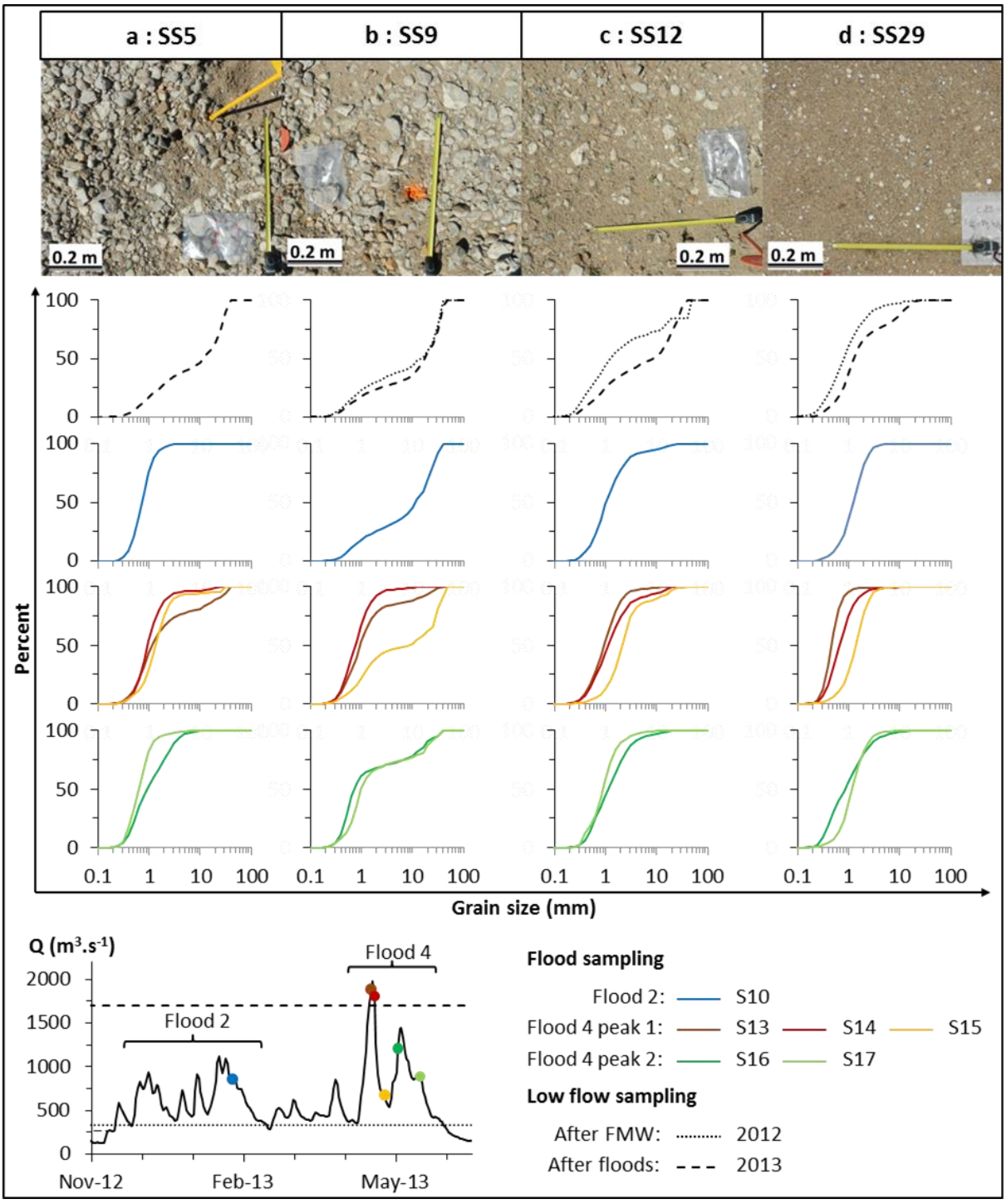


Figure 4-10: Sediment surface in 2013 (a,b,c and d) and associated evolution of grain sizes between 2012-2013 with the variations during floods.

The relationship between the calculated bed shear stress and the D_{50} of sediments sampled during floods was integrated into the Southard and Boguchwal's diagram (1990) (Figure 4-11). For low discharges, the bed shear stress was sometimes insufficient to induce sediment motion (I on Figure 4-11).

According to the diagram, hydraulic conditions can favour a transition between the dune and the upper stage plane bed during the highest discharge conditions when high flow strength induce a larger portion of bed material to be transported as suspended material (Bridge and Best, 1988; Naqshband, 2014). The result can be an increase in suspended load to the detriment of bedload and so should affect dune geometry. For all the surveys, conditions are favourable for dune development on the back of the bar, specifically for SS12 and SS29 sediment sampling located on the longitudinal track (LT18) and SS5 located upstream. Sediments sampled in SS9 present the less favourable conditions for dunes development.

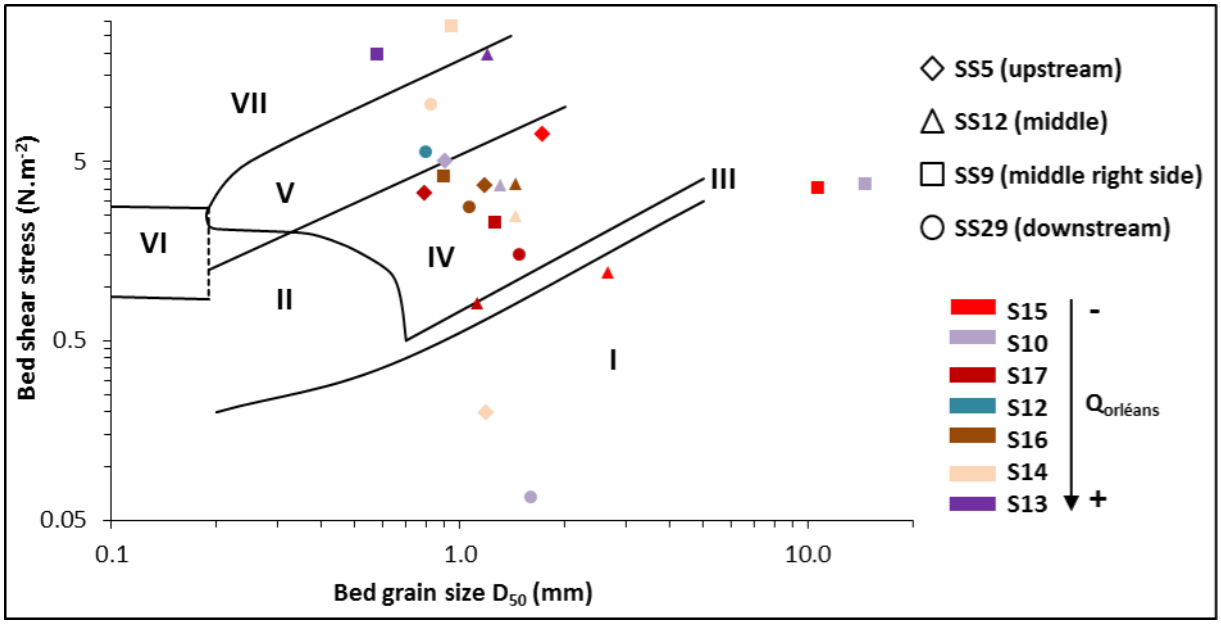


Figure 4-11: D_{50} sediment bed grain size in relation to the bed shear stress plotted in the Southard and Boguchwal (1990) bedform stability diagram. Labels for region: I, no movement on plane bed; II, ripples; III, lower plane bed; IV, dunes; V, overlap region of dunes, upper plane bed, and antidunes; VI, overlap region of ripples, upper plane bed, and antidunes; VII, overlap region of upper plane bed and antidunes.

4.4.5. Superimposed dune morphology and dynamics

4.4.5.1. Geometry

Only one population of dunes migrates on the bar during each survey (Figure 4-12A). The number of dunes identified for each survey is given in Table 4-1. The majority of surveys (12 out of 16) shows a representative dune height of 0.2 m associated with three wavelength classes: i) 0.5-1 m (group 1); ii) 1.5-2 m (group 2) ; iii) 2-2.5 m (group 3) (Figure 4-12A). Dunes in the other surveys have heights and lengths of 0.2-0.3 m and 3-3.5 m respectively (group 4) (Figure 4-12A). Dunes observed during the high discharges of flood 4 have a straight crest reminiscent of 2D dunes (Figure 4-12B).

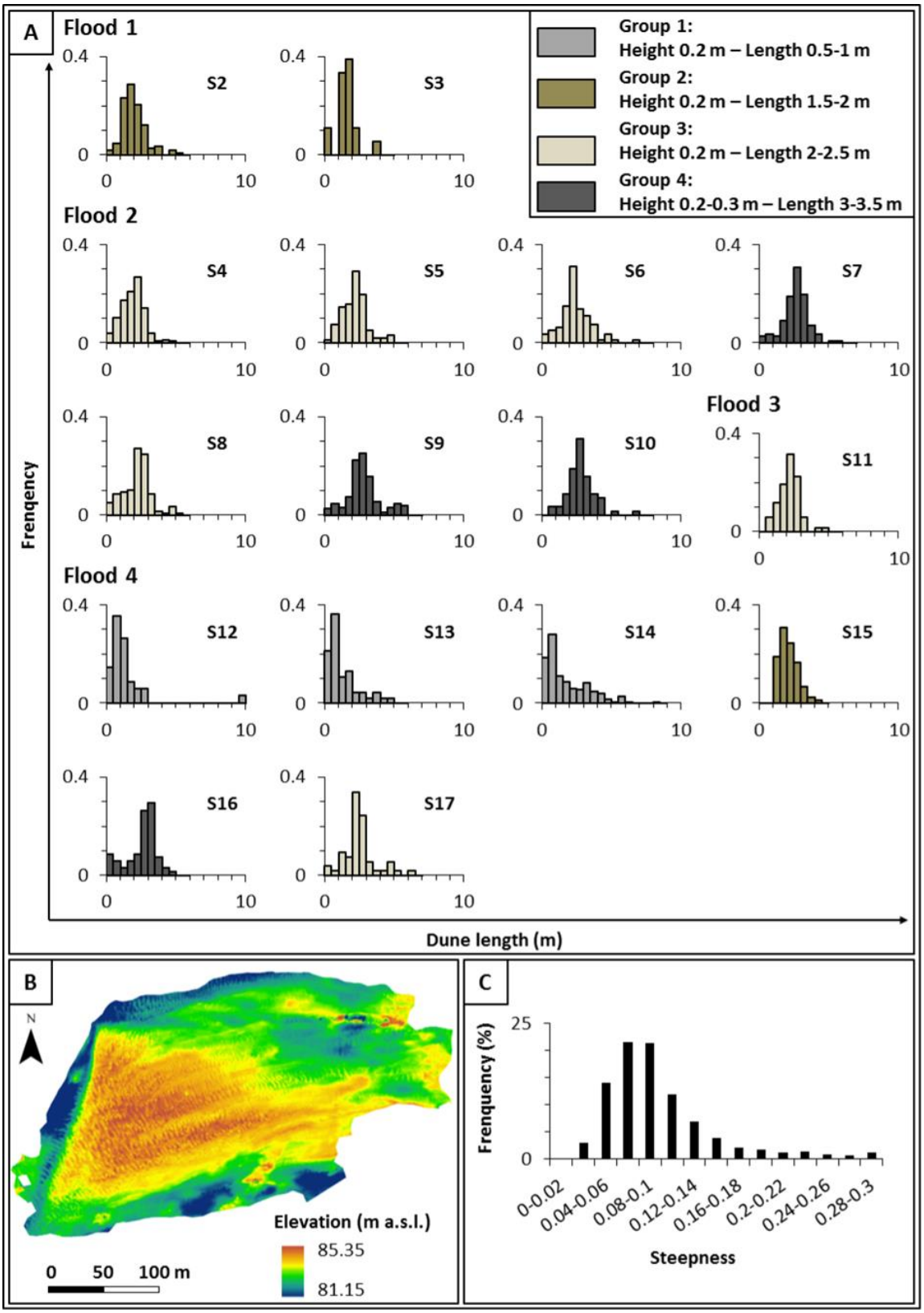


Figure 4-12: Frequency of dune length for each survey (A), the number of dune is available in Table 4-1.Digital elevation model during the high magnitude flood (S14) with discharge of 1810 m.^{3}s^{-1} (B). Frequency of steepness for all dunes measured with the whole surveys.

On the bar, medium dunes (1 m < L < 10 m) are located between the two curves established by Flemming (1988) and Ashley (1990) (Figure 4-13A). In contrast, small dunes (L < 1 m) are frequently higher than the maximum height calculated by Ashley (1990) (Figure 4-13A). The median dune heights and lengths are in line with the theoretical values except during the two highest discharges surveyed. More than half of dunes have a steepness between 0.06 and 0.12 (Figure 4-12C). The steepness values are high for the dunes of metric-order lengths. Once their lengths are pluri-metric their steepness become markedly lower, as was observed on the Rhine by Carling (2000) (Figure 4-13B).

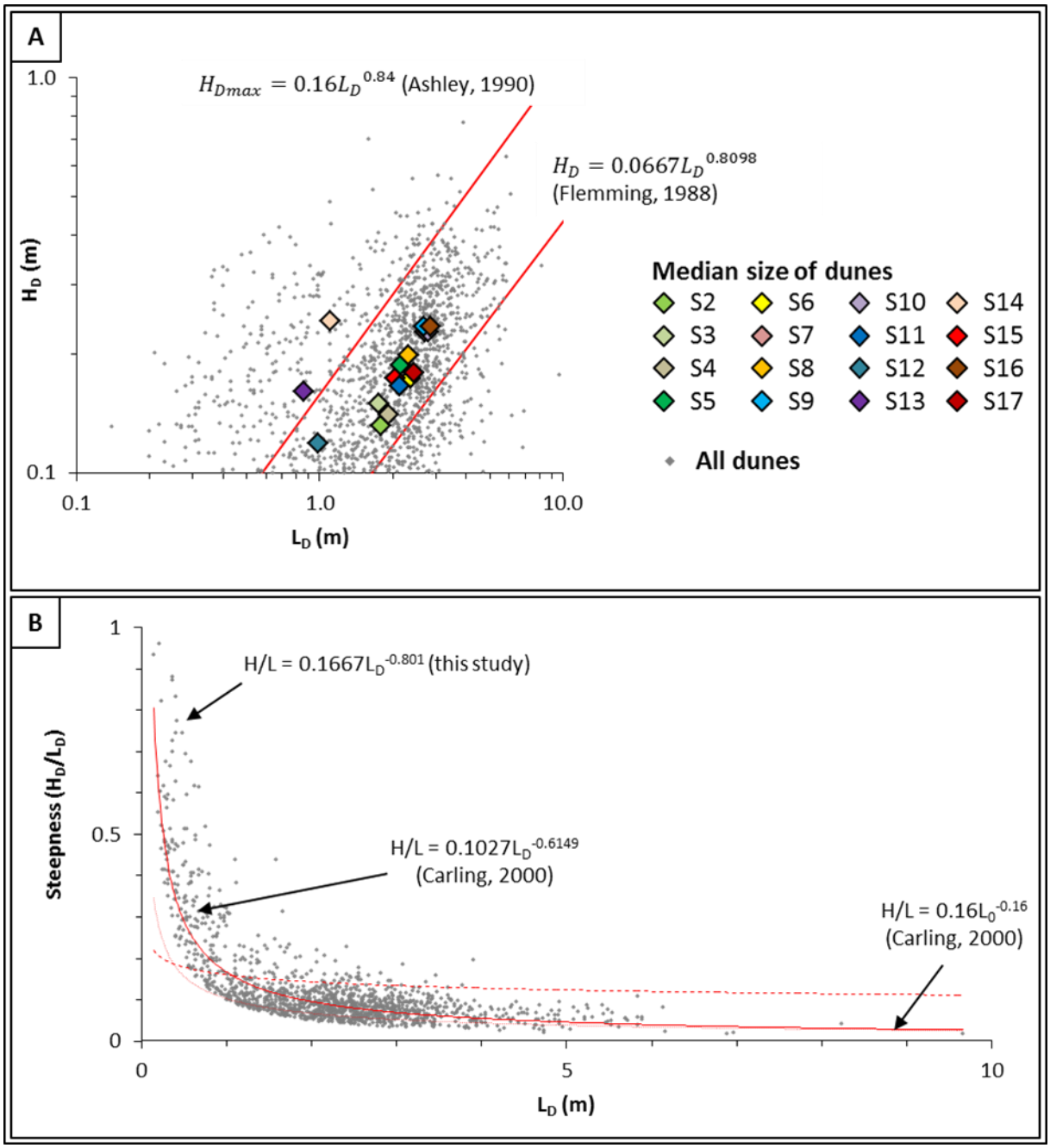


Figure 4-13: Total and median dune wavelengths and heights compared to the theoretical equations of Flemming (1988) and Ashley (1990) (A). Steepness evolution in regard to dune lengths compared to Carling's (2000) results on the River Rhine (B). (n=1423).

During the flood events monitored, the water depth on the mid-channel bar varied between 0.9 and 2.8 m. The dune heights are in agreement with the maximum equilibrium height of river dunes (Kleinhans *et al.*, 2002) (Figure 4-14A). For half of the surveys the heights are close to the maximum equilibrium height for which water depth is the limiting factor (Figure 4-14A).

However, for the other surveys, the dune heights remain small and lower than maximum equilibrium height of river dunes even for the deepest water conditions (Figure 4-14A). These results contrasts with the primary factor of control on dune morphology assumed to be the water depth in case on depth-limiting conditions (Flemming, 2000). However, dune heights are comparable to the predictive model by Allen (1968) (Figure 4-15B) as also shown on the Fraser River by Kostaschuk and Best (2005). Dune lengths are also well predicted except for three successive surveys (S12, S13, S14) conducted during the high magnitude flood associated with deepest water and following a strong erosion during emersion of the bar.

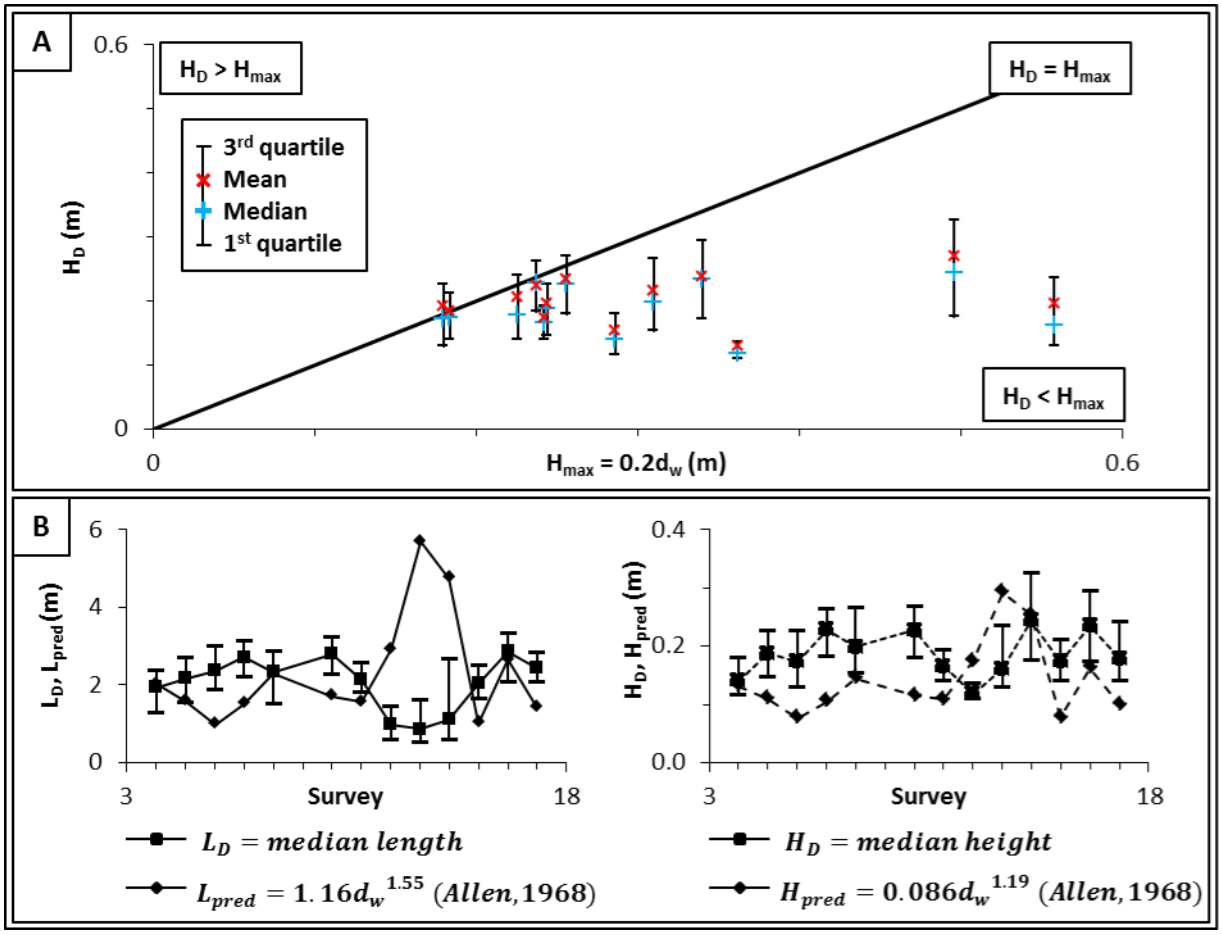


Figure 4-14: (A) Dune height for each survey according to the maximum development height of dunes in rivers estimated at 20% of water depth (Kleinhans *et al.*, 2002). (B) Comparison between median dune lengths (L_D) and median dune heights (H_D) per measurement survey with predicted values (L_{pred} and H_{pred}) using Allen's (1968) equilibrium model. The error bars represent the quartiles calculated around the median.

The adaptation of the dunes to hydrological variations reveals an anti-clockwise hysteresis for the high magnitude flood (Figure 4-15). However, the evolution of length and height parameters doesn't systematically follow the same trend and the lag time for these two parameters to adjust differed. Unfortunately, due to the slight variation in dune height relatively to the accuracy of measurements it is difficult to clearly conclude on this point.

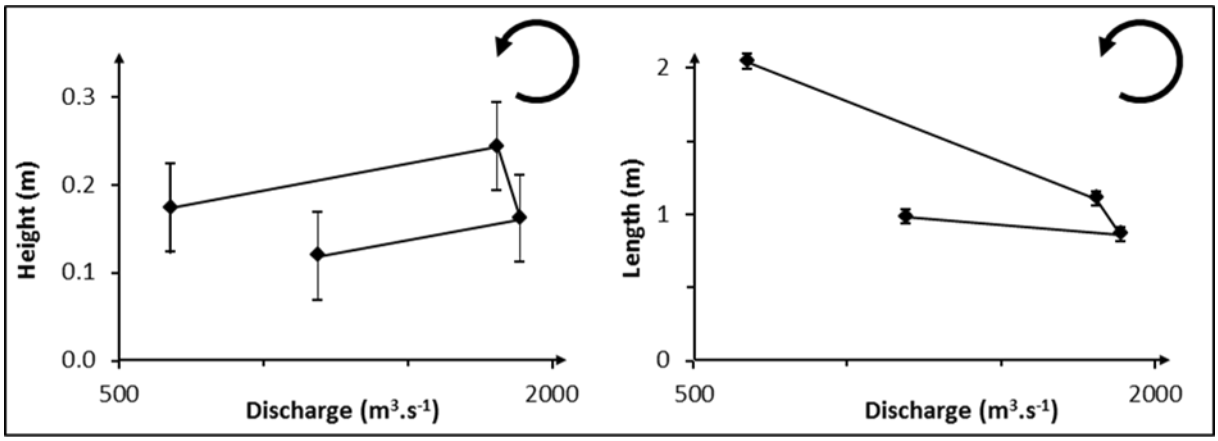


Figure 4-15: Evolution of dune heights and lengths in regard to the modification of discharge and water depth during the high magnitude flood surveyed.

On migrating bars, sediment availability can promote dune growth, the influence of water depth becoming, in this case, secondary (Villard and Church, 2005; Claude *et al.*, 2012). On the non-migrating bar studied, although deep water depth occurred during floods, dune height remained low even if hydraulics and grain size conditions were favourable to dune development. This suggests that sediment supply becomes the major limiting factor. The low erosion observed during floods (Figure 4-8) suggests that sediment stored on the non-migrating bar only slightly feeds the dunes. They grow once the sediment supply is provided by the main channel (after the peak discharge) and according to a lag time of adaptation.

4.4.5.2. Bedload transport rates

The height of dunes range from 0.14 to 0.26 m and their migration velocities from 24.10^{-5} $m.s^{-1}$ to 80.10^{-5} $m.s^{-1}$ (Table 4-1). At S6, celerity is at its lowest (24.10^{-5} $m.s^{-1}$), as are the associated transport rates (0.04-0.06 $kg.s^{-1}.m^{-1}$). Similarly, the highest dune velocities ($\geq$ 65.10^{-5} $m.s^{-1}$) are associated with the highest transport rates (0.13-0.23 $kg.s^{-1}.m^{-}1$). For the intermediate values (38.10^{-5}-50.10^{-5} $m.s^{-1}$), the bedload transport rates range from 0.05 to 0.14 $kg.s^{-1}.m^{-1}$, but show no direct relationship with the increase in dune celerity.

The lowest transport rates were observed for discharges close to the peak of flood 1 (527 $m^3.s^{-1}$) and flood 3 (797 $m^3.s^{-1}$) and during the falling stage of single peak of flood 2 (S6) at a discharge of 567 $m^3.s^{-1}$. For similar discharge and steepness values for surveys S4, S5 and S11, transport rates are similar for S4 and S5 but are lower for S11.

4.5. Discussion

4.5.1. Schematic model of the non-migrating bar and superimposed dune dynamics during floods

The identification of a dominant control parameter, among stage variations, morphological context, or sediment supply remains a difficulty in understanding the dynamics of bars (Hooke and Yorke, 2011; Reesink *et al.*, 2014). The data resolution of our study allows us to detail the processes occurring during a single high-magnitude flood event by proposing a conceptual model of the dynamics of a non-migrating mid-channel bar principally forced by a static perturbation (here a riffle), which can be somehow transposed on other fluvial systems. We also discuss the effect of the flood succession (of various duration and intensities) on the bar dynamics and superimposed dunes.

For the sake of simplicity, two specific areas can be distinguished in terms of sediment dynamics on the non-migrating bar studied in this paper. Namely, the upstream part of the bar appears as a relatively stable area where the presence of the riffle and armour layers stabilize the bar head. This part differs from the downstream part, margins and bar front which are highly mobile and characterized by relatively well-sorted sandy sediments. This can be explained by the high value of the Shields critical threshold for sediment motion parameter (as already shown on other bars of the Loire by Claude *et al.*, 2012 and Rodrigues *et al.*, in press). The sedimentary processes on these two areas of the bar depend on hydrological variations (has shown by Friedman *et al.*, 1996; Kiss and Sipos, 2007 for other fluvial systems) and associated sediment supply (phasing, quantity and grain size).

During a single peak of flood with magnitude higher than the 1-in-2 year floods, deposition processes occur at the end of the rising limb and at the beginning of the falling limb when sediments are delivered from the main channel. During a single peak flood with lower magnitude, deposition processes occur after the flood peak, during the beginning of the falling stage when sediments are supplied from the main channel.

During the falling water stage, the top of the bar and the right-bank area of its front undergo erosion, while the bar spreads laterally towards the left bank (south-west) due to the combined effects of the riffle and the slope gradient of the secondary channel. Thus, the morphological evolution and the associated sedimentary record are strongly correlated with discharge variations (as shown by Jones, 1977; Friedman *et al.*, 1996; Best *et al.*, 2003; Kiss and Sipos, 2007 in other contexts). Although the bar considered here is induced by the presence of a riffle, the morphological evolution of the mid-channel bar during a flood event are in line with the model proposed by Bridge (1993, 2003) with a trend for erosion of the bar margins and deposition on the top during the rising water stage, and erosion of the top and lateral deposition during the falling stage. Although this general model should be slightly modified on our site since the upstream part of the bar is fixed to the riffle, it is also in accordance with the findings of Ashworth *et al.* (2000) and Kiss et Sipos (2007) concerning the phasing of erosional and deposition processes occurring during a flood event as well as the role played by dunes during bar accretion (Ashworth *et al.* 2000, Best *et al.*, 2003). The morphological response of the non-migrating bar to high-magnitude floods can be described using the following five-step conceptual model (Figure 4-16):

- Stage 1: erosive phase, until the medium rising stage of previously deposited sediments; development of dunes from sediments previously stored on the bar; no supply from main channel;
- Stage 2: swelling phase, associated with sediment deposition on the back of the bar from lateral supply from the main channel leading to a longitudinally convex morphology near the flood peak (the bar-top continues to grow at the early stage of the flood decline);
- Stage 3: building phase, during high flow associated with sediment supply from the main channel (lateral and upstream). Elongation, lateral spreading at the end of rising and at the beginning of falling water stages (Figure 4-5C);
- Stage 4: waning stage, with asymmetrical spreading and flattening of the bar due to sediment reworking during the falling limb of the flood (S5-S6, S10-S11 and S16-S17); no re-supply from the main channel;

- Stage 5: margin-reworking, erosion of the bar front and of the margins when the bar is disconnected. The spatial extension of the bar thus reduces considerably compared to higher discharge conditions.

The influence of the swelling of the bar on flow resistance was not tested in this study but should be done in the future. This process can modify the boundary layer and the development of dunes on migrating bars (Carling *et al.*, 2000; Claude *et al.*, 2014) and point bars (Dietrich and Smith, 1984).

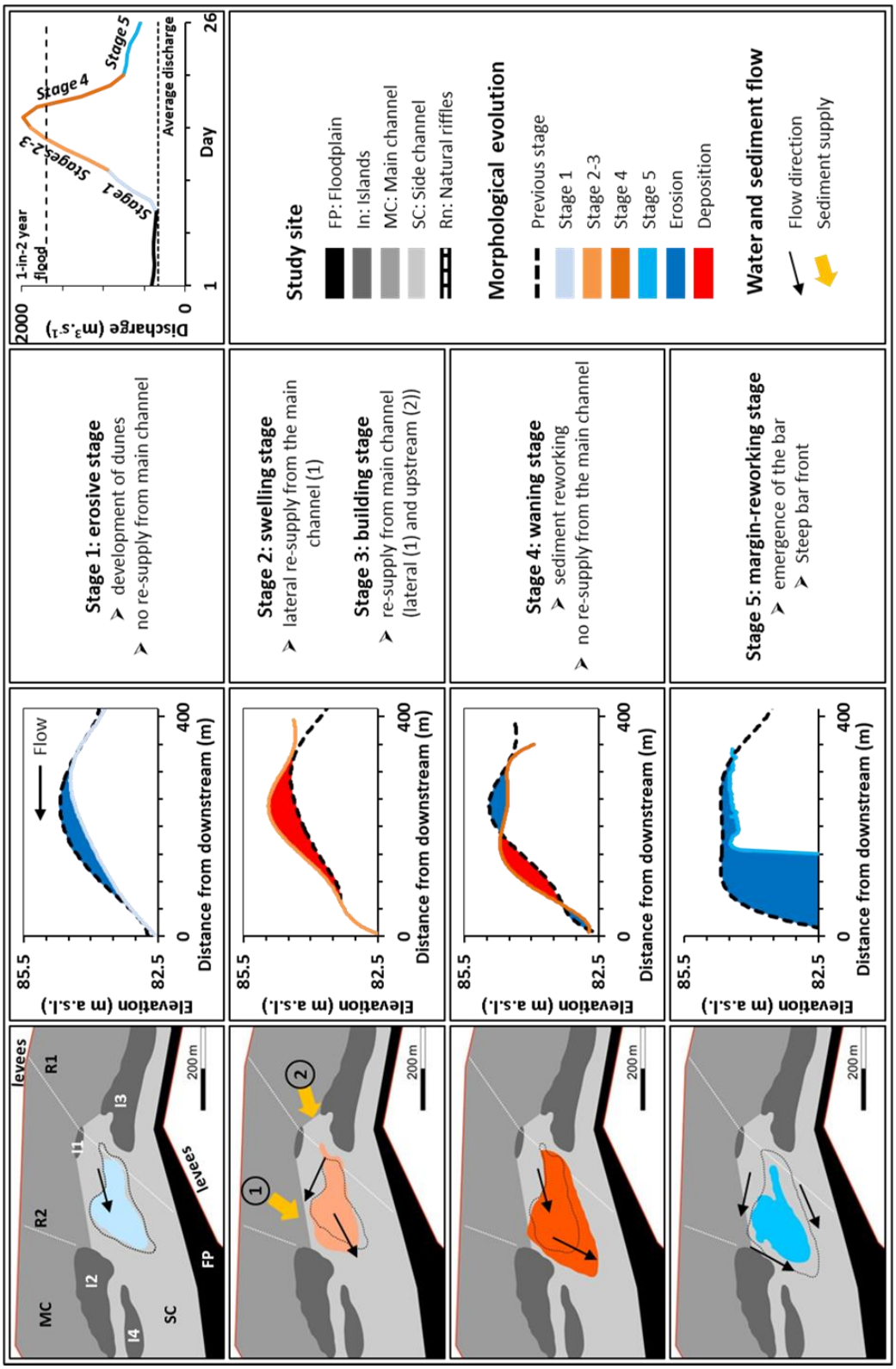


Figure 4-16: Conceptual model of the morphological evolution of the non-migrating bar (planform and bathymetry) during a flood event. On maps, black dashed lines correspond to the previous stage whereas colored bars refer to the evolution stage. Longitudinal tracks correspond to LT18 and the color code refers to the maps. Stages 2 and 3 are grouped because they refer to sediment supply (different according to the flood magnitude).

The succession of peak discharges during multi-peak floods or time intervals between floods also influence the non-migrating bar morphology. For instance, the bar's back morphology inherited at the end of a falling limb is preserved at the beginning of the subsequent one if the decline between the two peaks doesn't drive to the emersion of the bar. Then, the bar's back evolves from this inherited morphology. As a consequence, the succession of flood peaks allows the swelling of the bar's back avoiding the occurrence of the stage 5 (mainly associated with the emersion of the bar). Thus, two key parameters affect the morphological evolution of the non-migrating mid-channel bar during successive floods: (i) the duration of falling limbs determining the inherited morphology (convex or flat) and (ii) the emersion of the bar leading to the bar-top flattening and front bar retreat by erosion.

During flood events, the balance between deposited and eroded volumes on cross-sections CS6 to CS16 highlights a state of either a negative or positive sediment budget compared to the initial state. Figure 4-17 indirectly represents the gradient of sediment transport rate over the bar. Although the relationship between sediment transport rates and sediment budget is not linear, the rapid increase in sediment budget noted for floods 2 and 4 highlight a significant sediment deposition coming from the main channel. After long or high amplitude falling limbs the bar tends to show a negative budget, which is not always compensated for by sediment supplied in the subsequent flood. Overall, for the study period, the bar sediment budget is often negative compared to the initial post-engineering works state (Figure 4-17). These results lead us to the conclusion that during low-intensity floods, sediment supply is lower than during the high-intensity events as shown by Rodrigues *et al.*, 2006 on non-migrating bar located in an inlet of a side channel of the Loire.

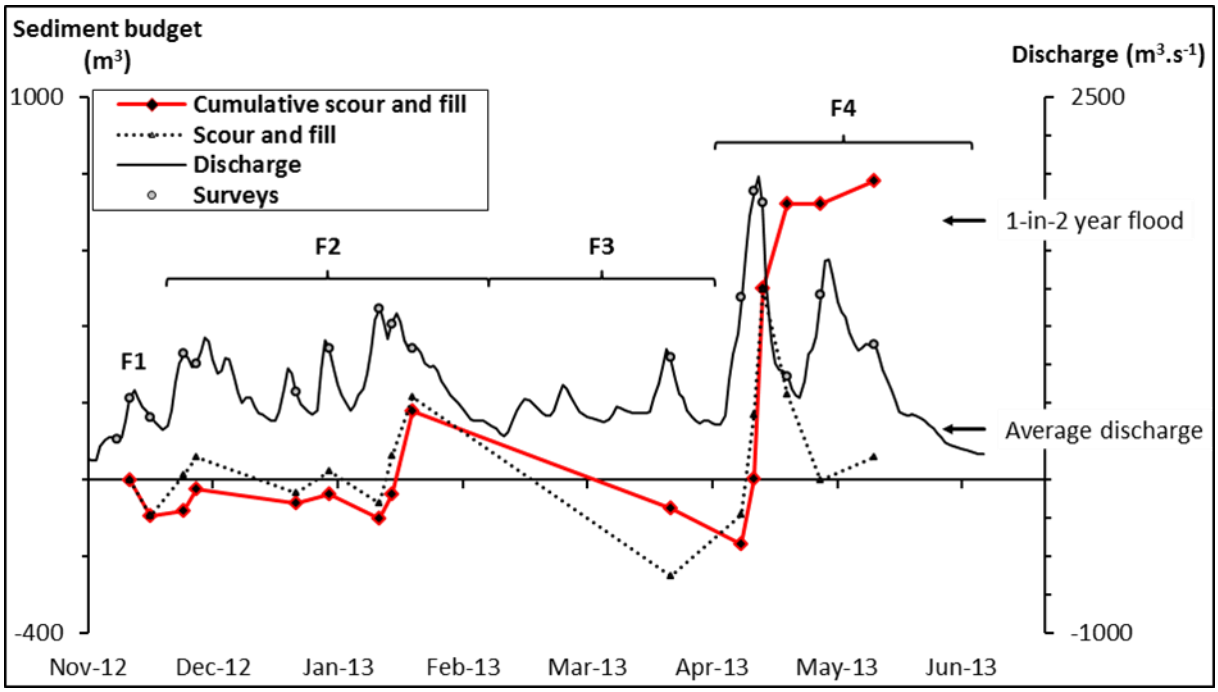


Figure 4-17: Evolution over time according to discharge rates of deposited and eroded volumes and cumulative volumes on cross-sections CS6-CS16.

As mentioned above, the flood stage and the phasing of sediment supply have a major influence on the morphology of the non-migrating bar and on dune development. This latter is influenced by several potential limiting factors such as the water depth, the balance between sediment grain size and bed shear stress and the sediment availability (depending on sediment supply from the main channel, armour layers formation and the presence of a previously deposited sediment store).

The initial morphology of the bar resulting from the fluvial management works (vegetation removal, topographical lowering and sediment mixing) influenced the dune development. During the first flood after management works, dunes developed from the sediment store represented by the low-elevation flattened bar surface with mixed sediments in a regressive way (upstream-oriented process).

Firstly, dunes appeared on the front of the bar which was subject to spreading and also during the first peak of the second flood whereas no significant sediment supply from the main channel was recorded on the bathymetrical data. This suggests that, initially, dunes developed from the sandy sediments of the downstream part of the bar in a context of sediment deficit (and independently of the low sediment supply coming from the main channel).

Kleinhans *et al.* (2002) suggested that the sediment deficit for bedforms to develop can depend on the grain sizes constituting the river bed which are sometimes too large to be mobilized; this can explain why dunes do not develop in the middle part of the bar. However, the absence of dunes in the upstream part could be induced by a thin active layer due to the non-alluvial bed marked by the natural riffle. This part remains without dunes throughout the study. For low discharge conditions, our results suggest that the predominant factor of dunes development is the sediment availability and grain size. The development of relatively small dunes regular in shape and size suggests a limited sediment supply or a thin active layer (Dalrymple and Rhodes in 1995; Tuijnder *et al.*, 2009). The armour layer development also suggests a context of sediment deficit. According to Carling *et al.* (2000), even in a context of sediment deficit, dune height can continue to grow to the detriment of their length and this was observed just before the peak of flood 4 (S12). Furthermore, Kleinhans *et al.* (2002) and Tuijnder *et al.* (2009) showed that under limited sediment supply conditions dune size was independent of water depth and flow velocity.

Secondly, the massive sediment supply delivered by the main channel at the end of the rising limb or at the onset of the falling limb of high-magnitude floods (i.e. flood 4) influenced the dune dynamics. These hydrological events have provided enough sediment for dune development which was only limited by the balance between bed shear stress and critical shear stress. The hysteretic process linked to variation in discharge, and showing a faster response in dune height than in dune length, complicates the analysis of the abovementioned limiting factors on dune growth. Anyhow, the rapid increase in dune height just after the flood peak 4 and its subsequent decrease is in phase with the sediment supply delivered by the main channel. Apparently, dunes adapted to the massive sediment supply firstly by modifying their height and afterwards by increasing their length at the end of the flood (while their height decreased probably due to the decrease in sediment supply). Under non-limiting sediment availability conditions, the difficulty the dunes had to grow in our system could be linked to the wide grain-size range and the often bimodal character of the sediment (Kleinhans *et al.*, 2002). Our results show that, on a mid-channel non-migrating bar developed in a sandy-gravel bed of a lowland river, superimposed dunes growth is mainly influenced by sediment supply, grain size, flow strength and in a lesser way water depth (as shown by Bartholdy *et al.*, 2005 in a tidal environment).

The identification of dunes along the longitudinal track LT18 allowed us to apply the dune tracking method to calculate bedload transport rates. They are comparable to those calculated in the main channel of the Loire River by Claude *et al.* (2012). According to the migration rates measured and to Kuhnle (2006), superimposition and amalgamation of dunes was not observable in our system.

4.5.2. Influence of hydrology on forcing parameters inducing a non-migrating bar

The results presented herein highlight a hydrological control of the morphological forcing parameters which govern the presence and the dynamics of the non-migrating bar. These forcing parameters are 1) the presence of a stationary obstacle (riffle), 2) an expansion area and 3) a low-curvature degree in the channel planform. Hereafter, points 2 and 3 will be referred as "planform" forcing. On the study site, as for other rivers, the effects of these parameters interact one to each other. In other words, the presence of the riffle is responsible for the expansion area and the building of vegetated islands in this part of the Loire. In that sense, the obstacle (here the riffle) could be interpreted as a first-degree forcing parameter whereas expansion area and the vegetated islands are a consequences which also influence the bar dynamics.

During low and medium flows, the effect on the morphological setting (riffles, vegetated islands, etc…) is stronger than during high-flow periods. For low-flow conditions, the natural riffles, the expansion area, and the vegetated islands influence elevation and slope of the water surface as well as flow directions and velocity. The two riffles present in the main channel (Figure 4-1) reduce the water surface slope and then promote a lateral gradient towards the side channel (Figure 4-3) responsible for the spreading of the bar towards the left bank during low-flows.

During high flow periods, the effects of the riffle on flow decreases. Contrarily, the role of planform forcing parameters (expansion area and low degree of curvature) becomes higher (Figure 4-18). For these water levels, flow is deflected towards the right bank. The divergence of flow for discharges higher that the 1-in-2 year flood induces a sediment deposition and a spreading of the bar in this direction.

This sediment deposition can afterwards be colonized by vegetation and evolve as vegetated islands (i.e., I1 and I2, Figure 4-1) which also interacts with the non-migrating bar by splitting the flow and sediment supply (I1, Figure 4-1) or by inducing, during the falling limb of the flood, the formation of a small channel responsible for the lateral scouring of the margins of the bar after its spreading during floods.

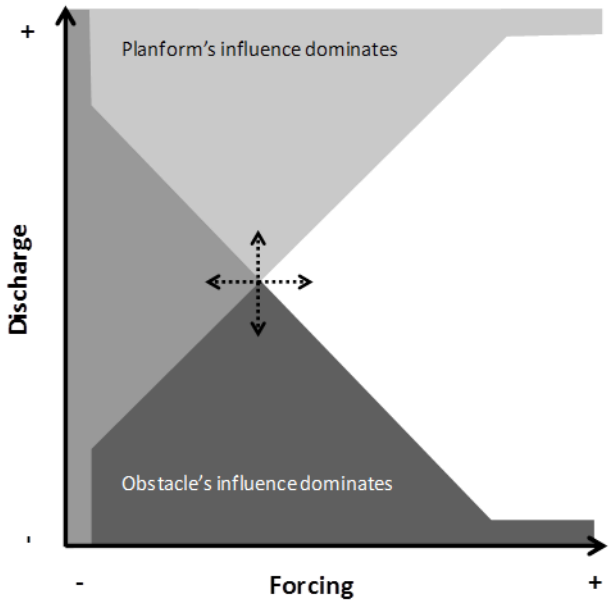


Figure 4-18: Theoretical view (based on this study) of the hydrological control of the morphological forcing parameters (obstacle [riffle] vs planform [expansion and low-amplitude curvature]) involved in the dynamics of non-migrating bars. Arrows indicate that the relative influence of the two morphological forcing parameters can shift according to the specificity of the site considered.

Non-migrating bars can lead to the morphological evolution of river beds (Parker, 1976; Hooke and Yorke, 2011; van Dijk, 2013). For instance, non-migrating bars such as point bars explain the overdeepening process occurring along the outer bank of rivers which is responsible of the lateral migration of meander bends (Struiksma, *et al.*, 1985; Parker and Johanneson, 1989) modulated by hydrology, banks geotechnical characteristics and riparian vegetation (Nanson and Beach, 1977; Hooke and Yorke, 2011).

Results presented in this paper suggest that non-migrating bars forced by a steady local perturbation (i.e. a riffle) can be responsible for some local morphological evolution (specifically on the erosion of islands located close to the bar) but do not drive to a significant morphological evolution of the river reach due to their fixed position in the channel.

Classically, if the banks of the reach were easily erodible (which is not the case here due to the presence of levees), they would retreat during the low migration of the bar inducing a general morphological adjustment of the channel (Coleman, 1969; Klaassen etMasselink, 1992; Thorne *et al.*, 1993; Ashworth *et al.*, 2000). This process was observed on several fluvial systems of various sizes and can be associated with the divergence of flows induced by the expansion area which can be involved in the development of secondary helical flows present in the surrounding channels (Whiting et Dietrich, 1991; Bridge et Gabel, 1992; Bridge, 1993; Richardson *et al.*, 1996; Richardson et Thorne, 1998). Contrarily to a point bar or even to some migrating bars present in meandering channels (Hooke and Yorke, 2011), an obstacle-induced bar will not translate laterally since its formation is linked to the presence of a static perturbation. However, the morphological influence of this bar type on the river reach can increase with time as it constitutes a potential site of woody vegetation recruitment and island edification (as shown by Wintenberger *et al.* in press on the same study site before 2012). If the bar evolves as an established island, its influence on flow, sediment transport and local morphological evolution will increase with time (McKenney *et al.*, 1995; Gurnell *et al.*, 2001; Wintenberger *et al.* in press). In other words, the 'life-cycle' (see Hooke and Yorke, 2011) of two non-migrating bars (induced by a steady perturbation or by planform) will be different according to their cause of formation.

4.6. Conclusion

This study was conducted on the Loire River (France) on a non-migrating mid-channel bar forced by a riffle and planform changes (local channel widening and low-sinuosity). Based on a large dataset acquired after management works which ensured an initial flat bed and a homogenized grain size distribution we propose a conceptual model of non-migrating bar dynamics during floods, detailing the interactions with superimposed dunes. The model proves that, in a relatively large lowland sandy-gravel bed river, the dynamics of a non-migrating mid-channel bar forced by a riffle can be resumed to a rather stable area which constitutes some type of "nucleus" around which spreading (bar margins), elongation (bar front) and swelling (bar back) occur and during flood events. During the falling limb of floods, sediments deposited on the top of the bar and on the bar front are reworked; a lateral spreading towards a side channel was also shown. When water leaves the bar, significant lateral erosion of the bar margins occurs.

Dunes developed instantaneously from the flat surface created during management works during the first flood by a upstream-oriented process. Dune development strongly depends of sediment (phasing, quantity and grain size) supplied by the surrounding channels during high-magnitude floods and by sediment availability (governed by armour layers and non-alluvial parts) during low-flow stages. The size and shape of dunes were rather stable even if adaptations were noted according to a weak anti-clockwise hysteresis. This study shows that superimposed dunes growth is mainly influenced by sediment supply, grain size, flow strength and in a lesser way water depth.

Morphological forcing parameters (steady perturbation [riffle] vs planform [widening, channel curvature] govern the presence, the dynamics of the non-migrating bar and its "long-term" evolution. The role of these parameters on the bar dynamics is cumulative but to a certain extent stage dependant. For low discharges, the influence of the riffle dominates (specifically on local flows). During high-flow stages it influences sediment availability but flow directions and strength are rather influenced by planform parameters.

This study is a first step to understand interactions between a non-migrating mid-channel bar forced by a steady perturbation (riffle) and superimposed dunes during unsteady flows. As a sedimentological perspective, the analysis of the influence of the location of dunes on the bar (front/back) on their development and morphological evolution should be done., From an ecological point of view, the understanding the non-migrating bar dynamics proposed in this paper constitutes the base of an analysis of the survival during flood events of young seedlings recruited on the bar (Wintenberger *et al.*, submitted).

Acknowledgments

This study is part of the Ph.D. thesis of the first author and is funded by the Master Plan Loire Grandeur Nature - FEDER (Presage n°34971), Agence de l'Eau Loire-Bretagne (n° 100392601), Etablissement Public Loire (11-DR-RD-015) and Région Centre. Michel Chantereau, Damien Hemeray (Réserve Naturel Nationale de Saint-Mesmin) and Thomas Carrière (DDT 45) are acknowledged for their valuable help. Y. Guerez and T. Handfus (CETU ELMIS – University of Tours) are thanked for their help during flood surveys. Other field investigations and grain size analysis were carried out with the help of J.-P. Bakyono, I. Pene, M. Rincel (University F. Rabelais, Tours). O. Ursache (University F. Rabelais, Tours) is acknowledged for his help during the analysis of hydraulics data.

The authors wish to thank Sue Edrich for the English translation of the manuscript.

References

Allen, J. R. L. 1968. Current ripples - Their relation to patterns of water and sediment motion. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 433p.

Ashley, G. M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem. Journal of Sedimentary Research. 60: 160-172. DOI: 10.2110/jsr.60.160

Ashmore, P. E. 1982. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. Earth Surface Processes and Landforms. 7: 201-225. DOI: 10.1002/esp.3290070301

Ashmore, P. E. 1991. How do gravel-bed rivers braid. Canadian Journal of Earth Sciences. 28: 326-341. DOI: 10.1139/e91-030

Ashworth, P. J., Ferguson, R. I., Ashmore, P. E., Paola, C., Powell, D. M. and Prestegaards, K. L. 1992. Measurements in a Braided River chute and lobe: 2. Sorting of bed load during entrainment, transport, and deposition. Water Resources Research 28: 1887-1896. DOI: 10.1029/92WR00702

Ashworth, P. J. 1996. Mid-Channel bar growth and its relationship to local flow strength and direction. Earth Surface Processes and Landforms. 21: 103-123. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199602)21:2<103::AID-ESP569>3.0.CO;2-O

Ashworth, P. J., Best, J. L., Roden, J. E., Bristow, C. S. and Klaassen, G. J. 2000. Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh. Sedimentology. 47: 533-555. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00305.x

Bartholdy, J., Flemming, B.W., Bartholomä, A., Ernstsen, V.B. (2005). Flow and grain size controle of depth-independent simple subaqueous dunes. Journal of Geophysical research, 110, F04S16, 12p.Best, J. L., Ashworth P. J., Bristow, C. S. and Roden J. E. 2003. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh, Journal of Sedimentary Research. 73(4): 516–530. DOI: 10.1306/010603730516

Bittner, L. D. 1994. River bed response to channel width variations: Theory and expermients, University of Illinois, Urbana-Champaign.

Blondeaux, P. and Seminara, G. 1985. A unified bar-bend theory of river meanders. Journal of Fluid Mechanics. 157: 449-470. DOI: 10.1017/S0022112085002440

Blott, S. J. and Pye, K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 1237-1248. DOI: 10.1002/esp.261

Bridge, J.S., Best, J.L., 1988. Flow, sediment transport and bedform dynamics over the transition from dunes to upper stage plane beds, Sedimentology, 35, 753-764.

Bridge, J. S. and Gabel, S. L. 1992. Flow and sediment dynamics in a low sinuosity, braided river: Calamus River, Nebraska Sandhills. Sedimentology. 39: 125-142. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1992.tb01026.x

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

Bridge, J. S. 2003. Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record. Blackwell, Oxford. 491p.

Bristow, C. S. 1987. Brahmaputra River: channel migration and deposition. In: Recent Developments in Fluvial Sedimentology (Eds Ethridge, F. G., Flores, R. M. and Harvey, M. D.), SEPM, Special Publications, 39, 63-74p.

Callander, R. A. 1969. Instability and river channels. Journal of Fluid Mechanics. 36: 465-480. DOI: 10.1017/S0022112069001765

Carling, P. A., Golz, E., Orr, H. G. and Radecki-Pawlik, A. 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. Sedimentology. 47: 227-252. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00290.x

Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J.G., Macaire, J.J., Jugé, P. 2012. Estimating bedload transport in a large sand–gravel bed river from direct sampling, dune tracking and empirical formulas. Geomorphology. 179: 40-57. DOI:10.1016/j.geomorph.2012.07.030

Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J.G., Tassi, P. and Jugé, P. 2014. Interactions between flow structure and morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France, Water Resources Research, 50, 2850–2873. DOI: 10.1002/2013WR015182

Coleman, J. M. 1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. Sedimentary Geology. 3: 129-239. DOI: 10.1016/0037-0738(69)90010-4

Colombini, M., Seminara, G. and Tubino, M. 1987. Finite-amplitude alternate bars. Journal of Fluid Mechanics. 181: 213-232. DOI: 10.1017/S0022112087002064

Crosato, A. and Mosselman, E. 2009. Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding. Water Resources Research 45: W03424. DOI: 10.1029/2008WR007242.

Crosato, A., Desta, F.B., Cornelisse, J., Schuurman, F., Uijttewaal, W.S.J. (2012). Experimental and numerical findings on the long-term evolution of migrating alternate bars in alluvial channels. Water Resources Research, 48, W06524, doi:10.1029/2011WR011320.

Dalrymple, R. W. and Rhodes, R. N. 1995. Estuarine dunes and bars. In: Geomorphology and Sedimentology of Estuarines. Developments in sedimentology (Eds Perillo, G. M. E.), Elsevier, 53, 359-422p. ISBN 9400701233, 9789400701236

Dietrich, W. E. ,Smith, J. D. 1984. Bed load transport in a river meander. *Water Resour. Res.* **20**: 1355-1380.

Eekhout, J. P. C., Hoitink, A. J. F. and Mosselman E. 2013. Field experiment on alternate bar development in a straight sand-bed stream. Water Resources Research. 49: 8357–8369. DOI: 10.1002/2013WR014259

Federici, B. and Paola, C. 2003. Dynamics of channel bifurcations in noncohesive sediments. Water Resources Research 39: 1162. DOI: 10.1029/2002WR001434

Flemming, B. W. 1988. Zur klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler transportkörper. Bochumer geologische und geotechnische arbeiten. 29: 44-47.

Flemming, B. W. 2000. The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. In: Marine Sandwave Dynamics, Proceedings of an International Workshop, Lille (France). 55-60p.

Friedman, J. M., Osterkamp, W. R. and Lewis, W. M. 1996. The role of vegetation and bed-level fluctuations in the process of channel narrowing. Geomorphology. 14: 341-351. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00047-9

Gaeuman, D. and Jacobson, R. B. 2007. Field assessment of alternative bed-load transport estimators. J. Hydraul. Eng. 133: 1319. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1319)

Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V. and Tockner, K. (2001) Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. Earth Surf. Proc. Land., 26, 31–62.

Hoekstra, P., Bell, P., Van Santen, P., Roode, N., Levoy, F. and Whitehouse, R. 2004. Bedform migration and bedload transport on an intertidal shoal. Continental Shelf Research. 24: 1249-1269. DOI: 10.1016/j.csr.2004.03.006

Hooke, J., and Yorke, L. 2011. Channel bar dynamics on multi-decadal timescales in an active meandering river. Earth Surf. Process. Landforms 36, 1910–1928.

Jackson, R. G. 1975. Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. Bulletin of the Geological Society of America. 86: 1523-1533. DOI: 10.1130/0016-7606(1975)86<1523:HAAAUM>2.0.CO;2

Jones, C.M. 1977. Effects of varying discharge regimes on bed-form sedimentary structures in modern rivers. Geology, 5: 567-570.

Kiss, T. and Sipos, G. 2007. Braid-scale channel geometry changes in a sand-bedded river: Significance of low stages. Geomorphology. 84: 209-221. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.01.041

Klaassen, G. J., Masselink, G. 1992. Planform changes of a braided river with fine sand as bed and bank material. In: Proceedings 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany. 459-471p.

Kleinhans, M. G., Wilbers, A. W. E., De Swaaf, A. and Van Den Berg, J. H. 2002. Sediment supply-limited bedforms in sand-gravel bed rivers. Journal of sedimentary Research. 72: 629-640. DOI: 10.1306/030702720629

Kleinhans, M. G. and Van Den Berg, J. H. 2011. River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method. Earth Surface Processes and Landforms. 36: 721–738. DOI: 10.1002/esp.2090

Kostaschuk, R. A., Church, M. A. and Luternauer, J. L. 1989. Bedforms, bed material, and bedload transport in a salt-wedge estuary: Fraser River, British Columbia. Canadian Journal of Earth Sciences. 26: 1440-1452. DOI: 10.1139/e89-122

Kostaschuk, R., and J. Best 2005. Response of sand dunes to variations in tidal flow: Fraser Estuary, Canada, Journal of Geophysical Research, 110, F04S04. DOI: 10.1029/2004JF000176

Kuhnle, R. A., Horton, J. K., Bennett, S. J. and Best, J. L. 2006. Bed forms in bimodal sand–gravel sediments: laboratory and field analysis. Sedimentology, 53: 631–654. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2005.00765.x

Lanzoni, S. 2000a. Experiments on bar formation in a straight flume: 1. Uniform sediment. Water Resource Research, 36: 3337-3349. DOI: 10.1029/2000WR900160

Lanzoni, S. 2000b. Experiments on bar formation in a straight flume: 2. Graded sediment. Water Resource Research, 36: 3351-3363. DOI: 10.1029/2000WR900161

Latapie, A. 2011. Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial: exemple de la Loire Moyenne, Univsersté François Rabelais de Tours, Tours, France. 279p.

Latapie, A., Camenen, B., Rodrigues, S., Paquier, A., Bouchard, J.P., Moatar, F., 2014. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. Catena. 121: 1-12. DOI: 10.1016/j.catena.2014.04.017

Leopold, L. B. and Wolman, M. G. 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. United States Geophysical Survey, Professional Paper 262-B.

Macaire JJ, Gay-Ovejero I, Bacchi M, Cocirta C, Patryl L and Rodrigues S. 2013. Petrography of alluvial sands as a past and present environmental indicator: Case of the Loire River (France). International Journal of Sediment Research 28: 285–303. DOI:10.1016/S1001-6279(13)60040-2

Mclelland, S. J., Ashworth, P. J., Best, J. L., Roden, J. and Klaassen, G. J. 1999. Flow Structure and Transport of Sand-Grade Suspended Sediment around an Evolving Braid Bar, Jamuna River, Bangladesh. In: Fluvial Sedimentology VI: International Association of Sedimentologists, Special Publication 28 (Eds Smith, N. D. and Rogers, J.), Blackwell Publishing Ltd., 43-57p.

McKenney, R., Jacobson, R.B., Wertheimer, R.C., 1995. Woody vegetation and channel morphogenesis in low gradient, gravelbed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas. Geomorphology, 13, 175–198.

Miori, S., Repetto, R. et Tubino, M. 2006. A one-dimensional model of bifurcations in gravel-bed channels with erodible banks. *Water resour. res.* 42: W11413.

Mosselman E, Tubino M, Zolezzi G. 2006. The overdeepening theory in river morphodynamics: two decades of shifting interpretations. In Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics – River Flow 2006; 1175–1181.

Naqshband, S. 2014. Morphodynamics of river dunes: suspended sediment transport along mobile dunes and dune development towards upper stage plane bed. PhD thesis, University of Twente, 149 p.

Nanson, G.C., Beach, H.F., 1977. Forest succession and sedimentation on a meandering river floodplain, northeast British Columbia, Canada. Journal of Biogeography 4, 229– 251.

Parker, G. 1976. On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. Journal of Fluid Mechanics. 76: 457-480. DOI: 10.1017/S0022112076000748

Parker, G., Johanneson, H. 1989. Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels. In: River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Eds. S. Ikeda and G. Parker, pp.379-415.

Peters, J.-J. and Sterling, A. 1975. Mateba 12: la méthode des dragages dirigés., Laboratoire de recherches hydrauliques, 11-29p.

Peters, J.-J. 1978. Discharge and sand transport in the braided zone of the Zaire estuary. Netherlands J. Sea Res. 12: 273-292.

Pinto Martins, D., Bravard, J. P. and Stevaux, J. C. 2009. Dynamics of water flow and sediments in the upper Paraná River between Porto Primavera and Itaipu Dams, Brazil. Lat. Am. j. sedimentol. basin anal. 16: 111-118.

Reesink, A. J. H., Bridge, J. S. 2007. Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars. Sedimentary Geology 202: 281-296. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2007.02.005

Reesink, A. J. H., Bridge, J. S. 2009. Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars – Part 2, further experiments. Sedimentary Geology 222: 274-300. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2009.09.014

Reesink, A. J. H., Bridge, J. S. 2011. Evidence of bedform superimposition and flow unsteadiness in unit-bar deposits, South Saskatchewan River, Canada. Journal of Sedimentary Research. Vol. 81 no. 11: 814-840. DOI: 10.2110/jsr.2011.69

Reesink, A. J. H., Ashworth, P. J., Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Parsons, D. R., Amsler, M. L., Hardy, R. J., Lane, S. N., Nicholas, A. P., Orfeo, O., Sandbach, S. D., Simpson, C. J., Szupiany, R. N. (2014). Sacles and causes of heterogeneity in bars in a large multi-channel river: Rio Parana, Argentina. Sedimentology, doi: 10.1111/sed.12092.

Repetto, R., Tubino, M., Paola, C. 2002. Planimetric instability of channels with variable width. Journal of Fluid Mechanics. 457: 79-109.

Richardson, W. R., Thorne, C. R. and Mahmood, S. 1996. Secondary flow and channel changes around a bar in the Brahmaputra river, Bangladesh. In: Coherent flow structures in open channels (Eds Ashworth, P. J., Bennet, S. J., Best, J. L. and McLelland, S. J.), John Wiley and Sons, Ltd, 519-543p.

Richardson, W. R. and Thorne, C. R. 1998. Secondary Currents around Braid Bar in Brahmaputra River, Bangladesh. J. Hydraul. Eng. 124: 325-327.

Richardson, W. R. and Thorne, C. R. 2001. Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river: Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh. Geomorphology. 38: 185-196. DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00080-5

Rodrigues, S., Bréhéret, J. G., Macaire, J. J., Moatar, F., Nistoran, D. and Jugé, P. 2006. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: The Loire River (France). Sedimentary Geology. 186: 89-109. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.11.011

Rodrigues, S., Bréhéret, J.-G., Macaire, J. J., Greulich, S. and Villar, M. 2007. In channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire, France. Sedimentology. 54: 223-242. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2006.00832.x

Rodrigues, S., Claude, N., Juge, P. and Breheret, J. G. 2012. An opportunity to connect the morphodynamics of alternate bars with their sedimentary products. Earth Surface Processes and Landforms. 37: 240-248. DOI: 10.1002/esp.2255

Rodrigues, S., Mosselman, E., Claude, N., Wintenberger, C.L., JUGE, P. (in press). Alternate bars in a sandy gravel bed river: generation, migration and interactions with superimposed dunes. Earth Surface Processes and Landforms. DOI: 10.1002/esp.3657.

Seminara, G. and Tubino, M. 1989. Alternate bars and meandering: free, forced and mixed interactions. In: River meandering (Eds Ikeda, S. and Parker, G.), American Geophysical Union - Water Resources Monographs 12, Washington. 267-320p.

Sime, L. C., Ferguson, R. I. and Church, M. 2007. Estimating shear stress from moving boat acoustic Doppler velocity measurements in a large gravel bed river. Water Resources Research 43: W03418. DOI: 10.1029/2006WR005069

Simons, D. B., Richardson, E. V. and Nordin, C. F. 1965. Bedload equation for ripples and dunes, US Geological Survey Professional Paper 462-H.

Southard, J. B. and Boguchwal, L. A. 1990. Bed configuration in steady unidirectional water flows; Part 2, Synthesis of flume data. Journal of Sedimentary Research. 60: 658-679. DOI: 10.1306/212F9241-2B24-11D7-8648000102C1865D

Struiksma, N., Olesen, K. W., Flokstra, C. and De Vriend, H. J. 1985. Bed deformation in curved alluvial channels. Journal of Hydraulic Research. 23: 57-79. DOI: 10.1080/00221688509499377

Ten Brinke, W. B. M., Wilbers, A. W. E. and Wesseling, C. 1999. Dune Growth, Decay and Migration Rates during a Large-Magnitude Flood at a Sand and Mixed Sand–Gravel Bed in the Dutch Rhine River System. In: Fluvial Sedimentology VI: International Association of Sedimentologists, Special Publication 28 (Eds Smith, N. D. and Rogers, J.), Blackwell Publishing Ltd., 15-32p.

Thorne, P. D., Hardcastle, P. J. and Soulsby, R. L. 1993. Planform channel evolution of the Brahmaputra River, Bangladesh. In: Braided Rivers (Eds Best, J. L. and Bristow, C. S.), Geological Society Special Publication, London. 257-276p.

Tubino, M. 1991. Growth of alternate bars in unsteady flow. Water Resources Research 27: 37-52. DOI: 10.1029/90WR01699

Tuijnder, A. P., Ribberink, J. S. and Hulscher, S. J. M. H. 2009. An experimental study into the geometry of supply-limited dunes. Sedimentology. 56: 1713-1727. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2009.01054.x

Van Den Berg, J. H. 1987. Bedform migration and bed-load transport in some rivers and tidal environments. Sedimentology. 34: 681-698. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1987.tb00794.x

Van der Mark, C. F., Blom, A., & Hulscher, S. J. M. H. (2007). Variability in bedform characteristics using flume and river data. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM, 923-930. DOI: 10.1201/NOE0415453639-c117

Van Der Mark, C. F., Blom, A. and Hulscher, S. J. M. H. 2008. Quantification of variability in bedform geometry. Journal of Geophysical Research 113: F03020. DOI: 10.1029/2007JF000940

Van Dijk, W. (2013). Meandering rivers: Feedbacks between channel dynamics, floodplain and vegetation. PhD thesis, University of Utrecht, 206 p.

Villard, P. V. and Church, M. 2003. Dunes and associated sand transport in a tidally influenced sand-bed channel: Fraser River, British Columbia. Canadian Journal of Earth Sciences. 40: 115-130. DOI: 10.1139/e02-102

Villard, P. V. and Church, M. 2005. Bar and dune development during a freshet: Fraser River Estuary, British Columbia, Canada. Sedimentology. 52: 737-756. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2005.00721.x

Whiting, P. J., Dietrich, W. E. 1991. Convective accelerations and boundary shear stress over a channel bar. Water Resour. Res. 27: 783-796.

Wilcock, P. R. 1996. Estimating Local Bed Shear Stress from Velocity Observations. Water Resources Research 32: 3361. DOI: 10.1029/96WR02277

Wintenberger, C.L., Rodrigues, S., Breheret, J.G., Villar, M. (in press). Fluvial islands: first stage of development from forced bars and vegetation interactions. Geomorphology.

Wintenberger, C. L., Rodrigues, S., Breheret, J.G., Jugé, P., Villar, M. The survival of *Populus nigra* L. seedlings to alluvial bar dynamics. Submitted to Earth Surface Processes and Landforms (Jan., 5, 2015).

Wu, F. C., Yeh, T. H. 2005. Forced bars induced by variations of channel width: Implications for incipient bifurcation. J. Geophys. Res. 110: F02009.

Wu, F. C., Shao, Y. C. and Chen, Y. C. 2011. Quantifying the forcing effect of channel width variations on free bars: Morphodynamic modeling based on characteristic dissipative Galerkin scheme. Journal of Geophysical Research 116: F03023. DOI: 10.1029/2010JF001941

Zolezzi G, Guala M, Termini D, Seminara G. 2005. Experimental observations of upstream overdeepening. Journal of Fluid Mechanics 531: 191–219.

Zolezzi, G., Bertoldi, W., Tubino, M. 2006. Morphological analysis and prediction of river bifurcations. In: Braided Rivers Process, Deposits, Ecology and Management (Eds Sambrook Smith, G. H., Best, J. B., Bristow, C.S., Petts, G.E.), Special publication - International association of sedimentologists, 36, 233-256p.

Chapitre 5 : Influence de la dynamique hydro-sédimentaire d'une barre alluviale dans la survie des semis de *P. nigra* L.

Mosaïque paysagère à l'aval de la barre sédimentaire forcée de Mareau-aux-Prés (RNN Saint-Mesmin) présentant des Habitats Natura 2000 prioritaires : Saulaie-peupleraie à Populus nigra dominant et peupleraies sèches à Populus nigra (Chevalier et Martin, 2015)

5.1. Objectifs et synthèse du chapitre

Ce chapitre est également présenté sous la forme d'un article en révisions (majeures) pour la revue *Earth Surface Processes and Landforms*. La version présentée dans ce manuscrit correspond à la version initiale envoyée à la revue, les corrections n'ayant pas encore été intégrées.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence la dynamique hydro-sédimentaire à la suite des travaux d'entretien du lit sur la recolonisation (installation + survie) de la barre par la végétation ligneuse pionnière (reproduction sexuée *vs* végétative). Plus particulièrement, il vise à répondre aux questions posées dans les axes 2 et 3 définis dans la partie « démarche » de cette thèse :

- Axe 2 : « Les pratiques d'entretien peuvent-elles favoriser le renouvellement des populations de Salicaceae par reproduction sexuée ? »
- Axe 3 : « Quels sont les paramètres influençant le potentiel de résistance des semis entre l'année n et n+1 aux contraintes hydrauliques et sédimentaires exercées lors des crues ? »

Bien que les résultats présentés dans ce chapitre permettent de répondre aux objectifs spécifiques de l'axe 2, ceux-ci sont principalement orientés vers les pratiques de gestion et d'entretien du lit et feront donc l'objet d'une discussion dans la partie synthèse de ce manuscrit, ce chapitre étant plus ciblé sur la description des processus. En revanche, cet article permet d'identifier des seuils de tolérances des semis aux contraintes exercées lors des crues qui est l'un des trois objectifs identifiés pour l'axe 3.

Les objectifs spécifiques de l'article sont de définir (i) les liens entre la dynamique d'une barre forcée sur un cycle hydrologique et la survie des semis de peupliers noirs après leur recrutement, (ii) les processus hydro-sédimentaires et leur contribution relative conduisant à la mortalité des semis, (iii) les valeurs seuils pour chacun des processus identifiés et (iv) l'influence des facteurs biologiques permettant la survie.

Pour répondre à ces objectifs nous avons reconduit le suivi hydro-sédimentaire à l'étiage et en crue de la barre entre le moment de l'installation des semis et l'année suivante.

Ces mesures ont été couplées à des mesures sur la végétation ligneuse pionnière afin d'identifier l'espèce, le type de reproduction, la densité et la hauteur des individus. Toutes les mesures sur la végétation ont été réalisées à la fin de la saison de croissance, nous avons travaillé sur les jeunes plantules ayant survécu à la période estivale et qui ont donc ont été soumises aux crues survenant l'hiver suivant leur recrutement.

La localisation des zones de recrutement est indépendante de la dynamique de la barre. En revanche, la dynamique de la barre identifiée dans l'article précédent gouverne la survie potentielle des semis âgés de moins d'un an. Quatre types de processus hydro-sédimentaires létaux pour les semis ont été identifiés : (i) arrachage par la seule force de traînée, (ii) arrachage par érosion du substrat associé à la force de traînée, (iii) enfouissement précédé par la contrainte exercée par la force de traînée et (iv) la succession de l'érosion suivi par un enfouissement (combinaison des processus [ii] et [iii]). Le développement des armures constituent une protection contre l'érosion du substrat, seule la force de traînée est à l'origine de l'arrachage des semis dans les zones d'armures qui sont restées stables pour les débits observés. La contribution de chaque processus conduisant à la mortalité dépend de la combinaison et du phasage des processus d'érosion-dépôt, de l'apport sédimentaire (en termes de quantité et taille des grains), de la vitesse des écoulements et des traits biologiques. Les valeurs identifiées pour chaque processus sont données ainsi que le pourcentage de mortalité associé à chaque type à l'échelle de l'unité morphologique étudiée. L'affinement vers l'aval des sédiments sablo-graveleux induit une organisation longitudinale de ces processus sur la barre non-migrante étudiée qui est présentée dans un modèle conceptuel à l'échelle de la barre sédimentaire.

Ainsi, à travers ce chapitre nous identifions les processus hydro-sédimentaires conduisant à la mortalité ainsi que leur contribution relative à cette mortalité. De plus, nous identifions des seuils de tolérance pour chacun des processus. Cependant, cet article met également en évidence le manque de connaissances sur les traits biologiques permettant de comprendre l'influence réelle de la dynamique hydro-sédimentaire sur la survie des semis de peupliers noirs. Ces aspects seront abordés dans le sixième chapitre.

De plus, malgré une mortalité sévère (> 90 %) des semis suite aux crues, la localisation de leur survie ainsi que leur nombre peuvent amener à discuter à la fois de l'influence des travaux d'entretien du lit sur le renouvellement des populations de certaines espèces de salicacées ainsi que de comparer cette recolonisation par voie sexuée à la situation précédente (avant travaux de 2012) pour comprendre si la distribution spatiale des ligneux pionniers survivants est dépendante du site et de sa dynamique. Ces derniers points seront abordés dans la synthèse du manuscrit.

Chapiter 5: The survival of *Populus nigra* L. seedlings to alluvial bar dynamics

Wintenberger CL[1], Rodrigues S[1], Bréhéret JG[1], Jugé P[2], Villar M[3].

[1] Université François Rabelais – Tours, E.A. 6293 GéHCO – GéoHydrosystèmes Continentaux, UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37 200 FRANCE.
[2] Université François Rabelais – Tours, CETU ELMIS, 11 quai Danton, 37 500 FRANCE.
[3] INRA Val de Loire Orléans UR 0588, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet Cedex, FRANCE.

Abstract

A field study was carried out to investigate the influence of river bar dynamics on seedlings survival of riparian trees. We specifically analyzed *Populus nigra* L. survival during floods subsequent to their recruitment. The study aims to define (i) the links between bar dynamics during the hydrological cycle and survival of seedlings after recruitment, (ii) the fluvial processes and their relative contribution leading to seedlings mortality, (iii) the threshold values for each process and (iii) the influence of biological factors on survival. We focused our study on a non-migrating mid-channel bar in a lowland sandy-gravel bed river, the Loire River (France).

We studied the bar dynamics before and after seedlings recruitment using frequent bathymetrical (mono- and multi-beam echosoundings), topographical (Terrestrial Laser Scanning), flow velocity (Acoustic Doppler Profiler) and sediment grain size surveys. We connected the bar dynamics during floods to the survival by monitoring vegetation.

The location of recruitment is independent of the bar dynamics but this latter governs the survival potential of one-year seedlings. Four types of fluvial processes inducing seedlings mortality were identified: (i) uprooting by drag force, (ii) uprooting by erosion of sediments, (iii) burying proceeded by drag force and (iv) succession of erosion and burial. Armour layer development constitutes a protection against erosion and uprooting only induced by the drag force effect.

The contribution of each process driving to the seedlings mortality depends on the combination and phasing of scour and fill processes, sediment supply (quantity and grain size), flow velocity and biological traits. Threshold values of each stress endured by seedlings are given. The downstream fining of sandy-gravelly sediments induces a longitudinal succession of these processes presented in a bar-scale model.

Keywords: non-migrating bar, uprooting, burying, riparian vegetation, seedlings

5.2. Introduction

5.2.1. Background

Riparian vegetation sustain water quality and diversity of habitats in fluvial ecosystems and is a key factor of the fluvial pattern evolution (Tal and Paola, 2007 and 2010; Comiti *et al.*, 2011; Gibling and Davies, 2012; Corenblit *et al.*, 2014). Moreover, woody pioneer species, such as *Populus nigra* L. (*Salicaceae*), are identified as engineering species (Jones *et al.*, 1996; Stoffel and Wilford, 2012; Gurnell, 2013) driving biogeomorphological succession (Corenblit *et al.*, 2007).

Human activities (e.g. navigation, flow regulation, channelization, and sediment mining) led to strong modifications of the hydrological and morphological patterns, and thus the fluvial dynamics and biogeomorphological succession. These activities generate riparian forest decline, specifically by the decrease of potential recruitment area, created during the geomorphic phase (Corenblit *et al.*, 2007).

Sexual reproduction of *Populus ssp.* has been studied for long time (Stanton and Villar, 1996), but the success of recruitment needs to match biological cycle and geomorphic succession, detailed in the "recruitment box model" by Mahoney and Rood (1998). The "biogeomorphological life cycle" concept (Corenblit *et al.*, 2013) highlights these complex interactions applied to *P. nigra*. The water table decline pattern (Van Splunder *et al.*, 1996; Mahoney and Rood, 1998; Guilloy-Froget *et al.*, 2002) and the substrates textures, including the associated capillary fringe (Mahoney and Rood, 1991) influence the seedling growth during summer of recruitment. In temperate climatic area, hydric stresses have a lower influence than geomorphic disturbance on seedlings survival (Polzin and Rood, 2006). Thus, the establishment of seedlings depends on flow pattern (Johnson, 2000; Dixon, 2003) and on their ability to resist to the associated geomorphic constraints (Bornette *et al.*, 2008).

The ability of seedlings to withstand the hydro-geomorphic disturbances following their recruitment depends on root and stem growth. The anchorage of seedlings is related to the root biomass and architecture whereas biomass and architecture of the aerial part (e.g. height, diameter, number of branches) determine the area on which the drag force is applied. However, the influence of these biological factors also depends on the dynamics of the colonized morphological units, such as bar or side channel. In other words, the morphological units most suitable for seedling establishment of pioneer riparian trees are also subject to flood disturbances that could induce seedling mortality (Auble and Scott, 1998).

In a temperate area, two constraints processes can apply on seedlings in a gravelly-sand bed river, namely uprooting and burying or combination of both. Edmaier *et al.* (2011) distinguished two uprooting processes.

Type I refers to immediate processes only induced by drag force whereas type II combines local erosion around the plant, decreasing anchorage strength until the drag forces prevail. This suggest potential influence of sediment grain size on the above-mentioned processes, specifically in the case of a gravelly-sand bed rivers, where armour layers formation can protect seedlings from uprooting by Type II.

The study of woody pioneer vegetation dynamics, specifically of the genius *Salicaceae*, was well documented for braided gravel-bed rivers weakly impacted by human activities such as the Tagliamento river in Italy (e.g. Edwards *et al*., 1999; Petts *et al.* 2000; Gurnell *et al.* 2001; Francis and Gurnell 2006; Moggridge and Gurnell, 2009; Bertoldi *et al.*, 2010; Welber *et al.* 2012). Moreover, the influence and management implications of regulation of river flow to promote riparian vegetation dynamics was also extensively studied (e.g. Kalischuk *et al.*, 2001; Cabezas *et al.*, 2008; Burke *et al.*, 2009; Gonzalez *et al.*, 2010b). However, investigations carried out on relatively large regulated lowland sandy-gravel bed rivers subject to fluvial management works performed for flood protection (i.e. mechanical removal of vegetation and topographic lowering of bars) remain rare.

In this context, we propose in this paper to focus on the survival of *P. nigra* seedlings which recruited on a non-migrating bar (Rodrigues *et al.*, 2014) rejuvenated after fluvial management works which constitutes suitable area for recruitment with a better survival potential than migrating bar (Rodrigues *et al. in press*).

Our specific objectives were to (i) connect non-migrating alluvial bar dynamics and survival of *Populus nigra* seedlings during floods occurring after recruitment, (ii) identify the contribution of each fluvial processes (uprooting, sediment erosion, burying) and their phasing leading to seedlings death during floods, (iii) define threshold values of abovementioned processes for seedlings survival and finally (iv) test the influence of biological factors of seedlings (density and height) on their survival.

To answer these questions, a multidisciplinary approach, combining sedimentology, hydrology and *P. nigra* biology has been conducted in an *in situ* experimental study site, on the Loire River (France).

5.3. Material and methods

5.3.1. The study site in the Loire River

The Loire river (France) drains a catchment area of 117 000 km² on a course of 1 012 km in length. In its middle reaches, the river flows through sedimentary rocks of the Paris basin and shows a range of fluvial patterns from single channel (straight or meandering) to anabranches. Floods are caused by storms occurring in the upstream part of the river during winter and spring (Dacharry, 1996; Duband, 1996) and by intense rainfall coming from the Atlantic Ocean.

Human activities such as damming, building of groynes for navigation and intense sediment mining which stopped in 1995 had a strong impact on the evolution of the river pattern. Lateral shifting is also constrained by artificial levees built for flood prevention. As a consequence, a severe incision of the main branch of the river led to exposure of the bedrock, affecting the slope and thus the morphology of the Loire River.

Moreover, associated with a decrease in flooding, side channel and alluvial bars were rapidly colonized by woody vegetation which enhances sediment deposition (Rodrigues *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2007) and reduces habitat diversity and flow capacity during floods. To restore flow capacity and sediment motion, the French governmental agency DREAL plans fluvial management works (FMW). They consist in vegetation cutting and topographical lowering of bars and side channel which provide new potential recruitment area for black poplars.

The study site of Mareau-aux-Prés (Figure 5-1A) is located about 10 km downstream of Orleans (649 km from the source). At the Orleans gauging station, the average discharge of the Loire is 344 $m^3.s^{-1}$, and its 2-year flood discharge is 1,700 $m^3.s^{-1}$.

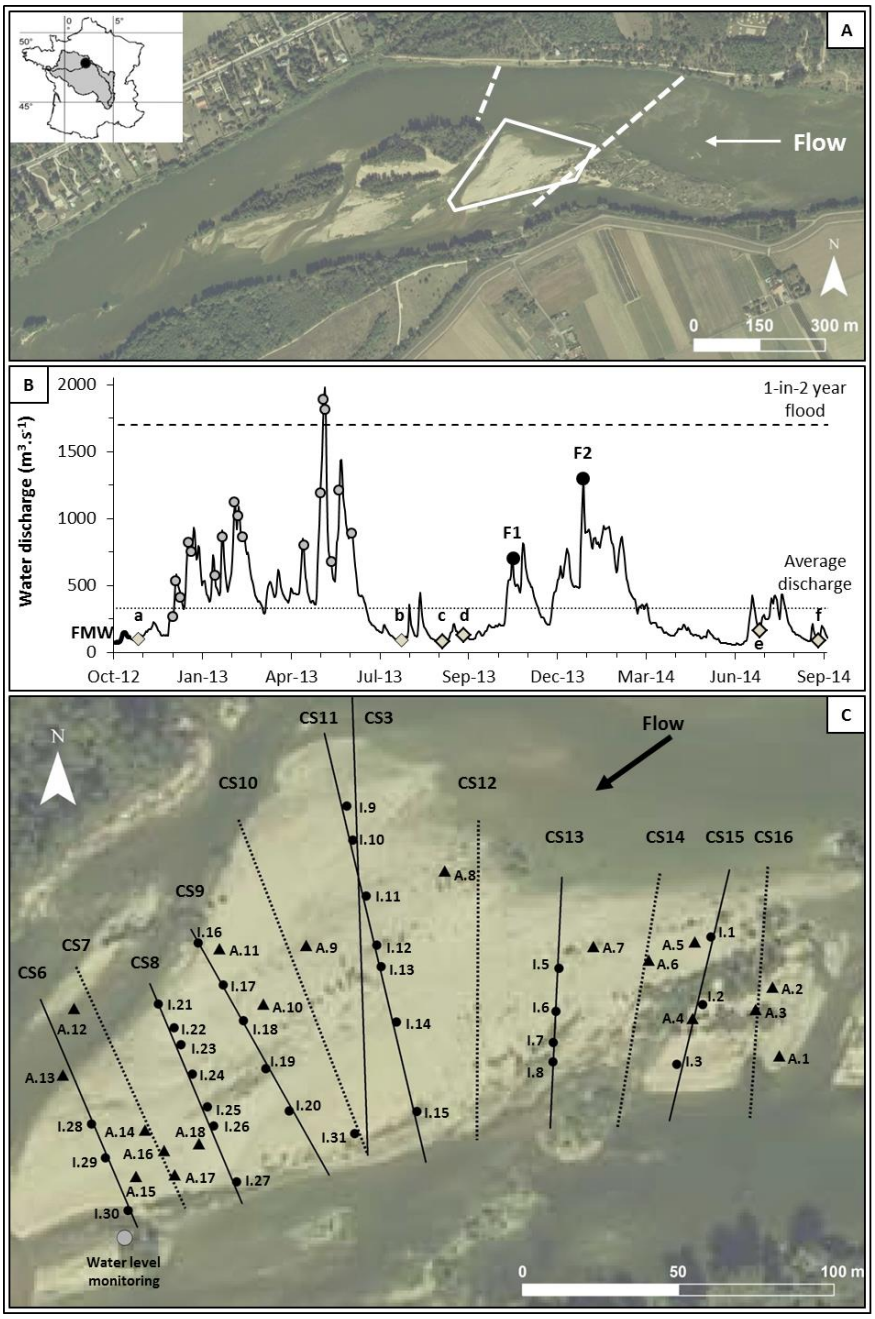


Figure 5-1: (A) Morphological context of the study site characterized by an anabranching fluvial pattern. The non-migrating bar studied is marked with the white line and the dashed lines refer to natural riffles. (B) Discharge variations since the FMW done in 2012 to the survival measurements on *P. nigra* seedlings in 2014. Topographical surveys (a, b and e) and vegetation measurements (c, d, e and f) were done during low flows. Circles correspond to flood measurements (bathymetry, flow velocity, sediment sampling). Between December 2012 and June 2013, measurements characterized the bar dynamics before the recruitment of *P. nigra* (grey circles). Measurements performed at F1 and F2 (dark circles) characterize flood constraints applied on seedlings. (C) CS3 to CS16 represent bathymetrical cross sections. Flow velocity measurements were performed on the unbroken dark lines (CS3, 6, 8, 9, 11 and 15). The black circles refer to initial plots followed since FMW; the triangles to additional plots after recruitment of *P. nigra*.

This site is characterized by an anabranching fluvial pattern composed of a set of islands present for several decades. This reach is characterized by a contraction-expansion area; the channel width varies from 270 m to 430 m, the sinuosity index is of 1.04 and the average slope of 0.00023 $m.m^{-1}$ (Latapie *et al.*, 2014). The artificial levee on the right bank deflects the main channel course towards the south-west while a side channel flows straight near the left bank.

The water surface is locally modified due to two natural bedrock riffles and a non-migrating mid-channel bar, developed between these two riffles and consisting of siliceous sands, gravels, pebbles and cobbles.

The mid-channel bar was colonized by woody pioneer trees in 2004-2005 following previously fluvial management works and evolved rapidly as an island until 2012 (Rodrigues *et al.*, *in press*). In September 2012, fluvial management works (FMW) were carried out. They consisted in cutting down the vegetation, extracting the root systems and lowering the average elevation of the island by exporting the bar sediments into the main channel. After this work, the alluvial bar was characterized by a flat surface of 26,700 m²; no bedforms were present anymore, except for some small ridges and swales mostly oriented in the flow direction. During these operations, sediments were homogenized on the bar to a depth of 0.5 m: no spatial organization of grain size was perceptible after the works. After the FMW, the bar was submerged at the minimum discharge value of 300 $m^3.s^{-1}$ (Figure 5-1B).

5.3.2. Vegetation

In 2013, seedlings recruited on twelve plots of the thirty initial plots of 0.25 m². Eighteen additional plots of 4 m² on average (taking in account the topography of the bar and the success of recruitment) were incorporated to complete the initial network and take into account specific locations where *P. nigra* seedlings germinated (Figure 5-1C). Fifteen of them have a longitudinal shape and three a quadrilateral shape. Along the 15 plots, seedling height was measured every L/32 with L the length of the plot. On the three other plots, the same measurements were applied on each diagonal resulting of a set of height data of 64 seedlings. The density of seedlings was measured on every plots (initial n=12; additional n=18) in September at the end of the growing season (indicated by red-brown apical bud, Rohde *et al.*, 2011). Seedlings recorded and georeferenced during this period are those that were subject to subsequent floods constraints. In July and September 2014, vegetation measurements were done on survival seedlings recruited in 2013.

5.3.3. The bar dynamics

5.3.3.1. Scour chains

Between 2013 and 2014, the active layer during floods was studied using the scour chain method (Hassan, 1990; Laronne *et al.*, 1994; Hassan *et al.*, 1999; Rodrigues *et al.*, 2012). A total of 30 metal-link chains were inserted vertically, anchored into the stream bed, and located along x, y, z axes using the DGPS. The scour chains were located after the floods by digging the channel bed using the DGPS and a metal detector. The scour and fill depths of bed material during floods were determined by measuring the length of the chain above the elbow (maximum scour depth) and the distance between the elbow and the post-flood bed level (subsequent sediment deposition).

5.3.3.2. Bathymetric and topographic survey

Twelve cross-sections were surveyed using a mono-beam echo-sounder (Tritech PA500 - 500 kHz) during floods between 2012 and 2014. The echo-sounder was connected to the DGPS and driven by Hypack 2009 software. Accuracy of the measurements was 0.1 m during navigation. The first year (2012-2013), seventeen surveys were performed for a range of discharges of 264 $m^3.s^{-1}$ to 1890 $m^3.s^{-1}$.

The second year (2013-2014), two floods were surveyed, the first flood (F1 = 700 $m^3.s^{-1}$) occurred after recruitment and the flood of highest intensity (F2 = 1,300 $m^3.s^{-1}$) (Figure 5-1B). Topographic surveys were conducted at low flow stages in 2012 and after fluvial management work in 2013. In 2012, topographic measurements were performed using the DGPS. An average of six points per square meter was recorded to provide an appropriate representation of the slope breaks on the bar. In 2013, a topographic survey was performed using a terrestrial laser scanner (TLS) Leica HDS 3,000 (800 points on average per square meter).

Collected data were integrated in a Geographic Information System (GIS) using the software ArcGis 10 (ESRI). A Digital Elevation Model (DEM) was obtained using the triangulated irregular network of the ArcToolBox. In 2014, the elevation of the vegetation plots was recorded with the DGPS.

5.3.3.3. Grain size analyses

On the 30 initial plots, surface sediments (0.1-0.2 m) were sampled at the end of the low flow periods of 2012 (after FMW) and 2013 (recruitment year). Sediment samples were analysed by dry sieving using a vibratory sieve shaker (*Retsch* 3D - AS450) and the fraction finer than 63 µm (negligible in the river bed of the Loire, [Macaire *et al.*, 2013]) was excluded. The D_{50} and D_{90} were obtained using the Gradistat 4.0 spreadsheet (Blott and Pye, 2000). The D_{50} is the median diameter grain size of the sediment and the D_{90} the diameter for which 90 % of grain size of the sediment are smaller.

5.3.3.4. Hydrology and hydraulics

Water level was obtained using the differential of pressure measured between an emerged probe (Baro) and an immerged probe (Diver) located in a piezometer (Figure 5-1C) with an accuracy of 0.005 m and on a time step of 30 minutes.

The water level was converted in meter above sea level to be compared with the topographical surveys.

Flow velocities were acquired using a Riversurveyor M9 ADP (Sontek), which has two sets of four profiling beams (at 3 MHz and at 1 MHz) connected to the DGPS over seven of the twelve cross-sections (Figure 5-1C). On each cross-section surveyed four successive tracks were recorded at a boat speed of approximately 1 $m.s^{-1}$.

The same materials and method applied by Claude *et al.* (2014) was used to obtain the mean flow velocity and the bottom velocity located near the bed. A flow velocity value on each plot was obtained using the triangulation method of ArcGis 10.

The drag force applied on seedlings was considered proportional to the square of flow velocity based on the following equation:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A \qquad (5\text{-}1)$$

with F_d the drag force (N), ρ water density ($kg.m^{-3}$), v mean flow velocity ($m.s^{-1}$), C_D the dimensionless drag coefficient taken here as a constant and A the transverse area (m^2). Since *P. nigra* seedlings recruited during the same period we considered that the C_d was the same for all of them. In this paper the drag force refers to flow stresses applied on seedlings and its variability is approximated by the square of flow velocity.

5.4. Results

5.4.1. Bar dynamics before recruitment

The front and the edges of the non-migrating bar are highly mobile during floods. These parts of the bar delimitates a spreading area (Figure 5-2A).

In contrast, the center and the upstream part of the bar remained relatively stable during floods (Figure 5-2A). On initial plots, the erosion doesn't exceed 0.45 m in the fixed area and 0.9 m in the spreading area. The front and bar edges are mainly composed of mobile sand during floods (spreading area in Figure 5-2A) whereas and the stable area is mainly composed of coarser sediments (fixed area in Figure 5-2A).

During floods, flow velocity is higher close to the main channel (Figure 5-2A and 2B for the cross section CS3) and increases with the discharge (Figure 5-2B). Upstream, the presence of obstacles (such as islands, vegetation) leads to the zones of low and high flow velocities (CS15, CS13, CS3 and CS11). Downstream, spatial distribution of flow velocity is more homogeneous (CS9, CS8, CS6).

During floods, the erosion prevails over the bar during the rising stage of flood (Figure 5-2C phase 1). The deposition follows the erosion (Figure 5-2C phase 2) and depends on sediment supplied from the main channel. For low intensity of flood (< 1,200 $m^3.s^{-1}$), sediment supply is delivered to the bar after the peak discharge whereas for higher intensity of flood, large quantities of sediments arrive from the main channel before the peak discharge.

At the end of the falling stage of flood, sediments deposited previously are reworked contributing to the bar spreading (Figure 5-2C phase 3). At the emersion of the bar, bar edges are eroded laterally by surrounding channels whereas bare sediments on the top of the bar constitute the potential recruitment area (Figure 5-2C phase 4).

This work highlights the succession of geomorphic processes during floods and the constraints potentially applied on seedlings after their recruitment. During the rising flood stage, when erosion dominates (Figure 5-2C phase 1), seedlings could be potentially vulnerable to uprooting by local scouring or drag force referring in Types 1 and 2 defined by Edmaier *et al.* (2011).

The burying during floods, associated with significant sediment supply from the main channel (Figure 5-2C phase 2), could limit the subsequent erosion of the substrate. In case of deposition occurring before the peak discharge, burying of seedlings can protect them against uprooting by the drag force. The reworking processes at the end of the falling stage of flood (Figure 5-2B phase 3) can limit the burying depth for seedlings located on the bar top.

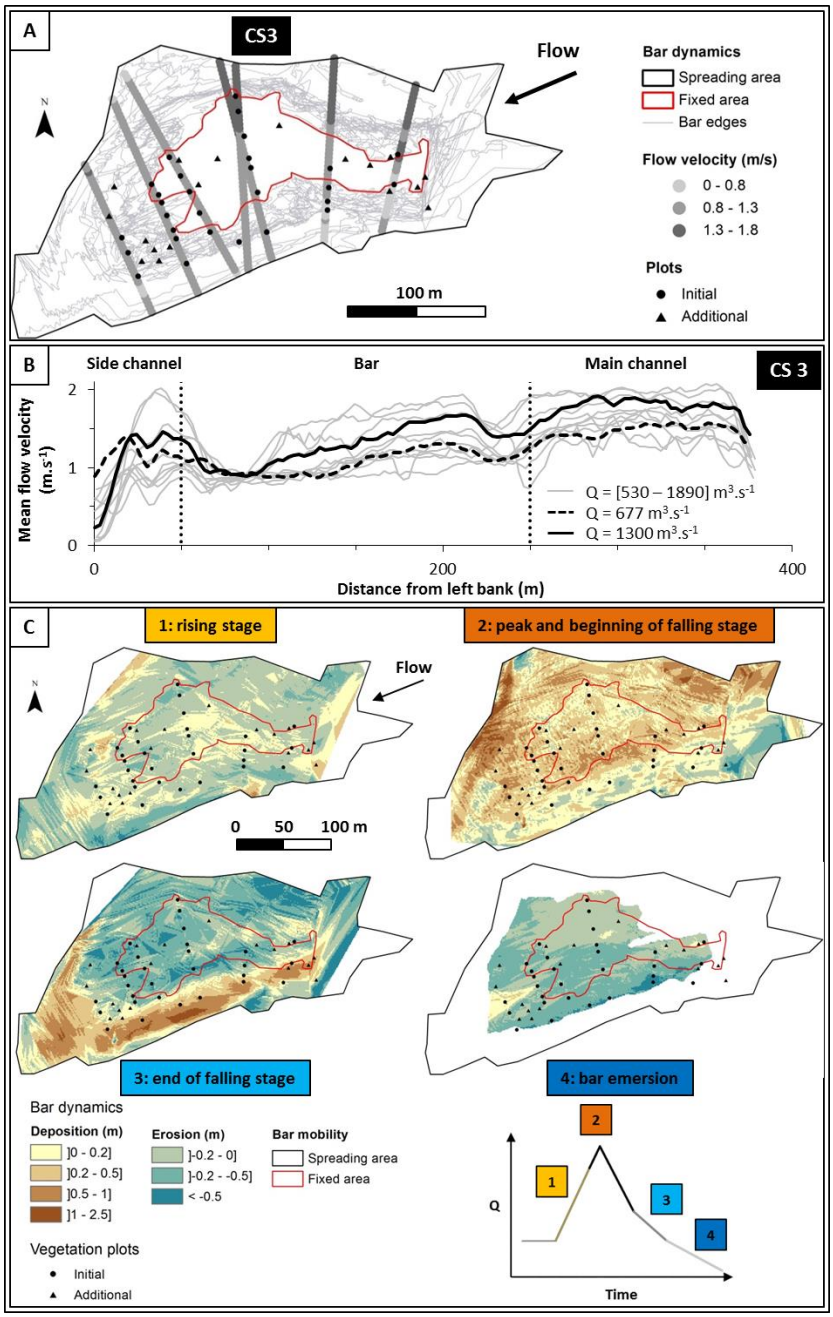


Figure 5-2: (A) Planform evolution during floods of the non-migrating bar of Mareau-aux-Prés. Bar edges are characterized by the isoline 84.2 m. Note the successive elongation and spreading of the bar during floods and the presence of a fixed area delimited in red. Flow velocities on the bar are given for a discharge of 1210 $m^3.s^{-1}$ at Orléans gauging station. (B) Flow velocity for discharge values ranging from 530 $m^3.s^{-1}$ to 1890 $m^3.s^{-1}$ on cross-section 3 (see Figure 5-1 for location). Flow velocity associated with discharge values of 677 $m^3.s^{-1}$ and 1300 $m^3.s^{-1}$ (close to floods F1 and F2) are mentioned respectively in dashed and bold lines. (C) Morphological bar dynamics as a function of the flood stages: (1) dominant erosion during the rising limb of the hydrograph, (2) dominant subsequent deposition close to the peak discharge and at the beginning of the falling stage, (3) sediment reworking (erosion) on the bar top in benefit of front lengthening and spreading toward side channel, (4) erosion of bar edges associated with the emergence of the bar.

5.4.2. Recruitment environment

In June 2013, the bar emerged and the average elevation is of 84.5 m above sea level (a.s.l.) with a minimum value of 83.9 m (a.s.l.) and a maximum value of 85.2 m (a.s.l.) (Figure 5-3A). The bar is mainly composed of sands, gravels and pebbles. Sandy sediments are provided by the main channel during flood events whereas coarser particles come from the erosion of the upstream natural riffle and are weakly erodable for the range of discharges surveyed. These latter sediments are located upstream and can constitute armour layers (Figure 5-3). The median part of the bar is composed of a sandy-gravel mixture and the downstream part mainly of sands. Three substrates are identified from the cumulative curves of sediment grain size (Figure 5-3B):

- Fine sediments mainly composed of coarse sand at elevations ranging between 83.9 m (a.s.l.) and 84.7 m (a.s.l.) and mostly located downstream (Figure 5-3A),
- Medium size sediments are sand mixed with gravels and pebbles at elevations ranging between 84 m (a.s.l.) and 84.6 m (a.s.l.) in the median part and in the southern parts of the bar (Figure 5-3A),
- Coarse sediments mainly composed of gravel and pebbles at elevations ranging between 84 m (a.s.l.) and 84.5 m (a.s.l.) are principally located upstream (Figure 5-3A).

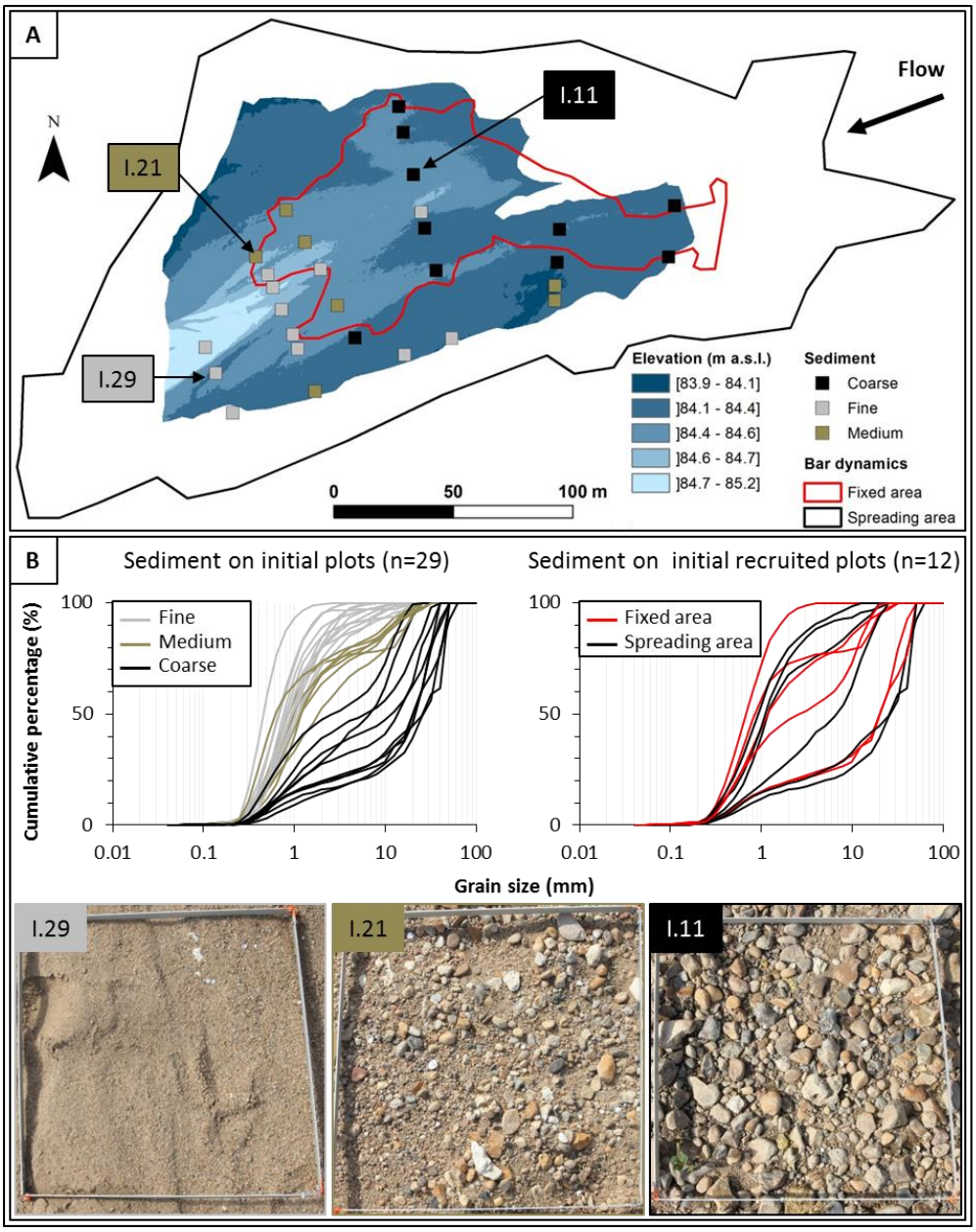


Figure 5-3: (A) Elevation and sediment grain size distributions on the bar during the recruitment in summer 2013. (B) Three sediment types were identified using the cumulative curves of grain size and *P. nigra* recruited on the three types in both fixed and spreading areas. Photographs correspond to the three sediment types present on the bar surface in plots of 0.25 m^2 (see A for location).

5.4.3. Vegetation establishment and survival

The plots of successful recruitment in 2013 are those emerged at the end of the falling stage of flood (water level decline ranging between 0.04 and 0.02 m.day^{-1}). The minimum elevation of the water level was 83.7 m (a.s.l.) and the plots of successful recruitment in 2013 have elevations ranging between 84.1 m (a.s.l.) and 84.6 m (a.s.l.) (Figure 5-4A). Thus, the maximum distance between water level and each plot varies between 0.4 and 0.9 m.

Two submersion events occurred before the vegetation measurements in August 2013. The density of recruitment 2013 is independent of the emersion duration during the growth period (Figure 5-4B).

The average height of seedlings per plot varies between 0.02 m and 0.05 m with no significant relationship between heights and the emersion duration of plots during the growing season (Figure 5-4B).

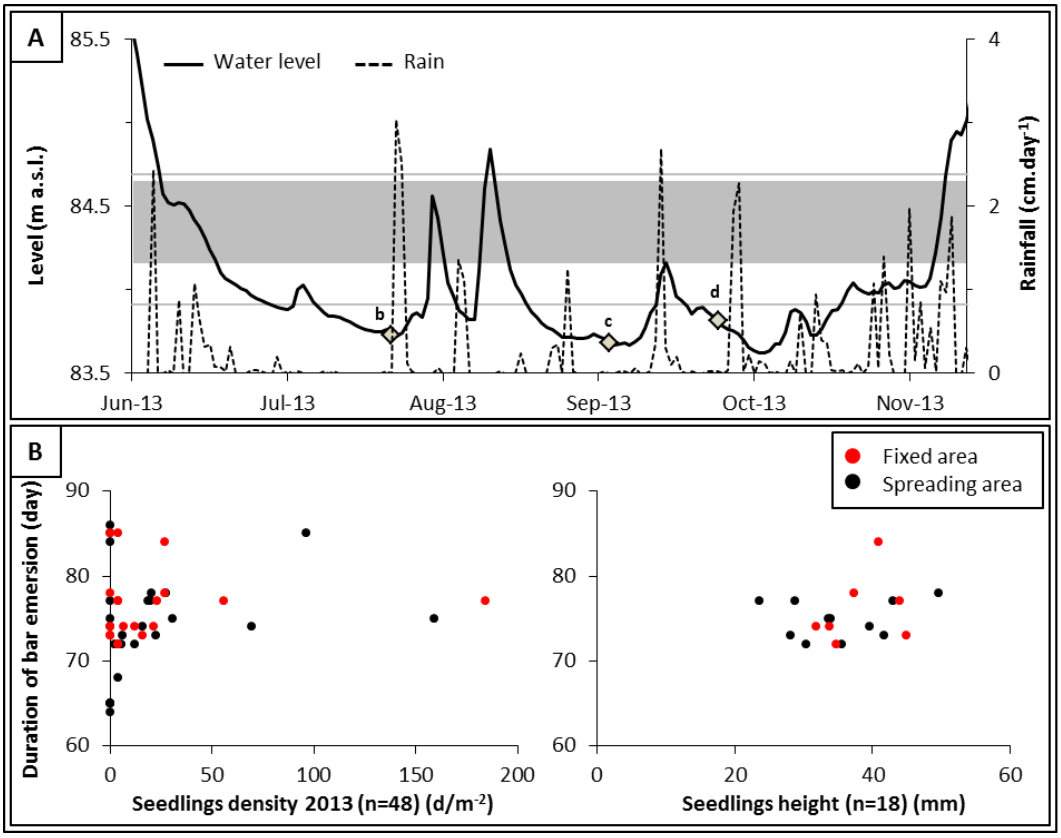


Figure 5-4: (A) Elevation of the water level obtained using a Diver probe during the recruitment and growth season for *P. nigra* in 2013 (see Figure 5-1 for location). The rainfall data of the meteorological station of Orléans-Bricy (Code: 07249, LFOJ are available at http://asso.infoclimat.fr/). Grey lines refer to the extreme elevation of the bar; the shaded area corresponds to the range of elevation of plots colonized by *P. nigra* seedlings. Topographic (b) and vegetation (c and d) surveys corresponds to grey diamonds. (B) Seedlings density and height, observed during c and d surveys, are given in regards to the bar emersion duration from June to November.

In 2013, the successful recruitment at the end of the growing season was measured for *P. nigra* seedlings on thirty plots (Figure 5-5A). Sixteen are located in the spreading area and fourteen in the fixed area without substrate distinction (Figure 5-3B). Density of successful recruitment varies from 2 to 184 seedlings per square meter (Figure 5-5A) and the maximum density in the survival plots is 20 seedlings per square meter (Figure 5-5B). But most of the plots have a similar density in 2014 which does not exceed 7 seedlings per square meter.

Total mortality was measured on more than the half of plots (9 plots) in the spreading area against one third (5 plots) in the fixed area (Figure 5-5B-C). The mortality is incomplete on six plots both in the spreading and in the fixed area (Figure 5-5C). A complete survival is observed on one plot in the spreading area and on three plots in the fixed area (Figure 5-5C). The higher survival rates in 2014 are observed on plots with a low density of recruitment in 2013. However, no significant relation between the density during recruitment and survival has been measured in our site.

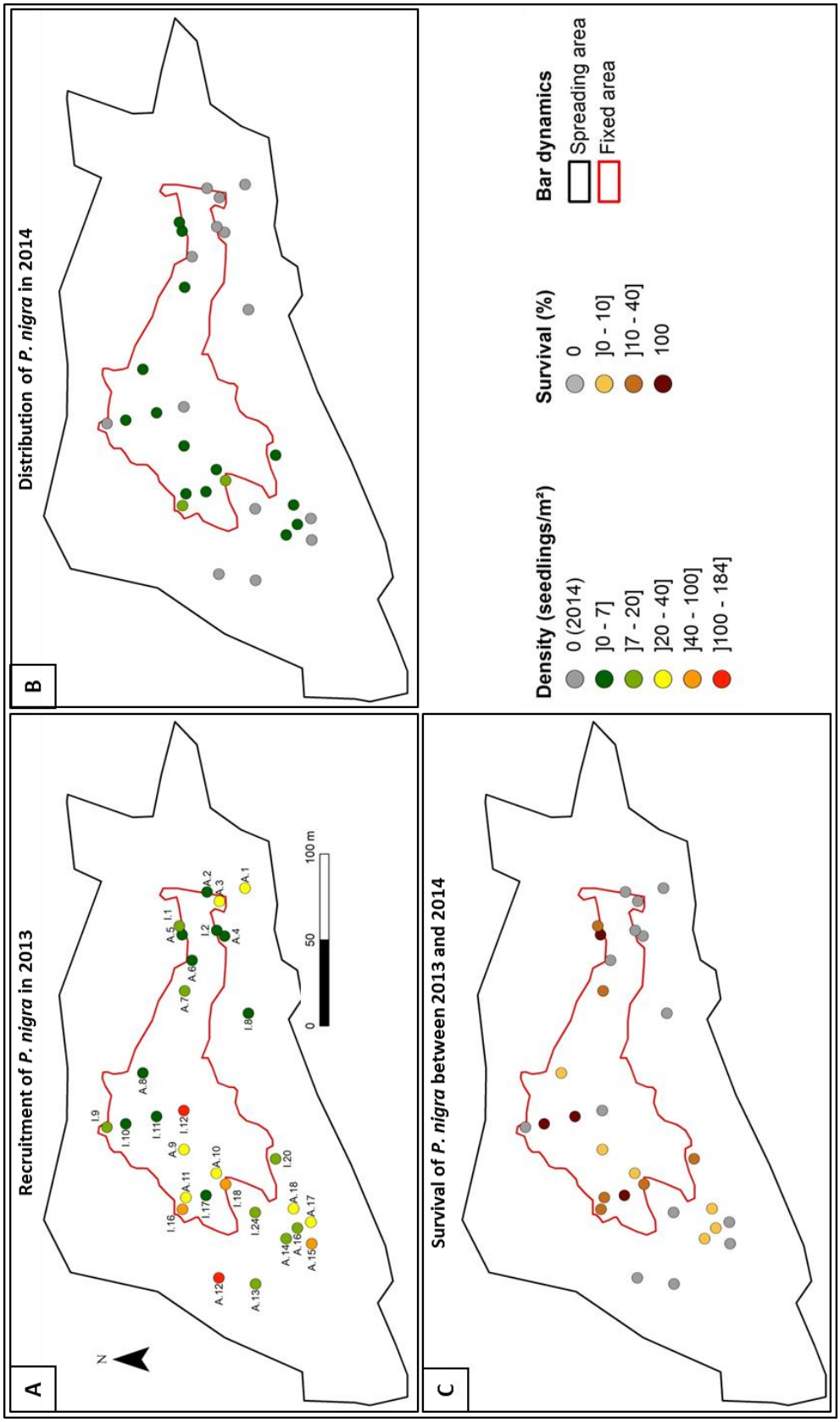


Figure 5-5: Density of recruitment in 2013 (A), distribution and density of surviving seedlings in 2014 (B) and the corresponding survival rate (C).

Whereas the initial successful recruitment is independent of the sediment texture, the survival rates on the spreading area are higher for seedlings recruited on coarse sediment associated with armour layer formation than those recruited on finer sediment (Figure 5-6A). On the fixed area, the survival rate increases with the grain diameter except for the plot I.9 (Figure 5-6). Sediment textures associated with mortality on the spreading area are associated with incomplete and complete survival on the fixed area.

The heights of seedlings vary between 0.01 m and 0.1 m and the height variability is very different between the plots (Figure 5-6B). On the fixed area, the survival rate seems to increase with the height and variability but the limitation of low number of plots prevents any definitive conclusion. In the spreading area, no trend emerges from the comparison between seedlings height in 2013 and the survival rate the following year. In 2014, the elevation of plots, where seedlings recruited in 2013, varies between 83.9 m (a.s.l.) and 84.8 m (a.s.l.).

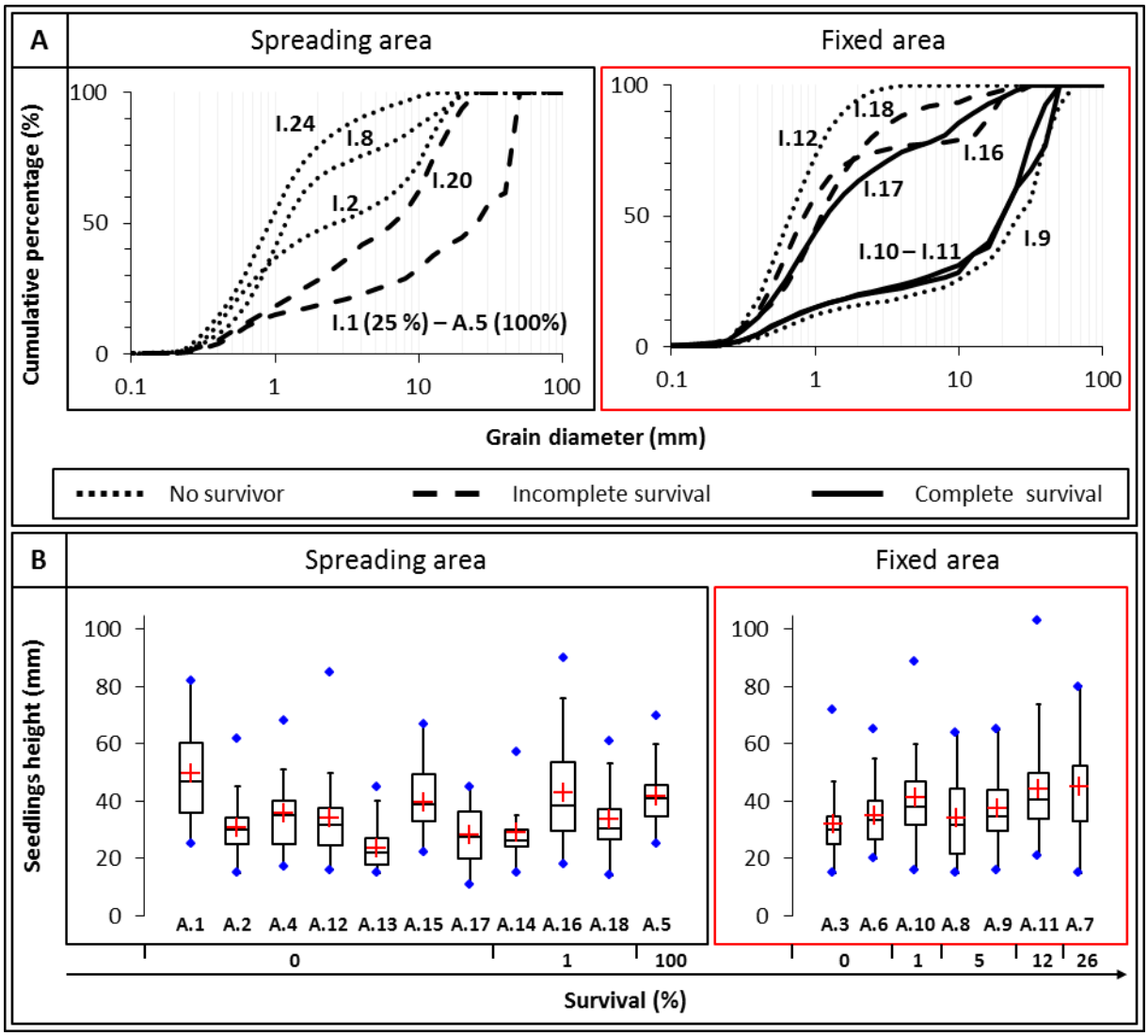


Figure 5-6: Cumulative curves of sediment grain size on both spreading and fixed areas (A). Continuous, dashed or dotted lines, refer respectively to complete, incomplete and no survival states. In the spreading area, the A.5 plot is associated with the cumulative curve of sediments sampled on I.1. These plots have the same sediment texture and are very close (5 m) but not the same survival rate (given in brackets) (B). Seedlings height as a function of survival rate in the spreading and fixed areas. Number of measurements used to construct box plots is 64 for plots A.9, A.10 and A.11 and 32 for the others. For each part of the bar (fixed or spreading area), box plots are sorted from the lowest to the highest survival rate.

5.4.4. Floods constraints on seedlings

5.4.4.1. Intensity and succession of erosion and deposition processes

At the beginning of submersion during flood 1 (F1), the erosion prevailed on the bar independently of the initial elevation, with similar intensity on all plots except for one plot on the spreading area (Figure 5-7A). During the emersion of the bar after the flood 2 (F2), sediment deposition prevailed on the whole bar with higher intensity in the spreading area. However, higher elevation plots of the fixed area were subject to erosion due to post-flood sediment reworking (Figure 5-7C). Between the two floods F1 and F2, the erosion prevailed on the spreading area and deposition on the fixed area (Figure 5-7B). Between 2013 and 2014, the lowering of elevation occurred more often, and with higher intensity, on the plots of the spreading area (Figure 5-7D).

Sediment deposition occurred in many cases on the plots of the fixed area, but thickness of sediment deposited was higher on the spreading area (Figure 5-7D). So, the two areas have an opposite morphological behavior during floods although the same trend is observed at the submersion and emersion phases after floods period (Figure 5-7).

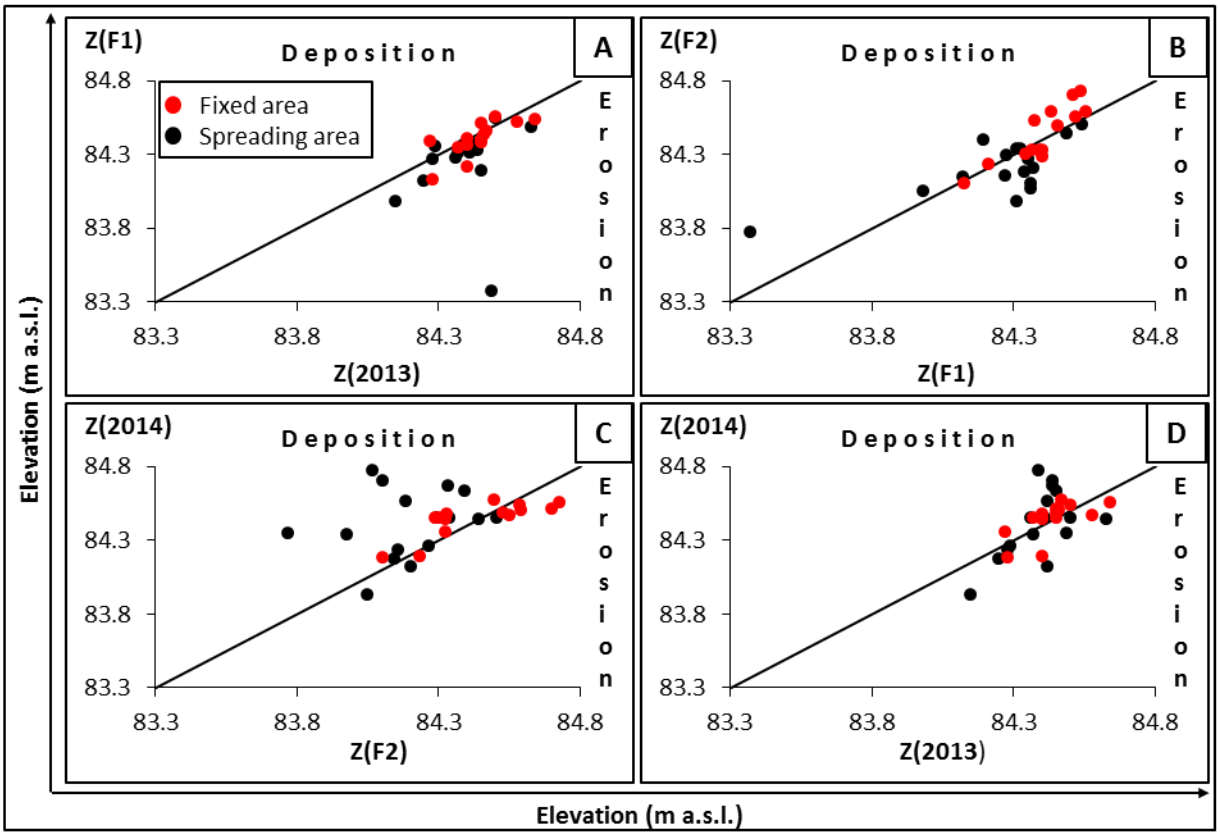


Figure 5-7: Variations of elevation of the plots with *P. nigra* seedlings between the initial elevation and the flood F1 (A), between the flood F1 and the flood F2 (B), between the flood F2 and final elevation after emersion of the bar in summer 2014 (C). Variation in elevation between the initial (2013) and final (2014) elevation (D). Black points refer to the spreading area and red points to the fixed area. Points located above the line reveal deposition process and those under the line erosion. The initial elevations (2013) were extracted from the DEM obtained using the TLS point cloud, the elevations during floods from the DEM based on bathymetric surveys and final elevations were recorded with the DGPS.

In the fixed area, seedlings survived to maximal erosion of 0.1 m (Figure 5-8). In case of no erosion of the germination substrate, final burying heights are of few centimeters and do not exceed 0.1 m. In case of erosion before deposition, these subsequent deposits vary between 0.1 m and 0.2 m. However, the increase of elevation in 2014, after the successive erosion-deposition process, is of 0.1 m in maximum compared to the elevation in 2013. In this range of magnitude, erosion has a strongest influence on the seedling survival than burying. For the similar range of erosion-deposition rate, morphological control on the seedling survival is not predominant.

In the spreading area, the germination substrate was always eroded. When seedlings survived, the survival rate increased as the height of scoured and/or deposited sediment decreased. The survival rates, ranging from 25 % to 100 % are associated with erosion lower than 0.1 m and subsequent burying from 0.1 m to 0.2 m.

Survival rates are low (1 %) in case of erosion ranging between 0.1 m and 0.3 m, associated with subsequent burying of 0.3-0.6 m. On plots I.18, the erosion was equal to 0.2 m, similar to the previous case, but no subsequent deposition occurred and the associated survival rate was higher (13 %). Five plots (A.1, A.12, A.13, A.15 and A.17) without survivors present high values of scour and/or fill height of sediments. Erosion of the germination substrate on these plots ranged from 0.3 m to 1.1 m and was followed by sediment deposition between 0.4 m and 1 m on four of them. The other plots without survivors were eroded of 0.1 m compared to the elevation of recruitment. Then, most of them were buried under a deposition height lower than 0.2 m.

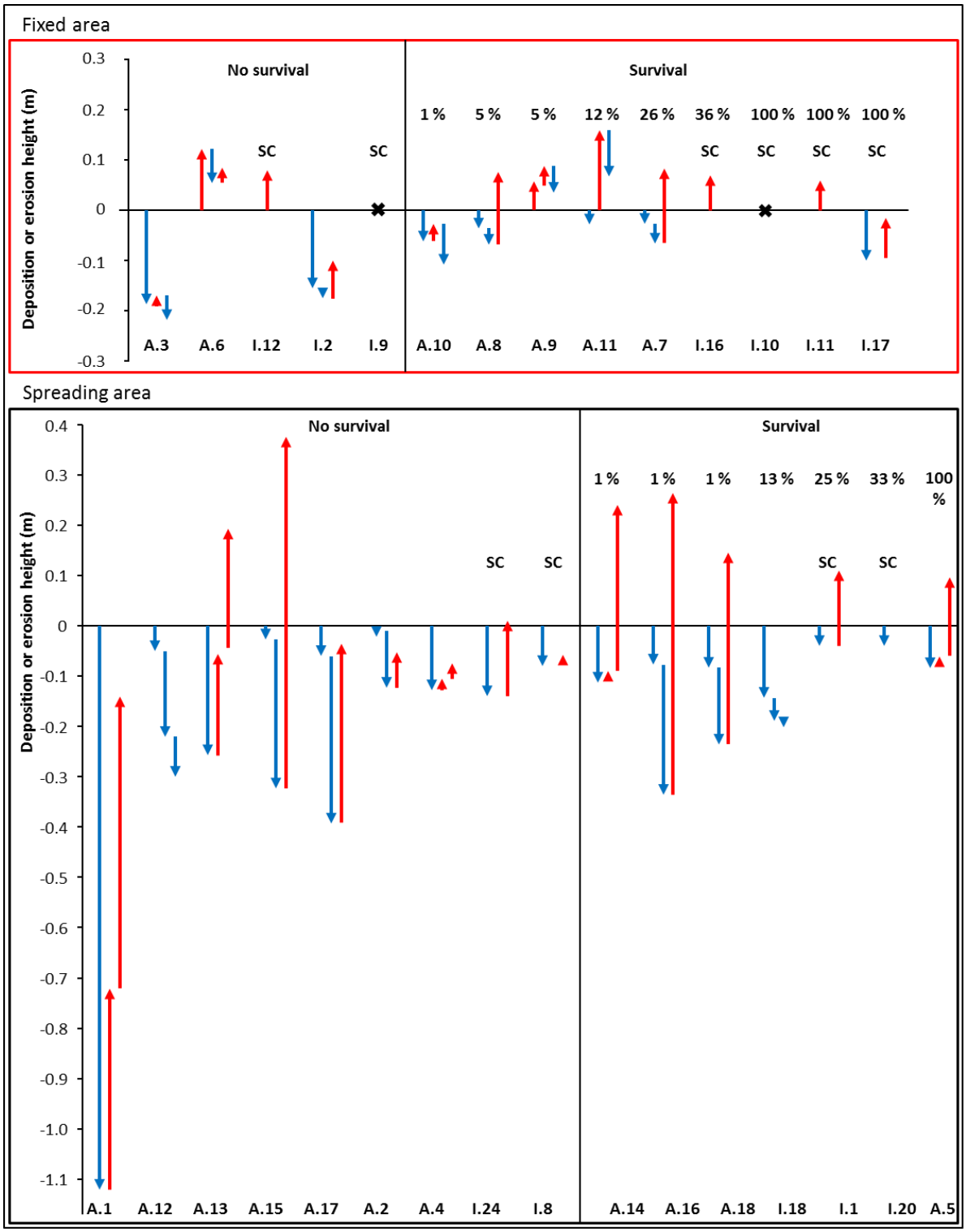


Figure 5-8: Phasing of erosion and deposition processes during floods on each vegetated plots. The plots with SC written on top correspond to scours chains results with two centimeters of accuracy. The black crosses on two of them (I.9 and I.10) indicate the absence of sediment movement, for the others only one arrow indicates an univocal process (erosion or deposition). Plots without SC were documented using bathymetric and topographic surveys. The three successive arrows refer respectively to elevation variation between 2013-F1, F1-F2 and F2-2014. Low values should be taken with caution because of the accuracy of the measurements (0.1 m).

5.4.4.2. Flow constraints

The maximum values of square velocity were of 1.7 $(m.s^{-1})^2$ during flood F1 and 2.4 $(m.s^{-1})^2$ during flood F2 (Figure 5-9). The higher constraints associated with a complete survival is of 2.3 $(m.s^{-1})^2$. Flow velocity was higher during the flood F2, although some plots located in the upstream do not follow this trend because local factors (shelter areas). The maximal increase between the two floods is of 1.4 $(m.s^{-1})^2$. Plots I.12 and A.9 are buried from the peak discharge of the flood F1 to the emergence of the bar (Figure 5-8) suggesting that maximal constraints applied on these plots are lower than observed at the peak discharge of F1 (Figure 5-9a).

Four plots were buried during the peak discharge of flood F2 suggesting that the applied constraints on these plots are ranged between constraints measured during F1 and F2 (Figure 5-9) even if the difference between F1 and F2 is low. As for other parameters, no trend emerges between the drag force, assimilated to the square flow velocity, and the survival rate.

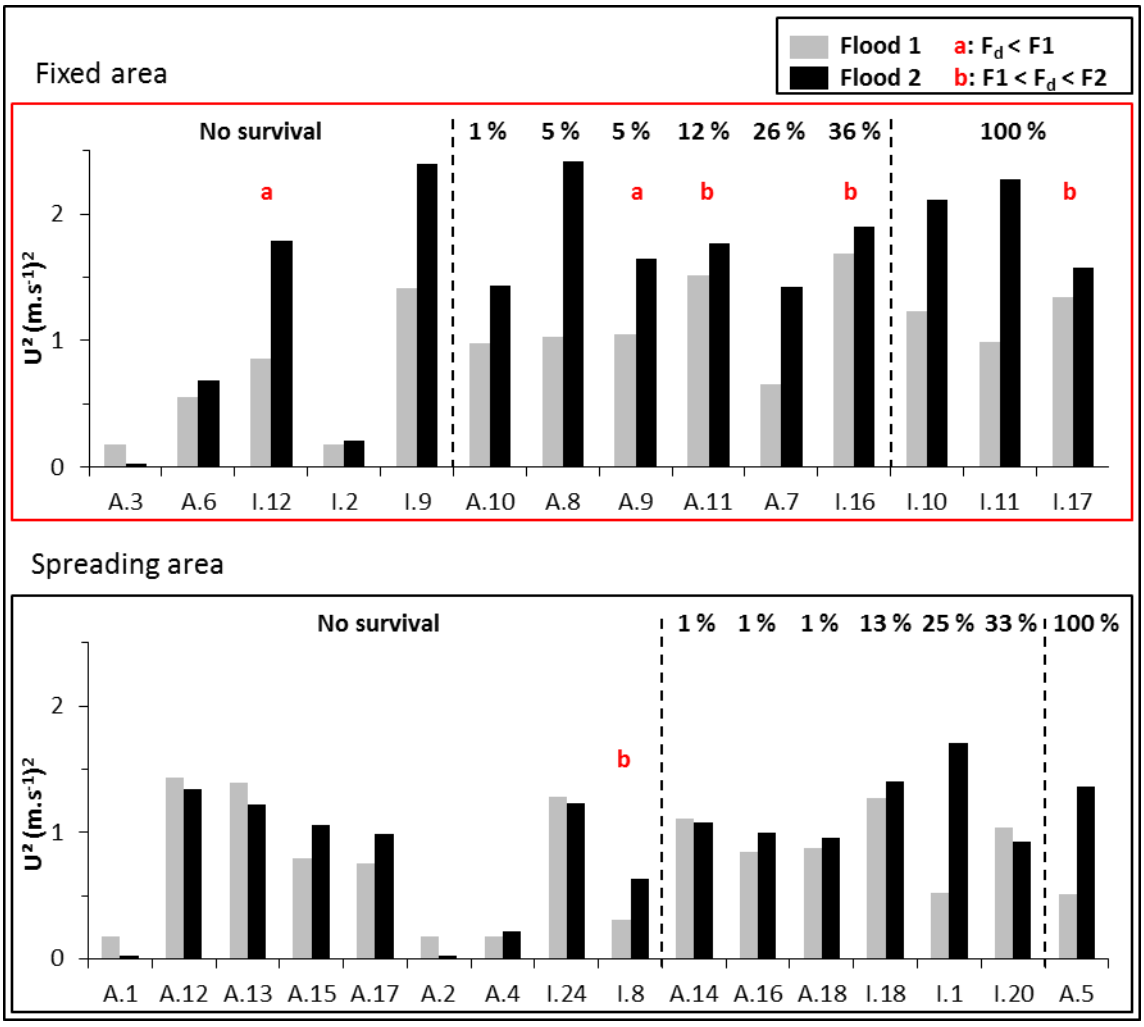


Figure 5-9: Square velocity during flood peaks F1 and F2 as a function of survival rates on each vegetated plots. The square of flow velocity, assumed to be representative of the drag force variation applied on seedlings, is given for each plot as a function of survival. The dotted lines separate plots without survival, with plots of incomplete survival and plots of complete survival. The letter "a" refers to the plots for which a deposit over the initial elevation is observed that persists until the emergence of the bar. Consequently, the drag force applied was lower than the value observed at the peak discharge of F1. The letter "b" refers to plots with deposition at the peak discharge of F2. Consequently, the applied force ranged between the values observed at the peaks discharge of F1 and F2.

5.5. Discussion

5.5.1. Influence of the non-migrating bar dynamics on seedling survival

The spatial distribution of the seedlings in september 2013 reflects the "recruitment box" proposed by Mahoney and Rood (1998). According to this concept, no successful recruitment of *P. nigra* was observed on the extreme elevations on the bar. The successful recruitment of *P. nigra* is located on plots associated with favorable flow elevation decline (Barsoum, 2002 ; Segelquist *et al.*, 1993 ; Mahoney and Rood, 1991 and 1992 ; McBride and Strahan, 1984). Discharge variation and rainfall during the summer of the recruitment (2013) could have improved seedling survival (Guilloy-Froget *et al.*, 2002) but also could have affected seedling growth (Segelquist *et al.*, 1993) and specifically the root system (Van Splunder *et al.*, 1996; Gonzalez *et al.*, 2010a).

Combined with the late emergence of the bar, these hydrological conditions could explain the low heights of the seedlings at the end of growth season. The *P. nigra* seedling survival is not related to the elevation of the germination plot (see section 3.2), probably because of the low magnitude of elevations which remain close to the base flow. These results suggest a survival distribution mostly driven by the bar dynamics (scour and fill processes, sediment grain size). For a specific location, the bar dynamics influences (i) the potential substrate of recruitment and (ii) the potential of erosion-deposition occurring during floods post-recruitment. The non-migrating bar under consideration is characterized by two distinct areas regarding to the sediment dynamics: the spreading area reveals strong morphological changes (high values of erosion-deposition height) whereas the fixed area, although characterized by the highest flow velocity, is composed of coarse sediments promoting the stability during floods. Consequently, morphological changes in the fixed area are lower than in the spreading area. The conceptual model of this bar dynamics is close to the model proposed by Bridge (2003): erosion of bar edges and deposition on the top of the bar during the rising stage of flood; erosion on the top of the bar in benefit to the lateral spreading during the falling stage.

On this non-migrating mid-channel bar, the survival rate of *P. nigra* seedlings is higher in the fixed area rather than in the spreading area. A first explanatory factor of seedling survival pattern is the distinct morphological and sedimentary functioning of these two areas during floods, independent of the initial elevation. These results suggest a role of the bar type (migrating/non-migrating) on seedlings survival.

In the case of migrating bars, although the conditions for seedlings recruitment are comparable, the survival would probably be less effective because no fixed areas are present.

The second parameter influencing significantly the survival of seedlings is the grain size distribution. In both fixed and spreading areas, the survival rate of seedling tends to increase with grain size. The downstream fining on bars (Folk and Ward, 1957; Lunt and Bridge, 2004; Pyrce and Ashmore, 2005) could be a discriminating factor of the *P. nigra* seedling survival recruited on alluvial bars. On the fixed area, larger variability and maximum height of the seedling within the seedling lot would provide higher survival rate the year of recruitment, independently of flood stresses (drag force, erosion, burying) applied on them. However, this trend requires to be tested in the future on larger seedling samples to conclude on this point.

5.5.2. Influence of type processes leading to seedlings death

At the local scale, seedlings can be affected by three process, (i) uprooting by the drag force (Type I, Edmaier *et al.*, 2011), (ii) erosion of the recruitment surface associated with the drag force (Type II, Edmaier *et al.*, 2011) and (iii) burial. The successive of floods endured by seedlings lead to a combination of the three above-mentioned processes. We propose to complete the Edmaier Types (focused on vegetation uprooting), by adding burial (Type III) and combination of erosion/deposition (Type IV). In this way, four causes of mortality during floods can be distinguished on a bar after recruitment in a sandy-gravel lowland river. Their relative importance on seedlings mortality can be estimated at the bar scale (Table 5-1):

- Type I: uprooting by drag force
- Type II: uprooting by erosion
- Type III: burying preceded by drag force
- Type IV: succession of erosion followed by burial

Table 5-1: Relative importance of each process leading to seedling mortality on a river bar. Values correspond to the percentage of seedlings mortality by each process compared to the mortality on the entire bar, the number in parentheses indicates the number of plots concerned by the process.

Process	Fixed area	Spreading area	Entire bar
Type I	0.1 (2)	0	0.1 (2)
Type II	12.7 (2)	15.3 (3)	28 (5)
Type III	13.6 (5)	0	13.6 (5)
Type IV	15.9 (5)	34.7 (13)	50.6 (18)
Total	42.3 (14)	50 (18)	92.3 (30)

The association of these four processes leads to a mortality of 92.3 % of *P. nigra* seedlings by floods during the first year of establishment. This high mortality rate is usual for riparian young seedlings (Johnson, 2000). Additionally to the identification of mortality process on a non-migrating bar, a range of threshold values tolerated by seedlings for each process have been measured (Table 5-2).

Table 5-2: Highest values of each process for which the seedling survival was measured. The asterisks refer to scour chains measurements with 0.02 m accuracy. For Type IV in the fixed area, the maximal erosion and deposition tolerated by seedlings do not refer to the same plot.

Processes	Process	Units	Fixed area	Spreading area
Type I	Uprooting by drag force	$m^2.s^{-2}$	2.1	no plot
Type II	Erosion	m	-0.1	-0.2
Type III	Burying	m	0.07*	no plot
Type IV	Erosion	m	-0.1*	-0.35
	Burying	m	0.15	0.6

Type I: Uprooting by drag force

In case of no erosion of the germination substrate, the dominant process is the uprooting by the drag force directly applied on seedlings. On the non-migrating mid-channel bar studied, the drag force, assimilated here to the square of velocity, is responsible of 0.1 % of the seedlings mortality (Table 5-1). The seedlings concerned were located in the fixed zone close to the main channel where armour layers are developing. Although this area corresponds to the highest flow velocity values recorded on the bar, a complete survival of small seedlings could sometime be observed. In this specific area, the range of magnitude between the height of seedlings and the diameter of particles is similar; we assume that this could have led to a protective effect of seedlings by flow induced offered by the large particles. However, most of time, type I plots have a complete mortality or a complete survival although the physical conditions are similar (initial elevation, grain size, flow velocity).

This suggests a significant effect of biological factors (see next sections), such as the ratio between aerial parts (affected by drag force) and the root anchorage and seedling flexibility. The intra species variability between seedling growth recruited on plots with obviously similar physical conditions should also be taken under consideration.

The low mortality rates associated with type I observed on the Loire River could be specific of lowland sandy-gravelly rivers characterized by high values of the Shields mobility parameter due to skin friction (high sediment mobility) and by the development of armour layers.

Type II: Erosion of substrate

Seedling mortality is caused by erosion of the germination substrate associated with the drag force when no subsequent deposition occurs on plots affected by erosion during floods. About 28 % of seedlings measured on the bar died because of this process mainly located on the spreading zone (Table 5-1). Uprooting by erosion depends on the energy balance between size/density of sediment grains and flow velocity illustrated by the Shields mobility parameter skin friction (θ'). In case of erosion with a range of magnitude close to the root depth development, the efficiency of this process will also depend on root anchorage characteristics (depth/structure).

Type III: Burying

When the intensity of uprooting process by type I is lower than the seedling anchorage, and if bedload sediments are supplied from upstream, seedlings can be buried during floods. About 13.6 % of seedlings died after burying (Table 5-1) on the bar investigated.

The threshold conditions of plant resistance to burial stresses depend on the species, the age of plant (Levine and Stromberg, 2001), the occurrence of burial in the vegetative cycle (Johnson, 1994) and the burial modes (depth, frequency). In tidal environment, (Maun, 1998) has shown that the survival of species decreases with the increasing of burial depth in a single event and increases with plant age. The strong ability of riparian species to survive to burying stresses is proved (Gurnell, 2013) but the lack of knowledge about the ability of *Salicaceae* seedlings to survive to this stress constitute an important issue in the understanding of species colonization strategy. More specifically, young shoots can initiate from buried young seedlings (Figure 5-10). This ability could modulate the observed survival rates and also the genetic diversity initially established during the seedlings recruitment. These original data also brings additional knowledge about this engineer species ability to promote the biogeomorphological phase (Corenblit *et al.*, 2007) that leads to significant fluvial morphological changes (Rodrigues *et al.*, 2007; Rodrigues *et al., in press*; Gurnell *et al.*, 2001) from regeneration via sexual reproduction.

However, it remains difficult to differentiate the cause of mortality: uprooting by drag force, stem sectioning by sediment abrasion or burying. This last process will constitute in the future an additional Type to the classification proposed in this paper about the mortality causes for seedlings on fluvial environment, specifically in the present context of a non-migrating bar during floods. These questions encountered methodological problems to distinguish these processes (other species vegetative fragments, destruction during measurements).

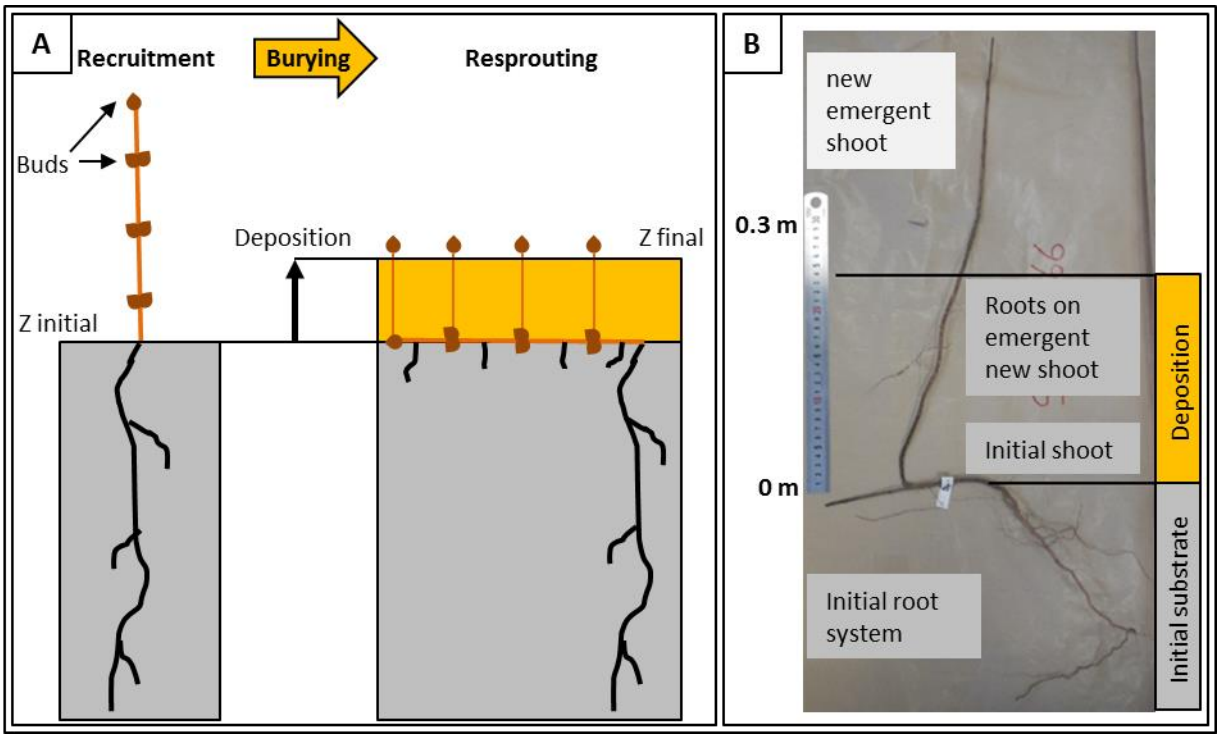


Figure 5-10: (A) Potential response of a *P. nigra* seedling on burial stresses. (B) Observed response of a seedling of *P. nigra*, just recruited, horizontally buried under 0.25 m of sand after the growth period. The next year, one shoot emerged, the buried part of this new shoot has roots and the emergent part has buds.

Type IV: Combination of erosion-burying

Identified as the type IV, the erosion followed by deposition appears on most of the plots and lead to 50.6 % of the mortality observed (Table 5-1). The survival of seedlings is observed for erosion about one or few decimeters suggesting that both erosion and the associated drag force were not strong enough to uproot the entire root system. These seedlings also survived to a subsequent deposition of decimeters. However, seedlings suffer from maximal threshold of -0.35 m of erosion followed by a deposition of 0.6 m (Table 5-2) in the spreading area could lead to wonder if the survival observed corresponds to the initial seedlings observed or to vegetative fragments from upstream. This observation leads to the following question: are seedlings of one year old able to constitute these fragments or are they too weak? Answer to this question appears important in terms of ecological strategy influencing gene flow (Imbert and Lefèvre, 2003) and fluvial landforms dynamics. A simplified longitudinal model emerges from the study of the non-migrating mid-channel bar (Figure 5-11).

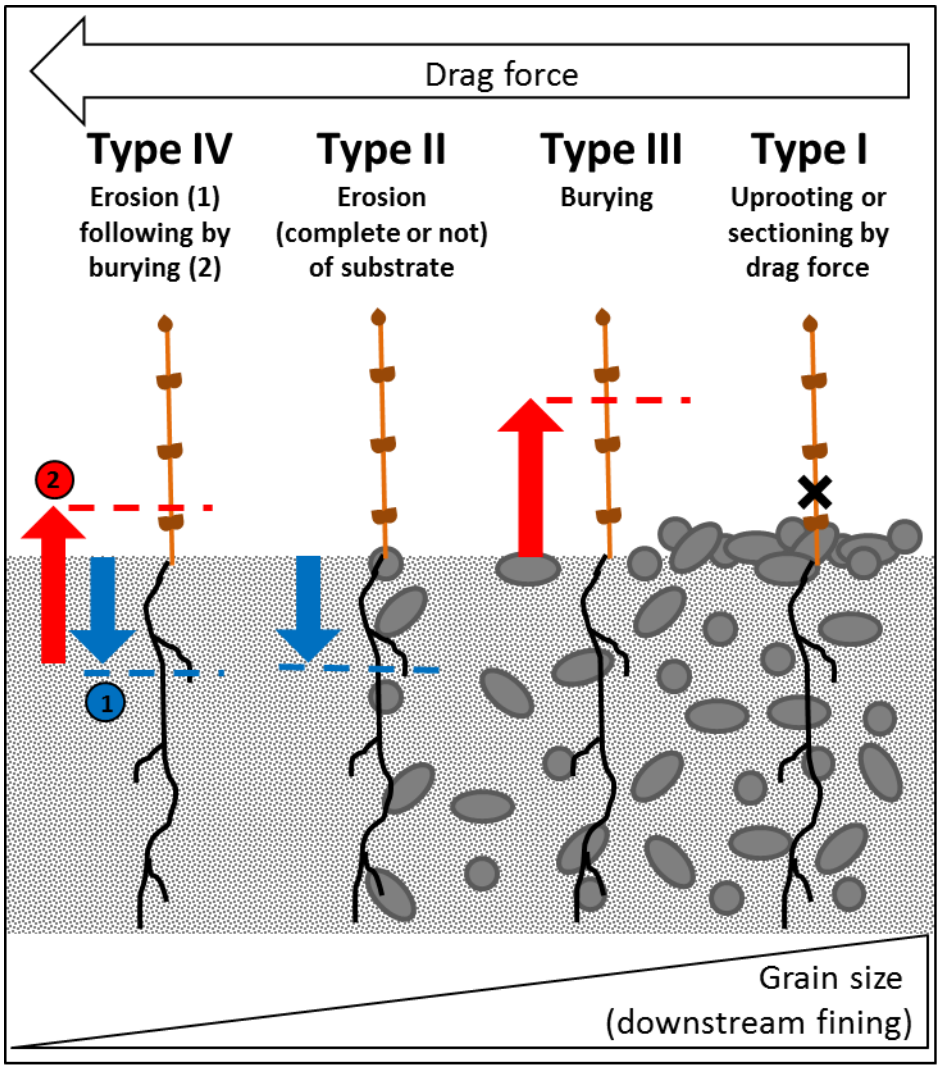


Figure 5-11: Model of mortality processes on a non-migrating mid-channel bar in a sandy-gravel lowland river from upstream to downstream based on this study.

The four processes identified and leading to seedlings mortality are not sufficient to understand the survival process on the bar, suggesting the involvement of other biological factors.

5.5.3. Influence of seedlings variability

Several plots have shown various survival rates although physical conditions were similar. This ability of seedlings to withstand the higher flow velocity close to the main channel interrogates to the biological factors promoting survival to the effect of drag force. First, the flexibility of the shoot of the young seedling, here combined to a small height, could decrease the drag force applied on seedlings. Secondly, the strength and depth of root anchorage of seedlings appear to be important factor influencing the spatial pattern of survival.

The root structure, related to the sediment grain size and depth of anchorage influence the ability of seedlings to withstand the uprooting by drag force. Basically, the ratio between the aerial part of the seedlings and the anchorage strength is a key factor in the survival ability to the drag force in river with low energy as lowland rivers. Karrenberg *et al.*, (2003) studied the anchorage of saplings and cuttings of *P. nigra* but understanding of the seedling resistance is lacking. The root growth of riparian seedlings, including *P. nigra*, has been studied to quantify required growth rates to survive to several water table decline conditions (Gonzalez *et al.*, 2010a; Guilloy *et al.*, 2011; Van Splunder, 1996; Kranjcec *et al.*, 1998). These studies provide large amount of data which are unfortunately not applicable to this work because of the effect of discharge fluctuation mentioned above. Furthermore, the depth of seedlings anchorage on the bar could be influenced by the variable extent of capillary fringe due to various substrate textures (Mahoney and Rood 1991). Finally, these studies highlight the complexity of seedlings growth response to the physical environment. However, another biological complexity that has to be taken in account is the genetic diversity within the species and within the seedlot (illustrated in Figure 5-12): each seedling is unique, and has to adapt to environmental factors of the day/week/months of germination.

Rooting system (architecture, growth) is the black box of such fluvial adaptation process and will be further studied as key adjustments of such pioneer species to environmental changes, under the form or artificial (management and restoration) or global change.

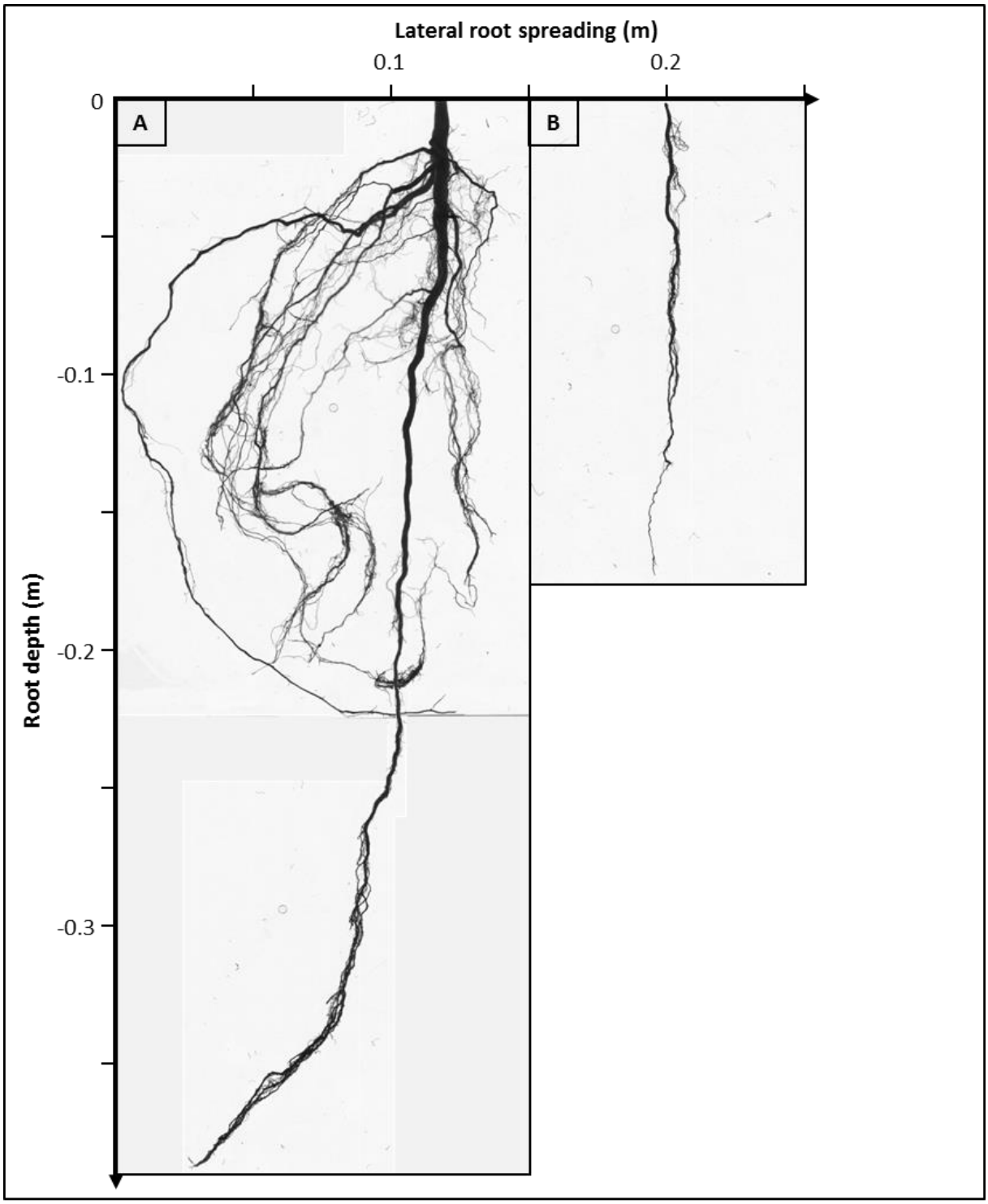


Figure 5-12: Illustration of the diversity of root growth. Two root systems of *P. nigra* seedlings grown from seeds coming from the same female tree, planted the same day at the end of May on an experimental trial of 1 m^3 of sand. Seedlings were excavated 260 days after germination. The deepest root system corresponds to an aerial growth of 40.3 cm, the other of 10.9 cm.

5.6. Conclusion

The working hypothesis of this field study is that non-migrating bars present in relatively large and low-gradient sandy-gravelly rivers constitute a preferential area for the survival of riparian seedlings such as *P. nigra* to flood stresses occurring during the first year after recruitment. Detailed field surveys performed on a non-migrating bar of the Loire River, and combining morphology, hydrology and biology, lead us to the following conclusions:

- On a non-migrating bar, two areas are distinguished during floods. A central and fixed area, subject to low erosion and deposition processes and the edges of the bar which are highly mobile. Survival rates of seedlings are higher in the central and fixed area;
- the stresses applied on seedlings depends on the non-migrating bar dynamics parameters namely phasing of scour and fill processes, sediment supply; sediment grain size and the flow velocity;
- Four types of fluvial processes emerge, (i) uprooting by drag force, (ii) uprooting by erosion of sediments, (iii) burying preceded by drag force and (iv) succession of erosion and burial;
- the combination of individual stresses (drag force, erosion and burial) complicates the determination of seedlings survival threshold,
- the survival thresholds of seedlings depend on the combination and succession of the individual flow stresses mentioned above during floods;
- the seedling survival rate is higher for taller seedlings of the central and fixed area of the bar and no correlation between height and survival was observed in the spreading area. The role of biological factors on *P. nigra* anchorage parameters needs to be analyzed in future studies to clearly understand the survival pattern.

In this study, we propose a simplified longitudinal model at the bar scale which details the constraints applied on one-year old seedlings. This spatial distribution of stresses induces specific biological adaptation of seedlings along the bar.

Acknowledgments

This study is part of the Ph.D. thesis of the first author and is funded by the Masterplan Plan Loire Grandeur Nature - FEDER (Presage n°34971), Agence de l'Eau Loire-Bretagne (n° 100392601), Etablissement Public Loire (11-DR-RD-015) and Région Centre. Michel Chantereau, Damien Hemeray (Réserve Naturel de Saint-Mesmin) and Thomas Carrière (DDT 45) are acknowledged for their valuable contributions. Y. Guerez and T. Handfus (CETU ELMIS – University of Tours) are thanked for their assistance during flood surveys. Other field investigations and grain size analysis were carried out with the help of J.P. Bakyono, A. Dubois, I. Pene, M. Rincel (University F. Rabelais, Tours). We thank S. Marin (INRA Val de Loire) for sharing her data on genetic structuration of seedlings recruitment. O. Ursache (University F. Rabelais, Tours) is acknowledged for his help during the analysis of hydraulics data.

References

Auble GT and Scott ML. 1998. Fluvial disturbance patches and cottonwood recruitment along the Upper Missouri River, Montana. Wetlands 18: 546-556. DOI: 10.1007/BF03161671

Barsoum N. 2002. Relative contributions of sexual and asexual regeneration strategies in Populus nigra and Salix alba during the first years of establishment on a braided gravel bed river. Evolutionary Ecology 15: 255-279. DOI: 10.1023/A:1016028730129

Bertoldi W, Zanoni L and Tubino M. 2010. Assessment of morphological changes induced by flow and flood pulses in a gravel bed braided river: The Tagliamento River (Italy). Geomorphology 14: 348-360. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.07.017

Blott SJ and Pye K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms 26: 1237-1248. DOI: 10.1002/esp.261

Bridge JS. 2003. Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record. Blackwell, Oxford. 491 p.

Burke M, Jorde K and Buffington JM. 2009. Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: Changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North American river. Journal of Environmental Management 90: 224–236. DOI:10.1016/j.jenvman.2008.07.022

Cabezas A, Gonzalez E, Gallardo B, Garcia M, Gonzalez M and Comin FA. 2008. Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for restoration and management. Aquatic Sciences 70: 361-376. DOI 10.1007/s00027-008-8059-4

Claude N, Rodrigues S, Bustillo V, Bréhéret JG, Tassi P and Jugé P. 2014. Interactions between flow structure and morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France. Water Resources Resaerch 50: 2850–2873. DOI:10.1002/2013WR015182.

Comiti F, Da Canal M, Surian N, Mao L, Picco L and Lenzi MA. 2011. Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. Geomorphology 125: 147-159. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.09.011

Corenblit D, Tabacchi E, Steiger J and Gurnell AM. 2007. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. Earth-Science Reviews 84: 56-86. DOI:10.1016/j.earscirev.2007.05.004

Corenblit D, Steiger J, Gonzalez E, Gurnell AM, Charrier G, Darrozes J, Dousseau J, Julien F, Lambs L, Larrue S, Roussel E, Vautier F and Voldoire O. 2013. The biogeomorphological life cycle of poplars during the fluvial biogeomorphological succession: a special focus on Populus nigra L. Earth Surface Processes Landforms 39: 546–563. DOI: 10.1002/esp.3515

Corenblit D, Davies NS, Steiger J, Gibling MR and Bornette G. 2014. Considering river structure and stability in the light of evolution: feedbacks between riparian vegetation and hydrogeomorphology. Earth surface processes and landforms. DOI: 10.1002/esp.3643

Dacharry M. 1996. Les grandes crues historiques de la Loire. La Houille Blanche 6-7: 47- 53. DOI: http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1996067

Dixon MD. 2003. Effects of flow pattern on riparian seedling recruitment on sandbars in the Wisconsin River, Wisconsin, USA. Wetlands 23: 125-139. DOI: 10.1672/0277-5212(2003)023[0125:EOFPOR]2.0.CO;2

Duband D. 1996. La genèse des crues dans le bassin de la Loire. La Houille Blanche 6-7: 54-62. DOI: http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1996068

Edmaier K, Burlando P and Perona P. 2011. Mechanisms of vegetation uprooting by flow in alluvial non-cohesive sediment. Hydrology Earth System Sciences 15: 1615–1627. DOI: 10.5194/hess-15-1615-2011

Edwards PJ, Kollmann J, Gurnell AM, Petts GE, Tockner K and Ward JV. 1999. A conceptual model of vegetation dynamics on gravel bars of a large Alpine river. Wetlands Ecology and Management 7: 141–153. DOI: 10.1023/A:1008411311774

Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology 27: 3–26.

Francis RA and Gurnell AM. 2006. Initial establishment of vegetative fragments within the active zone of a braided gravel-bed river (River Tagliamento, NE Italy). Wetlands 26: 641-648. DOI: 10.1672/0277-5212(2006)26[641:IEOVFW]2.0.CO;2

Gibling MR and Davies NS. 2012. Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution. Nature Geoscience 5: 99–105. DOI:10.1038/ngeo1376

González E, Comin FA and Muller E. 2010a. Seed dispersal, germination and early seedling establishment of Populus alba L. under simulated water table declines in different substrates. Trees 24: 151-163. DOI 10.1007/s00468-009-0388-y

González E, González -Sanchis M, Cabezas A, Comin F A and Muller E. 2010b. Recent Changes in the Riparian Forest of a Large Regulated Mediterranean River: Implications for Management. Environmental Management 45: 669–681. DOI 10.1007/s00267-010-9441-2

Guilloy-Froget H, Muller E, Barsoum N and Hughes FMR. 2002. Dispersal, germination, and survival of Populus nigra L. (salicaceae) in changing hydrologic conditions. Wetlands 22: 478-488. DOI: 10.1672/0277-5212(2002)022[0478:DGASOP]2.0.CO;2

Guilloy H, González E, Muller E, Hughes FMR and Brasoum N. 2011. Abrupt Drops in Water Table Level Influence the Development of Populus nigra and Salix alba Seedlings of Different Ages. Wetlands 31: 1249-1261. DOI: 10.1007/s13157-011-0238-8

Gurnell AM, Petts GE, Hannah DM, Smith BPG, Edwards PJ, Kollmann J, Ward JV and Tockner K. 2001. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed fiume Tagliamento, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 26: 31-62. DOI: 10.1002/1096-9837(200101)26:1<31::AID-ESP155>3.0.CO;2-Y

Gurnell AM. 2013. Plants as river system engineers. Earth Surface Processes Landforms 39: 4-25. DOI: 10.1002/esp.3397

Hassan MA. 1990. Scour, fill, and burial depth of coarse material in gravel bed streams. Earth Surface Processes and Landforms 15: 341–356.

Hassan MA, Schick AP and Shaw PA. 1999. The transport of gravel in an ephemeral sandbed river. Earth Surface Processes and Landforms 24: 623–640. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199907)24:7<623::AID-ESP978>3.0.CO;2-2

Imbert E and Lefèvre F. 2003. Dispersal and gene flow of Populus nigra (Salicaceae) along a dynamics river system. Journal of Ecology 91: 447-456. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2003.00772.x

Johnson WC. 1994. Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: patterns and causes. Ecological Monographs 64: 45–84. DOI: 10.2307/2937055

Johnson WC. 2000. Tree recruitment and survival in rivers: influence of hydrological processes. Hydrological Processes 14: 3051-3074. DOI: 10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<3051::AID-HYP134>3.0.CO;2-1

Jones CG, Lawton JH and Shachak M. 1996. Organisms as Ecosystem Engineers. Ecosystem Management 2: 130–147. DOI: 10.1007/978-1-4612-4018-1_14

Kalischuk AR, Rood SB and Mahoney JM. 2001. Environmental influences on seedling growth of cottonwood species following a major flood. Forest Ecology and Management 144: 75–89. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00359-5

Karrenberg S, Blaser S, Kollmann J, Speck T and Edwards PJ. 2003. Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment. Functional Ecology 17: 170–177. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2003.00709.x

Kranjcec J, Mahoney JM and Rood SB. 1998. The responses of three riparian cottonwood species to water table decline. Forest Ecology and Management 110: 77–87. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00276-X

Laronne JB, Outhet DN, Carling PA and McCabe TJ. 1994. Scour chain employment in gravel bed rivers. Catena 22: 299–306. DOI: 10.1016/0341-8162(94)90040-X

Latapie A, Camenen B, Rodrigues S, Paquier A, Bouchard JP and Moatar F. 2014. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. Catena 121: 1–12. DOI: 10.1016/j.catena.2014.04.017

Levine CM and Stromberg JC. 2001. Effects of flooding on native and exotic plant seedlings: implications for restoring south-western riparian forests by manipulating water and sediment flows. Journal of Arid Environments 49: 111 – 131. DOI:10.1006/jare.2001.0837

Lunt IA and Bridge JS. 2004. Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok River, Alaska. Sedimentology 51: 415-432. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2004.00628.x

Macaire JJ, Gay-Ovejero I, Bacchi M, Cocirta C, Patryl L and Rodrigues S. 2013. Petrography of alluvial sands as a past and present environmental indicator: Case of the Loire River (France). International Journal of Sediment Research 28: 285–303. DOI:10.1016/S1001-6279(13)60040-2

Mahoney JM and Rood SB. 1991. A device for studying the influence of declining water table on poplar growth and survival. Tree Physiology 8: 305 – 314. DOI: 10.1093/treephys/8.3.305

Mahoney JM and Rood SB. 1992. Response of a hybrid poplar to water table decline in different substrates. Forest Ecology and Management 54: 1 – 4. DOI: 10.1016/0378-1127(92)90009-X

Mahoney JM and Rood SB. 1998. Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment - an integrative model. Wetlands 18: 634-645. DOI: 10.1007/BF03161678

Maun MA. 1998. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. Canadian Journal of Botany 76: 713–738. DOI: 10.1139/b98-058

McBride JR and Strahan J. 1984. Establishment and survival of woody riparian species on gravel bars of an intermittent stream. American Midland Naturalist 112: 235-245.

Moggridge HL and Gurnell AM. 2009. Controls on the sexual and asexual regeneration of Salicaceae along a highly dynamic, braided river system. Aquatic Sciences 71: 305-317. DOI: 10.1007/s00027-009-9193-3

Petts GE, Gurnell AM, Gerrard AJ, Hannah DM, Hansford B, Morrissey I, Edwards PJ, Kollmann J, Ward JV, Tockner K and Smith BPG. 2000. Longitudinal variations in exposed riverine sediments: a context for the ecology of the Fiume Tagliamento, Italy. Aquatic Conservation: Marine And Freshwater Ecosystems 10: 249 – 266. DOI: 10.1002/1099-0755(200007/08)10:4<249::AID-AQC410>3.0.CO;2-R

Polzin ML and Rood SB. 2006. Effective disturbance: seedling safe sites and patch recruitment of riparian cottonwoods after a major flood of a mountain river. Wetlands 26: 965-980. DOI: 10.1672/0277-5212(2006)26[965:EDSSSA]2.0.CO;2

Pyrce RS and Ashmore PE. 2005. Bedload path length and point bar development in gravel-bed river models. Sedimentology 52: 839-857. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2005.00714.x

Rodrigues S, Bréhéret JG, Macaire JJ, Moatar F, Nistoran D and Jugé P. 2006. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: the Loire River (France). Sedimentary Geology 186: 89-109. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.11.011

Rodrigues S, Bréhéret JG, Macaire JJ, Greulich S and Villar M. 2007. In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire (France). Sedimentology 54: 223-242. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2006.00832.x

Rodrigues S, Claude N, Jugé P and Bréhéret JG. 2012. An opportunity to connect the morphodynamics of alternate bars with their sedimentary products. Earth Surface Processes and Landforms 37: 240–248. DOI: 10.1002/esp.2255

Rodrigues S, Mosselman E, Claude N, Wintenberger C and Juge P. 2014. Alternate bars in a sandy gravel bed river: generation, migration and interactions with superimposed dunes. Earth Surface Processes and Landforms. DOI: 10.1002/esp.3657

Rodrigues S, Wintenberger CL, Bréhéret JB, Villar M. in press. Fluvial islands: first stage of development from non-migrating (forced) bars and woody-vegetation interactions. Geomorphology

Segelquist CA, Scott ML and Auble GT. 1993. Establishment of Populus deltoides Under Simulated Alluvial Groundwater Declines. American Midland Naturalist 130: 274-285. DOI: 10.2307/2426127

Stanton BJ and Villar M. 1996. Controlled reproduction of Populus. In: Biology of Populus and its implications for management and conservation. Stettler RF, Bradshaw HD, Heilman PE, Hinckley TM (Eds). NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 113-138.

Stoffel M and Wilford DJ. 2012. Hydrogeomorphic processes and vegetation: disturbance, process histories, dependencies and interactions. Earth Surface Processes Landforms 37: 9-22. DOI: 10.1002/esp.2163

Tal M and Paola C. 2007. Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation. Geology 35: 347–350. DOI: 10.1130/G23260A.1

Tal M and Paola C. 2010. Effects of vegetation on channel morphodynamics: results and insights from laboratory experiments. Earth Surface Processes and Landforms 35: 1014–1028. DOI: 10.1002/esp.1908

Van Splunder I, Voesenek LACJ, Coops H, De Vries XJA and Blom CWPM. 1996. Morphological responses of seedlings of four species of Salicaceae to drought. Canadian Journal of Botany 74: 1988-1995. DOI: 10.1139/b96-238

Welber M, Bertoldy W and Tubino M. 2012. The response of braided planform configuration to flow variations, bed reworking and vegetation: the case of the Tagliamento River, Italy. Earth Surface Processes Landforms 37: 572-582. DOI: 10.1002/esp.3196

5.7. Données sur le saule blanc

L'article précédent est centré sur l'espèce *P. nigra* car les données pour cette espèce sont plus nombreuses que pour l'espèce *S. alba*. Néanmoins, nous souhaitions présenter dans ce chapitre une partie additionnelle à l'article concernant la recolonisation de la barre par les ligneux pionniers en intégrant les saules blancs. Les matériels et méthodes mis en œuvre sont identiques à ceux présentés dans l'article et ne feront donc pas l'objet d'une nouvelle présentation. Toutefois, une distinction entre les placettes initiales et les placettes additionnelles, également distinguées dans l'article, doit être précisée. Sur les placettes initiales, la densité de saule blanc a été mesurée en 2013, l'année du recrutement et en 2014 pour observer la survie. En revanche, les saules blancs sur les placettes additionnelles correspondent aux mesures réalisées en 2014 pour la survie. En effet, dans un premier temps les saules blancs n'ont pas été comptés dans les placettes additionnelles mais en 2014 il a été possible d'observer les parcelles où des semis de saules blancs avaient survécu. Ainsi, sur les placettes initiales nous connaissons la densité initiale de recrutement réussi et la survie alors que sur les placettes additionnelles nous connaissons uniquement les placettes pour lesquelles les contraintes appliquées aux semis ont permis leur survie.

5.7.1. Recrutement et survie

Le recrutement des saules blancs a été observé uniquement sur des placettes où des peupliers noirs se sont également installés (Figure 5-13) et les altitudes des placettes les hautes et les plus basses sont identiques à celles pour le peuplier noir. Ainsi, des cohortes mono-spécifiques de peupliers noirs ont été observées mais pas de saules blancs. Les saules blancs ont principalement été observés dans la zone fixe (Figure 5-13).

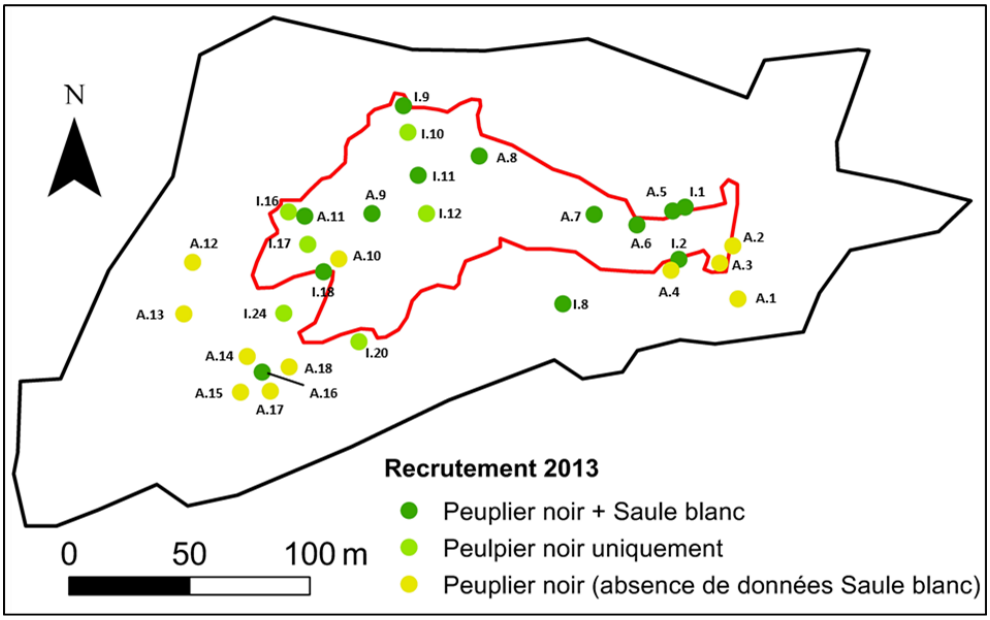


Figure 5-13 : Placettes sur lesquelles le recrutement des ligneux pionniers a réussi à la fin de la période estivale de 2013.

Les saules blancs ont recrutés sur six placettes initiales (I.1, I.2, I.8, I.9, I.11, I.18) (Figure 5-13). Trois de ces placettes (I.1, I.9, I.11) présentait un développement d'armure, les sédiments des trois autres placettes étant sablo-graveleux (I.2, I.8) à sableux (I.18) (Figure 5-14B). Sur les six placettes, les saules ont survécu sur trois d'entre elles, deux correspondant à des surfaces initialement armurées ainsi que sur le substrat le plus fin (Figure 5-14B). Les peupliers noirs, également installés sur ces placettes, sont morts sur deux d'entre elles (I.2, I.8) localisés à proximité du chenal secondaire sur les marges de la barre et ont survécu sur l'une d'elles (I.1) (Figure 5-14A). *A contrario*, deux placettes (I.9, A.6) présentent la survie de saules blancs mais pas des peupliers noirs. Sur les autres placettes initiales (I.11, I.18), les deux espèces ont survécu. Sur les placettes additionnelles, les peupliers noirs ont survécu et de jeunes saules blancs issus de graines ont été observés.

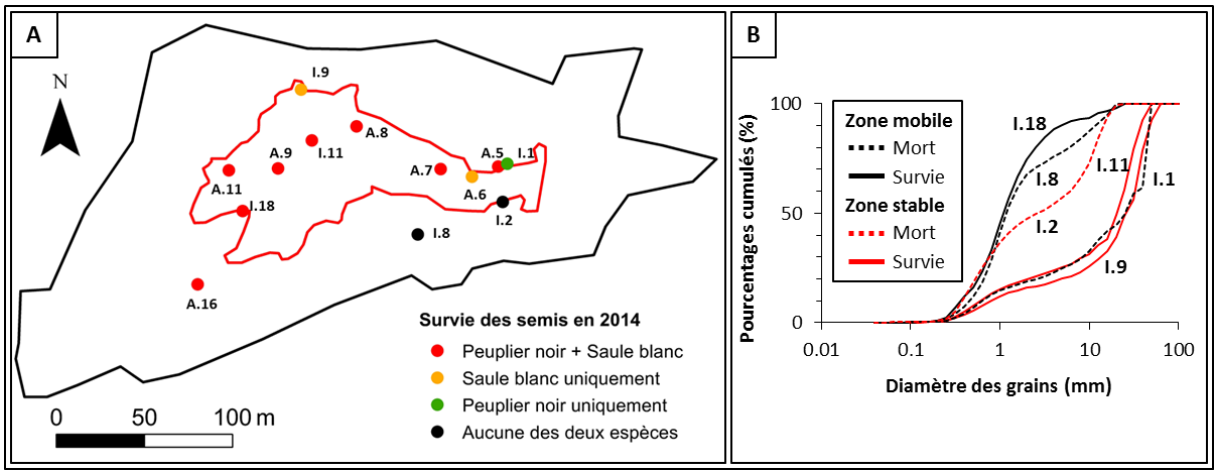


Figure 5-14 : Survie en 2014 des semis des espèces *P. nigra* et *S. alba* sur les placettes où les deux espèces sont présentes (A). Granularité des sédiments de surface sur lesquels les semis de saule blanc ont germé et survécu à la période estivale de 2013.

Les saules blancs ont survécu à une érosion d'environ 0,2 m (I.18) et à des profondeurs d'enfouissements inférieures à 0,1 m (A.6, A.9, I.11) (Figure 5-15A). Comme pour les peupliers noirs, des saules blancs sont présents en 2014 sur la placette A16 alors que les contraintes associées aux processus d'érosion dépôt dans ce secteur sont importantes. L'érosion y est particulièrement forte puisque le substrat est plutôt sableux dans ce secteur de la zone fortement mobile au cours des crues. Les saules blancs n'ont pas survécu sur les placettes I.1, I.2 et I.8 alors que les intensités des processus érosion-dépôt sont similaires à celles observées sur les placettes où les semis ont survécu (Figure 5-15A). Sur ces placettes ne sont pas non plus présentent de fortes contraintes hydrauliques en crue (Figure 5-15B).

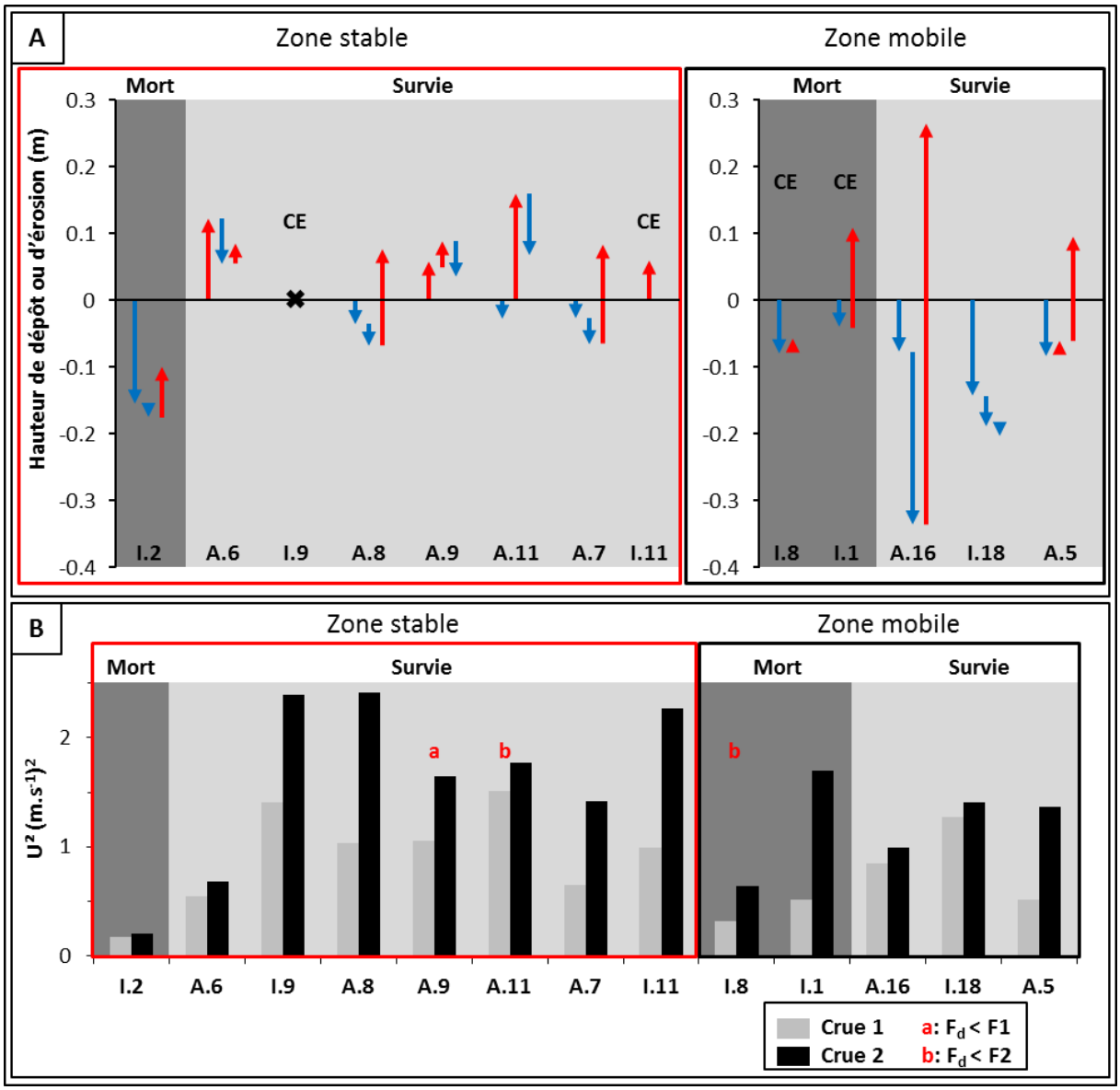


Figure 5-15 : (A) Phasage des processus d'érosion-dépôt survenant au cours des crues sur les placettes portant des semis de saule blanc et de peuplier noir. Les placettes avec la mention « CE » au-dessus correspondent aux résultats des chaines d'érosion (précision centimétrique). Une croix noir indique l'absence de mouvement, une seule flèche indique un processus univoque (érosion où dépôt). Les autres résultats sont issus des mesures de topographie et bathymétrie. Trois flèches successives correspondent respectivement à l'intensité de processus enregistrée entre 2013-F1, F1-F2 and F2-2014. Les faibles valeurs doivent être prises avec précautions en raison de la précision des mesures (0,1 m). (B) Le carré de la vitesse, présumé comme représentatif de la variation de la force de traînée appliquée aux semis, mesurée aux pics des crues F1 et F2. La lettre « a » signifie un dépôt de sédiment sur la placette survenant avant le pic de crue F1 et persistant jusqu'à l'émergence de la barre. En conséquence, la force de traînée appliquée aux semis doit être inférieure à celle observée au pic de crue F1 et F2. La lettre « b » signifie que du dépôt a été enregistré sur ces placettes avant le pic de crue F2, protégeant les semis contre la force de traînée maximale du pic de crue F2.

La zone mobile semble également propice à la survie des semis de saule blanc. Toutefois, à l'instar du peuplier, les contraintes mesurées sur les semis de saules blancs n'expliquent pas complètement leur survie. De plus, même si pour la majorité des placettes si la survie est avérée, elle l'est pour les deux espèces, quelques exceptions ont été observées. Alors que les conditions édaphiques étaient identiques, la survie a été favorisée pour une espèce et pas l'autre ce qui interroge sur la différence de capacité entre ces deux espèces à résister aux contraintes exercées en crue. Les conditions de croissance et les contraintes ayant été identiques, l'avantage doit provenir de traits biologiques permettant à une espèce plutôt que l'autre de survivre. Le chapitre suivant dont l'objectif est de déterminer l'influence du substrat sur la croissance des semis ainsi que sur la capacité à résister aux contraintes exercées lors des crues nous permet également de comparer les traits biologiques entre ces deux espèces.

Chapitre 6 : Rôle de la structure sédimentaire sur la croissance aérienne et racinaire, l'arrachage et l'enfouissement de semis de peuplier noir (*Populus nigra* L.) et saule blanc (*Salix alba* L.) en conditions semi-contrôlées.

Semis de saules blancs dans un substrat sableux en conditions semi-contrôlées

6.1. Objectifs et synthèse du chapitre

Le présent chapitre, contrairement aux trois chapitres précédents ne se présente pas sous la forme d'un article déjà mis en forme. Ce chapitre concerne l'approche *ex situ* développée dans cette thèse afin de répondre aux objectifs de l'axe de recherche 3 identifié au début de ce manuscrit. Cet axe de recherche vise à répondre à la question suivante : « Quels sont les paramètres influençant le potentiel de résistance des semis entre l'année n et n+1 aux contraintes hydrauliques et sédimentaires exercées lors des crues ? ».

Le chapitre précédent a permis de répondre en partie à cette question, cependant des zones d'ombre demeurent. La démarche expérimentale menée en pépinière et présentée dans ce chapitre a donc pour objectif (i) d'enrichir les connaissances concernant le développement des semis de peupliers noirs et de saules blancs, (ii) de déterminer des adaptations phénotypiques (système aérien et racinaire) à la structure sédimentaire, (iii) d'identifier des seuils de tolérance aux contraintes, notamment la force nécessaire à l'arrachage et la profondeur d'enfouissement.

Le dispositif expérimental développé dans cette approche est basé sur notre hypothèse de travail postulant que la résistance des semis aux contraintes hydrauliques et sédimentaires dépend de leur croissance et de leur ancrage racinaire, pouvant eux-mêmes être significativement influencé par le moment de libération des graines et la structure sédimentaire. Une fosse expérimentale a été creusée et remplie de trois substrats différents caractéristiques des unités morphologiques de Loire moyenne. Trois expériences (témoin, force nécessaire à l'arrachage, profondeur d'enfouissement tolérée) ont été menées pour chaque substrat.

La germination des saules blancs en conditions semi-contrôlées dans la pépinière s'est avérée plus difficile que pour le peuplier noir et par conséquent les données obtenues pour cette espèce sont moins nombreuses. Elles permettent cependant de mettre en évidence certaines différences entre les deux espèces.

Les principaux résultats mettent en lumière que la croissance des semis et la structure du système racinaire sont significativement différentes entre un substrat sableux et un substrat sablo-graveleux. En revanche, la variabilité de la structure interne du sédiment matérialisé par un dépôt sableux décimétrique au-dessus d'un substrat sablo-graveleux ne met pas en évidence une adaptation particulière des semis qui ont un développement relativement proche de ceux ayant poussés sur un substrat sablo-graveleux.

Pour des conditions identiques (eau, ensoleillement, nutriments), les semis de peupliers noirs sur le sable ont tendance à être plus grands et présentent un système racinaire plus long et plus ramifié avec de nombreuses racines fines. Les semis sur substrat sablo-graveleux sont plus petits avec un système racinaire moins ramifié. Toutefois, il n'y a pas de différence significative de la longueur de la racine principale des semis entre les deux substrats. Ces différences de croissance sont attribuées à la porosité des sédiments sableux qui permettent une meilleure disponibilité en eau et nutriments que les substrats sablo-graveleux extrêmement drainant bien que l'expérience ait été effectuée dans des conditions hydriques non limitantes.

Les expériences réalisées pour déterminer la force nécessaire à l'arrachage ont montré que celle-ci peut être relativement variable et qu'elle semblait être liée à la biomasse racinaire malgré la perte des racines liée à l'arrachage. De plus, aucune différence significative n'a été révélée par les analyses statistiques sur la force nécessaire à l'arrachage entre les substrats sableux et sablo-graveleux. L'hypothèse avancée est que la force d'ancrage est principalement déterminée par la racine principale qui ne se développe pas de manière significativement différente entre les substrats. Cette hypothèse explique également pourquoi le trait observé le mieux corrélé à la force d'arrachage est la biomasse racinaire ; après arrachage ce sont principalement les racines fines qui sont perdues ainsi que la partie cassée de la racine principale qui contribuent faiblement à la biomasse du système racinaire.

Enfin, en raison des difficultés de germination des graines, l'expérience d'enfouissement s'est limitée à l'enfouissement d'un semis par substrat. Au total, 247 peupliers noirs ont été couchés puis enfouis sous une couche de sable d'épaisseur variable entre 0,2 m et 0,5 m et mesurant en moyenne 50 mm. Un seul individu a réussi à pousser à travers la couche sableuse l'année suivante. Cette expérience a surtout permis de mettre en évidence des lacunes sur les processus biologiques permettant la survie des semis à la contrainte d'enfouissement.

Du fait du faible pourcentage de germination des graines, seule l'expérience témoin a été réalisée sur le saule blanc. Les premiers résultats montrent que le saule blanc semble également avoir une croissance différente entre les substrats sableux et sablo-graveleux, le substrat sableux étant une fois de plus favorable à un développement du système racinaire et aérien important. De plus, le système racinaire des saules développés sur le sable est très ramifié et différent de celui observé sur substrat sablo-graveleux. Les saules blancs ayant poussé sur les substrats sablo-graveleux ont des ordres de grandeur de croissance plus proche des peupliers noirs que des autres saules blancs ayant poussé sur substrat sableux.

Ces expérience ont permis de mettre en évidence des systèmes racinaires et aériens différents en fonction de la granularité du substrat et ce, pour les deux espèces étudiées. Cependant, pour le peuplier noir ces différences n'apparaissent pas avoir d'impact sur la force nécessaire à l'arrachage. Néanmoins, la force maximale de l'ancrage n'est pas le seul élément à prendre en compte dans la capacité de résistance des semis à cette contrainte. En effet, la croissance de la tige a une influence sur la force de traînée appliquée aux semis. Ainsi, les traits biologiques, notamment la profondeur de l'ancrage et la croissance sont analysés comme des facteurs pouvant également influencer la survie des semis aux contraintes exercées en crue. Dans la partie synthèse qui suit ce chapitre, l'influence de ces traits biologiques sera discutée au regard des différents processus identifiés dans le chapitre précédent et conduisant à la mortalité élevée des semis pendant les crues.

6.2. Introduction

Le système racinaire assure deux fonctions, l'apport en nutriments et la stabilité de la plante. Le système racinaire se développe dans un milieu poreux dans lequel il est soumis à des *stimuli* non directionnels liés à l'évolution des propriétés du sol (Danjon, 2011). L'architecture du système racinaire est influencée par la disponibilité et la distribution des nutriments (Thaler et Pages, 1998) ; elle peut s'adapter pour un grand nombre d'espèces en vue d'atteindre (extension) des compartiments plus riches en nutriments résultants de l'hétérogénéité du sol (Robinson, 1994) ou d'assurer un meilleur ancrage par exemple. A cet égard, Karrenberg *et al.* (2003) mettent en évidence une différence d'ancrage de l'espèce *Populus nigra* entre les substrats sableux et graveleux. Les contraintes physiques directionnelles comme la pente topographique (Chiatante *et al.*, 2002), la direction du vent dominant ou le sens d'écoulement d'une rivière peuvent également engendrer des adaptations du système racinaire. A titre d'exemple, la morphologie et les propriétés biomécaniques du système racinaire du peuplier noir se modifient en réponse à une flexion imposée sur la racine pivot (Scippa *et al.*, 2008). L'adaptation du système racinaire à la contrainte dépend du moment d'apparition de la contrainte dans le cycle végétatif de l'espèce (Trupiano *et al.*, 2012). Toutefois, des contraintes exercées durant la période de dormance des ligneux peuvent engendrer une croissance du système racinaire durant la période végétative suivante adaptée au type et à l'intensité de ces contraintes (Nicoll et Dunn, 1999).

Dans les systèmes fluviaux, un *stimulus* directionnel est associé à l'abaissement de nappe auquel les semis doivent survivre après leur germination. De nombreuses études se sont concentrées sur l'influence de l'abaissement de nappe sur la croissance racinaire des espèces ligneuses pionnières (Mahoney and Rood, 1992 ; Segelquist *et al.*, 1993 ; Van Splunder *et al.*, 1996 ; Kranjcec *et al.*, 1998 ; Rood *et al.*, 1999 ; Shafroth *et al.*, 2000 ; Horton et Clark, 2001 ; Gonzalez *et al.*, 2010 ; Guilloy *et al.*, 2011). En revanche, l'analyse du système racinaire des jeunes semis et de l'ancrage qu'il produit en fonction du substrat (granularité) et en l'absence de stress hydrique n'a pas encore fait l'objet de publications, notamment pour les espèces *Populus nigra* et *Salix alba*. Ces conditions reflètent celles qui prévalent sur les barres sédimentaires et les chenaux secondaires présents au sein de la bande active des cours d'eau dans un contexte climatique tempéré.

En conséquence, notre hypothèse est que le milieu de germination, en raison de son hétérogénéité et de ses propriétés physiques (*e.g.* capacité d'adsorption), peut engendrer une diversité de système racinaire pour une même espèce.

Cette différence de morphologie du système racinaire aurait une influence potentielle sur la force d'ancrage des semis ainsi que sur leur croissance et par conséquent sur leur capacité à survivre aux contraintes d'arrachage et d'enfouissement. Durant le premier cycle végétatif, débutant par la germination des graines, les jeunes plants ne sont pas soumis à des contraintes d'écoulement d'intensités similaires à celles qu'ils subiront lors des crues hivernales suivantes. L'adaptation du système racinaire à la contrainte de l'écoulement est donc supposée faible voire inexistante lorsque les premières crues surviennent après le recrutement. De plus, les conclusions du chapitre précédent mettent en évidence l'influence de la dynamique hydro-sédimentaire d'une barre forcée de centre de chenal dans la survie des peupliers noirs durant les crues subséquentes à leur recrutement. Cependant, l'intensité des processus ne permet pas toujours de comprendre les taux de survie ou de mortalité des semis à l'issue des crues suivant l'année de leur germination. Une des clés de compréhension manquante est la capacité de résistance des semis aux contraintes exercées lors des crues. Les contraintes identifiées sont :

- Arrachage induit par la force de trainée (Type I)
- Arrachage induit par érosion du substrat (Type II)
- Enfouissement (Type III)
- Succession des processus érosion-dépôt (Type IV)

Ainsi, afin de mieux comprendre la résistance et la survie des semis de peupliers noirs et de saules blancs aux contraintes exercées lors des crues notamment du Type I et III nous avons développé un dispositif expérimental en conditions semi-contrôlées en pépinière. Ce dispositif permet d'étudier le système racinaire et aérien de jeunes plants des deux espèces *Populus nigra* et *Salix alba*, issus de la germination de graines sur trois substrats différents. La démarche mise en œuvre vise à répondre aux objectifs spécifiques suivants :

- déterminer l'influence potentielle du substrat sur la morphologie racinaire et aérienne des semis de peuplier noir et de saule blanc ;
- identifier des différences de morphologie du système racinaire et de la croissance aérienne entre les deux espèces ;
- quantifier les forces nécessaires à l'arrachage de jeunes semis de peuplier noir ;

- apprécier l'influence potentielle du substrat sur le processus et la force nécessaire à l'arrachage ;
- obtenir des profondeurs d'enfouissement tolérées ou létales pour les semis de peuplier noir.

Ce dispositif ne permet en revanche pas de détailler le processus d'arrachage des semis concomitant avec l'érosion du substrat (Type II) ni l'influence de la succession des contraintes (Type IV).

Les autres chapitres de la thèse avaient pour objectif de répondre à des questions scientifiques d'intérêt pour la communauté par l'application de méthodes éprouvées propres aux géosciences. *A contrario*, ce chapitre présente une méthodologie et des résultats à caractère plus prospectifs, empruntées et adaptées d'autres disciplines, pour répondre aux questions concernant la capacité des espèces étudiées à résister aux contraintes en crue. De ce fait, la partie « matériel et méthodes » est ici plus détaillée que dans les chapitres précédents ; une partie de la discussion est consacrée à la critique de la méthodologie retenue.

6.3. Matériel et méthodes

6.3.1. Dispositif expérimental

6.3.1.1. Dispositif en conditions semi-contrôlées

Le dispositif expérimental a été développé au sein de la pépinière expérimentale de Guémené-Penfao gérée par l'Office National des Forêts (ONF) en Loire-Atlantique (44) à environ 300 km vers l'ouest du site de prélèvement des graines (Figure 6-1A). Les deux sites sont localisés à la même latitude offrant des conditions de températures comparables. En revanche, la région du dispositif expérimental est plus humide. Les expérimentations choisies se déroulant en condition de non stress hydrique pour les semis, cette différence de climat ne constitue pas un obstacle. Le dispositif expérimental, a été installé en sommet de butte, orientée nord nord-ouest/sud sud-est avec une pente d'environ 5 % permettant l'écoulement gravitaire de l'eau, récoltée par une pompe afin d'éviter l'eau les conditions anoxiques. Un dispositif d'arrosage permanent était disposé pour la saison estivale.

Cette fosse expérimentale est creusée dans un sol argileux reposant sur un substrat composé de grès blancs ou violacées en petits bancs dans sa partie nord nord-ouest et de siltites argilo-gréseuses verdâtres et rougeâtres dans sa partie sud sud-est (Fourniguet et Trautmann, 1985) (Figure 6-1B). La localisation topographique du site permet une exposition directe à la lumière du soleil, condition nécessaire à la croissance de ces espèces pionnières.

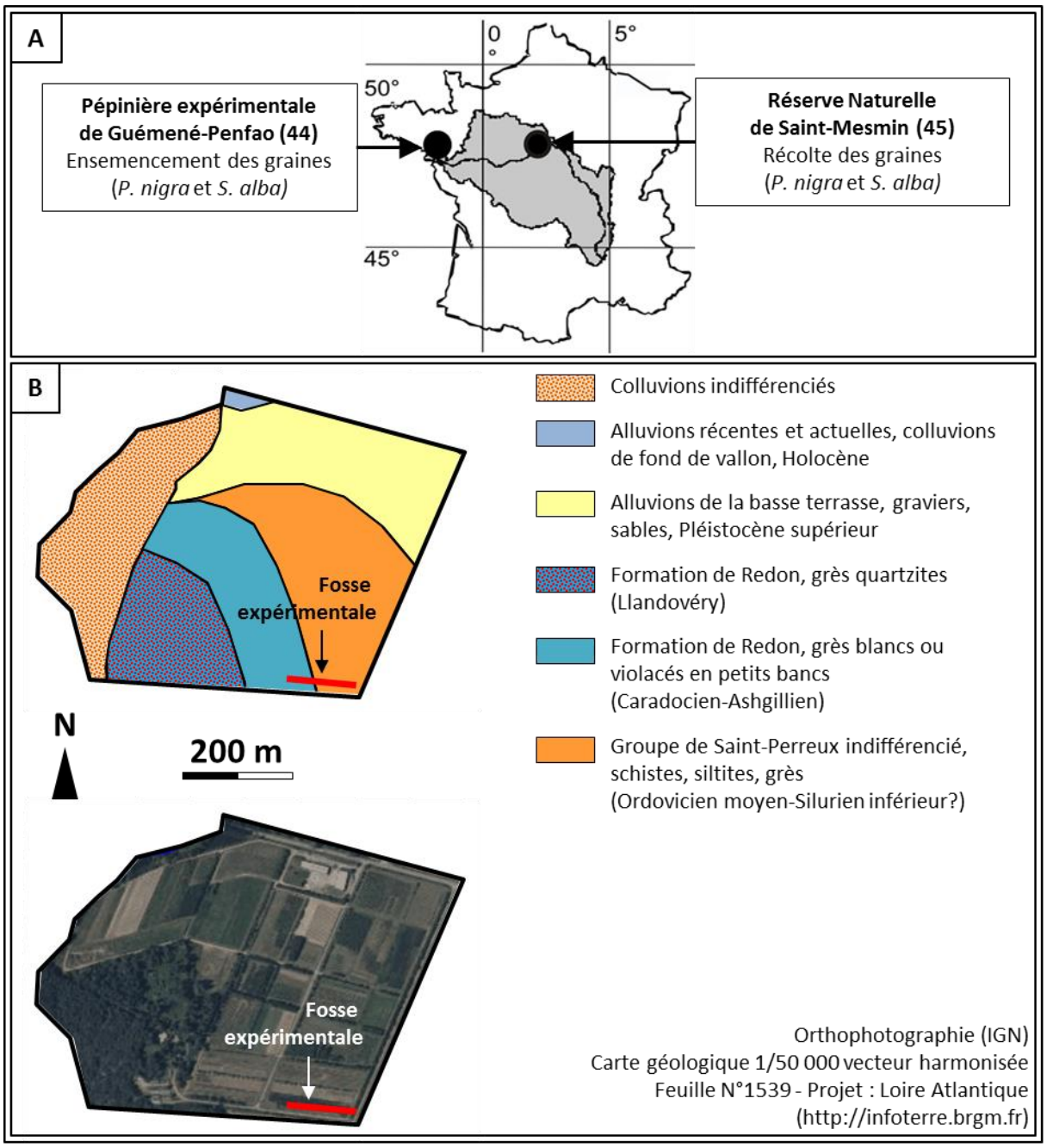


Figure 6-1 : (A) Localisation du site de prélèvement des graines (Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin sur la Loire moyenne) et du dispositif expérimental (Pépinière de Guémené-Penfao en Loire Atlantique). Carte géologique harmonisée (1/50000) et photo aérienne de la pépinière de Guémené-Penfao (B).

Détermination du substrat

Le dispositif expérimental consiste à simuler trois substrats du lit de la Loire Moyenne sur lesquels les semis sont susceptibles de germer :

- un substrat sableux (représentatif des dunes),
- un substrat sablo-graveleux (représentatif des dépôts de fond de chenaux),
- un substrat sablo-graveleux en profondeur (1 m) recouvert d'un dépôt de sable (0,2 m). Cette modalité sera dénommée par la suite substrat bi-couche.

Ces trois types de substrats sont caractéristiques des secteurs de la bande active (chenaux secondaires, barres sédimentaires) propices à l'installation et au maintien des ligneux pionniers. Des données d'analyses granulométriques antérieures à cette étude (Lorin, 2003 ; Rodrigues, 2006 and 2012 ; Latapie, 2011) ont été synthétisées pour déterminer la composition granulométrique représentative pour les mélanges sédimentaires expérimentaux (substrat sableux et sablo-graveleux, Figure 6-3). Les analyses proviennent de sédiments prélevés dans trois chenaux secondaires répartis sur le cours moyen de la Loire (Bréhémont [37], Souzay-Champigny [49], Ingrandes/Le Fresne-sur-Loire [44]) ainsi que sur une barre sédimentaire (Mareau-aux-Prés [45]) (Figure 6-2).

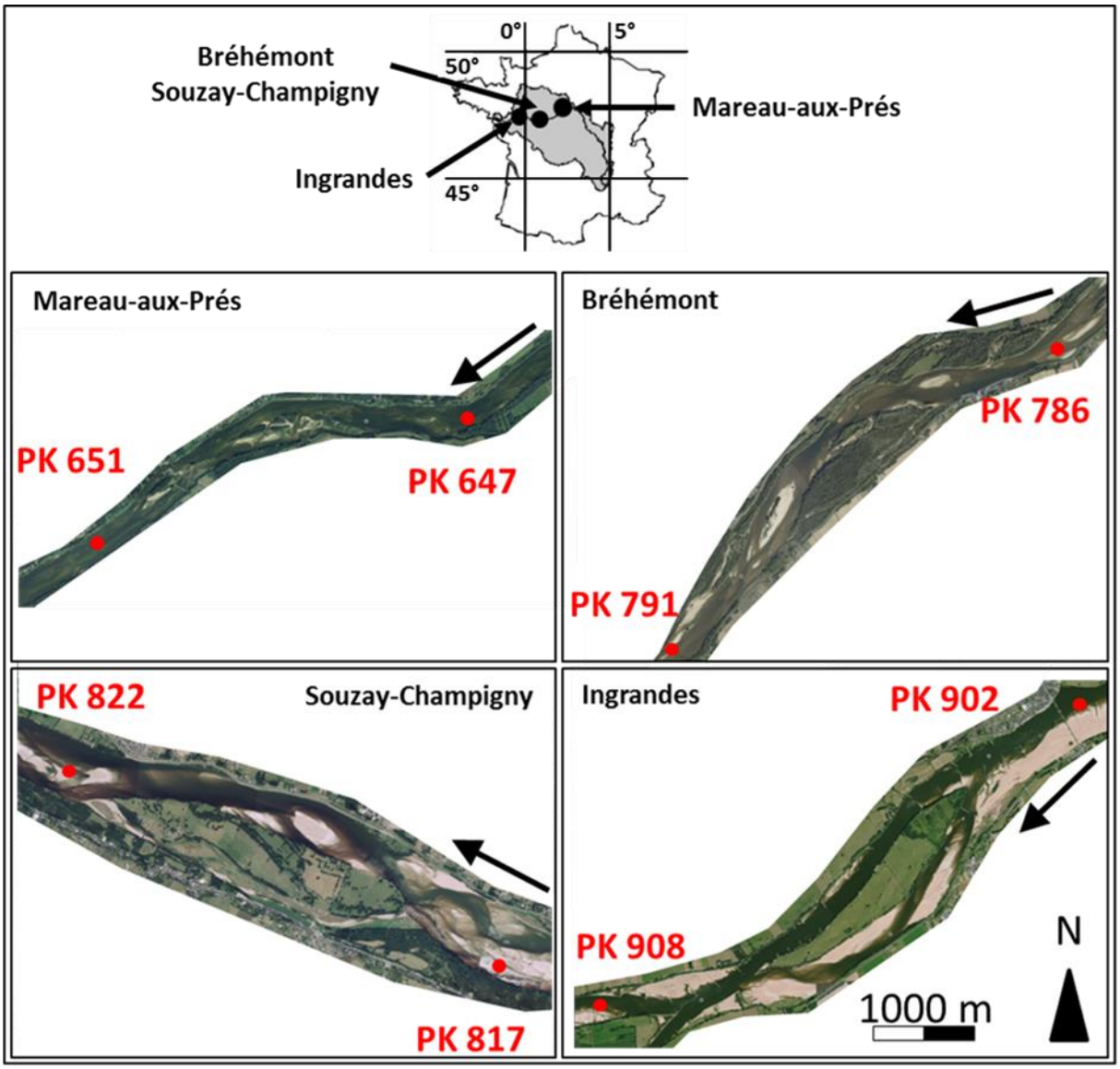


Figure 6-2 : Secteurs de prélèvement des échantillons de sédiments à partir desquels les mélanges granulométriques expérimentaux ont été définis.

Ces analyses granulométriques ont permis de tracer les courbes de fréquence cumulées des sédiments échantillonnés (Figure 6-3). De plus, le travail de thèse de Latapie (2011) a permis de compléter le spectre granulométrique rencontré en Loire moyenne avec le D_{50} d'échantillons de sédiments provenant de chenaux secondaires, de barres sédimentaires ainsi que du fond de chenal.

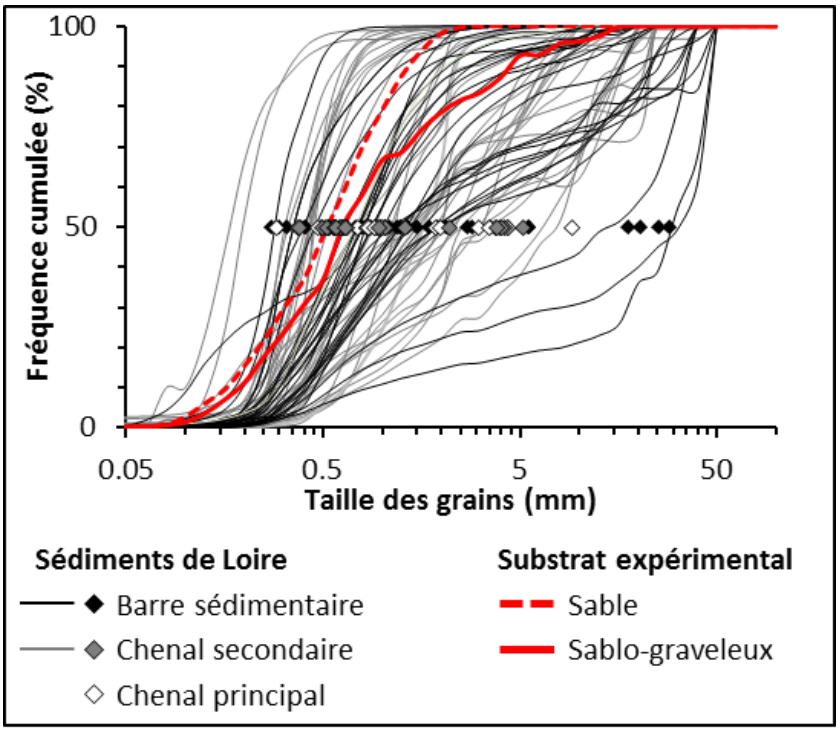


Figure 6-3 : Courbes des fréquences cumulées des tailles de grain (n=68) et D_{50} (n=98) (losanges) des sédiments de Loire en fonction des unités sédimentaires échantillonnées associées avec les courbes de fréquence cumulées de la taille des grains des sédiments utilisés pour remplir la fosse expérimentale.

Le mélange granulométrique a été défini à l'aide des courbes de fréquences cumulées ainsi que des sédiments disponibles auprès des carriers de la région. Les sédiments de la fosse sont des sédiments de Loire, prélevés dans l'estuaire, en lit mineur. Les sédiments ont été lavés après extraction pour éliminer le sel provenant des eaux estuariennes.

6.3.1.2. Fosse expérimentale

La fosse expérimentale (Figure 6-4) de 108 m de long est large de 1,2 m et profonde de 1,2 m permettant d'obtenir 108 casiers unitaires de dimension 1 m*1,2 m*1,2 m dans lesquels les graines ont été semées. La fosse expérimentale est divisée en trois parties au sein desquelles les trois substrats mentionnés plus haut sont répartis, chacun sur 12 casiers. Les différents substrats sont séparés par des planches.

Figure 6-4 : Fosse expérimentale de 108 m de long, 1,2 m de large et 1,2 m de profondeur remplis de sédiments lavés provenant de l'estuaire de la Loire. Les trois types de substrat sont séparés par des planches en bois et au sein de chaque substrat des casiers individuels de 1 m de long sont identifiés.

La fosse expérimentale est divisée en trois parties (Table 6-1), dans lesquelles la répartition des substrats, composés de 12 casiers chacun, a été tirée aléatoirement à l'aide du logiciel ExcelStat.

Table 6-1 : Répartition des substrats dans la fosse expérimentale.

Fosse expérimentale								
Partie 1 (sommet de pente)			Partie 2 (milieu de pente)			Partie 3 (bas de pente)		
Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche	Bi-couche	Sablo-graveleux	Sable	Sable	Bi-couche	Sablo-graveleux
12 casiers	12 casiers	12 casiers	12 casiers	12 casiers	12 casiers	12 casiers	12 casiers	12 casiers

6.3.1.3. Végétation

Les deux espèces choisies pour réaliser ces expérimentations sont *Populus nigra* et *Salix alba*. Les inflorescences ont été prélevées à maturité sur des individus femelles dans la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin (Table 6-2) à proximité du site de Mareau-aux-Prés (45) faisant l'objet des études *in situ* de ce travail de thèse. Les capsules des inflorescences sont ensuite disséquées en laboratoire afin de récolter le coton contenant les graines (Figure 6-5). Les graines sont conservées dans le coton dans une chambre froide dont la température est inférieure à 10°C jusqu'au jour de l'ensemencement (Figure 6-5) afin de préserver leur viabilité (Maroder *et al.*, 2000).

Figure 6-5 : Récolte des graines en laboratoire. Première étape : ouverture des capsules composant les inflorescences de saules et peupliers et récolte du coton contenant les graines. Etape 2 : séparation du coton et des graines par tamisage.

Les graines ont été séparées du coton à l'aide de tamis (Figure 6-5) avant d'être semées sur les casiers unitaires de la fosse expérimentale. Lors de l'ensemencement, quelques graines sont placées en boîte de pétri pour vérifier leur viabilité (Table 6-2).

Les graines ont été semées à une densité de 345 graines.m^{-2} à l'aide de plaque de semence (Figure 6-5) de dimension 1.2 m*0.8 m, permettant un espace de 0.2 m entre les semis de deux casiers juxtaposés.

Une fois ensemencés, le dispositif est protégé contre les nuisibles et les intempéries (grêles, forte pluie) par un grillage et des filets. Les semis sont arrosés par un dispositif de pluie fine localisé à une dizaine de centimètres de hauteur.

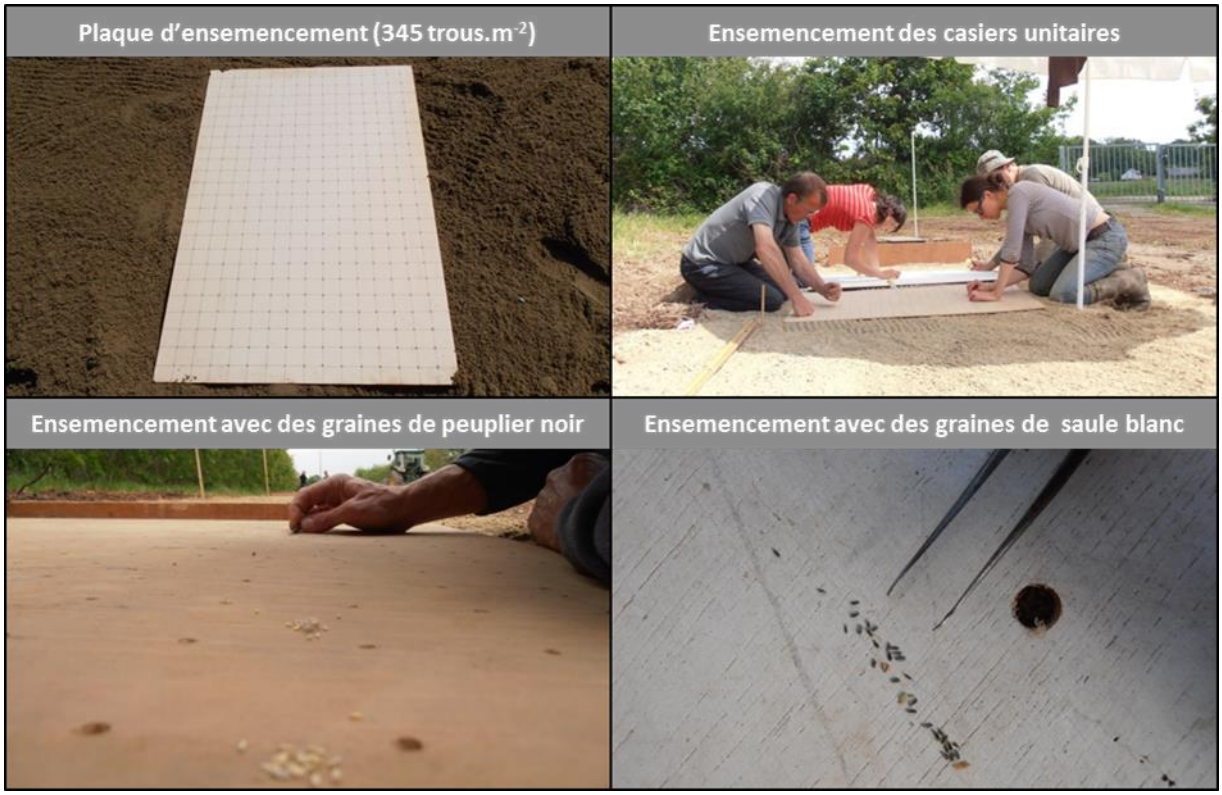


Figure 6-6 : Planches d'ensemencement (1,2 m * 0,8 m) des casiers individuels avec une densité (345 trous) et un espacement fixe (nœuds). Quelques graines sont insérées dans chaque trou pour optimiser la germination, le but étant d'avoir une plantule par trou. Les graines de peuplier noir sont blanches et de taille supérieure à celles du saule blanc qui sont grises.

Les différentes étapes de récoltes des graines, ensemencement et mesures réalisées sur la végétation sont mentionnées dans un calendrier récapitulatif (Table 6-2).

Table 6-2 : Récapitulatif des données et calendrier des expériences en pépinière.

	Année 1			Année 2	
	P. nigra (mai)	*S. alba* (mai)	*P. nigra* (juin)	*P. nigra*	*S. alba*
Nombre d'arbres mères	1	1	1	2	1
Récolte des inflorescences	14-mai-12		15-juin-12	26-mai-13	
Récolte coton + graines (labo)	15-mai-12		18-juin-12	27-mai-13	
Début de l'ensemencement	21-mai-12		19-juin-12	28-mai-13	
Nombre de jour d'ensemencement	1		1	4	
% germination des graines en boîte de pétri	92	84	86	99	81
Nombre de graines testées en boîte de pétri	70	550	110	100	
Observation de la germination en boîte de pétri	22-mai-12		19-juin-12	31-mai-13	
Début extraction pour l'expérience témoin	n.r.		29-janv.-13	10-févr.-14	
Nombre de jours entre l'ensemencement des graines et la récolte des semis	n.r.		224	258 (± 6)	
Début expérience arrachage	n.r.		26-mars-13	10-févr.-14	
Nombre de jours entre l'ensemencement des graines et l'arrachage des semis	n.r.		280	258 (± 6)	
Nombre de jours de mesures (témoin + arrachage)	n.r.		2	2	
Enfouissement des semis	n.r.		29-mars-13	n.r.	
Nombre de jours entre l'ensemencement des graines et l'enfouissement	n.r.		283	n.r.	
Mesure de survie à l'enfouissement	n.r.		12-févr.-14	n.r.	
Nombre de jours d'enfouissement	n.r.		320	n.r.	

La fosse a été ensemencée deux années de suite et la répartition de l'ensemencement au sein de chaque substrat a été tirée aléatoirement à chaque fois. La première année, des graines des deux espèces arrivées à maturité en mai ont été semées sur les deux tiers des casiers selon le plan expérimental de la Figure 6-7A. Un tiers des casiers étaient restés disponible pour des graines de peupliers noirs arrivées à maturité en juin pour identifier un éventuel effet de la phénologie sur la capacité des semis à survivre aux contraintes testées. Les graines de mai n'ayant pas germées, les graines de peuplier noir de juin ont été semées sur tous les casiers de la partie 3 de la fosse. Sur ces 36 casiers ensemencés, 22 casiers ont été utilisés pour réaliser l'expérience témoin (8 sur sable, 6 sur bi-couche, 8 sur sablo-graveleux), 4 casiers pour l'expérience d'arrachage (1 sur sable, 2 sur bi-couche, 1 sur sablo-graveleux) et 3 pour l'expérience d'enfouissement (1 sur chaque substrat).

La seconde année, seules les parties 1 et 2 de la fosse ont été ensemencées avec des graines des espèces *P. nigra* et *S. alba* (Figure 6-7B). En effet, les substrats de la partie 3 avaient été perturbés par les mesures de l'année précédente. De plus, cette partie accueillait encore l'expérience d'enfouissement au moment du nouvel ensemencement.

Sur les 72 casiers ensemencés pour cette seconde année, 19 ont été consacrés à l'expérience témoin (7 sur sable, 6 sur bi-couche, 6 sur sablo-graveleux) et 11 à l'expérience d'arrachage (4 sur sable, 3 sur bi-couche, 4 sur sablo-graveleux). Les casiers non utilisés présentaient des taux de germination très faibles voire inexistants.

L'expérience d'enfouissement ayant été réalisée qu'une seule fois, les résultats présentés dans ce chapitre seront ceux issus de l'ensemencement de l'année 1. En revanche, pour les expériences témoin et d'arrachage, les résultats présentés seront ceux de l'année 2 qui présentent un jeu de données plus robuste.

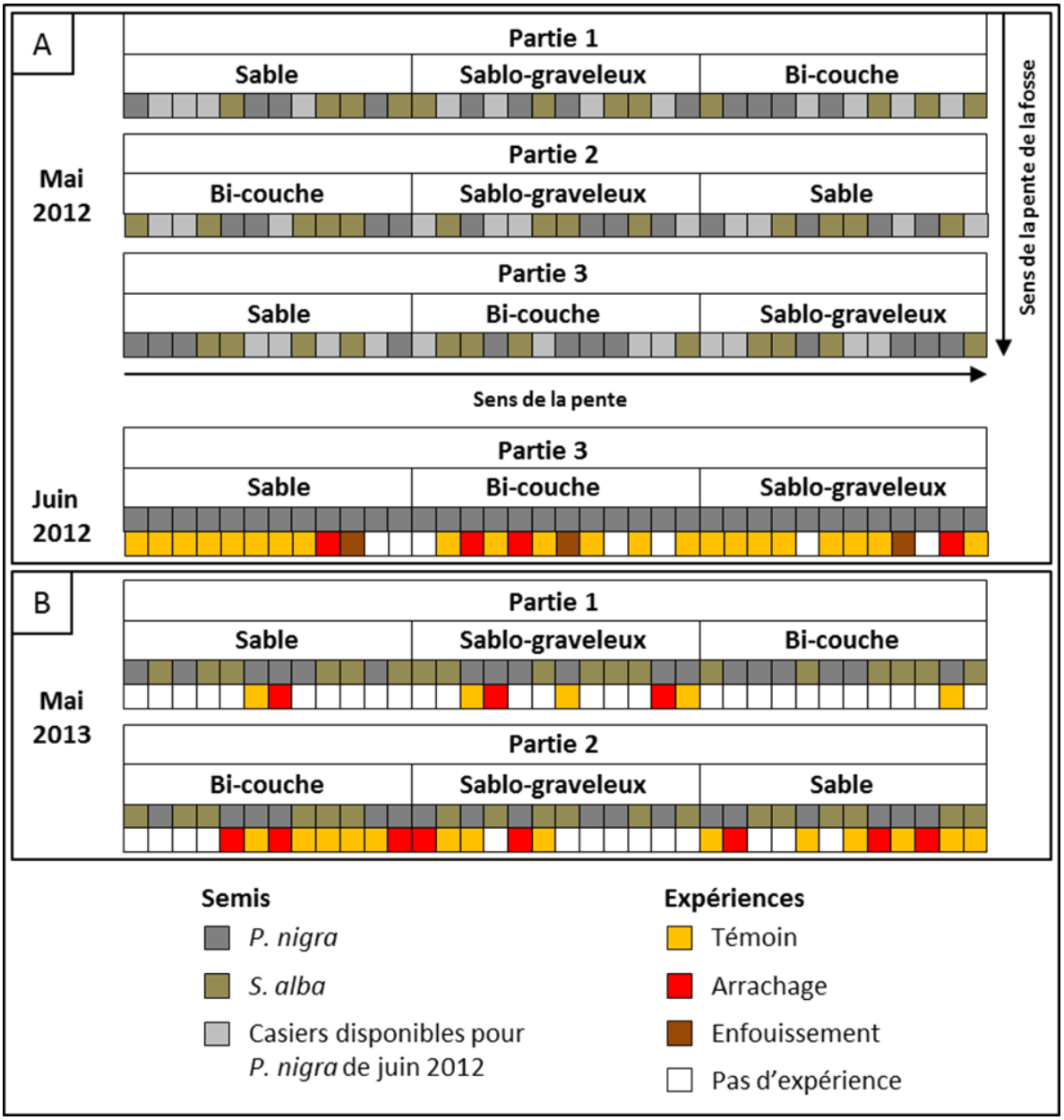


Figure 6-7 : Ensemencement des deux tiers des casiers du dispositif expérimental en mai 2012 suivi de l'ensemencement de tous les casiers de la partie 3 en juin 2012 suite à l'absence de germination en mai (A). Ensemencement des parties 1 et 2 du dispositif expérimental en mai 2013 (B)

6.3.2. Expérience témoin et d'arrachage

6.3.2.1. Récolte des semis témoin

La première année, la récolte a été faite dans des quadrats de 0,5 x 0,5 m à l'intérieur des casiers unitaires afin de limiter un éventuel effet « bordure ». La fosse a été saturée en eau (Figure 6-8) afin de tirer sur les plants verticalement en conservant le système racinaire. La seconde année, les casiers ont été décaissés à l'aide d'une pelleteuse munie d'un godet de 0,9 m de large. Les sédiments sont déposés à côté de la fosse dans lesquels les semis ont été récoltés. Les systèmes racinaires ont été libérés des sédiments à l'aide d'un jet d'eau.

6.3.2.2. Arrachage des semis

Les semis arrachés concernent exclusivement l'espèce *P. nigra* (Figure 6-8). La saturation en eau de la fosse permet de simuler la saturation en eau des sédiments comme dans le cas d'une crue survenant au sein d'une rivière. Le test d'arrachage a été effectué sur 30 individus. Les semis étaient arrachés à l'aide d'un cordon attaché au collet, sur lequel une traction parallèle au sol été appliquée (Figure 6-8). Le cordon était relié à un dynamomètre (FMI ALLURIS-100) de résolution 0,01 N, de précision +/- 0,2 %, de gamme de mesure de 0-50 N permettant la mesure de la force nécessaire à l'arrachage. Pour limiter la perturbation du substrat, chaque arrachage était espacé en fonction de la longueur racinaire des plants arrachés et en progression d'un bord du casier à un autre en tirant toujours vers le côté de progression, non perturbé.

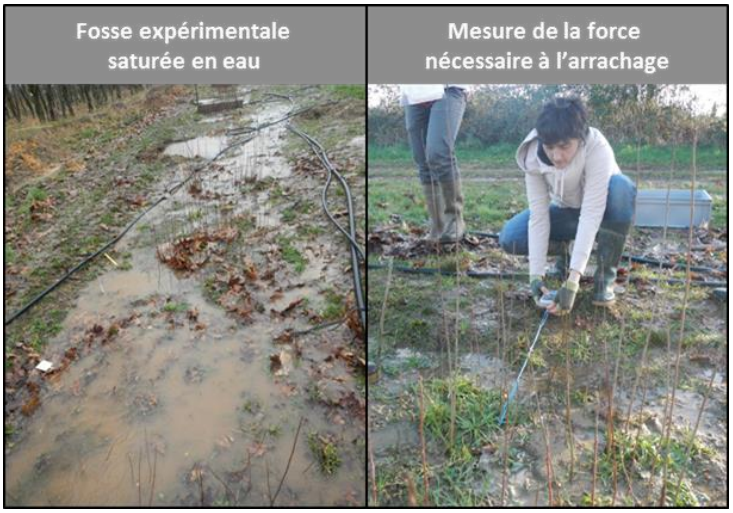


Figure 6-8 : Expérience d'arrachage, les sédiments sont saturés en eau et les semis arrachés par traction au collet avec un cordon relié à un dynamomètre.

6.3.2.3. Mesures manuelles

Au laboratoire de l'INRA d'Orléans, des mesures manuelles ont été réalisées sur l'ensemble des semis récoltés en pépinière (témoin + arrachage). Les paramètres mesurés sont :

- la longueur de la racine principale (L_{RP}),
- la longueur de la tige principale (L_T),
- le diamètre au collet (D_C),
- la biomasse racinaire (B_R) et de la partie aérienne (B_T).

Les longueurs ont été mesurées avec des mètres de précisions millimétriques, les diamètres avec des pieds à coulisse avec une précision de 0,1 mm (Figure 6-9).

Figure 6-9 : Dispositif des mesures manuelles en laboratoire.

Dans une dernière étape, les biomasses ont été pesées avec une Balance précise au 1/1000ème de gramme (Pioneer TM OHAUS).

6.3.2.4. Mesure du système racinaire par analyse d'image

Une fois les mesures manuelles réalisées, à l'exception des biomasses, le système racinaire a été séparé du système aérien pour être scanné (témoin + arrachage). Le temps nécessaire pour réaliser les mesures manuelles et les scans de racine varie de deux à cinq minutes par individu en fonction du développement de son système racinaire. Le temps d'acquisition des données étant long, il a été décidé de scanner au maximum 30 systèmes racinaires associé à une tige portant un bourgeon terminal choisi aléatoirement. Parfois, des systèmes racinaires pour lesquels la tige n'avait pas de bourgeon ont été intégrés pour avoir un nombre statistiquement représentatif.

Chaque système racinaire a été scanné par classe de 0,2 m le long de la racine principale pour appréhender l'évolution de la structure racinaire de l'éloignement au collet. Le scanner était connecté à un ordinateur (Figure 6-10) et piloté par le logiciel WinRHIZO Pro 2007d. Les paramètres optiques du scanner sont fixes et identiques pour tous les scans. La résolution choisie est de 400 pixels par pouce, correspondant à des pixels de taille de 0,063 mm de côté comme préconisé par Bouma *et al.* (2000).

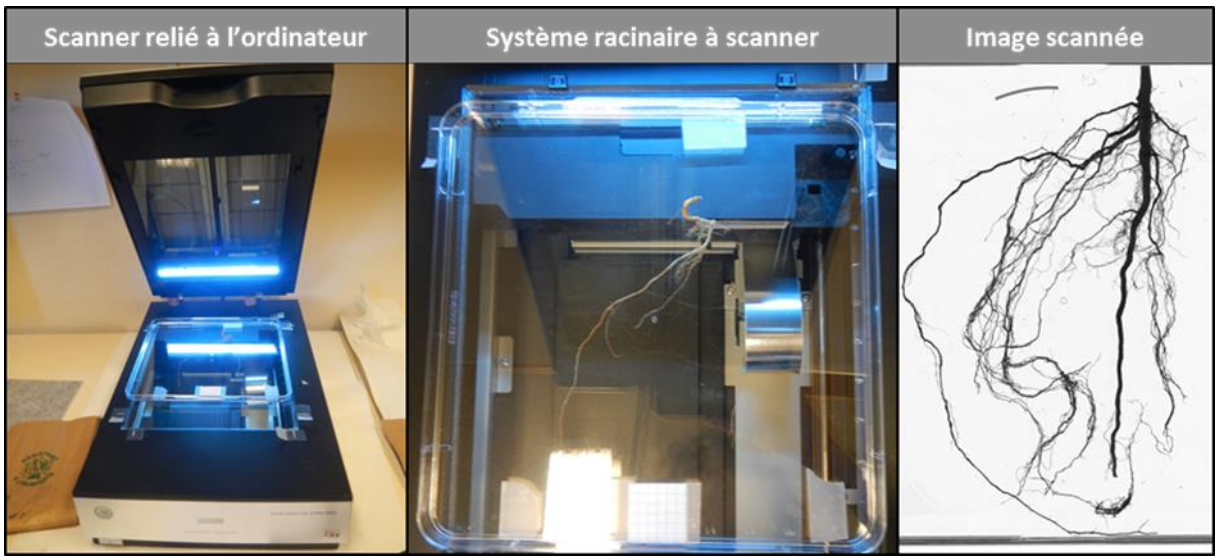


Figure 6-10 : Scanner relié à l'ordinateur permettant l'acquisition d'images en nuance de gris des systèmes racinaires (chaine de mesure C. Breton, INRA Orléans).

Une fois acquises, les images des systèmes racinaires ont été analysées par classification des pixels par nuance de gris. Les pixels représentant le fond (blanc) sont séparés des pixels représentant les racines (noir) en déterminant une valeur seuil. Le logiciel WinRHIZO peut déterminer automatiquement cette valeur seuil.

Cependant la présence de racines fines ou impuretés (poussière) peut entraîner des erreurs de classification automatique. L'opérateur peut modifier la valeur seuil pour prendre en compte toutes les racines et exclure les impuretés. Il est également possible d'exclure des zones de l'image ne comprenant que des impuretés. Le biais induit par un opérateur inexpérimenté peut être relativement important, c'est pourquoi toutes les analyses ont été réalisées durant une même période ininterrompue et par le même opérateur afin de limiter ce biais. Les mesures utilisées sont les suivantes :

- la longueur cumulée du système racinaire (L_{SR}),
- le diamètre moyen (D_{MSR}),
- les longueurs par classe de diamètre.

La grille de pixel permet le calcul des longueurs et diamètres. Cependant, les racines sont rarement alignées à la grille de pixel et parfois les racines peuvent se croiser au sein d'une image. Pour le calcul des longueurs, le logiciel applique à chaque pixel une correction prenant en compte la direction du mouvement. Le logiciel détecte également les nœuds et croisement afin d'additionner ou soustraire les longueurs pour compenser les superpositions et les nœuds.
Le diamètre moyen est calculé par la formule suivante :

$$Diamètre_{moyen} = Aire\ projetée / Longueur\ totale\ des\ racines \qquad (6\text{-}1)$$

L'aire projetée est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Aire\ projetée = nb_{pixels\ racine} \times aire\ pixel \qquad (6\text{-}2)$$

Dans cette dernière formule, le nombre de pixel représentant des racines est issu de la classification par nuance de gris et l'aire de pixel correspond au produit de sa hauteur et de sa largeur.
Pour obtenir les longueurs par classe de diamètre des racines, les diamètres sont mesurés en continu le long de la racine. Pour chacun des pixels appartenant à la racine, le diamètre est calculé comme suit :

$$Diamètre = plus\ petite\ distance\ entre\ 2\ côtés\ opposés\ (pixel)\ dans\ toutes\ les\ directions \qquad (6\text{-}3)$$

Le détail des méthodes de calcul de la morphologie des racines utilisées dans ce travail est disponible dans le manuel d'utilisation du logiciel WinRHYZO Pro 2007d (pp. 119-125, 2007).

6.3.2.5. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le jeu de données de l'espèce *P. nigra* de l'année 2 sur les semis des deux expériences témoin et arrachage à l'aide du logiciel R. Les tests statistiques ont été réalisés selon les étapes suivantes pour chacune des expériences :

- Etape 1 : réalisation des analyses de variance à 1 facteur (ANOVA) déterminant un « effet bloc » significatif ou non entre les casiers (répétitions) par substrat pour chaque variable testée,
- Etape 2 : validation ou correction des ANOVA,
- Etape 3 (en cas d'effet bloc) : détermination de la contribution de chaque casier par substrat pour chaque variable,
- Etape 4 (en cas d'effet bloc) : correction des valeurs pour chaque variable selon l'équation suivante :

$$Coefficient_{correction} = \frac{moyenne\ totale\ des\ blocs}{moyenne\ du\ bloc} \qquad (6\text{-}4)$$

- Etape 5 : réalisation d'ANOVA pour déterminer l'influence du substrat sur les variables testées,
- Etape 6 : validation ou correction des ANOVA,
- Etape 7 (test significatif) : détermination de la contribution de chaque substrat.

Les variables quantitatives sélectionnées sont les suivantes :

- la longueur de la tige (L_T) dont les individus sans bourgeon terminal ont été exclus,
- la longueur de la racine principale (L_{RP}),

- longueurs cumulées du système racinaire (L_{SR}),
- diamètre moyen de l'ensemble des racines composant le système racinaire (D_{MSR}) désigné comme le diamètre moyen du système racinaire par la suite dans ce chapitre,
- le diamètre au collet (D_C),
- biomasse tige (B_T) dont les individus sans bourgeon terminal ont été exclus,
- biomasse racinaire (B_R),
- Force nécessaire à l'arrachage correspondant uniquement à l'expérience arrachage.

Les ANOVA permettent de modéliser les relations existantes entre la variable explicative qualitative qui correspond au casier ou au substrat et la variable quantitative à expliquer correspondant à nos mesures. Elles sont réalisées selon l'énoncé statistique suivant :

- Hypothèse H_0 : l'effet de la variable qualitative sur la variable quantitative est nul. Pour les ANOVA testant l'effet bloc, l'hypothèse H_0 signifie qu'il n'y a pas d'effet bloc sur les variables quantitatives testées. Pour les ANOVA concernant l'influence du substrat, l'hypothèse H_0 signifie que le substrat (sable, sablo-graveleux, bi-couche) n'a pas d'influence sur la variable quantitative testée.
- Hypothèse H_1 : l'effet de la variable qualitative sur la variable quantitative est au moins significatif donc la variable qualitative à un effet sur la variable quantitative. Pour les ANOVA testant l'effet bloc, l'hypothèse H_1 signifie qu'il y a un effet bloc sur les variables quantitatives testées. Pour les ANOVA concernant l'influence du substrat, l'hypothèse H_1 signifie que le substrat (sable, sablo-graveleux, bi-couche) a une influence sur la variable quantitative testée.

Le rejet de H_0 est décidé au risque α= 5 % de se tromper si la *p-value* du test est inférieure à 5 %. La significativité du test dépend de la *p-value* selon les modalités suivantes :

- *p-value* < 5 % : le test est positif et significatif (*),
- *p-value* < 1 % le test est positif et très significatif (**),

- *p-value* < 1 ‰ le test est positif et hautement significatif (***).

Dans le cas du rejet de H_0, on conclura à un effet bloc ou à un effet du substrat sur la variable quantitative considérée. Dans le cas contraire, on conclura que, jusqu'à preuve du contraire, rien n'indique qu'il y ait un effet bloc du dispositif expérimental ou du substrat sur la variable quantitative.
La validité des modèles ANOVA réalisés est conditionnée par quatre postulats :

- P1 : les erreurs ont une espérance nulle,
- P2 : les erreurs ont toutes la même variance (homoscédasticité des erreurs), c'est-à-dire que la dispersion des résidus est la même autour des valeurs prédites,
- P3 : les erreurs sont indépendantes. Elles sont idéalement dues à des aléas de mesures et ne doivent pas être liées entre elles.
- P4 : les erreurs suivent une loi normale, ce qui permet de construire les intervalles de confiance des paramètres.

Les postulats sont validés graphiquement mais des validations statistiques ont également été appliquées aux postulats P2 et P4.
Le postulat P2 (égalité des variances) est testé statistiquement par la réalisation d'un test de Bartlett comparant k variances observées selon le schéma statistique suivant :

- H_0 : les k variances sont identiques dans la population visée,
- H_1 : l'une au moins des variances diffère d'au moins une autre dans la population visée.

Le rejet de H_0 est décidé au risque α = 5 %, 1 % ou 1 ‰ si la *p-value* du test est respectivement inférieure à 5 %, 1 % ou 1 ‰. Lorsque le postulat P2 n'est pas respecté une « Anova avec variances différentes » est réalisée en appliquant une correction de Welch comparable à la méthode d'ANOVA classique.
Le postulat P4 (normalité) est évalué statistiquement par la réalisation d'un test de Shapiro testant la normalité de la variable selon le schéma statistique suivant :

- H_0 : la distribution des résidus est conforme à une loi normale dans la population visée,
- H_1 : la distribution des résidus n'est pas conforme à une loi normale dans la population visée.

Le rejet de H_0 est décidé au risque α = 5 %, 1 % ou 1 ‰ si la *p-value* du test est respectivement inférieure à 5 %, 1 % ou 1 ‰. Toutefois, les tests d'ANOVA sont considérés comme suffisamment robustes pour s'affranchir de cette condition si la validation graphique confirme que les points ne s'éloignent pas trop de la ligne de normalité et que la distribution n'est pas en « dos de chameau » ou exponentielle.

Lorsque nos tests d'ANOVA sont positifs nos variables quantitatives sont corrélées à la variable explicative. Des tests ont été réalisés pour comparer les moyennes observées dans les blocs deux à deux et pour déterminer si elles sont significativement différentes. Le but de ce test est de savoir si les effets (bloc ou substrat) révélés par les ANOVA concernent l'ensemble des variables qualitatives (casier ou substrat) où plusieurs (variabilité inter-casier et inter-substrat).

6.3.3. Expérience d'enfouissement

L'enfouissement est réalisé sur un casier par substrat pour les semis de l'année 1 (Figure 6-7). Dans chaque casier, des quadrats de 0,5 x 0,5 m ont été délimités et géo-référencés (X, Y, Z) à l'aide du DGPS centimétrique Proflex 500 (Magellan). Sur chaque individu présent dans le quadrat la présence du bourgeon terminal a été notée. De plus, chaque individu a également été mesuré, étiqueté et géo-référencé avec le DGPS.

Les semis ont ensuite été enfouis sous du sable de composition granulométrique identique à la modalité de substrat sableux testé dans la fosse expérimentale. Les semis ont été couchés sur le sol avant d'être enfouis pour mimer un enfouissement par apport sédimentaire dans une rivière lors des crues. La topographie initiale et après enfouissement des casiers consacrés à cette expérience a été levée avec le DGPS Proflex 500 selon la densité de points exposée dans le Table 6-3.

Table 6-3 : Nombre de points topographiques levés par quadrat (0,5 m * 0,5 m) avant et après enfouissement des semis.

	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Topographie initiale	92	76	93
Topographie après enfouissement	33	33	34

L'outil d'interpolation par triangulation du logiciel SIG (Système d'Information Géographique) ArcGis10 a été utilisé pour obtenir des Modèles Numériques d'Altitude (MNA) de 0.1 m de résolution. A partir de ces MNA, la hauteur d'enfouissement de chaque semis a été obtenue grâce à l'outil d'extraction des valeurs du module *Spatial Analyst*. La résolution du MNA ne permettant pas le recouvrement de la totalité des localisations de semis, ces valeurs n'ont pas pu être extraites pour neuf semis sur le substrat bi-couche, sept sur le sablo-graveleux et sept également sur le sable.

Les plants issus des graines semées en juin 2012, enfouis en mars 2013, ont été recherchés en février 2014. Le sable a été enlevé à la pelle, à la main et à l'eau afin de préserver au mieux les parties aériennes et racines encore présentes.

6.4. Résultats

6.4.1. Expérience témoin

6.4.1.1. Influence du substrat sur les paramètres biologiques

Pour tous les paramètres observés, la variabilité des valeurs sur le substrat sableux est toujours plus forte que pour les deux autres substrats. Les valeurs extrêmes fortes sont également toujours plus élevées pour le substrat sableux (Figure 6-11). Sur les sept paramètres testés, les moyennes les plus fortes sont également observées sur le substrat sableux pour six d'entre elles (Table 6-4). En revanche, pour le diamètre moyen du système racinaire, la moyenne la plus élevée est observée sur le substrat bi-couche (Table 6-4).

Table 6-4 : Valeurs moyennes des paramètres biologiques analysés sur les trois substrats. Les nombres entre parenthèses correspondent aux nombres de semis mesurés pour chaque paramètre.

	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Longueur de tige (mm)	432 (207)	265 (112)	269 (112)
Diamètre au collet (mm)	3,4 (215)	2,7 (141)	2,5 (157)
Biomasse tige (g)	1,61 (207)	0,53 (112)	0,75 (70)
Biomasse racine (g)	1,11 (215)	0,62 (141)	0,76 (83)
Longueur cumulée du système racinaire (mm)	2719,6 (120)	1401,7 (120)	1744,2 (83)
Longueur de la racine principale (mm)	409 (213)	394 (141)	376 (157)
Diamètre moyen système racinaire (mm)	0,7 (120)	0,7 (120)	0,8 (83)

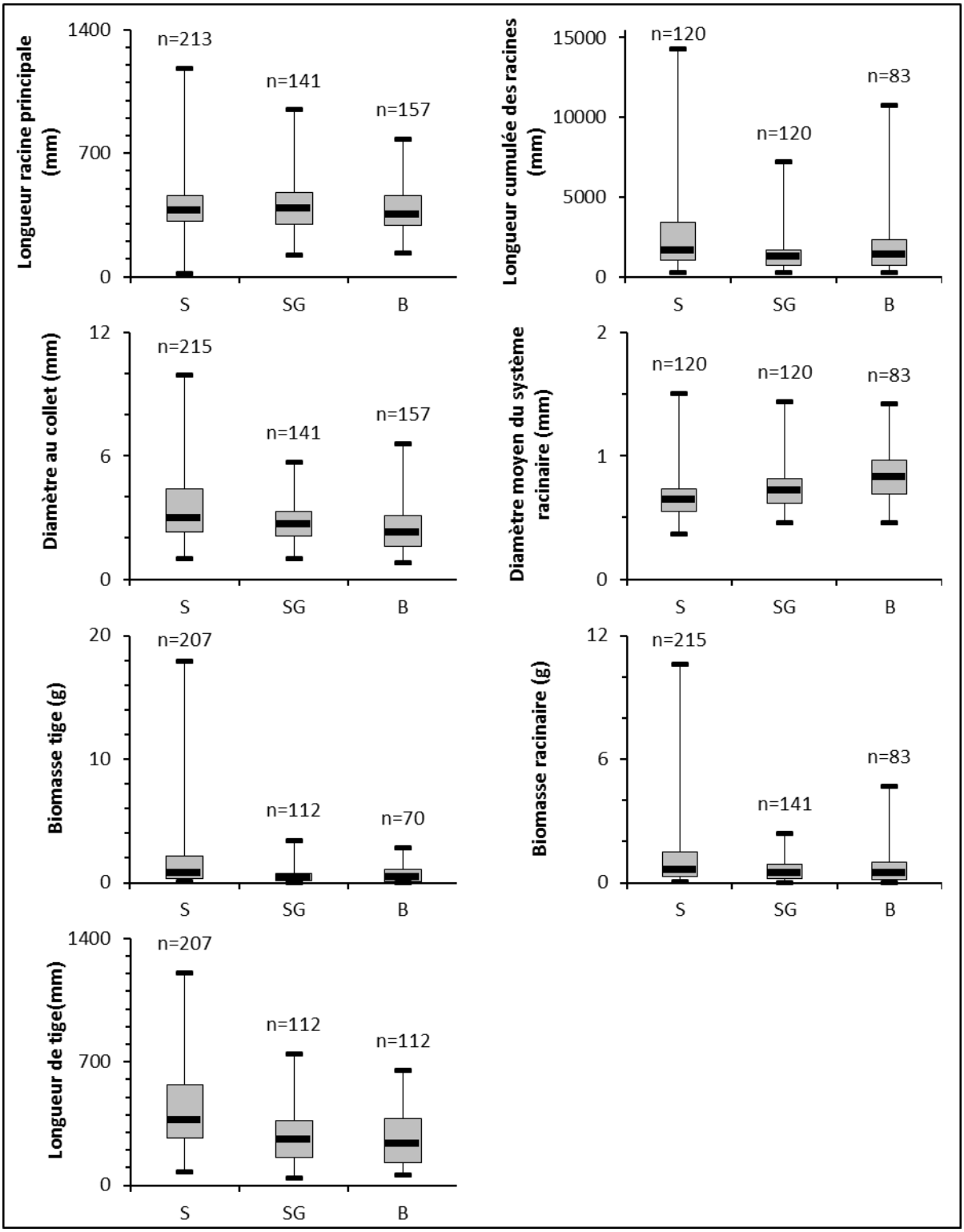


Figure 6-11 : Boîtes à moustache représentant la variabilité des valeurs de chaque paramètre biologique pour chacun des substrats testés dans l'expérience témoin.

Ces résultats montrent que les semis développés sur substrat sableux sont différents de ceux développés sur les substrats sablo-graveleux et bi-couche.

Sur les sept paramètres analysés, seul le paramètre « longueurs racine principale » n'est pas significativement différent entre les substrats (Table 6-5). En revanche, les résultats montrent des différences très significatives du diamètre moyen du système racinaire entre les substrats et hautement significatives pour la longueur de tige, le diamètre au collet, les longueurs cumulées du système racinaire et les biomasses (tige et racines) (Table 6-5).

Table 6-5 : résultats des ANOVA entre substrats pour l'expérience témoin. Le niveau de significativité est ****P* **< 0,05 ; *****P* **< 0,01 ; ******P* **< 0,001 ; ns, non significatif.

	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Effectifs	207	112	112
Longueur de tige		**2,2*****	
Effectifs	215	141	157
Diamètre au collet		**1,9*****	
Effectifs	213	141	157
Longueur racine principale		**0,1ns**	
Effectifs	207	112	70
Biomasse tige		**1,52*****	
Effectifs	215	141	83
Biomasse racine		**1,35*****	
Effectifs	120	120	83
Longueur cumulée du système racinaire		**2,56*****	
Effectifs	120	120	83
Diamètre moyen du système racinaire		**1,64****	

Les ANOVA révèlent donc un effet substrat sur six des sept paramètres analysés. Sur ces derniers, les tests de contribution de chacun des substrats sont présentés dans le Table 6-6. Il en ressort deux points majeurs : (i) des différences significatives entre le substrat sableux et les deux autres substrats pour les six paramètres analysés avec des valeurs supérieures sur substrat sableux (Table 6-4) pour cinq de ces paramètres (longueur de tige, diamètre au collet, longueurs cumulées du système racinaire, biomasses tige et racines) (i) les semis sur substrat bi-couche ne sont significativement différents de ceux sur substrat sablo-graveleux que pour trois paramètres, avec des valeurs supérieures sur ce substrat bi-couche (Table 6-4) uniquement sur le paramètre diamètre moyen du système racinaire.

Table 6-6 : Contributions des substrats dans l'expérience témoin. Le niveau de significativité est **P* < 0,05 ; ***P* < 0,01 ; ****P* < 0,001 ; ns, non significatif.

		Sablo-graveleux	Bi-couche
Longueur de tige	Sable	**2,1*****	**1,6*****
	Sablo-graveleux	-	0.83ns
Diamètre au collet	Sable	**4,5*****	**6,4*****
	Sablo-graveleux	-	**3***
Biomasse tige	Sable	**8*****	**1,2*****
	Sablo-graveleux	-	**3,8***
Biomasse racine	Sable	**1,5*****	**2,8****
	Sablo-graveleux	-	0,17ns
Longueurs cumulées du système racinaire	Sable	**6,6*****	**2,4*****
	Sablo-graveleux	-	0,06ns
Diamètre moyen du système racinaire	Sable	**6,6****	**0*****
	Sablo-graveleux	-	**5,2*****

6.4.1.2. Structure racinaire des peupliers noirs « témoins »

Le rapport entre la longueur de la racine principale et la longueur cumulée du système racinaire permet d'appréhender de manière indirecte et qualitative le développement de racines secondaires. Plus le ratio est proche de 1, moins il y a de racines secondaires. En revanche, plus le ratio est faible plus les longueurs cumulées sont élevées par rapport à la longueur de la racine principale indiquant un nombre de racines secondaires important (Figure 6-12).

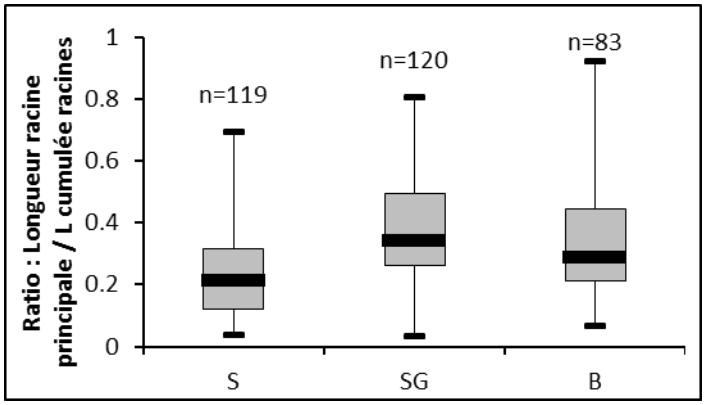


Figure 6-12 : Boîte à moustache du ratio de la longueur de la tige principale sur la longueur cumulée du système racinaire des semis pour chaque substrat de l'expérience témoin.

La variabilité la plus forte du ratio longueur de la racine principale sur longueur cumulée du système racinaire est observée sur le substrat bi-couche et la plus faible sur le substrat sableux.

Sur le substrat sableux, les valeurs du ratio sont plus faibles que sur les deux autres substrats ce qui est cohérent avec des longueurs de racine principale non différentes mais des valeurs de longueur cumulée significativement différentes et plus élevées pour le substrat sableux. Ces résultats suggèrent un développement de racines secondaires plus important sur les semis semés sur substrat sableux que sur substrat sablo-graveleux et bi-couche. Toutefois, le ratio est toujours inférieur à 1, indiquant des systèmes racinaires avec des racines secondaires sur tous les substrats.

Sur les trois substrats, plus de 60 % des longueurs cumulées sont mesurées sur les 20 premiers centimètres de la racine principale, puis entre 20 % et 40 % sur les 20-40 cm, moins de 10 % sur les 40-60 cm et moins de 1 % sur la partie inférieure de la racine principale (Figure 6-13). Dans la partie supérieure, le pourcentage est plus élevé sur le substrat sablo-graveleux et le plus faible sur le sableux. Inversement, le pourcentage est le plus élevé dans la partie 20-40 cm pour le sable et plus faible pour le sablo-graveleux. Le substrat bi-couche quant à lui présente des pourcentages intermédiaires par rapport aux deux autres substrats sur les 40 premiers cm de la racine principale. En revanche, le pourcentage de longueur cumulée de racine est légèrement plus élevé pour le substrat bi-couche entre 40 cm et 60 cm sur la racine principale.

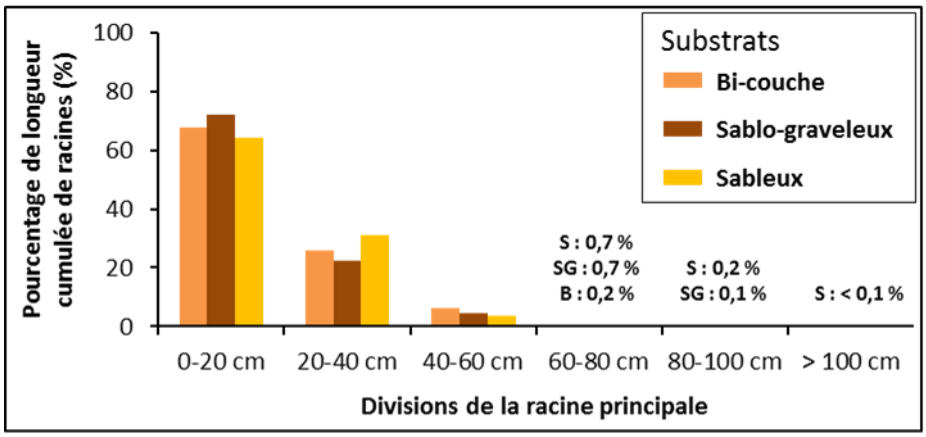


Figure 6-13 : Pourcentage de longueur cumulée des racines pour chaque substrat en fonction de la localisation sur la racine principale de l'expérience témoin.

Dans les trois substrats, les diamètres de racines les plus représentés sont ceux inférieurs à 0,5 mm (Figure 6-14A). Sur les 20 premiers centimètres de la racine principale, la gamme des diamètres de racine est la plus large (Figure 6-14B). Cependant, les diamètres les plus représentés sont ceux inférieurs à 0,5 mm sur les premiers centimètres.

Sur les trois substrats, à partir de 40 cm les diamètres les mieux représentés sont plus grands et compris entre 1-0,5 mm. La réduction du nombre de racines secondaires en profondeur au profit de la croissance de la racine principale plus épaisse peut expliquer ces résultats.

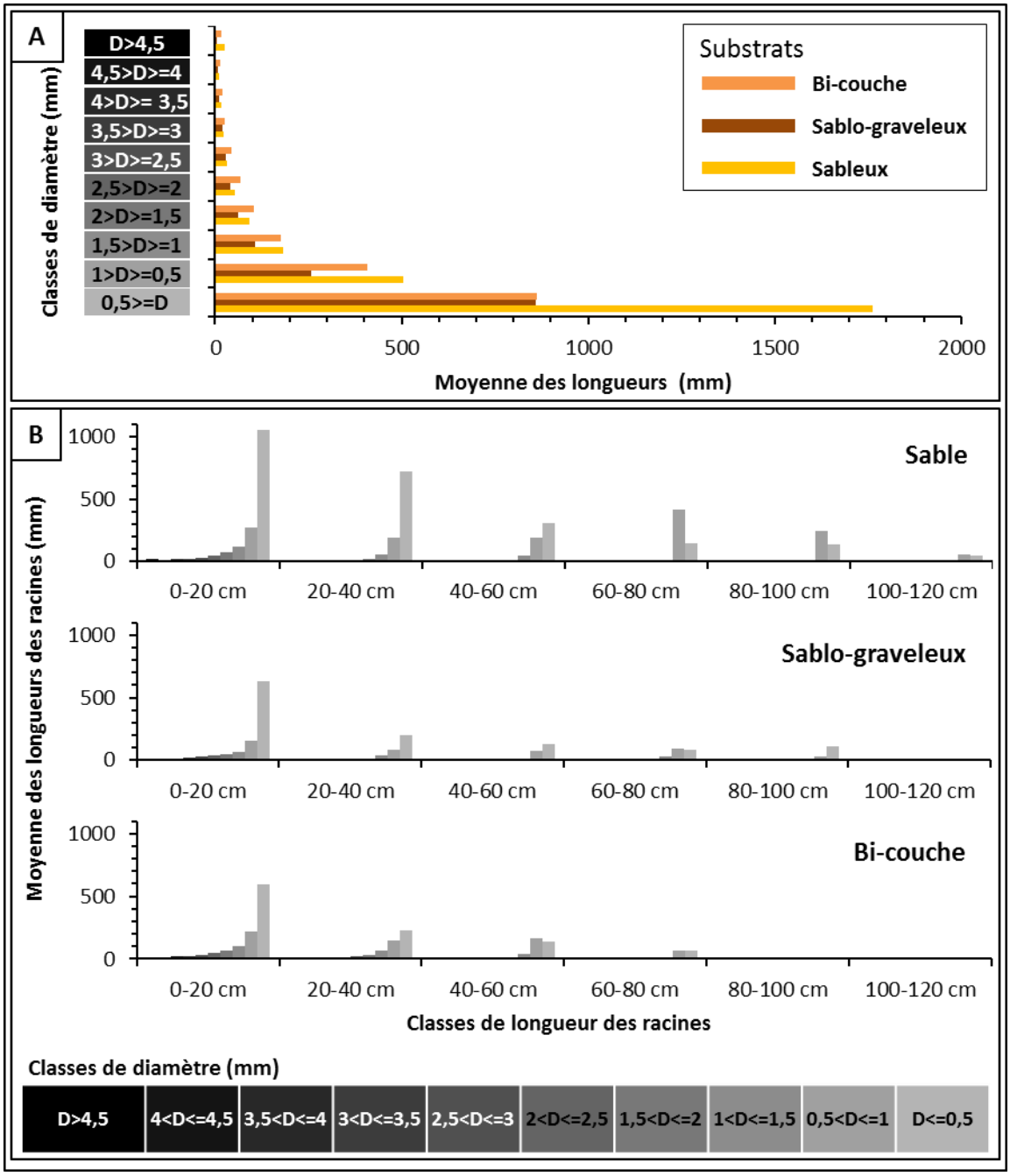


Figure 6-14 : Médianes et moyennes des longueurs de racines en fonction des classes de diamètre pour chaque substrat de l'expérience témoin (A). Moyenne des longueurs de racines par classe de diamètre en fonction de la longueur de la racine principale pour chaque substrat de l'expérience témoin (B).

6.4.1.3. Croissance des peupliers noirs « témoins »

La variabilité du ratio biomasse tige/racine est plus forte sur le substrat sableux que sur les deux autres substrats testés (Figure 6-15), avec 75% des valeurs supérieures à 1. A l'inverse, les valeurs du ratio ont tendance à être inférieures à 1, avec seulement 25% environ des valeurs supérieures à 1 sur les substrats sablo-graveleux et bi-couche. La tendance est identique pour ces deux derniers substrats pour le rapport entre la longueur de la tige et celle de la racine principale (Figure 6-15). Pour tous les substrats, le ratio est inférieur à 1 lorsque la longueur de la tige est comparée à la longueur cumulée du système racinaire (Figure 6-15). Les valeurs médianes sur les trois substrats sont semblables, la variabilité étant moins forte sur le substrat bi-couche que sur les deux autres substrats. Ces résultats suggèrent que sur les substrats sableux et sablo-graveleux le rapport de longueur de croissance entre la tige et le système racinaire est similaire. En revanche, les semis ont une production de biomasse de la partie aérienne plus importante que la partie racinaire dans le substrat sableux en comparaison du substrat sablo-graveleux. Les semis sur substrat bi-couche présentent des valeurs plutôt similaires à ceux développés dans le substrat sablo-graveleux que sur le substrat sableux pour les deux ratios biomasses et tige sur racine principale. En revanche, pour le ratio entre la longueur de tige et la longueur cumulée du système racinaire, les semis sur substrat bi-couche se distinguent des semis des deux autres substrats.

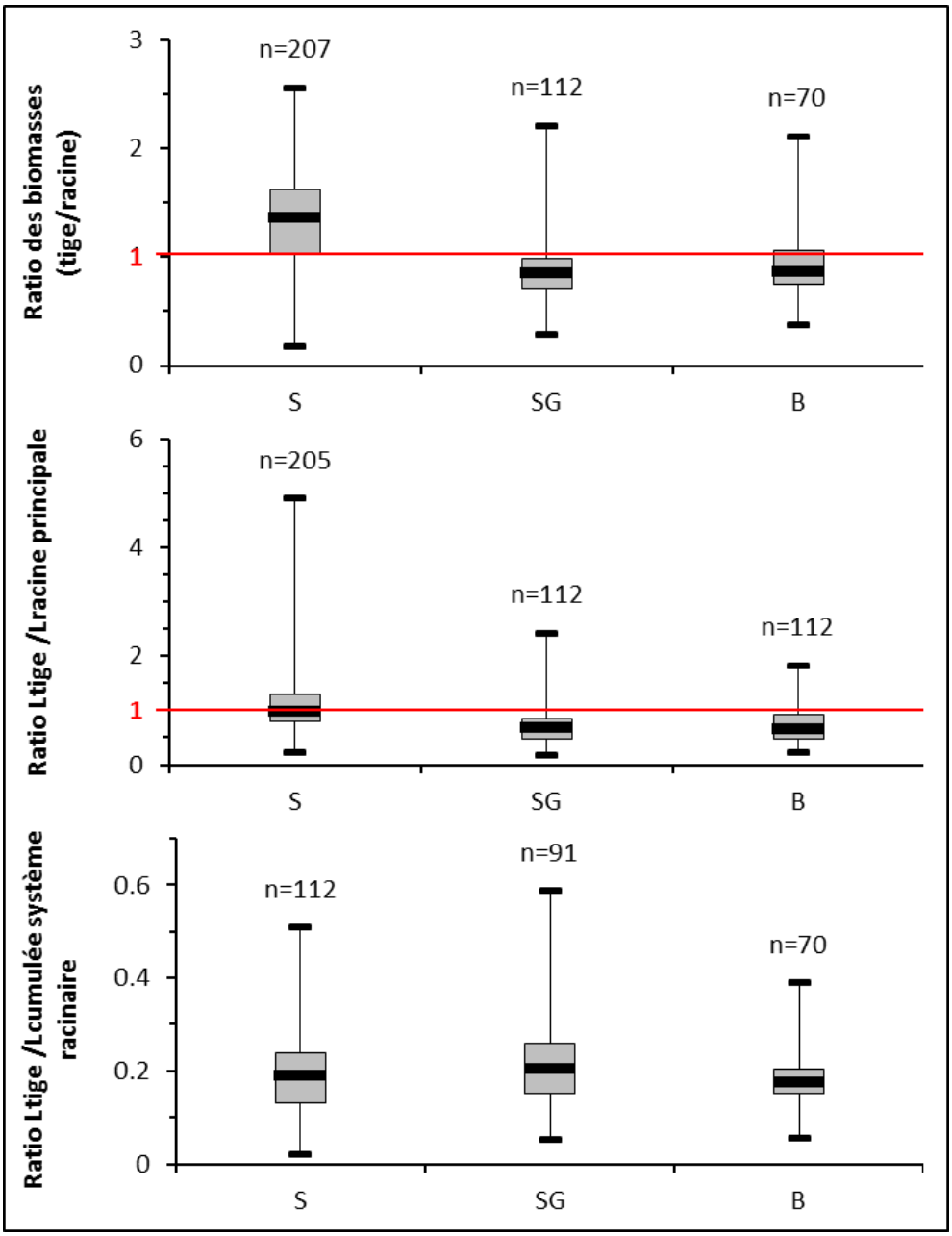


Figure 6-15 : Boîte à moustache décrivant la variabilité des ratios des biomasses et longueurs de tige sur les biomasses et longueurs de la racine principale où cumulées du système racinaire, pour chaque substrat dans l'expérience témoin.

6.4.2. Expérience d'arrachage sur le peuplier noir

6.4.2.1. Influence du substrat sur les paramètres biologiques et l'arrachage

Les paramètres biologiques analysés pour les semis de l'expérience d'arrachage correspondent aux 7 paramètres de base décrits dans l'expérience témoin. Les valeurs moyennes pour chaque substrat de ces 7 paramètres sont mentionnées dans le Table 6-7 et les boîtes à moustaches de la Figure 6-16.

La variabilité des valeurs sur le sable est plus forte que sur les deux autres substrats pour six (L_{RP}, L_{SR}, D_C, D_{MSR}, B_T et L_T) des sept paramètres mesurés (Figure 6-16) et les valeurs moyennes sont également plus fortes sur substrat sableux pour cinq paramètres (L_T, D_C, B_T, B_R, L_{SR}) (Table 6-7). La variabilité des valeurs sur substrat sablo-graveleux et bi-couche sont relativement semblables (Figure 6-16). Les moyennes mesurées sur le substrat bi-couche sont proches de celles mesurées sur substrat sablo-graveleux mais toujours légèrement supérieures pour six paramètres (L_T, D_C, B_T, B_R, L_{SR} et L_{RP}) et identiques pour le diamètre moyen du système racinaire (D_{MSR}) (Table 6-7).

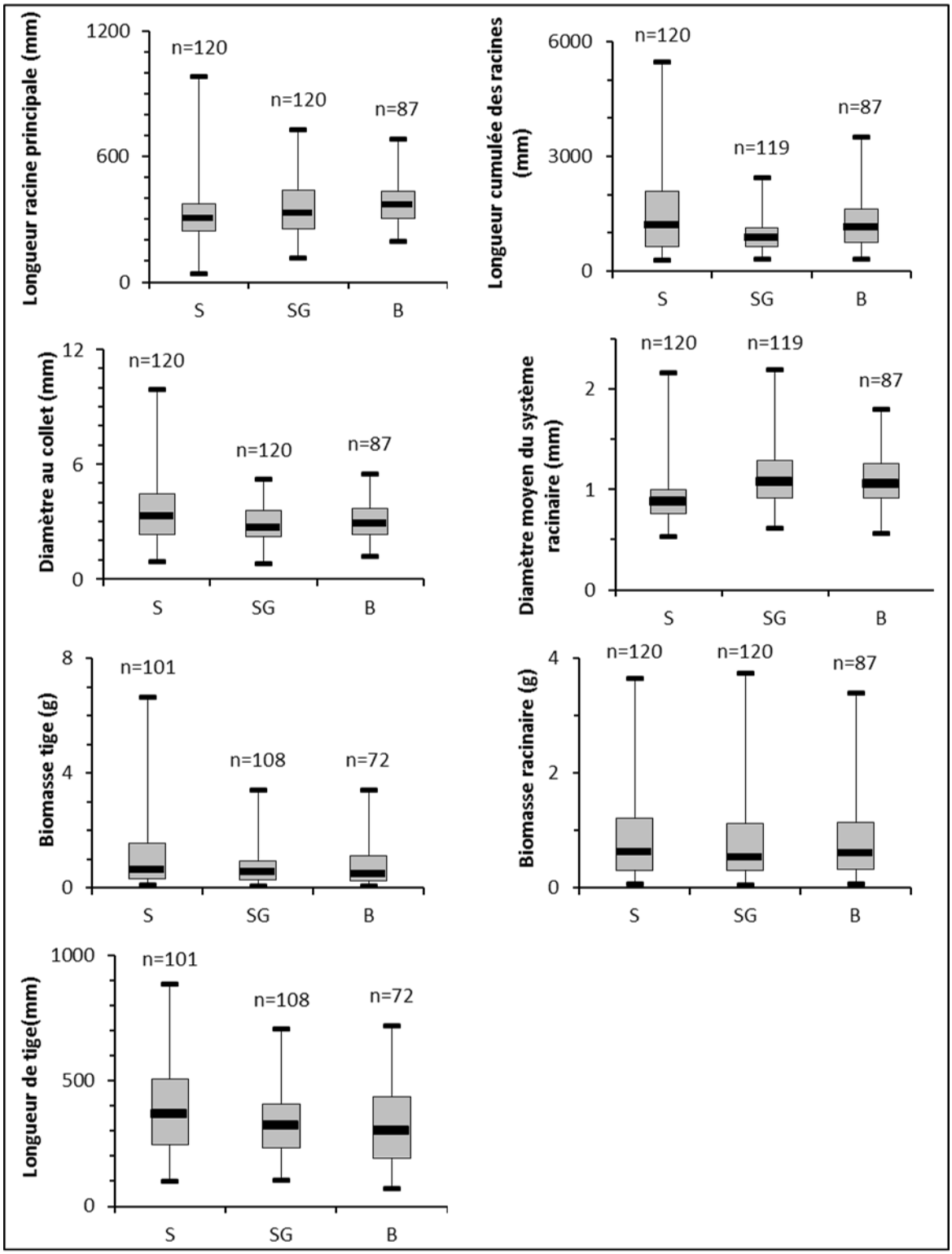


Figure 6-16 : Boîtes à moustache représentant la variabilité des valeurs de chaque paramètre pour chacun des substrats testés dans l'expérience d'arrachage.

Table 6-7 : Comparaison entre l'expérience témoin et d'arrachage des valeurs moyennes des paramètres descriptifs du système racinaire pour chaque substrat.

	Expérience témoin			Expérience arrachage		
	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Longueur de tige (mm)	432 (207)	265 (112)	269 (112)	393 (101)	326 (108)	328 (72)
Diamètre au collet (mm)	3,4 (215)	2,7 (141)	2,5 (157)	3,6 (120)	2,9 (120)	3,1 (87)
Biomasse tige (g)	1,61 (207)	0,53 (112)	0,75 (70)	1,16 (101)	0,71 (108)	0,78 (72)
Biomasse racine (g)	1,11 (215)	0,62 (141)	0,76 (83)	0,89 (120)	0,77 (120)	0,87 (87)
Longueur cumulée du système racinaire (mm)	2719,6 (120)	1401,7 (120)	1744,2 (83)	1472,3 (120)	949,6 (119)	1300,8 (87)
Longueur de la racine principale (mm)	409 (213)	394 (141)	376 (157)	328 (120)	349 (120)	381 (87)
Diamètre moyen système racinaire (mm)	0,7 (120)	0,7 (120)	0,8 (83)	0,9 (120)	1,1 (119)	1,1 (87)

L'effet du substrat est hautement significatif sur le diamètre au collet, la longueur cumulée du système racinaire et diamètre moyen du système racinaire (Table 6-8). Il est également très significatif pour la longueur et la biomasse de la tige ainsi que la longueur de la racine principale, contrairement à ce qui a été observé dans l'expérience témoin où elle est non significative (Table 6-8). En revanche, le substrat n'a pas d'effet significatif sur la biomasse racinaire et la force nécessaire à l'arrachage (Table 6-8).

Table 6-8 : résultats des ANOVA entre substrats pour l'expérience arrachage. Le niveau de significativité est *P < 0,05 ; **P < 0,01 ; ***P < 0,001 ; ns, non significatif.

	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Effectifs	101	108	72
Longueur de tige		**1,76****	
Effectifs	101	108	72
Biomasse tige		**1,2****	
Effectifs	120	120	87
Diamètre au collet		**5,08*****	
Effectifs	120	120	87
Longueur racine principale		**1,58****	
Effectifs	120	120	87
Biomasse racine		**4,3ns**	
Effectifs	120	119	87
Longueur cumulée du système racinaire		**2,61*****	
Effectifs	120	119	87
Diamètre moyen du système racinaire		**1.14*****	
Effectifs	120	120	87
Force arrachage < 50 N		**3,22ns**	

Les ANOVA révèlent un effet substrat sur six des huit paramètres analysés (L_T, B_T, D_C, L_{RP}, L_{SR}, D_{MSR}). Sur ces six paramètres, les tests de contribution de chacun des substrats mettent en évidence (Table 6-9) : (i) les trois substrats ne sont jamais tous significativement différents entre eux pour un paramètre, (ii) pour quatre paramètres (L_T, D_C, B_T, D_{MSR}) les semis sur substrat sableux sont significativement différents de ceux sur les deux autres substrats non significativement différents entre eux, (iii) pour les paramètres de longueur de la racine principale et longueur cumulée du système racinaire, les substrat bi-couche et sablo-graveleux sont respectivement significativement différents des deux autres substrats.

Table 6-9 : Contributions des substrats dans l'expérience d'arrachage. Le niveau de significativité est ****P* **< 0,05 ; *****P* **< 0,01 ; ******P* **< 0,001 ; ns, non significatif.

		Sablo-graveleux	Bi-couche
Longueur de tige	Sable	**6,5*****	**6,15****
	Sablo-graveleux	-	0,93ns
Diamètre au collet	Sable	**1*****	**1*****
	Sablo-graveleux	-	0,18ns
Biomasse tige	Sable	**2,6*****	**7,58****
	Sablo-graveleux	-	0,56ns
Longueur de la racine principale	Sable	0,18ns	**3,4*****
	Sablo-graveleux	-	**4,3***
Longueur cumulée du système racinaire	Sable	**1,5*****	0,19ns
	Sablo-graveleux	-	**4,1*****
Diamètre moyen du système racinaire	Sable	**0*****	**1,34*****
	Sablo-graveleux	-	0,78ns

6.4.2.2. Comparaison des traits et de l'influence du substrat avec les peupliers noirs « témoins »

Sur le substrat sableux, les moyennes des paramètres analysés sont supérieures à celles des autres substrats pour cinq paramètres (L_T, D_C, B_T, B_R, L_{SR}) et inférieures pour le paramètre diamètre moyen des racines (D_{MSR}) pour les deux expériences, témoin et arrachage (Table 6-7). Seules les moyennes de longueur de racine principale ne suivent pas la même tendance entre les deux expériences. Dans l'expérience témoin, la moyenne la plus élevée est sur le substrat sableux et la plus faible sur le substrat bi-couche. A l'inverse, dans l'expérience d'arrachage la moyenne la plus élevée est sur le substrat bi-couche et la plus faible sur le substrat sableux. La variabilité des valeurs sur le substrat est plus forte pour tous les paramètres dans l'expérience témoin et sur six paramètres dans l'expérience d'arrachage (L_T, D_C, B_T, L_{SR}, D_{MSR}, L_{RP}).

Les ANOVA révèlent un effet substrat significatif sur six des sept paramètres pour les deux expériences témoin et arrachage dont cinq sont identiques entre les deux expériences (L_T, B_T, D_C, L_{SR}, D_{MSR}). Dans l'expérience témoin, les ANOVA réalisées sur les valeurs de biomasse racinaire révèlent également un effet substrat significatif qui n'existe pas dans l'expérience d'arrachage. De plus, dans l'expérience d'arrachage, les ANOVA révèlent un effet substrat sur le paramètre longueur de la racine principale qui n'existe pas dans l'expérience témoin.
Les valeurs de longueur de tige (L_T), biomasse racinaire (B_R) et longueur cumulée du système racinaire (L_{SR}) sont significativement différentes sur les substrats sableux des deux autres substrats non significativement différents entre eux pour les deux expériences témoin et arrachage. Pour les autres paramètres pour lesquels il existe un effet substrat, dans l'expérience témoin tous les substrats sont significativement différents entre eux alors que dans l'expérience d'arrachage, seul un substrat est significativement différent des deux autres. Ainsi, les substrats significativement différents des deux autres sont le sable pour le diamètre moyen des racines (D_{MSR}), le substrat bi-couche pour la longueur de racine principale (L_{RP}) et le substrat sablo-graveleux pour la longueur cumulée des racines (L_{SR}).

6.4.2.3. Forces d'arrachage

Les ANOVA réalisées sur les forces nécessaires à l'arrachage n'ont pas révélées de différence significative entre les trois substrats. Les forces nécessaires à l'arrachage les plus faibles sont comprises entre 5 et 10 N et peuvent excéder 50 N pour les trois substrats (Figure 6-17). Entre 30 % et 40 % des semis arrachés nécessitent une force supérieure à 50 N qui constitue la limite de l'appareil de mesure utilisé. Sur la gamme des mesures inférieures à 50 N, la majorité des semis sont arrachés pour des valeurs comprises entre 20 N et 40 N avec un mode entre 20-30 N sur le sable, entre 30-40 N sur le substrat sablo-graveleux et une répartition égale entre 20-40 N sur le substrat bi-couche.

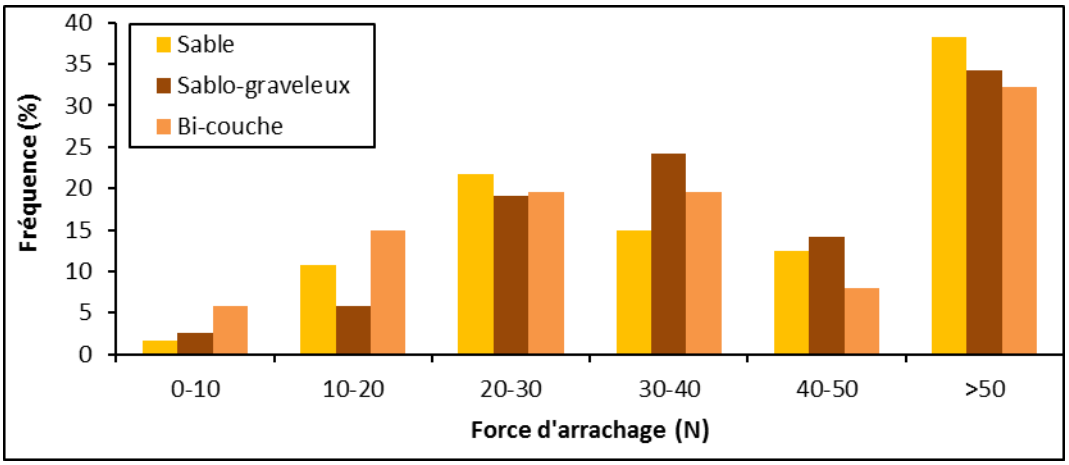


Figure 6-17 : Pourcentage de semis arrachés en fonction de la force de traction appliquée au collet pour chaque substrat.

5.3.3.3. Structure racinaire des peupliers noirs arrachés

Dans l'expérience d'arrachage, le ratio entre la longueur de la racine principale et la longueur cumulée des racines permet d'appréhender la ramification des systèmes racinaires arrachés (Figure 6-18).

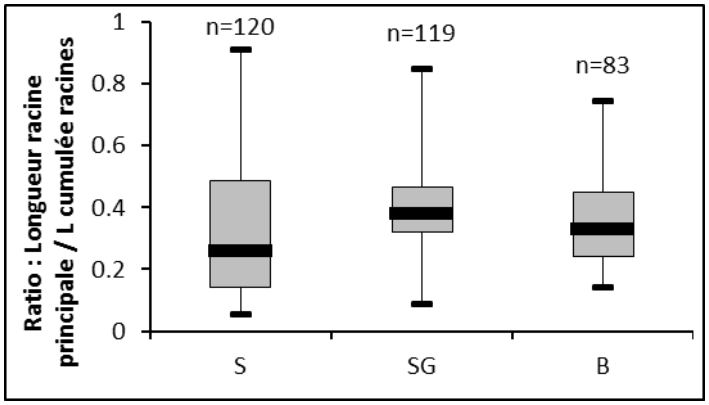


Figure 6-18 : Boîtes à moustache décrivant la varibilité du ratio de la longueur de la tige principale sur la longueur cumulée du système racinaire des semis pour chaque substrat de l'expérience arrachage.

La variabilité du ratio L_{RP}/L_{SR} est plus forte sur le substrat sableux. La valeur maximale du ratio, proche de 1, est observée sur le substrat sableux. La valeur maximale la plus éloignée de 1 est observée sur le substrat bi-couche. Cependant, pour les trois substrats, le troisième quartile correspond à une valeur de ratio d'environ 0,5 signifiant que 75 % des valeurs du ratio sont inférieures à 0,5. Toutefois, la répartition de ces valeurs n'est pas similaire avec des valeurs minimales et de premier quartile très variables entre les trois substrats.

Le classement des valeurs médianes est identique à celui observé dans l'expérience témoin avec par ordre croissant le substrat sableux, bi-couche et sablo-graveleux.

Plus de 95 % des longueurs de racines cumulées se localisent sur les 40 premiers centimètres de la racine principale avec près de 80 % dans les 20 premiers centimètres (Figure 6-19). A partir de 40 cm, tout comme dans l'expérience témoin, les pourcentages de longueur cumulée des racines sont très faibles.

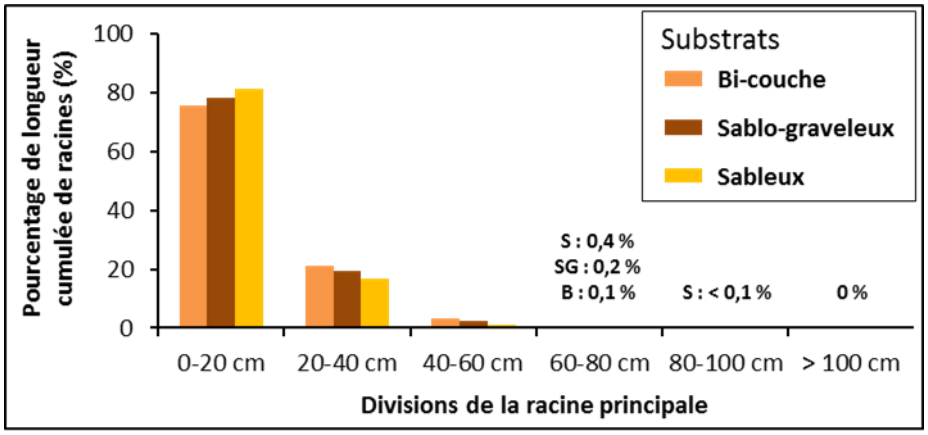


Figure 6-19 : Pourcentage de longueur cumulée des racines pour chaque substrat en fonction de la localisation sur la racine principale dans l'expérience d'arrachage.

Les pourcentages de longueur cumulée des racines ont diminué dans toutes les classes à partir de 20 cm sur la racine principale (Figure 6-20). En revanche ce pourcentage a augmenté dans la partie des 20 cm supérieurs de la racine principale.

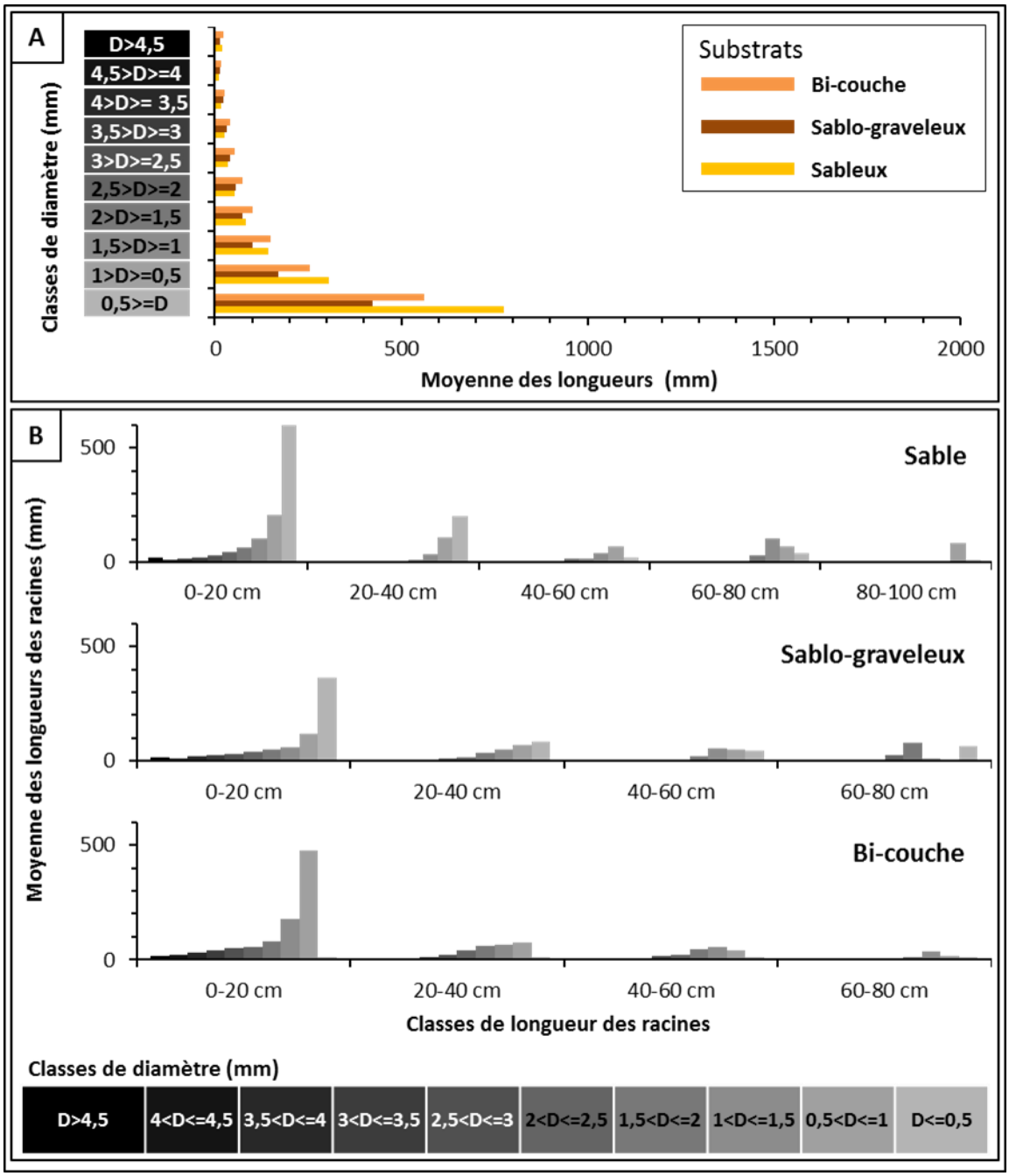


Figure 6-20 : Médianes et moyennes des longueurs de racines en fonction des classes de diamètre pour chaque substrat de l'expérience arrachage(A). Moyenne des longueurs de racines par classe de diamètre en fonction de la longueur de la racine principale pour chaque substrat de l'expérience arrachage (B).

6.4.2.4. Influence des paramètres mesurées sur la force d'arrachage

Les semis nécessitant une force d'arrachage supérieure à 50 N ont tendance à avoir une longueur, un diamètre et une biomasse de tige plus élevés que les semis nécessitant une force inférieure à 50 N avec une sensibilité plus forte pour la biomasse (Figure 6-21).

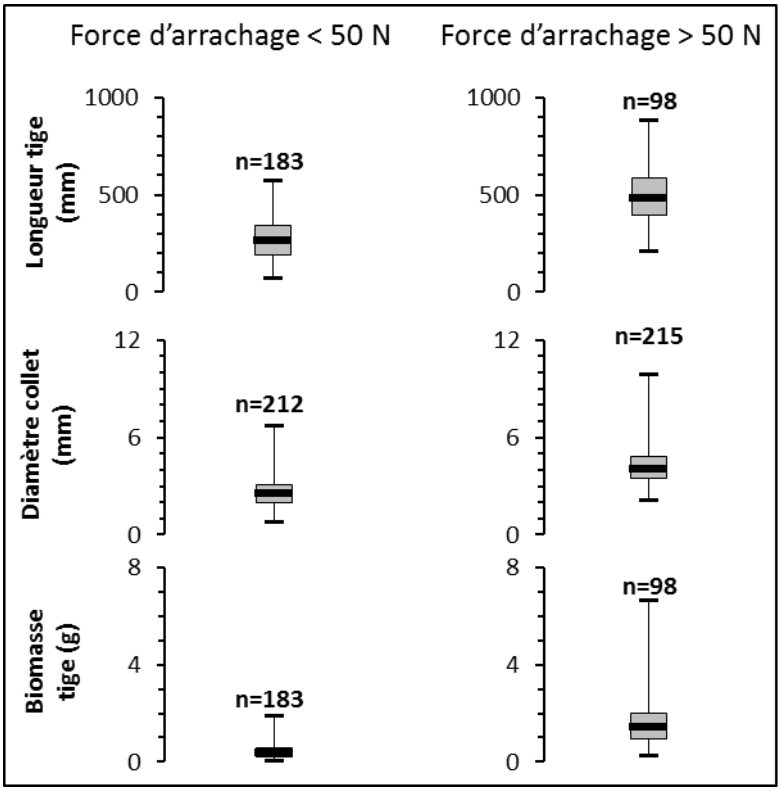


Figure 6-21 : Comparaison des paramètres biologiques de la partie aérienne des semis en fonction de la force nécessaire à l'arrachage inférieure ou supérieure à 50 N.

Les diamètres moyens du système racinaire sont semblables pour les semis arrachés pour les forces d'arrachage inférieures et supérieures à 50 N (Figure 6-22). Les longueurs de racine principale ont tendance à être plus petites pour les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N. Cette tendance est d'autant plus marquée sur la longueur cumulée du système racinaire et la biomasse racinaire. Le ratio de la longueur de racine principale sur la longueur cumulée du système racinaire est plus faible pour les forces d'arrachage nécessaires supérieures à 50 N suggérant également une ramification plus élevée du système racinaire des semis concernés.

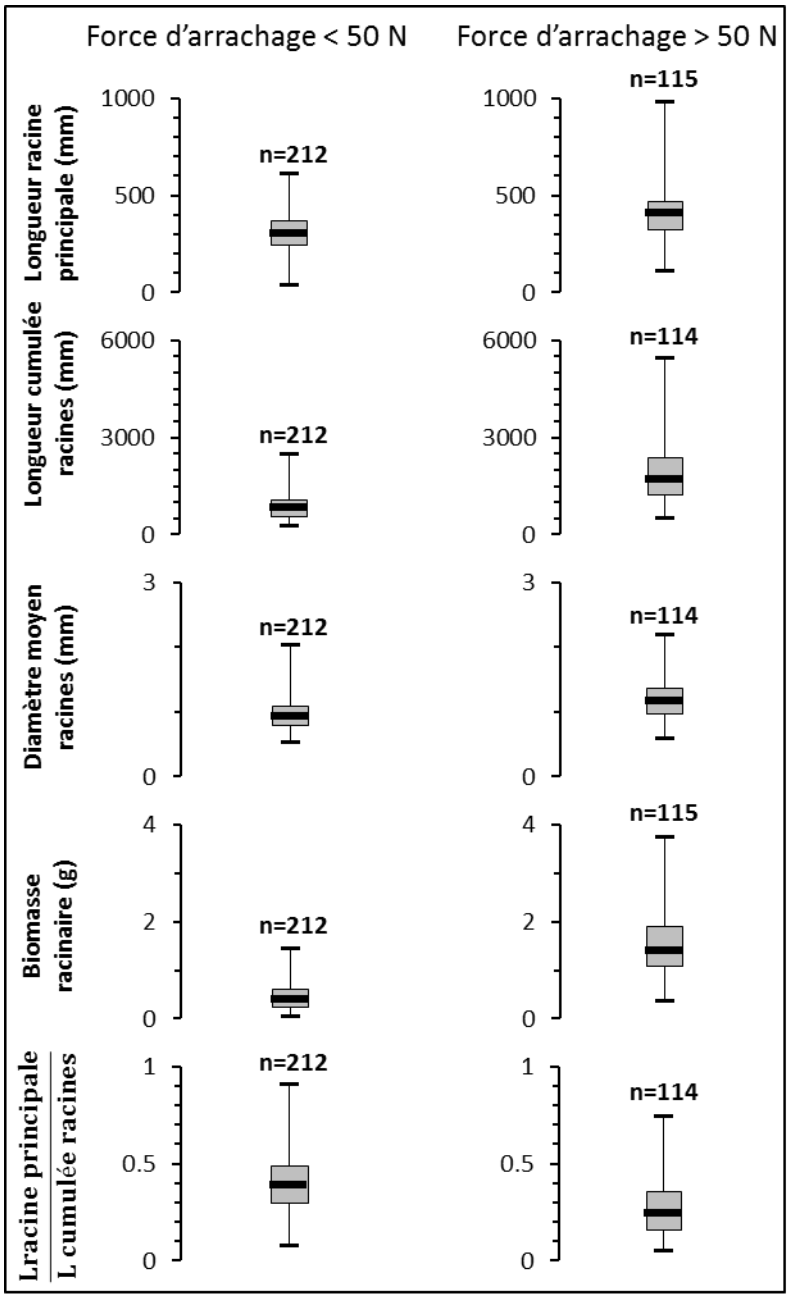


Figure 6-22 : Comparaison des paramètres biologiques décrivant le système racinaire des semis en fonction de la force nécessaire à l'arrachage inférieure ou supérieure à 50 N.

La plupart des valeurs de ratio des biomasses aériennes et racinaires fluctuent autour d'une valeur égale à 1 pour tous les semis arrachés (Figure 6-23). Cependant, les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N présentent des valeurs extrêmes hautes de ce ratio plus importantes traduisant une production de biomasse racinaire inférieure à la biomasse aérienne pour ces semis. La longueur de la racine principale est majoritairement plus longue que la tige pour les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N malgré des valeurs extrêmes hautes pour lesquelles cette tendance s'inverse.

En revanche, les semis dont la force nécessaire à l'arrachage est supérieure à 50 N présentent des valeurs du ratio de longueur de tige sur longueur de la racine principale supérieure à 1 traduisant une longueur de tige supérieure à la longueur de la racine principale. Cependant, le ratio comparant la longueur de tige avec la longueur cumulée du système racinaire est toujours inférieur à 1 traduisant une longueur de racine totale plus importante que la partie aérienne. Les médianes calculées de ce ratio sont similaires pour des forces d'arrachage inférieures et supérieures à 50 N. Cependant, des valeurs plus fortes sont observées pour les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N traduisant un écart entre la longueur cumulée du système racinaire et de la tige moins important que pour les semis nécessitant une force d'arrachage plus grande.

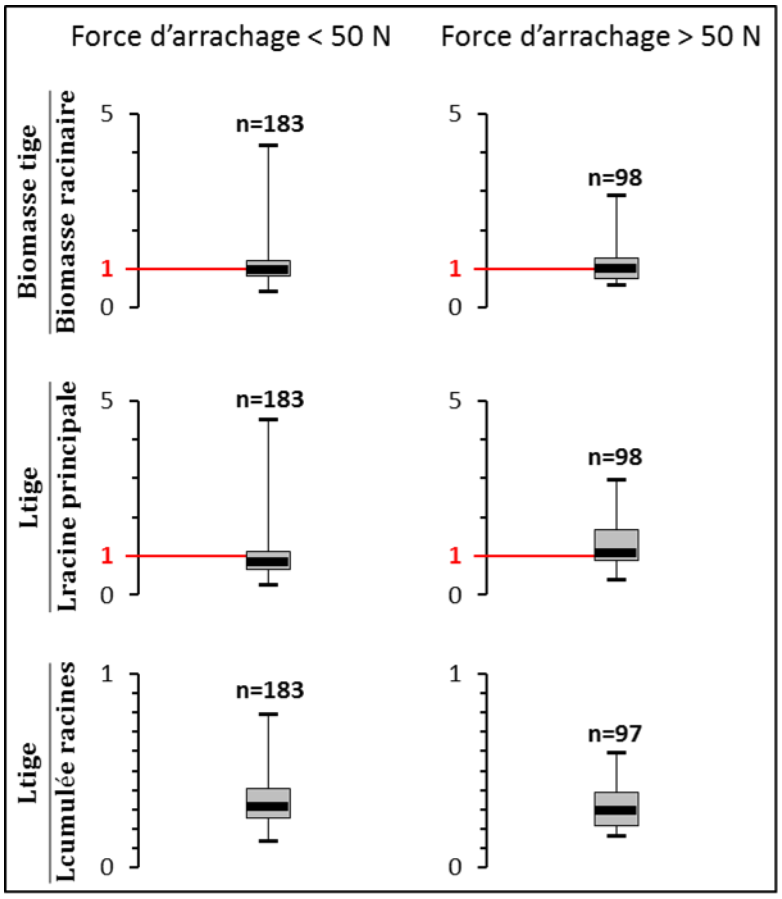


Figure 6-23 : Comparaison des paramètres biologiques décrivant le rapport de croissance entre la partie aérienne et le système racinaire des semis en fonction de la force nécessaire à l'arrachage inférieure ou supérieure à 50 N.

Dans le substrat sableux, le paramètre qui apparaît le plus lié à la force nécessaire à l'arrachage est la biomasse racinaire (Figure 6-24). Toutefois, la relation entre les biomasses de la tige et la force nécessaire à l'arrachage présente une tendance similaire.

Les forces nécessaires à l'arrachage semblent également augmenter avec la longueur de la tige et du diamètre au collet. En revanche, aucune organisation n'apparaît entre les forces nécessaires à l'arrachage et les autres paramètres testés.

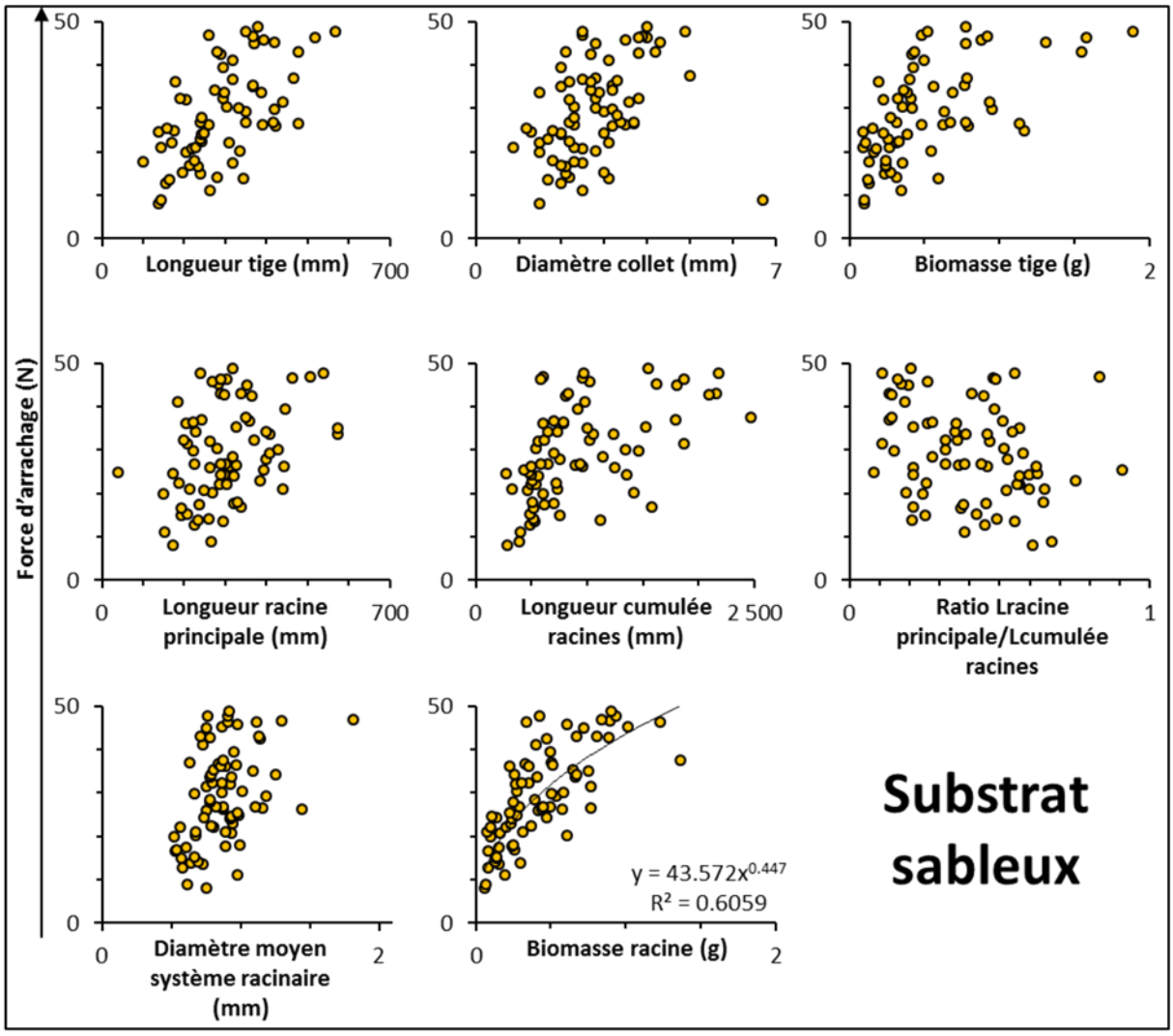


Figure 6-24 : Evolution de la force nécessaire à l'arrachage en fonction des paramètres biologiques pour les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N dans le substrat sableux.

Sur le substrat sablo-graveleux, comme sur le substrat sableux, la biomasse racinaire est le paramètre qui a la relation la plus forte avec la force nécessaire à l'arrachage, la tendance d'évolution des forces d'arrachage en fonction de la biomasse de la tige suit la même tendance et les forces tendent à augmenter avec le diamètre au collet (Figure 6-25). Les forces nécessaires à l'arrachage ne présentent pas de rapport significatif avec les mesures de longueurs racinaires et de tige. A l'inverse, une tendance à l'augmentation de la force nécessaire à l'arrachage s'observe avec l'augmentation du diamètre moyen du système racinaire.

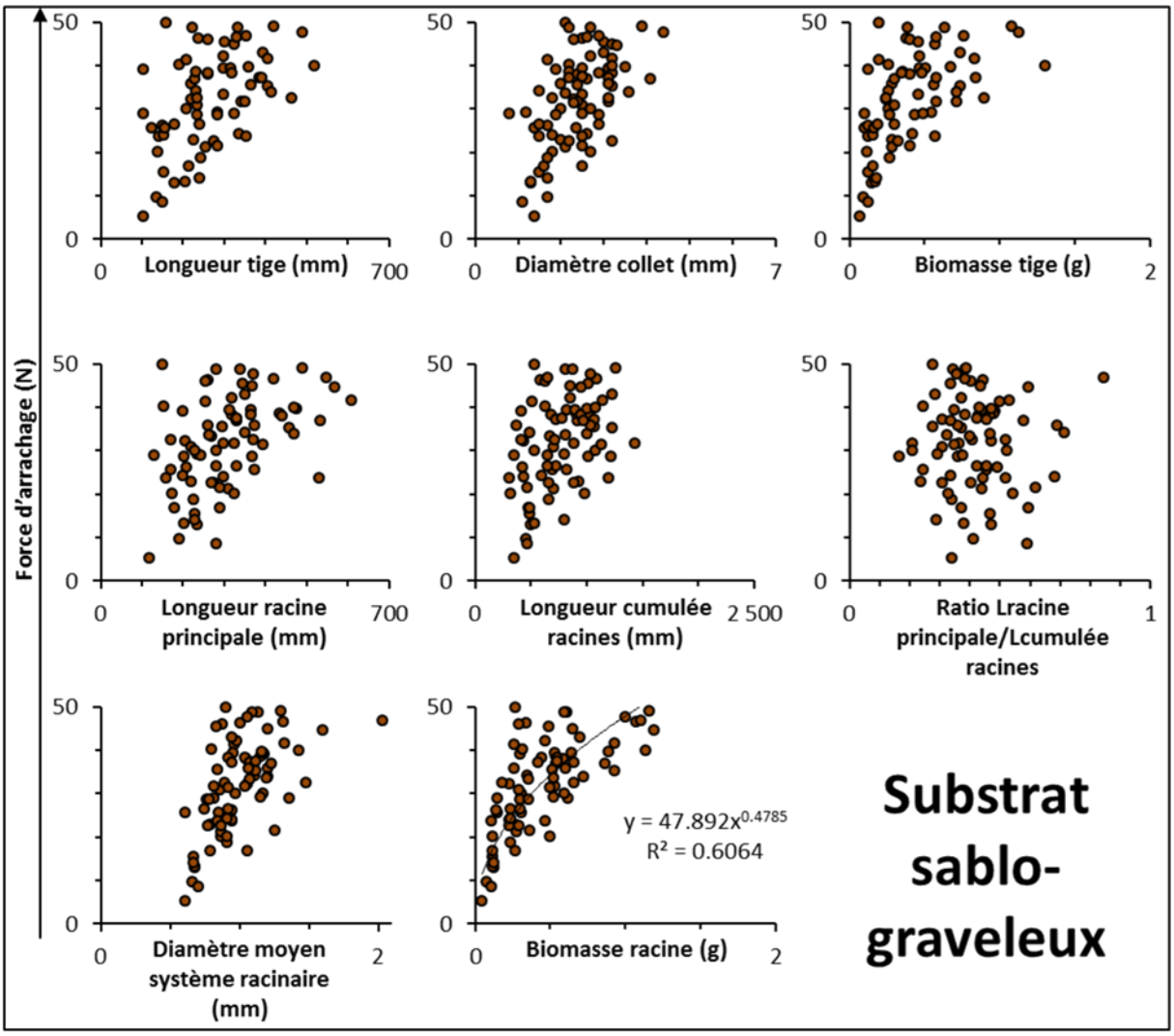


Figure 6-25 : Evolution de la force nécessaire à l'arrachage en fonction des paramètres biologiques pour les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N dans le substrat sablo-graveleux.

Sur le substrat bi-couche, l'augmentation de la force d'arrachage est toujours très liée à la biomasse racinaire mais également à la biomasse de la tige (Figure 6-26). De plus, la tendance d'augmentation de la force nécessaire associée à l'augmentation du diamètre au collet observé sur les deux autres substrats est plus importante sur le substrat bi-couche. La force nécessaire à l'arrachage augmente également avec la longueur de tige, comme évoqué pour le substrat sableux et avec le diamètre moyen racinaire, comme évoqué pour le substrat sablo-graveleux. De plus une tendance à l'augmentation de la force associée à l'augmentation de la longueur de la racine principale se dégage.

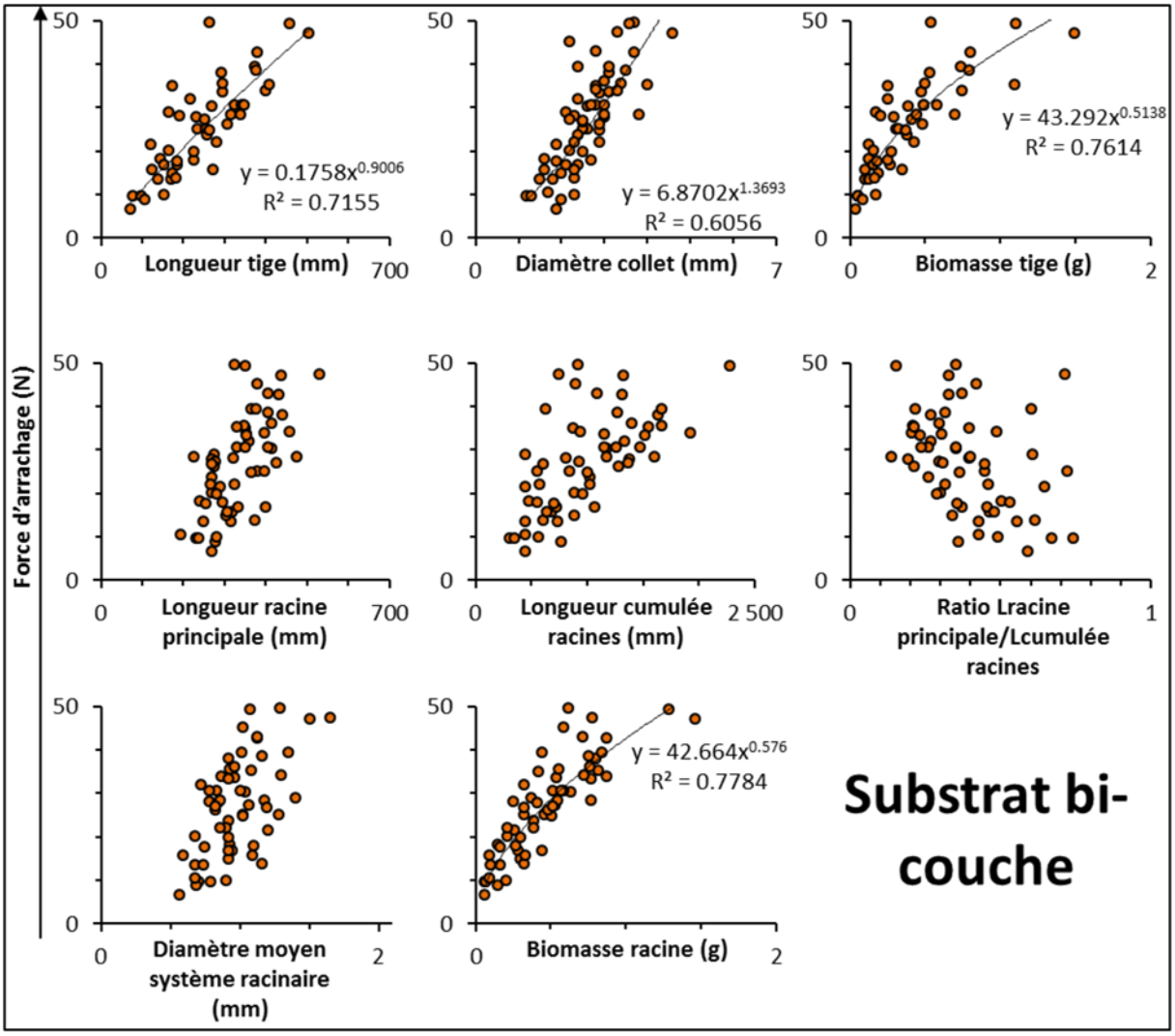


Figure 6-26 : Evolution de la force nécessaire à l'arrachage en fonction des paramètres biologiques pour les semis arrachés avec une force inférieure à 50 N dans le substrat bi-couche.

6.4.2.5. Croissance des peupliers noirs arrachés

Le ratio des biomasses suit la même tendance entre l'expérience d'arrachage et l'expérience témoin pour les substrats sableux et bi-couche (Figure 6-27). Les ratios entre les biomasses aériennes et racinaires sont supérieurs à 1, excepté pour les valeurs minimales, sur le substrat sableux. Ces valeurs sont inférieures à 1, excepté pour les valeurs maximales, sur le substrat bi-couche. Sur le substrat sablo-graveleux, ce ne sont plus uniquement les valeurs maximales qui sont supérieures à 1, mais la médiane reste inférieure à 1. Le rapport entre les longueurs de tige et de racine principale sont identiques à ceux des biomasses sur le substrat sablo-graveleux et bi-couche (Figure 6-27). En revanche, comme observé dans l'expérience témoin, les valeurs minimales ne sont plus les seules à être inférieures à 1.

Le ratio de longueur de tige sur longueur cumulée du système racinaire est plus variable sur le substrat sableux (Figure 6-27). Il est le moins variable sur le substrat bi-couche pour lequel les valeurs de ratio sont également les plus faibles.

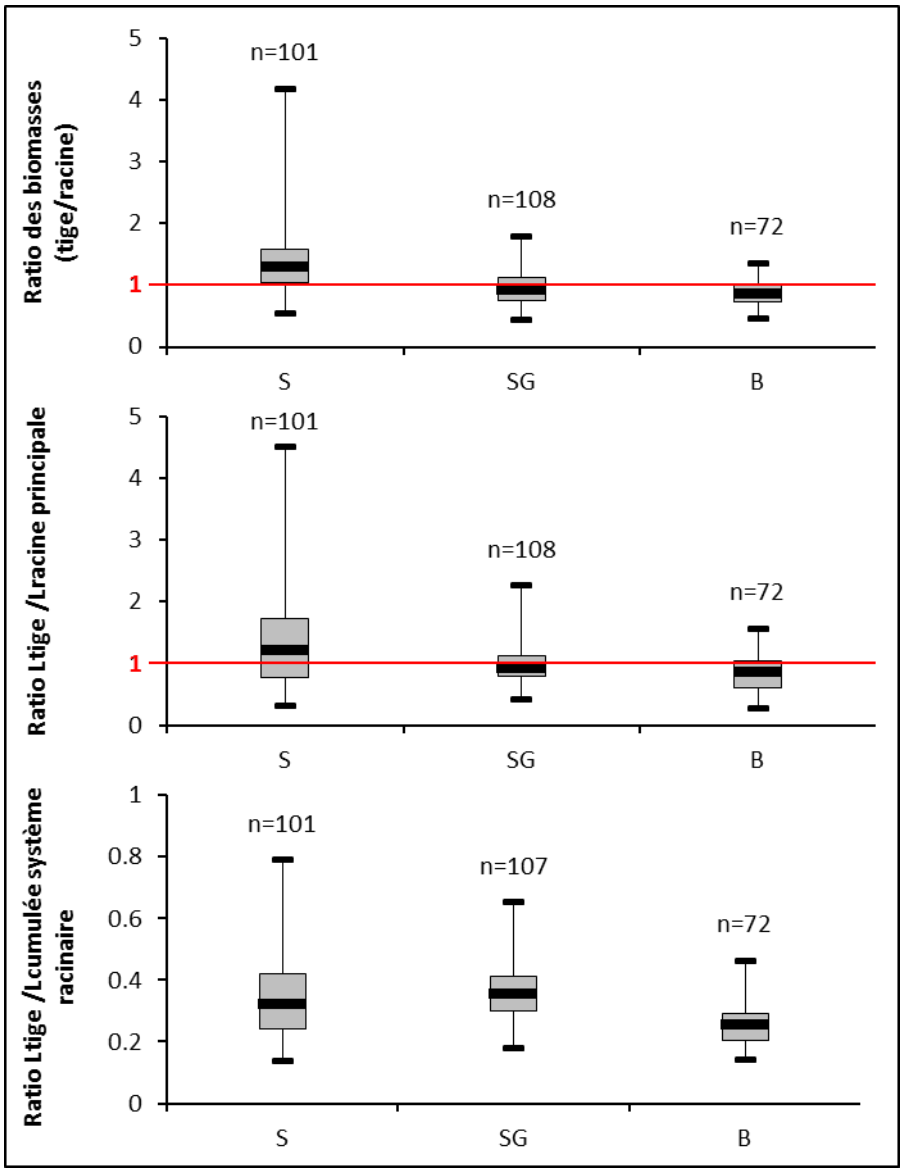


Figure 6-27 : Boîtes à moustache décrivant la variabilité des ratios des biomasses et longueurs de tige sur les biomasses et longueurs de la racine principale où cumulées du système racinaire, pour chaque substrat dans l'expérience d'arrachage.

6.4.3. Expérience témoin sur le saule blanc

6.4.3.1. Paramètres biologiques des saules blancs

L'expérience témoin réalisée sur le saule blanc n'a, pour le moment, pas fait l'objet d'analyses statistiques et seule une première description des paramètres mesurés est proposée dans ce chapitre. Les résultats des paramètres mesurés sont figurés dans le Table 6-10.

Table 6-10 : Valeurs moyennes des paramètres mesurés sur les saules blancs.

	S. alba		
	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Longueur de tige (mm)	538 (18)	280 (3)	62 (2)
Diamètre au collet (mm)	6,8 (32)	2,9 (35)	2,1 (47)
Biomasse tige (g)	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Longueur racine principale (mm)	518 (32)	379 (35)	378 (47)
Longueur cumulée des racines (mm)	13663 (25)	2178 (35)	1128 (47)
Diamètre moyen des racines (mm)	0,7 (25)	0,7 (35)	0,9 (47)
Biomasse des racines (g)	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Ratio Longueur racine principale sur Longueur cumulée des racines	0,05 (27)	0,25 (35)	0,41 (47)

La longueur de la racine principale a tendance à être plus longue sur le substrat sableux, elle est plus variable sur le substrat sablo-graveleux et les valeurs extrêmes fortes sont mesurées sur le substrat bi-couche (Figure 6-28). La longueur des racines principales n'excèdent pas 0,8 m de long pour tous les substrats. La longueur cumulée du système racinaire sur le substrat sableux est bien plus importante que sur les deux autres substrats, le bi-couche étant celui pour lesquelles les valeurs sont les plus faibles. Cette tendance est également visible sur la mesure du diamètre au collet. En revanche, elle s'inverse pour le diamètre moyen du système racinaire dont les valeurs les plus fortes sont observées sur le substrat bi-couche, les valeurs sur les deux autres substrats étant relativement similaires.

Le paramètre longueur de tige est mentionné dans cette figure, mais ne permet pas de conclure car les semis de saules étudiés étaient souvent cassés, ce qui ne permet pas l'utilisation de ce paramètre et les calculs d'indices associés.

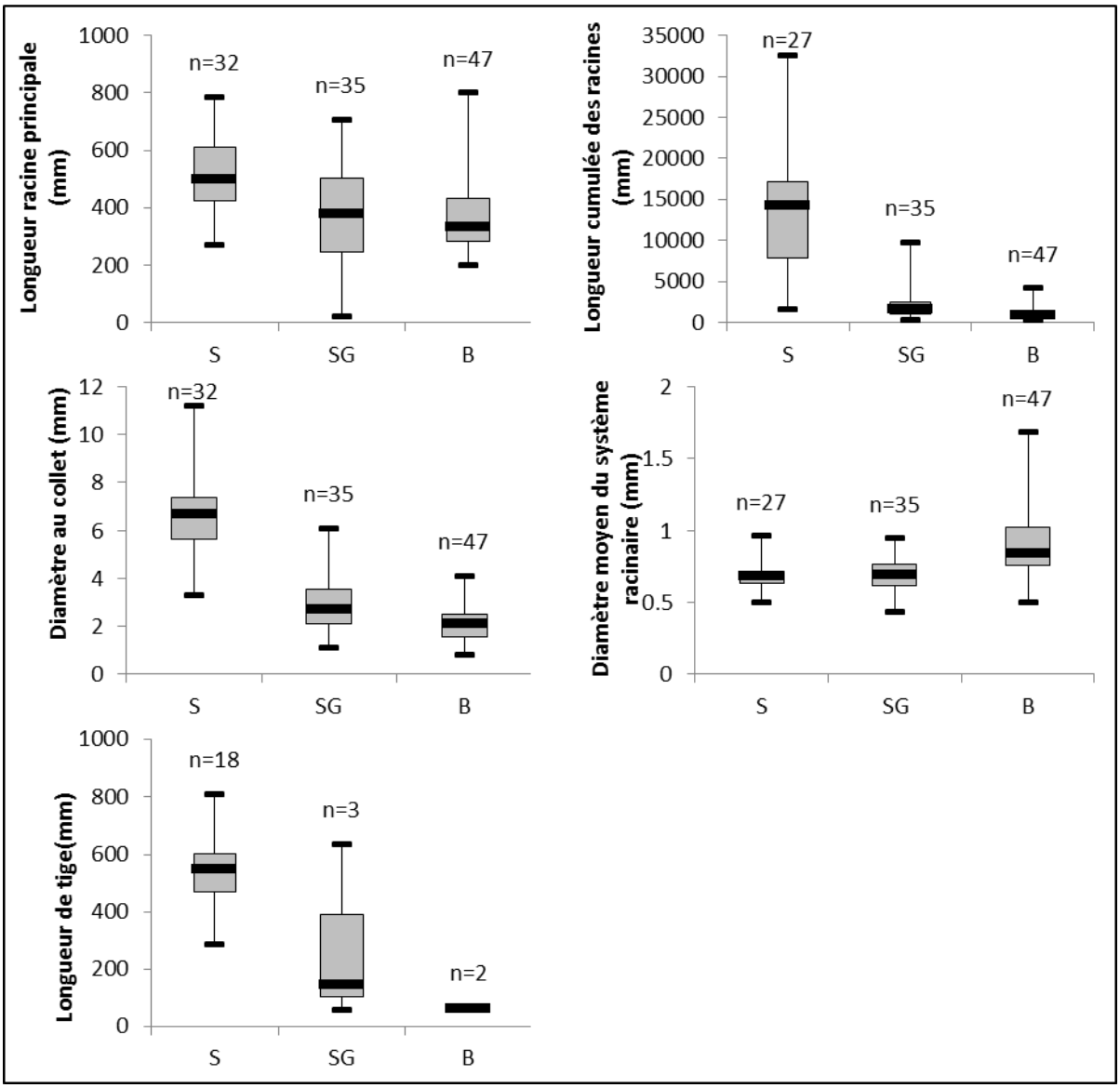


Figure 6-28 : Boîtes à moustache représentant la variabilité des valeurs de chaque paramètre biologique pour chacun des substrats testés dans l'expérience témoin des saules blancs.

6.4.3.2. Structure du système racinaire des saules blancs

Le système racinaire des saules blancs présente un rapport entre la longueur de la racine principale et celle de la longueur cumulée du système racinaire très variable sur le substrat bi-couche et sablo-graveleux mais peu sur le substrat sableux (Figure 6-29).

Les valeurs sont très faibles sur le substrat sableux pouvant suggérer une forte ramification qui serait plus faible sur le substrat bi-couche, le substrat sablo-graveleux offrant une situation intermédiaire.

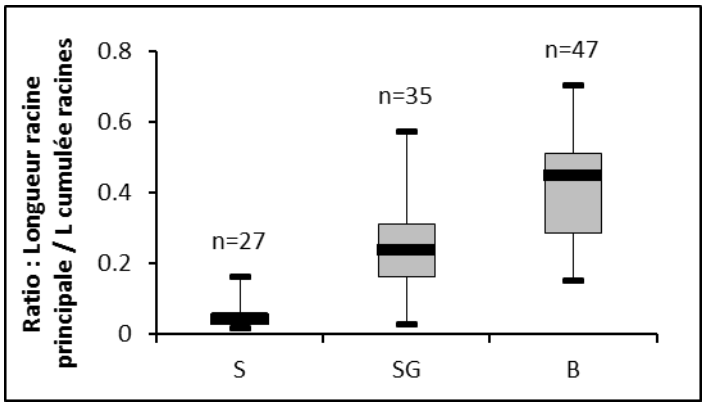


Figure 6-29 : Boîtes à moustache décrivant la varibilité du ratio de la longueur de la r principale sur la longueur cumulée du système racinaire des semis pour chaque substrat de l'expérience témoin sur les saules blancs.

Environ 70 % des longueurs cumulées de racines se localisent sur les vingt premiers centimètres de la racine principale avec néanmoins un pourcentage plus faible sur le substrat sablo-graveleux que sur les deux autres substrats (Figure 6-30). Environ 20 % des longueurs cumulées se localisent sur la partie 20-40 cm de la racine principale pour les trois substrats. Sur la partie 40-60 cm, 10 % des longueurs cumulées de racines sont mesurées sur le substrat sablo-graveleux alors que le pourcentage est inférieur à 5 % pour les autres substrats.

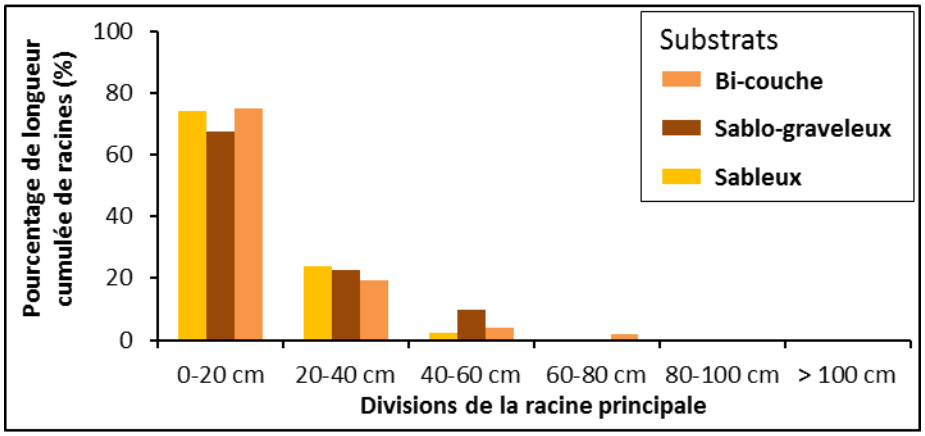


Figure 6-30 : Pourcentage de longueur cumulée des racines pour chaque substrat en fonction de la localisation sur la racine principale dans l'expérience témoin sur les saules blancs.

Comme évoqué précédemment, les semis sur substrat sableux ont tendance à avoir des longueurs de racines cumulées plus élevées et les diamètres associés des racines sont également élevés, notamment sur les 20 premiers centimètres de la racine principale (Figure 6-31). Néanmoins, sur les substrats sableux et sablo-graveleux les diamètres les plus faibles (< 0,5 mm) sont les plus représentés. Sur le substrat bi-couche, les longueurs cumulées des racines de diamètres les plus fins tendent à se réduire en profondeur alors que des racines de diamètres plus élevés perdurent.

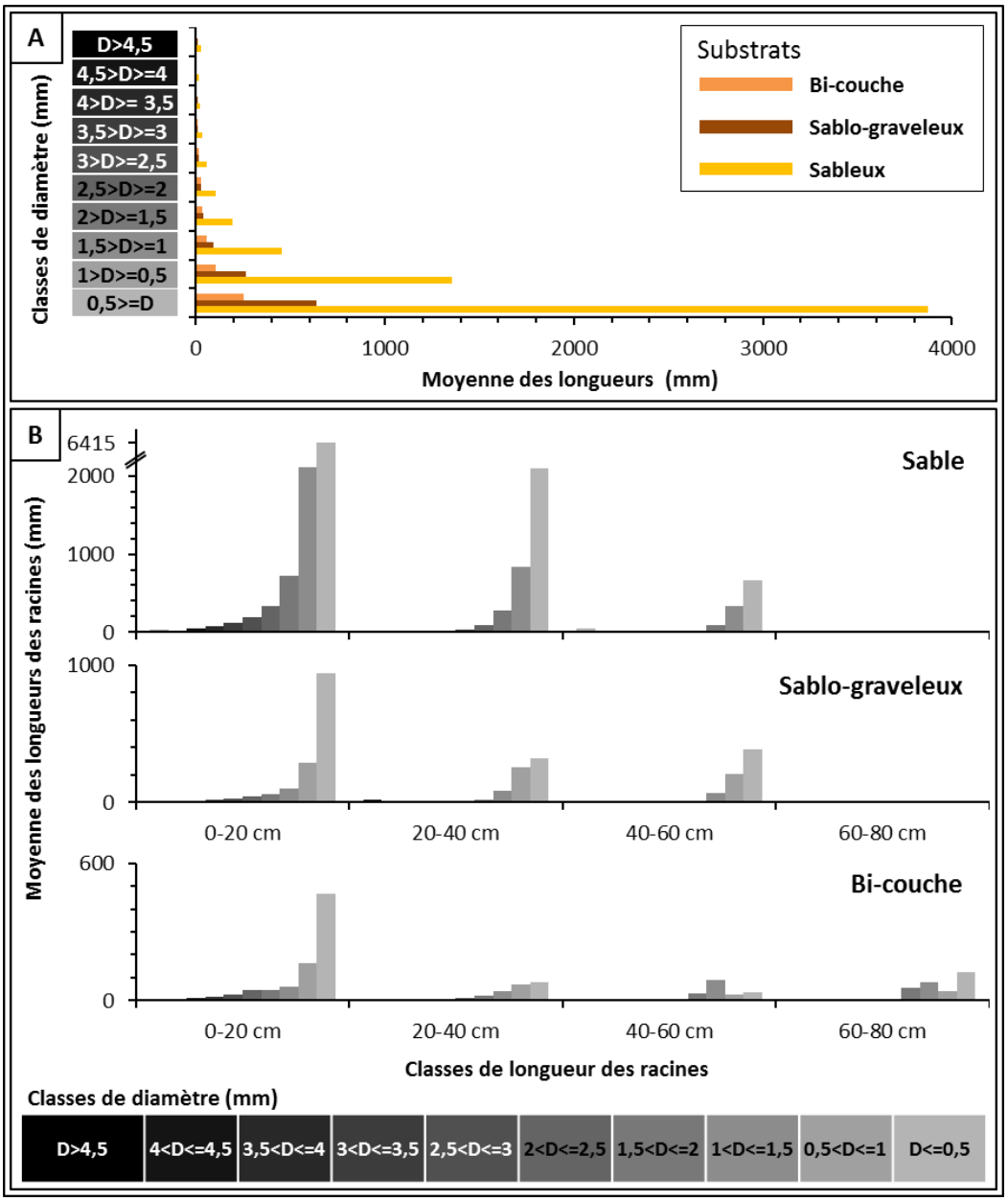


Figure 6-31 : Médianes et moyennes des longueurs de racines en fonction des classes de diamètre pour chaque substrat de l'expérience témoin sur saule blanc (A). Moyenne des longueurs de racines par classe de diamètre en fonction de la longueur de la racine principale pour chaque substrat de l'expérience témoin sur saule blanc (B).

6.4.4. Expérience d'enfouissement des peupliers noirs

Le nombre de semis enfouis par quadrats de 0,5 m par 0,5 m est de 86 sur le sable, 72 sur le sablo-graveleux et 89 sur le substrat bi-couche. Les semis du substrat sableux sont plus petits que ceux des deux autres substrats dont la variabilité surtout est bien plus importante (Figure 6-32). Sur le substrat sableux un individu ne présentait pas de bourgeon terminal, et deux individus sur le substrat sablo-graveleux.

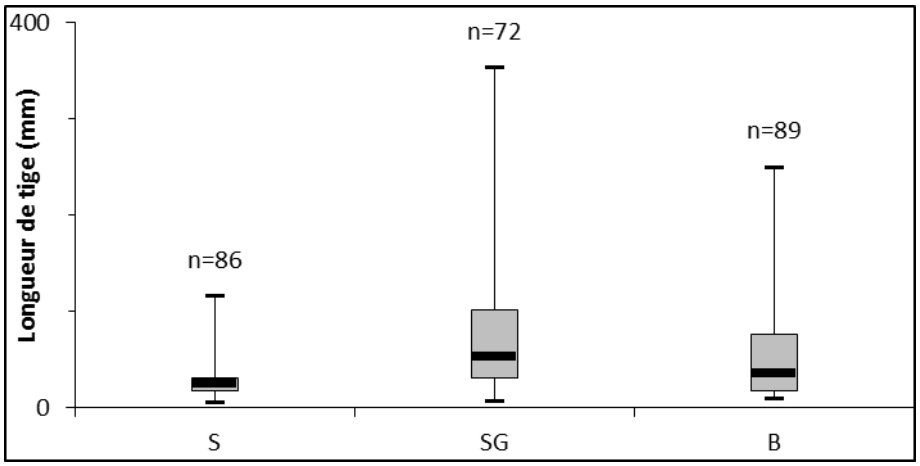


Figure 6-32 : Boîtes à moustache décrivant la variabilité de la taille de la tige des semis de peupliers noirs enfouis pour chaque substrat.

La profondeur d'enfouissement des semis est comprise entre 0,2 m et 0,5 m (Figure 6-33). La plupart des semis sur substrat sableux sont enfouis sous une hauteur de sable plus importante que les semis localisés sur les substrats sablo-graveleux et bi-couche.

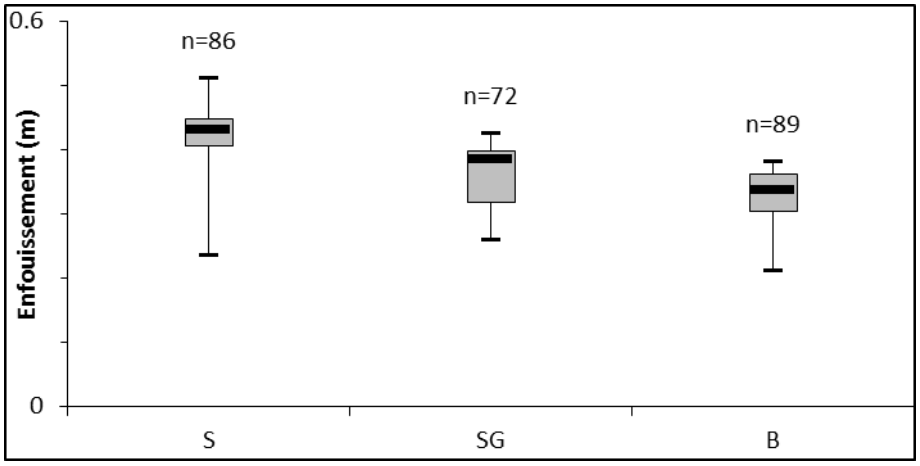


Figure 6-33 : Profondeur d'enfouissement des semis de peuplier noir de 283 jours pour chaque substrat.

Sur les 247 semis mesurés tout substrats confondus, un seul a émergé au-dessus de la surface enfouis après 320 jours d'enfouissement sur le substrat sablo-graveleux (Figure 6-34).

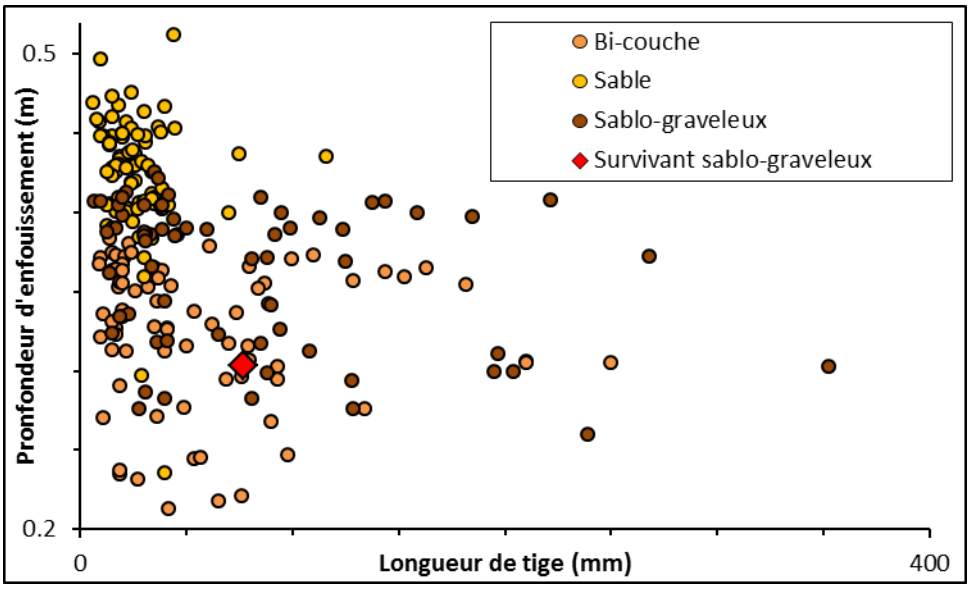


Figure 6-34 : Taille des semis en fonction de la hauteur d'enfouissement. Tous les points représentent des semis n'ayant pas émergé de la nouvelle surface topographique après 320 jours d'enfouissement. Le losange représente le seul survivant observé dans le substrat sablo-graveleux.

Les systèmes aériens des peupliers noirs initialement semés sur substrat sableux étaient en voie de décomposition avancée. Dans le casier de substrat bi-couche, un individu non mesuré dans le quadrat initial sous une profondeur d'enfouissement comprise entre 0,3 et 0,4 m. La longueur racinaire de ce semis est d'au moins 315 mm et la tige de 365 mm. Les parties aériennes des semis enfouis sur le substrat bi-couche sont moins décomposées que celles du substrat sableux.

Dans le casier sablo-graveleux, un individu de 77 mm de hauteur initiale a émergé d'une hauteur d'enfouissement de 0,3 m (Figure 6-35). La tige initiale mesure 185 mm après enfouissement. Une branche a poussé à partir d'un des bourgeons de la tige initiale. Cette branche a émergé de la couverture sableuse formant ainsi une nouvelle tige. Cette branche, mesurant 510 mm, est issue d'un bourgeon de la tige initiale localisé à 95 mm du collet initial. Des racines se sont développées sur la tige initiale enfouis entre le collet et la nouvelle branche. Des racines se sont également développées sur les 210 premiers millimètres de la nouvelle branche émergeant du sable. Au-delà des 210 mm, les bourgeons apparaissent. Du premier bourgeon au bourgeon terminal il y a 270 mm. La racine initiale mesure au moins 400 mm avec au moins une racine pivot et quelques racines secondaires beaucoup plus fines.

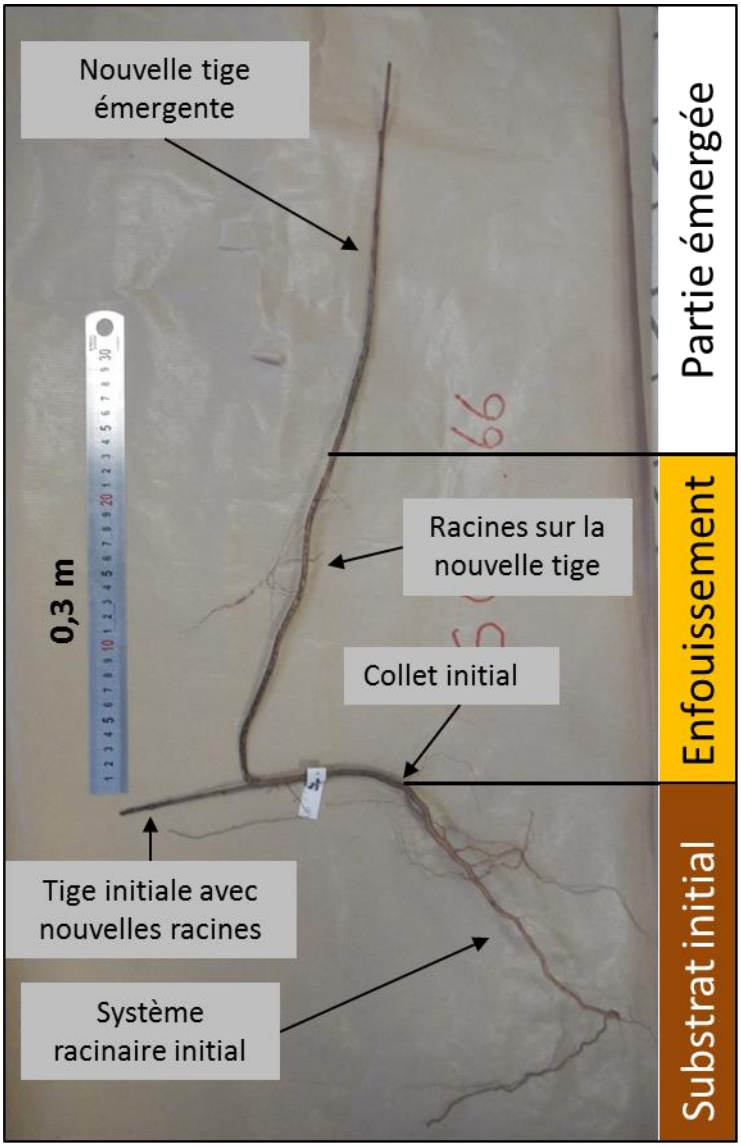


Figure 6-35 : Semis survivant sur le substrat sablo-graveleux.

Les autres semis semblaient avoir des parties aériennes encore moins décomposées que pour les deux autres substrats.

Pour les trois modalités, des racines non décomposées ont été retrouvées mais les parties aériennes ayant pour grande partie disparu il était impossible de coupler l'information partie aérienne et racinaire à l'aide des étiquettes.

6.5. Discussion

Les résultats expérimentaux réalisés sur des semis de peupliers noirs et de saules blancs pendant leur première année de croissance ont fait l'objet du présent chapitre, dans lequel nous souhaitions déterminer l'influence potentielle du substrat de germination sur la morphologie des semis. Le cas échéant nous souhaitions déterminer si cette influence pouvait être à l'origine d'une résistance différente des semis aux contraintes d'arrachage et d'enfouissement survenant lors des crues subséquentes à leur recrutement. Comme cela a été détaillé précédemment, pour répondre à ces interrogations, un dispositif expérimental en conditions semi-contrôlées a été développé afin de réaliser trois expériences visant des objectifs spécifiques.

Une expérience témoin pour déterminer l'influence du substrat de germination, avec une modalité de changement vertical (modalité bi-couche), sur la morphologie du système racinaire et aérien des semis de peupliers noirs et de saules blancs.

Une expérience d'arrachage pour déterminer les forces nécessaires à l'arrachage des plants, à l'issu de leur première année de croissance, en fonction des substrats de germination testés.

Une expérience d'enfouissement pour déterminer des seuils de tolérance à l'enfouissement des semis pour les trois substrats testés.

Comme évoqué dans l'introduction, ce chapitre concerne des méthodes et expériences prospectives pour nos domaines et les résultats n'ont pas tous permis de répondre aux objectifs visés, notamment concernant l'espèce *Salix alba* ainsi que l'expérience d'enfouissement. De ce fait, ces derniers éléments prendront une part moins importante dans la discussion. De plus, la première partie de la discussion sera consacrée à la critique des choix méthodologiques et à l'évaluation de la significativité des données obtenues.

6.5.1. Robustesse des données

6.5.1.1. Dispositif expérimental

Le développement du dispositif de Guémené-Penfao est basé sur la similarité avec les environnements étudiés *in situ* et pas uniquement axée sur l'étude de la variabilité des traits biologiques afin de comprendre à la fois le développement mais également la capacité de survie des semis de peupliers noirs et de saules blancs aux contraintes exercées lors des crues. Ce dispositif nous a permis de répondre en partie à ces interrogations grâce à l'acquisition de données suffisantes pour réaliser des analyses statistiques tout en étant non destructif *in situ*.

Cependant, ce dispositif a présenté certaines limites :

(i) Les analyses statistiques ont principalement concerné l'espèce peuplier noir. Les données sur le saule blanc sont moins nombreuses, car la germination de cette espèce en conditions semi-contrôlées s'est avérée plus difficile que celle du peuplier noir. Pourtant, les pourcentages de germination des graines de peuplier noir et de saule blanc sont presque identiques et élevés (> 75%) pendant les premiers jours de conservation (Karrenberg et Suter, 2003) ce qui a été confirmé par nos observations dans les boîtes de pétri. De plus, le même traitement a été appliqué aux deux espèces avec un substrat humidifié en permanence, condition favorable à la germination et survie des semis de peuplier noir (Guilloy-Froget *et al.*, 2002). Cependant, il est possible que l'humidité n'ait pas été suffisante pour le saule qui demande un substrat plus humide que le peuplier noir pour germer (Van Splunder *et al.*, 1995). Ces résultats constituent une première étape dans l'analyse de l'influence du substrat en tant que facteur explicatif du développement des semis des espèces étudiées alors que jusqu'ici il a plutôt été étudié en fonction de sa capacité à retenir l'humidité nécessaire à la germination et survie des semis.

(ii) La méthode de prélèvement des semis n'a pas influencé les paramètres de la longueur et de biomasse de la tige. En revanche, le choix d'une méthode d'extraction des semis pour appréhender le système racinaire induit inévitablement une perte, notamment des racines fines les plus fragiles. Cependant, un grand soin a été apporté pour préserver au maximum le système racinaire et limiter les biais induits par la perte de ces racines fines. Les longueurs racinaires sont donc sous-estimées par rapport à la réalité, à l'inverse, les diamètres moyens du système racinaire sont surestimés puisqu'une partie des racines fines ne sont pas prises en compte. En revanche, les racines fines contribuent peu à la mesure de biomasse qui doit donc correspondre à la variable la moins affectée par cette méthode.

(iii) L'expérience d'arrachage a été réalisée en exerçant une force de traction, dans une direction indépendante de la localisation du semis, sur la partie basale de la tige des semis. Les contraintes non-directionnelles et directionnelles précédemment exposées dans l'introduction influencent l'architecture et la morphologie du système racinaire. Notre fosse se trouvant en conditions semi-contrôlées, on ne peut exclure l'influence de ces paramètres sur le système racinaire des semis. Le dispositif artificiel doit prévenir des hétérogénéités de nutriments au sein d'un même substrat. En revanche, la disponibilité en eau et nutriment en fonction des propriétés physiques du substrat est considérée comme une conséquence indirecte de la granularité des sédiments sur le développement des semis.

La pente du dispositif était nécessaire pour empêcher les conditions d'anoxie mais elle correspond à une faible pente au regard des expériences réalisées sur l'influence de cette variable sur l'ancrage racinaire (Suna *et al.*, 2008). Les vents dominants peuvent également influencer le développement du système racinaire sur des jeunes semis (Tamasi *et al.*, 2005). Toutefois, la fosse est entourée de haies et d'un dispositif de protection grillagé pour limiter l'influence des intempéries.

Malgré les limites exposées, notre dispositif expérimental nous a permis d'identifier des différences dont les résultats seront discutés ultérieurement.

6.5.1.2. Utilisation de WinRHIZO

L'utilisation de l'outil WinRHIZO pour les mesures de longueurs cumulées et de diamètres est dépendante de la qualité des scans et de l'application du logiciel. Pour les systèmes racinaires simples, la méthode par analyse d'image apparaît être une méthode bien adaptée pour obtenir des mesures impossibles manuellement comme la longueur et les diamètres des racines plus fines. En revanche, lorsque les systèmes racinaires se densifient ou qu'ils présentent des torsions, les mesures deviennent plus difficiles. Nous avons essayé au maximum d'étaler les systèmes racinaires pour optimiser le calcul des paramètres choisis. Ce choix nous a privés de l'utilisation d'autres paramètres comme le calcul par le logiciel de la ramification des racines qui a été appréhendé de manière indirecte avec le ratio de la longueur de racine principale/longueur cumulée des racines (L_{RP}/L_{SR}). La diversité des approches pour obtenir des données sur le système racinaire nous permet de comparer les résultats qui apparaissent cohérents entre eux. De plus, le nombre de répétitions et la répétabilité de chaque étape des expériences ont eu pour but de limiter ces biais.

6.5.2. Influence du substrat sur la morphologie des espèces ligneuses pionnières

Dans notre contexte expérimental (non stress hydrique), sept variables de base ont été analysées ; la longueur de tige (L_T), le diamètre au collet (D_C), la longueur de la racine principale (L_{RP}), les longueurs cumulées des racines (L_{SR}), le diamètre moyen des racines calculé sur l'ensemble du système racinaire (D_{MSR}) ainsi que les mesures de biomasses des systèmes aériens (B_T) et racinaires (B_R). Pour toutes ces variables, **les semis ayant poussé sur le substrat sableux présentent la variabilité la plus forte ainsi que les moyennes les plus élevées** hormis pour le diamètre moyen des racines (D_{MSR}).

De plus, les analyses statistiques révèlent des **différences significatives entre le substrat sableux et les deux autres substrats** pour six des sept variables, la longueur de la racine principale n'étant pas significativement différente entre les substrats. Les **substrats sablo-graveleux et bi-couche sont également significativement différents entre eux pour les diamètres au collet (D_C), les biomasses de la tige (B_T) et les diamètres moyens des racines (D_{MSR})**. En revanche, les analyses statistiques ne révèlent **pas de différence significative pour les longueurs de tige (L_T), biomasses racinaires (B_R) et longueurs cumulées des racines (L_{SR})**. Entre ces deux substrats, la différence de variabilité des valeurs est moins importante qu'avec le substrat sableux et les valeurs moyennes sont plus fortes sur le substrat bi-couche, excepté pour le diamètre au collet (D_C). **Les semis développés sur la modalité bi-couche présentent des ressemblances plus importantes avec le substrat sablo-graveleux que sableux** mêmes si les valeurs sont significativement différentes des deux autres substrats pour une partie des traits observés. **Cette ressemblance entre les modalités bi-couche et sablo-graveleux suggère que le sable en surface a peu ou pas d'influence sur les traits biologiques analysés.**

L'hypothèse de départ était que **le substrat influence le développement du système racinaire et par conséquent l'ancrage des semis dans les sédiments. Les semis sur substrat sableux ont** des valeurs de ratio L_{RP}/L_{SR} faibles suggérant **une densité de racines secondaires importantes en comparaison des deux autres substrats** pour lesquels les valeurs du même ratio sont similaires.

Les longueurs de racines par classe de diamètre mettent en évidence un système racinaire plus dense à proximité du collet avec une racine principale épaisse et de nombreuses racines fines. Avec l'éloignement au collet, les racines fines sont moins nombreuses **suggérant une croissance des racines secondaires plutôt sur la partie peu profonde de la racine principale (proche du collet) alors que les extrémités de la racine principale sont peu pourvues en racines secondaires, ce qui est cohérent avec la littérature.**

Le substrat, en influençant la structure racinaire, peut indirectement influencer la croissance des parties aériennes des semis. Ainsi, les semis sur substrat sablo-graveleux ont tendance à avoir une biomasse de tige plus faible mais un diamètre au collet plus grands que les semis sur substrat bi-couche. Ce résultat suggère que **l'architecture de la tige n'est pas identique entre les semis ayant poussé sur substrat sablo-graveleux et bi-couche, soit en terme de diamètre de la tige sur l'ensemble de la pousse soit en terme de ramification**.

Parfois, des rameaux, dénommés rameaux sylleptiques, se développent à partir des méristèmes localisés à la base des pétioles des feuilles sur une tige de la même année. Les données sur les rameaux sylleptiques n'ont pas été présentées dans cette thèse, mais sont disponibles pour faire l'objet d'analyses ultérieures. Ces différences peuvent avoir des **conséquences sur la capacité des semis à résister à la force de trainée** exercée sur la tige lors des crues en modifiant le coefficient de traînée associé à la morphologie et la flexibilité du plant.

Le ratio entre les biomasses des parties aériennes et racinaires des semis est supérieur à 1 pour les semis sur substrat sableux ce qui est cohérent avec les résultats discutés précédemment. **Sur le substrat sableux, les longueurs cumulées de racines sont élevés et correspondent principalement à des racines secondaires qui permettent une alimentation en eau et nutriments aux plants, cela leur permet de se développer et explique qu'ils soient plus grands que sur les autres substrats. Cependant, les racines secondaires peuvent être nombreuses, leur rôle important, tout en ne représentant qu'une part très faible de la biomasse expliquant le rapport des rapports de biomasse tige/racine élevés**.

Le rapport de la longueur de la tige par rapport à la longueur de la racine principale a également tendance à être **plus élevé sur le sable que les autres substrats** ce qui signifie que pour une croissance de racine principale similaire qui constitue le pivot pour l'ancrage racinaire, **les semis développés sur substrat sableux auront tendance à avoir une tige plus grande et donc une plus grande surface soumise à la force de trainée lors des épisodes de crues**.

Les semis ayant poussés sur substrat sableux expriment une plus grande variabilité suggérant une meilleure plasticité dans cet environnement sans doute en raison d'un substrat de germination plus homogène. A l'inverse, l**es peupliers noirs ayant poussés sur les substrats sablo-graveleux et bi-couche, représentant des environnements plus hétérogènes, sont moins variables pour les paramètres analysés. Les semis développés sur le sable ont une structure racinaire plus ramifiée que sur le substrat sablo-graveleux en revanche il n'y a pas de distinction significative pour la longueur de la racine principale qui constitue l'ancrage du semis**.

Malgré un plus faible nombre de données pour l'espèce *Salix alba*, les systèmes racinaires de cette espèce développés sur substrat sableux se distinguent des deux autres substrats comme pour l'espèce *Populus nigra*. Les systèmes racinaires sur le substrat sableux sont plus ramifiés et présentent les diamètres les plus élevés espèces et substrats confondus.

Pour les deux espèces ligneuses étudiées, le substrat sableux est propice au développement des racines secondaires (Table 6-11). Les nutriments sont absorbés par les racines fines, les racines plus grosses fournissant plutôt la stabilité (Danjon et Reubens, 2008). Un système racinaire dense formé de nombreuses racines secondaires dans le sable peut expliquer une croissance de la tige plus importante et les biomasses de la partie aérienne plus élevées observés pour le peuplier noir mais également suggéré par les résultats sur le saule blanc. En conséquence, deux types d'influence du substrat sur la capacité des semis à survivre à la contrainte d'arrachage peuvent être envisagés :

- une influence directe de la morphologie des racines, notamment la racine principale pivot, et de l'architecture du système racinaire sur la stabilité ;
- une influence indirecte sur la morphologie de la partie aérienne, le substrat sableux en favorisant le développement des racines secondaires peut indirectement favoriser la croissance aérienne soumise à la force de traînée.

Table 6-11 : Valeurs moyennes calculées sur les semis de peupliers noirs et de saules blancs en fonction du substrat. Le nombre entre parenthèses correspond au nombre d'individus mesurés.

	P. nigra			*S. alba*		
	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche	Sable	Sablo-graveleux	Bi-couche
Longueur de tige (mm)	432 (207)	265 (112)	269 (112)	538 (18)	280 (3)	62 (2)
Diamètre au collet (mm)	3,4 (215)	2,7 (141)	2,5 (157)	6,8 (32)	2,9 (35)	2,1 (47)
Biomasse tige (g)	1,61 (207)	0,53 (112)	0,75 (70)	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Longueur racine principale (mm)	409 (213)	394 (141)	376 (157)	518 (32)	379 (35)	378 (47)
Longueur cumulée des racines (mm)	2719,6 (120)	1401,7 (120)	1744,2 (83)	13663 (25)	2178 (35)	1128 (47)
Diamètre moyen des racines (mm)	0,7 (120)	0,7 (120)	0,8 (83)	0,7 (25)	0,7 (35)	0,9 (47)
Biomasse des racines (g)	1,11 (215)	0,62 (141)	0,76 (83)	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Ratio Longueur racine principale sur Longueur cumulée des racines	0,24 (119)	0,37 (120)	0,34 (83)	0,05 (27)	0,25 (35)	0,41 (47)

Les ordres de grandeurs sont similaires entre les paramètres mesurés sur les semis de peupliers noirs et les semis de saules blancs ayant poussé sur les substrats sablo-graveleux et bi-couche.

En revanche, les saules blancs semés sur substrat sableux présentent des valeurs de diamètre au collet et de longueur cumulée des racines très élevés en comparaison des saules blancs semés sur les autres substrats et des peupliers noirs tout substrat confondus (Table 6-11 et Figure 6-36). Il est possible que le substrat sableux, présentant un environnement plus homogène que les deux autres substrats, permettent le développement du système racinaire et notamment des racines secondaires. De plus, un chevelu racinaire important permettant une plus grande assimilation des ressources en eau et nutriments peut ainsi favoriser la production de biomasse également aérienne suggérée par les diamètres au collet élevés. *A contrario*, les substrats sablo-graveleux et bi-couche relativement hétérogène peuvent freiner le développement du système racinaire en raison des contraintes qu'exercent les hétérogénéités sur les racines.

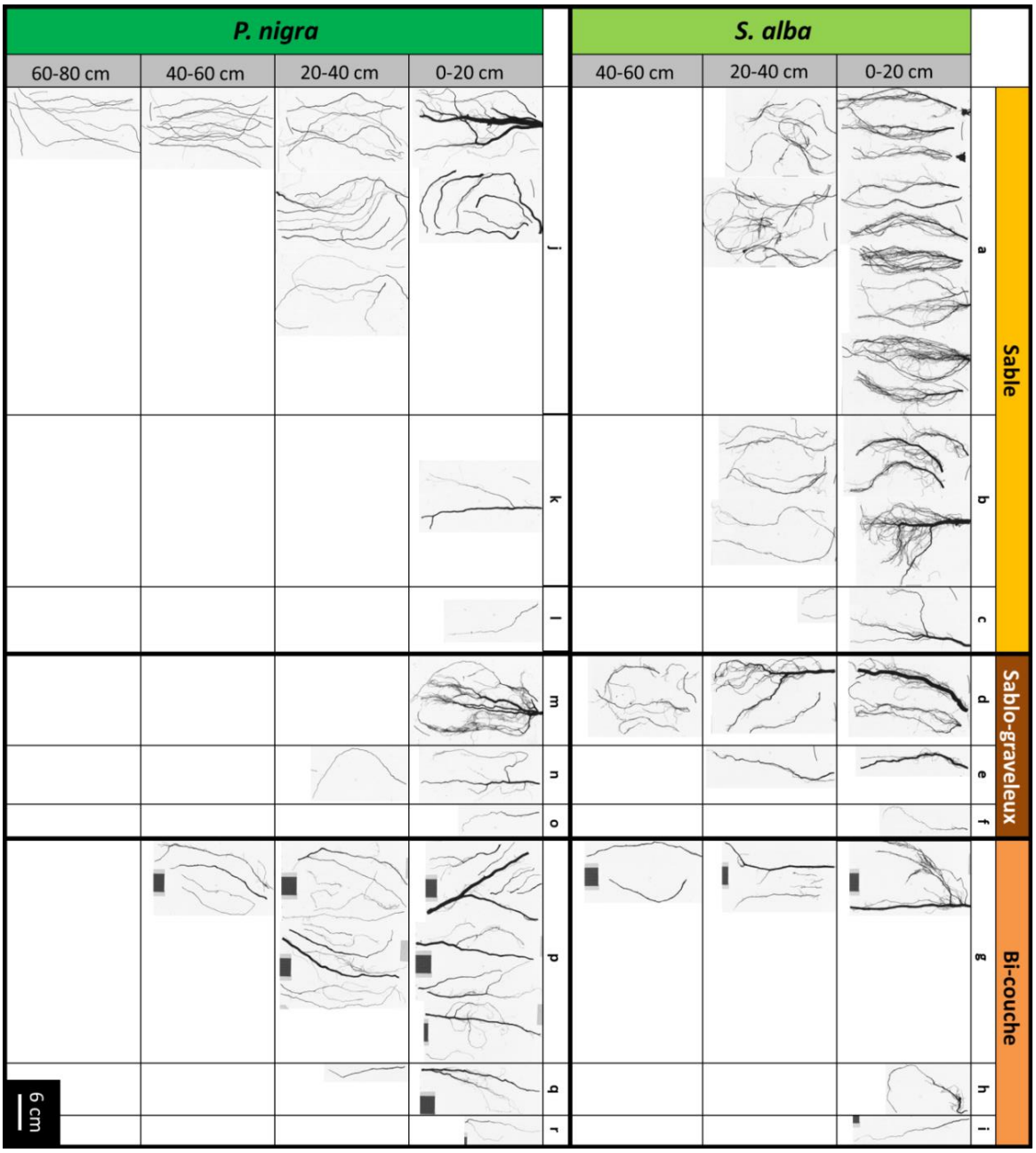


Figure 6-36 : Scans des systèmes racinaires de saules blancs et de peupliers noirs. Chaque lettre en tête de colonne correspond à un individu. Pour chaque individu, les scans sont présentés en fonction de leur localisation par rapport à la racine principale (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm). Pour chaque substrat, trois individus sont présentés en fonction de leur longueur cumulée de racine : le système racinaire de longueur cumulée maximale (*S. alba* : a, d, g ; *P. nigra* : j, m, p), médiane (*S. alba* : c, e, h ; *P. nigra* : k, n, q) et minimale (*S. alba* : c, f, i ; *P. nigra* : l, o, r).

Les résultats des ANOVA attestent une différence significative pour la majorité des traits observés entre les substrats. Il a également été noté que la variabilité des traits observés était souvent plus forte sur le substrat sableux que sur les deux autres substrats.

Néanmoins, pour les trois substrats certains paramètres apparaissent comme fortement variables et peuvent être une conséquence de l'hétérogénéité de disponibilité des ressources (Williamson *et al.*, 2011) ou des symbioses mycorhiziennes (Felten *et al.*, 2009) qui peuvent modifier le système racinaire et la croissance des semis.

6.5.3. Paramètres d'influence sur l'arrachage

L'expérience d'arrachage réalisée sur les peupliers noirs pour déterminer la force nécessaire à leur déracinement donne un écart de valeur d'au moins un facteur 10 pouvant aller de **5 N à plus de 50 N**. La force nécessaire à l'arrachage n'a **pas été identifiée comme significativement différente entre les substrats testés** contrairement à ce qui a été observé sur des salicacées âgés d'environ 3 ans et localisés sur la rivière Tagliamento, dont le peuplier noir (Karrenberg *et al*, 2003) où la force nécessaire à l'arrachage est plus élevée sur le sable que sur les graviers. Dans cette étude, les forces nécessaires à l'arrachage sont de l'ordre de 400 N à 700 N suivant l'espèce de salicacée et le substrat soit 10 à 100 fois plus que ce qui est observé la première année de croissance. Nos substrats, même s'ils sont à l'origine de morphologie et architecture racinaire différente, sont peut-être trop proches pour induire des différences significatives dans l'ancrage. A moins que cette distinction n'apparaisse avec le temps conjointement à l'apparition de la contrainte d'écoulement. Nos résultats sont cohérents avec le principe d'une racine pivot dont la fonction est principalement d'assurer la stabilité du semis. Les longueurs de racines principales dans l'expérience témoin ne sont pas significativement différentes entre les substrats, les forces nécessaires à l'arrachage ne le sont pas non plus. Pourtant, pour des arbres adultes, la résistance en tension à l'arrachage est renforcée avec l'augmentation du taux de ramification (Dupuy *et al.*, 2005) ainsi que par un réseau de nombreuses racines fines (< 5 mm) par rapport à des racines plus épaisses (Genet *et al.*, 2005). Il existe peut-être un seuil pour lequel le taux de ramification, plus élevée dans le sable, joue un rôle stabilisateur important par rapport aux systèmes racinaires développés dans les substrats plus graveleux.

La **biomasse racinaire a également été identifiée comme non significativement différente entre les substrats et elle correspond au paramètre biologique qui semble le mieux se corréler avec les forces nécessaires à l'arrachage**. Ce paramètre descriptif du système racinaire est également celui qui doit être le moins affecté par l'expérience d'arrachage puisque les racines les plus fines cassées contribuent peu à la biomasse.

La force nécessaire à l'arrachage la première année de croissance ne semble donc pas liée au substrat dans lequel le semis a poussé. Cependant, la résistance des plants en rivière dépend également de la force de traînée qui leur est appliquée, dépendante de la morphologie du système aérien et du rapport entre la partie aérienne et la partie racinaire (Ennos, 1993). Contrairement à la force nécessaire à l'arrachage ainsi que la longueur de la racine principale, les autres paramètres analysés ont été identifiés comme significativement différents entre les substrats. Rappelons que (voir chapitre précédent), le substrat exerce également un rôle dans la stabilité des semis en fonction du seuil de mise en mouvement des grains qui le compose dans un sédiment non cohésif.

6.5.4. Enfouissement

L'expérience d'enfouissement n'a pas pu être réalisée de manière efficace en raison du faible taux de germination obtenu la première année de mesure et le temps nécessaire pour sa réalisation (2 ans). Sur les 247 peupliers noirs enfouis sous une profondeur de sable variant entre 0,2 m et 0,6 m, un seul individu, enfouis sous 0,3 m de sable, a produit une tige sortant de la couverture sableuse. Sur les barres sédimentaires et dans les chenaux secondaires de Loire moyenne, des hauteurs de dépôt pluri-décimétriques sont régulièrement observées et nous pensions que l'espèce pouvait être adaptée à ce type de contrainte. Jusqu'ici il a été admis dans la littérature que l'enfouissement est une perturbation importante pour ces espèces mais les processus de survie n'ont pas été réellement étudiés. Cette expérience nous a montré que les semis ne « réapparaissaient » pas aussi rapidement que nous l'avions supposé initialement. Cependant, nous avons également observé que les parties aériennes étaient souvent en voie de décomposition alors que certains systèmes racinaires ne présentaient pas encore d'état de décomposition. Ces observations ouvrent un questionnement sur les mécanismes de survie des peupliers noirs à la contrainte de l'enfouissement.

6.5.5. Données complémentaires

Ce travail s'est avéré relativement prospectif et l'ensemble des données récoltées à partir de ces expériences n'a pas encore pu être analysé. Ainsi, il serait intéressant de comparer les résultats sur le peuplier noir obtenu pour les deux années successives. Les semis de la première année semblent plus petits que ceux de la deuxième année (Figure 6-37). Pour l'année 2, ni le substrat ni les paramètres morphologiques de longueur de racine principale et de longueur de tige ne semblent discriminants pour expliquer les forces nécessaires à l'arrachage.

En revanche, pour l'année 1 les nuages de points correspondant aux différents substrats se différencient (Figure 6-37). Les semis sur substrat sableux présentent la variabilité des longueurs de la racine principale la plus forte mais les forces nécessaires à l'arrachage sont faibles pour l'ensemble des semis (max : 11 N). Les forces nécessaires à l'arrachage sur le substrat sablo-graveleux sont les plus élevées (max = 30 N) et sont associées aux longueurs de racine principale les plus faibles. Une tendance à l'augmentation de la force nécessaire à l'arrachage associée à l'augmentation de la longueur de la racine principale semble se dégager pour les semis sur substrat bi-couche. Cette tendance est plus nette avec la hauteur de la partie aérienne et s'observe également pour les semis sur substrat sableux, qui présentent des hauteurs aériennes petites par rapport aux semis des autres substrats et moins variables. La tendance d'augmentation de la force nécessaire à l'arrachage lié à l'augmentation de la hauteur de la tige est moins nette sur les semis du substrat sablo-graveleux. Les tendances observées pour le rapport de la force nécessaire à l'arrachage et la longueur de la racine principale pour l'année 1 a totalement disparu des mesures de l'année 2. En revanche, concernant la force nécessaire à l'arrachage et la hauteur de tige, une tendance à une relation linéaire entre ces deux paramètres peut être encore apparente mais de manière nettement moins évidente.

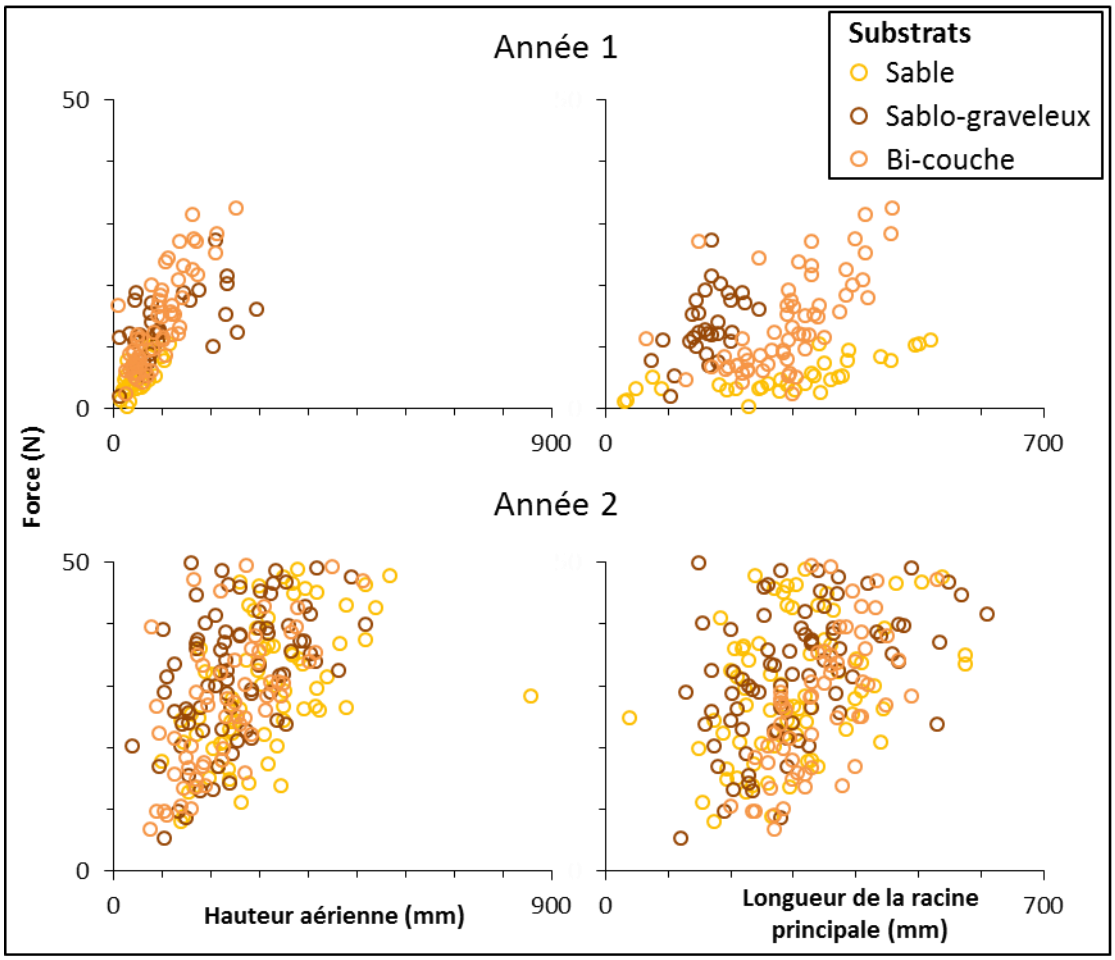


Figure 6-37 : Force nécessaire à l'arrachage des semis de peuplier noir pour chaque substrat en fonction de la hauteur aérienne et de la longueur de racine principale pour les deux années de mesure.

Initialement, deux phases d'ensemencement étaient prévues pour le peuplier noir, avec un lot de graines issues de peupliers noirs à maturité précoce (mai) et un lot de graines issues de peupliers noirs à maturité tardive (juin), ce caractère (maturité des graines) ayant un fort contrôle génétique. L'idée était d'appréhender l'effet de cette diversité génétique sur la croissance finale des semis et donc sur la résistance des semis aux contraintes. En raison de la faible germination de la première année, cette modalité avait été abandonnée. Néanmoins, ces résultats suggèrent l'existence d'un seuil de la croissance des semis dans les mécanismes d'ancrage entre les différents substrats. Une des perspectives à ce travail serait de déterminer s'il existe une différence de résistance des semis à l'arrachage entre les substrats en fonction de leur croissance.

6.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploité les résultats concernant une fosse expérimentale ensemencée avec des graines des espèces *Populus nigra* et *Salix alba* sur trois substrats représentatifs des environnements colonisés par ces espèces en Loire moyenne. Trois expériences ont été réalisées :

- une expérience témoin visant à déterminer l'influence du substrat de germination sur la morphologie racinaire et aérienne des semis des deux espèces étudiées ainsi qu'à identifier les différences de morphologie entre les deux espèces ;
- une expérience ayant pour objectif de mesurer les forces nécessaires à l'arrachage des semis en fonction du substrat de germination et d'identifier les rapports avec la morphologie des plants en fonction du substrat ;
- une expérience d'enfouissement dont le but était de déterminer des seuils critiques pour la survie des peupliers noirs.

Les résultats montrent une différence significative de la morphologie des semis de peupliers noirs entre le substrat sableux et les substrats sablo-graveleux et bi-couche. La variabilité des paramètres biologiques des semis sur substrat sableux est plus élevée que pour les autres substrats. Ils ont également une croissance plus importante. Les semis sur substrat bi-couche présentent des caractéristiques morphologiques qui sont souvent proches de celle du substrat sablo-graveleux. Pourtant, pour certains paramètres, les semis sur ce substrat se distinguent clairement des semis sur substrat sableux et sur sablo-graveleux. Seul un paramètre n'est pas significativement différent entre les substrats, la longueur de la racine principale. Celle-ci joue le rôle de pivot qui permet l'ancrage du plant ayant comme conséquence l'absence de différence significative entre la force nécessaire à l'arrachage et le substrat de germination. La ramification plus importante des semis sur substrat sableux n'apparaît pas leur conférer un ancrage plus fort. En revanche si le substrat de germination n'a pas d'influence directe sur la force nécessaire à l'arrachage, il peut avoir une influence indirecte sur la capacité de résistance des semis à l'arrachage en raison de son influence sur le développement de la partie aérienne et par conséquent sur la force de traînée.

Les résultats de l'expérience témoin sur saule blanc et celle de l'enfouissement ont fourni des données préliminaires. Il a été observé que pour le saule blanc la morphologie des semis semblaient également différente entre le substrat sableux et les deux autres substrats. De plus, les ordres de grandeurs des paramètres analysés sont équivalents à ceux du peuplier noir sur les substrats sablo-graveleux et sableux. En revanche, les semis de saule blanc sur substrat sableux présentent des valeurs de croissance racinaire bien plus élevée.

L'expérience d'enfouissement de 247 semis sous une épaisseur de sable de 0,2 m à 0,6 m n'a permis d'observer la sortie d'un unique individu de la couverture sableuse l'année suivante. Les semis de peupliers noirs sont donc apparus moins résistants que dans notre hypothèse de départ. Cependant cette expérience constitue une première étape dans l'étude de cette contrainte très peu abordée pour les espèces considérées.

Cette démarche mise en œuvre sur un nombre important de semis de *Salicaceae* de 5 mois de croissance en conditions semi-contrôlées fut riche d'enseignement. L'analyse de ces données met en lumière un avantage pour le développement des semis sur le substrat sableux par rapport aux deux autres structures sédimentaires. Elle met également en évidence la très forte variabilité génétique de ces semis pour les paramètres mesurés et notamment sur des traits racinaires rarement étudiés à grande échelle.

Transposée dans les conditions *in situ*, cette diversité génétique permettra à certains semis de survivre aux stress naturels de ces habitats dynamiques, qu'ils soient de type abiotique, comme les contraintes exercées en crue, mais également biotique (agents pathogènes). En effet, la diversité génétique permet à une population de survivre et se reproduire sous des conditions environnementales changeantes (Booy *et al.*, 2000).

Bibliographie

Bouma T.J., Nielsen K.L. and Koutstaal B., 2000. Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. Plant and soil 218: 185-196. DOI: 10.1023/A:1014905104017

Booy G., Hendricks R.J.J., Smulders M.J.M., Groenendael J.M.V. and Vosman B., 2000. Genetic diversity and the survival of populations. Plant Biology 2: 379-395. DOI: 10.1055/s-2000-5958

Chiatante D., Sarnataro M., Fusco S., Di Iorio A. and Scippa G.S., 2002. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of *Fraxinus ornus* L. and *Spartium junceum* L. growing on slopes. Plant Biosystems 137: 47-55. DOI: 10.1080/11263500312331351321

Danjon F. and Reubens B., 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. Plant and Soil 303: 1-34. DOI: 10.1007/s11104-007-9470-7

Danjon F.,2011. Croissance, architecture des racines et stabilité des arbres forestiers. Habilitation à diriger des recherches. Université de Bordeaux I. 57 p.

Dupuy L., Fourcaud T. and Stokes A., 2005. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. European Journal of Soil Science 56: 319-327. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00666.x

Ennos A.R., 1993. The Scaling of Root Anchorage. Journal of Theorical Biology 161: 61-75. DOI: 10.1006/jtbi.1993.1040

Felten J., Kohler A., Morin E., Bhalerao R.P., Palme K., Martin F., Ditengou F.A. and Legué V., 2009. The Ectomycorrhizal Fungus *Laccaria bicolor* Stimulates Lateral Root Formation in Poplar and Arabidopsis through Auxin Transport and Signaling. Plant Physiology 151: 1991-2005. DOI: 10.1104/pp.109.147231

Fourniguet J. and Trautmann F., 1985. Carte géologique au 1/50000 – Redon 419. BRGM, Orléans.

Genet M., Stokes A., Salin F., Mickovski S., Fourcaud T., Dumail J. and Van Beek R., 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. Plant and Soil 278: 1-9. DOI: 10.1007/s11104-005-8768-6

Gonzalez E. and Comin F.A., 2010. Seed dispersal, germination and early seedling establishment of *Populus alba* L. under simulated water table declines in different substrates. Trees 24: 151-163. DOI: 10.1007/s00468-009-0388-y

Guilloy H., González E., Muller E., Hughes F.M.R. and Barsoum N., 2011. Abrupt Drops in Water Table Level Influence the Development of *Populus nigra* and *Salix alba* Seedlings of Different Ages. Wetlands 31: 1249-1261. DOI: 10.1007/s13157-011-0238-8

Guilloy-Froget H., Muller E., Barsoum N. and Hughes F.M.R., 2002. Dispersal, germination, and survival of *Populus nigra* L. (Salicaceae) in changing hydrologic conditions. Wetlands 22: 478-488. DOI: 10.1672/0277-5212(2002)022[0478:DGASOP]2.0.CO;2

Horton J.L. and Clark J.L., 2001. Water table decline alters growth and survival of *Salix gooddingii* and *Tamarix chinensis* seedlings. Forest Ecology and Management 140: 239-247. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00314-5

Karrenberg S. and Suter M. 2002. Phenotypic trade-offs in the sexual reproduction of Salicaceae from flood plains. American Journal of Botany 90 (5): 749-754. DOI: 10.3732/ajb.90.5.749

Karrenberg S., Blaser S., Kollmann J., Speck T. and Edwards P.J., 2003. Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment. Functional Ecology 17: 170–177. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2003.00709.x

Kranjcec J., Mahoney J.M. and Rood S.B., 1998. The responses of three riparian cottonwood species to water table decline. Forest Ecology and Management 110: 77-87. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00276-X

Latapie A., 2011. Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire Moyenne (France), Thèse, Université François Rabelais de Tours, 277 p.

Lorin J., 2003. Etude granulométrique du site expérimental du Fresnes/Ingrandes. Données laboratoire et analyses, 100 p.

Mahoney J.M. and Rood S.B., 1992. Response of a hybrid poplar to water table decline in different substrates. Forest ecology and management 54: 141-156. DOI: 10.1016/0378-1127(92)90009-X

Maroder H.L., Prego I.A., Facciuto G.R. and Maldonado S.B., 2000. Storage behaviour of *Salix alba* and *Salix matsudana* seeds. Annals of botany 86: 1017-1021. DOI: 10.1006/anbo.2000.1265

Nicoll B. and Dunn A., 1999. The effects of wind speed and direction on radial growth of structural roots. In: Proceedings of the conference "The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology", Bordeaux, 20-24 July 1998, Series: 'Developments in Plant and Soil Sciences', vol 87,A., S. (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.61-76

Robinson D., 1994. The responses of plants to non-uniform supplies of nutrients. New Phytologist 127:635–674. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1994.tb02969.x

Rodrigues S., Bréhéret J.G., Macaire J.J., Moatar F., Nistoran D. and Jugé P., 2006. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: The Loire River (France). Sedimentary Geology 186: 89-109. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.11.011

Rodrigues S., Claude N., Juge P. and Breheret J.G., 2012. An opportunity to connect the morphodynamics of alternate bars with their sedimentary products. Earth Surface Processes and Landforms 37: 240-248. DOI: 10.1002/esp.2255

Rood S.B., Zanewich K., Stefura C. and Mahoney J.M., 1999. Influence of water table decline on growth allocation and endogenous gibberellins in black cottonwood. Tree Physiology 20: 831-836. DOI: 10.1093/treephys/20.12.831

Scippa G.S., Trupiano D., Rocco M., Di Iorio A. and Chiatante D., 2008. Unravelling the response of poplar (*Populus nigra*) roots to mechanical stress imposed by bending. Plant Biosystems 142: 401-413. DOI: 10.1080/11263500802151058

Segelquist C.A., Scott M.L. and Auble G.T., 1993. Establishment of *Populus deltoides* Under Simulated Alluvial Groundwater Declines. American Midland Naturalist 130: 274-285. DOI: 10.2307/2426127

Shafroth P.B., Stromberg J.C. and Patten D.T., 2000. Woody riparian vegetation response to different alluvial water table regimes. Western North American Naturalist 60: 66–76.

Suna H.L., Lia S.C., Xiongc W.L., Yanga Z.R., Cuib B.S. and Yangc T., 2008. Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. Ecological Engineering 32: 60-67. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.09.002

Tamasi E., Stokes A., Lasserre B., Danjon F., Berthier S., Fourcaud T. and Chiatante D., 2005. Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. Trees 19 : 374-384. DOI: 10.1007/s00468-004-0396-x

Thaler P. and Pages L., 1998. Modeling the influence of assimilate availability on root growth and architecture. Plant Soil 201: 307-320. DOI: 10.1023/A:1004380021699

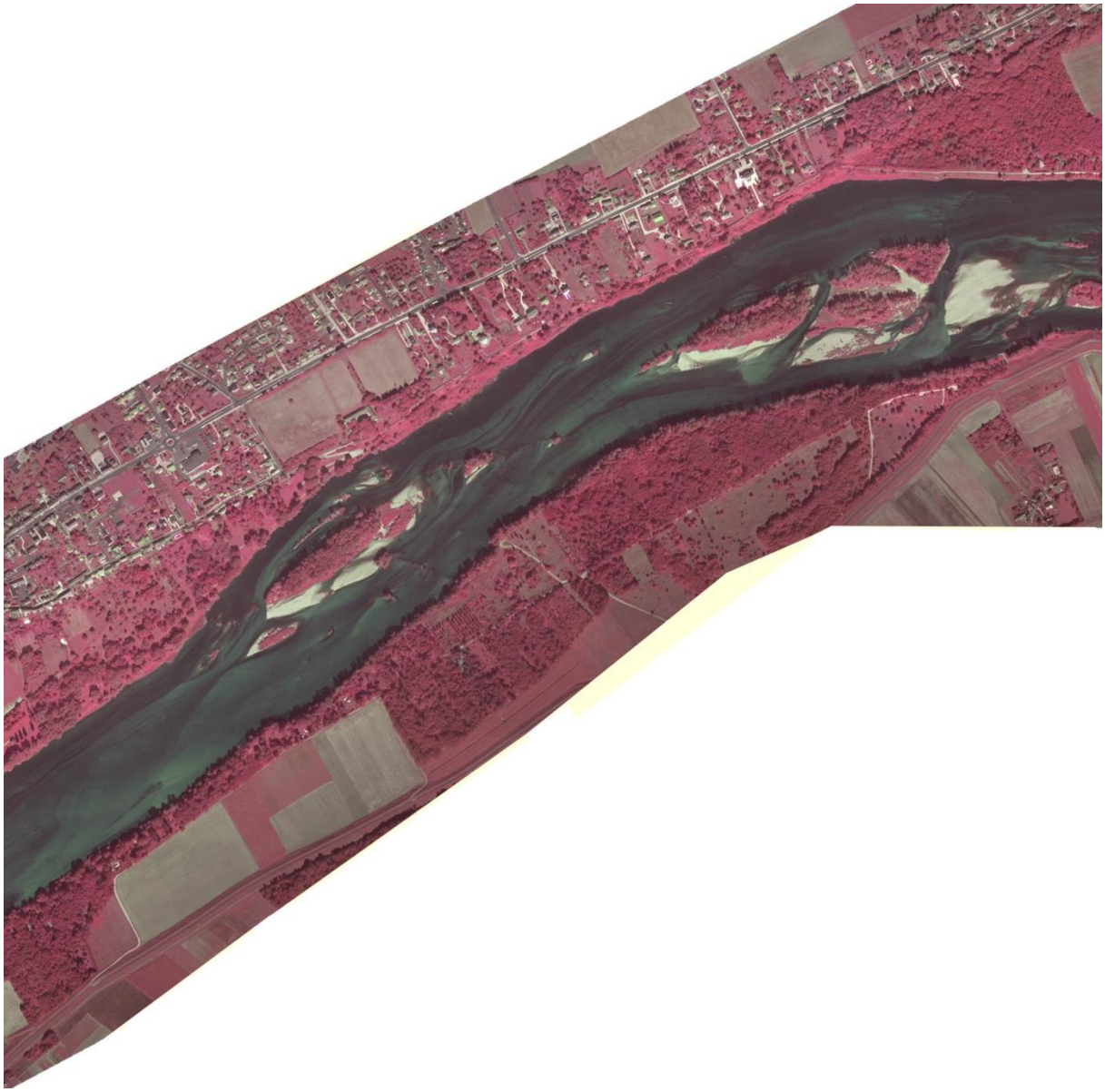
Trupiano D., Di Iorio A., Montagnoli A., Lasserre B., Rocco M., Grosso A., Scaloni A., Marra M., Chiatante D. and Scippa G.S., 2012. Involvement of lignin and hormones in the response of woody poplar taproots to mechanical stress. *Physiologia Plantarum* 146: 39–52. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01601.x

Van Splunder I., Coops H., Voesenek L.A.C.J., Blom C.W.P.M.,1995. Establishment of alluvial forest species in floodplains: the role of dispersal timing, germination characteristics and water level fluctuations. Acta. Bot. Neerl. 44:269–278.

Van Splunder I., Voesenek L.A.C.J., Coops H., De Vries X.J.A. and Blom, C.W.P.M., 1996. Morphological responses of seedlings of four species of *Salicaceae* to drought. Canadian Journal of Botany 74: 1988-1995. DOI: 10.1139/b96-238

Williamson L.C., Ribrioux S.P.C.P., Fitter A.H., Ottoline Leyser H.M., 2011. Phosphate Availability Regulates Root System Architecture in Arabidopsis. Plant physiology 226 : 875-882. DOI: 10.1104/pp.126.2.875

Chapitre 7 : Synthèse et discussion



Photographie infra-rouge du site de Mareau-aux-Prés (RNN Saint-Mesmin), septembre 2014 (source : EDF DTG, Grenoble)

7.1. Rappel du contexte et des objectifs de la thèse

L'objectif de la thèse est de comprendre les processus permettant la transition de la phase géomorphologique aux premiers stades de la phase biogéomorphologique de la succession biogéomorphologique fluviale (Corenblit *et al.*, 2007) ciblés sur les espèces *Populus nigra* et *Salix alba*, espèces patrimoniales de la ripisylve. Nous avons, pour répondre à cette problématique, développé une approche *in situ* renforcée par une approche *ex situ* articulées autour de quatre axes de recherche.

L'axe 1 concernait la remobilisation sédimentaire après les travaux d'entretien du lit afin de caractériser la dynamique hydro-sédimentaire des nouvelles unités créées ou rajeunies par les travaux ainsi que l'influence potentielle de cette dernière sur la survie des semis de peupliers noirs et de saules blancs. Les objectifs spécifiques étaient (i) de comprendre l'adaptation de la morphologie fluviale aux travaux, (ii) obtenir un retour d'expérience sur les pratiques, (iii) évaluer l'influence sur le développement de nouveaux semis. L'axe 2 était focalisé sur l'influence des travaux d'entretien sur le renouvellement des populations de deux espèces (*Populus nigra* et *Salix alba)* ; l'objectif était d'identifier des modalités de travaux plus favorables au recrutement de ces espèces qu'à une recolonisation rapide de l'unité morphologique concernée par voie végétative. L'axe 3 ambitionnait de caractériser les contraintes et les seuils de tolérance des semis de peupliers noirs et de saules blancs aux contraintes exercées en crue (force de trainée, érosion, dépôt). Plus précisément, nous souhaitions déterminer l'influence de l'environnement de recrutement sur la capacité de survie des semis. Enfin, l'axe 4 visait à identifier les processus et vitesses d'évolution de la phase pionnière aux premiers stades biogéomorphologiques (mutation d'une barre forcée en île).

Afin de répondre à ces objectifs, nous avons proposé quatre chapitres articulés selon les approches d'analyse *in* et *ex* situ mentionnées supra (Figure 7-1).

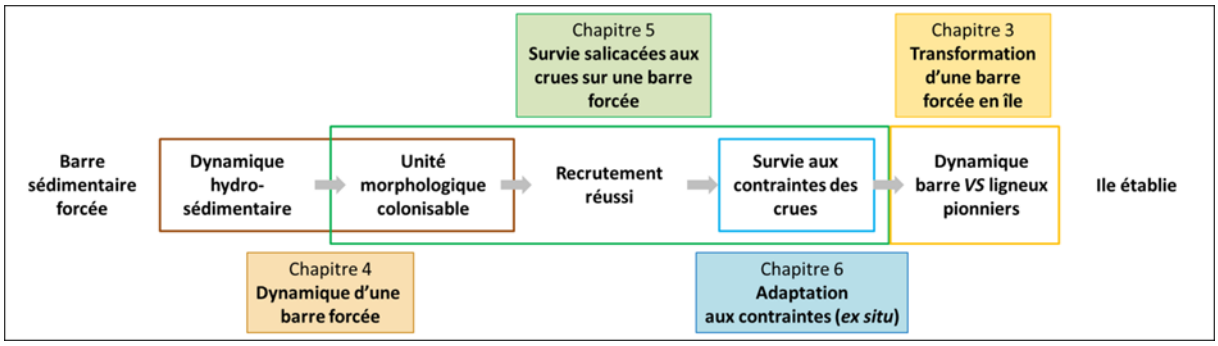


Figure 7-1 : Organisation des chapitres de la thèse en fonction des processus des phases et processus qu'ils décrivent.

L'approche *in situ*, sur laquelle sont bâtis les chapitres 3, 4 et 5, s'est focalisée sur une barre sédimentaire forcée de centre chenal de Loire moyenne localisée en aval de la ville d'Orléans [45] à Mareau-aux-Prés (Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin). Cette barre sédimentaire se situe à l'aval d'un seuil naturel rocheux, au sein d'un complexe d'îles et de barres sédimentaires développées dans un secteur de faible sinuosité associée à un élargissement de la section. Des travaux d'entretien du lit ont été réalisés en 2003 sur cette barre sédimentaire dans l'objectif de restaurer la continuité hydraulique du fleuve. A l'issu de ces travaux des semis de peupliers noirs se sont installés sur la barre sédimentaire qui a rapidement évoluée vers une île pionnière (Chapitre 3). En 2012, de nouveaux travaux d'entretien ont été conduits sur le site toujours dans le but de faciliter les écoulements de crue. Ces derniers ont fait l'objet d'une concertation forte entre gestionnaires de la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin, services gestionnaires en charge des travaux (DDT45) et chercheurs travaillant sur le site (INRA Orléans Val de Loire, GéHCO de Tours) dans le but : (i) d'être efficace sur l'abaissement de la ligne d'eau de crue, (ii) de limiter la colonisation potentielle par des espèces invasives, et (iii) de permettre un suivi scientifique pour obtenir un retour d'expérience sur ces travaux et comprendre les premiers stades de l'évolution d'une barre forcée vers une île pionnière. La Figure 7-2 retrace l'historique des actions d'entretien et de recherche menées sur le site de Mareau-aux-Prés.

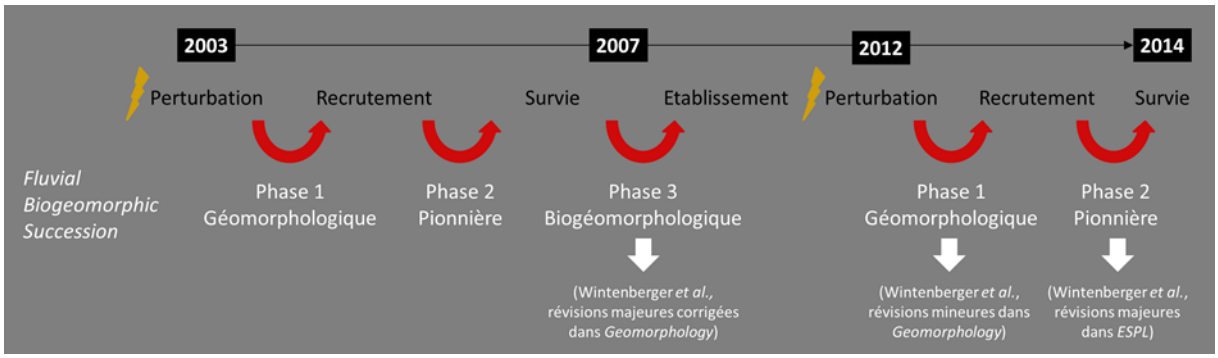


Figure 7-2 : Succession des phases biogéomorphologiques fluviales en fonction de l'histoire du site de Mareau-aux-Prés ainsi que les articles scientifiques issus de l'étude des différentes phases.

Cette concertation a permis d'initier une synergie de recherche qui s'est matérialisée par le projet Biomareau, financé entre 2012 et 2015 dans le cadre de la plateforme Recherche Données Information du Plan Loire Grandeur Nature III. L'objectif principal de ce projet est de comprendre l'influence des travaux sur la biodiversité du complexe d'îles au sein de laquelle cette barre s'est formée ainsi que d'analyser la recolonisation de la barre par les communautés (flore et faune) inféodées à ce type d'environnement après travaux. L'approche *in situ* menée dans cette thèse complète donc ce projet.

7.2. Influence de la dynamique hydro-sédimentaire sur la survie de *P. nigra* et *S. alba*

7.2.1. Influence des conditions de recrutement

De nombreux travaux scientifiques se sont attachés à décrire et comprendre la survie des semis de ligneux pionniers lors du recrutement (Mahoney et Rood, 1998) notamment via l'étude des adéquations entre (i) émersion des surfaces colonisables et libération des graines, (ii) abaissement de nappe et croissance racinaire (Segelquist *et al.*, 1993 ; Guilloy *et al.*, 2011) modulé par les précipitations (Guilloy-Froget *et al.*, 2002) et par la frange capillaire associée au substrat de germination (Mahoney et Rood, 1992). **Dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'influence des conditions de recrutement sur la capacité des semis à survivre aux contraintes des crues subséquentes.** Toutefois, l'analyse des paramètres d'installation apporte des données supplémentaires sur les conditions favorables à l'installation des semis de ligneux pionniers en Loire moyenne (hydrologie, altitude, granulométrie).

7.2.1.1. Mise en place de l'environnement de recrutement et contraintes pré-crue

La structure sédimentaire (taille des grains et organisation stratigraphique) sur laquelle les semis de *P. nigra* et *S. alba* poussent dépend de l'histoire hydro-sédimentaire survenue pendant les crues précédent le recrutement.

Sur la barre forcée étudiée (Chapitre 4), les apports sédimentaires survenant au cours des épisodes de crue dépendent de l'intensité, de la durée et de la fréquence de ces dernières. La succession des crues permet l'accroissement de la barre, celle-ci évoluant depuis la morphologie héritée pré-crue. Les retouches sédimentaires, associées à la phase de décrue, modifient la morphologie du dos de la barre ainsi que son extension spatiale comparée à celles qui la caractérisent en crues. Il en résulte une surface potentielle d'accueil des graines de peupliers noirs et de saules blancs. Notamment, le dos de la barre, convexe en crue, évolue vers une forme tabulaire offrant une gamme d'altitudes faibles favorables à l'accueil des graines. Ce processus a des conséquences sur l'adéquation des paramètres nécessaires au dépôt des graines, à leur germination et à la survie des semis, détaillées dans le modèle de la *recruitment box* (Mahoney et Rood, 1998).

Les processus hydro-sédimentaires sur la barre sont à l'origine d'un granoclassement amont aval accompagné d'un développement fréquent d'armures dans la partie amont (attachée au seuil naturel rocheux). Le front de barre est principalement composé de sédiments sableux. Ce processus a également été identifié sur d'autres barres sédimentaires dans des systèmes fluviaux différents (Smith, 1974 ; Lisle *et al.*, 1993 ; Pyrce et Ashmore, 2005). Ainsi, les structures sédimentaires disponibles à l'accueil des graines varient d'amont en aval. Ce point est fondamental car il influence plusieurs paramètres de la survie avant (alimentation en eau, croissance) et pendant les crues suivant le recrutement (croissance et forme du système aérien [résistance trainée], ancrage racinaire [résistance arrachage], potentiel d'érosion du substrat). La présence des seuils sur le site relève la ligne d'eau d'étiage réduisant la distance à la nappe en période estivale, notamment dans la partie amont de la barre, permettant ainsi le développement des semis sur les sédiments sablo-graveleux et graveleux dont la frange capillaire est peu épaisse (Mahoney et Rood, 1998). La partie aval, plutôt sableuse, permet la formation d'une frange capillaire de plus grande épaisseur favorable au recrutement des semis dans cette partie de la barre topographiquement plus élevée.

7.2.1.2. Influence de la granularité des sédiments sur la morphologie des semis et leur potentiel d'ancrage

La résistance des semis à l'arrachage (force de trainée avec ou sans érosion) dépend du rapport entre la tige (soumise à la force de traînée) et les racines, à travers lesquelles est transférée vers le sol la force exercée sur la tige. Le système de pivot est le mieux adapté pour résister à une contrainte unidirectionnelle (Ennos, 1993). D'autres parts, dans le cas d'une contrainte directionnelle, le système racinaire peut présenter une asymétrie caractérisée par un nombre de racines supérieures dans le sens de la contrainte (Coutts *et al.*, 1999; Chiatante *et al.*, 2003 ; Di Iorio *et al.*, 2005; Tamasi *et al.*, 2005) et ce dès les premiers stades de développement (*e.g.* Scippa *et al.*, 2006). Ainsi, l'ancrage des semis se modifie au cours du temps selon l'apparition des contraintes ; ceci implique des conséquences sur les plants (*e.g.* croissance asymétrique *vs* rupture des racines). **Néanmoins, la croissance des semis avant l'apparition des contraintes peut influencer l'ancrage (et ainsi la résistance aux contraintes) au moins vis-à-vis des premiers événements hydrologiques**.

Le granoclassement perceptible sur la barre forcée a conduit à l'étude de l'influence de la granularité du substrat de germination sur le développement des systèmes racinaires et aériens des semis de peupliers noirs et de saules blancs. Afin d'éviter la destruction des semis en place sur le terrain, les expérimentations *ex situ* ont permis de mettre en évidence, pour des conditions édaphiques et environnementales identiques (apports nutritifs, eau, ensoleillement) des morphologies et croissances des semis de peupliers noirs différentes en fonction du substrat de germination (Chapitre 6). **Les semis ayant poussés dans un substrat sableux présentent une plus grande variabilité de croissance et de morphologie** (système racinaire et aérien) **par rapport à ceux ayant poussés dans les deux autres substrats.** Cette grande variabilité de traits leur confère un spectre de réponses variées aux contraintes qu'ils peuvent subir. Les résultats préliminaires obtenus pour le saule blanc semblent préfigurer la même tendance pour cette espèce.

Pour des conditions de disponibilité en eau identiques et non limitées, **la longueur de la racine principale, qui constitue le point principal d'ancrage des semis de peuplier noir, n'est pas significativement différente pour les granularités testées dans nos expériences** *ex situ*. Cependant, la ramification du **système racinaire est plus dense pour un substrat sableux** en surface et en profondeur. Les racines secondaires ont tendance à se localiser sur les 20 premiers centimètres à proximité du collet et ce, quel que soit le substrat.

Ainsi, la profondeur d'ancrage du système racinaire, déterminant la valeur seuil d'intensité de l'érosion au-dessus de laquelle le système racinaire est emporté avec les sédiments, est potentiellement identique pour les substrats sableux et sablo-graveleux. Cependant, il existe nécessairement une valeur seuil à partir de laquelle l'érosion autour du système racinaire est trop élevée pour lui permettre de résister à la force de traînée (Edmaier *et al.*, 2011).

Le substrat sableux favorise le développement de racines secondaires, augmentant l'alimentation en eau et en nutriments du plant et permettant certainement une croissance plus importante. Les semis ayant poussés dans un substrat sablo-graveleux ou bi-couche (couche sableuse déposée sur un substrat sablo-graveleux) se ressemblent, présentant un système racinaire peu ramifié et une faible croissance de la tige en comparaison des résultats obtenus sur substrat sableux.

A l'échelle du semis, on peut présumer d'un **meilleur potentiel de résistance à des contraintes variées pour des semis développés dans un substrat sableux que dans des substrats sablo-graveleux (en revanche l'érosion du substrat de germination sera plus aisée en contexte sableux).** La plus faible diversité observée sur les substrats sablo-graveleux confère certainement des valeurs seuils de tolérance très proche pour l'ensemble des semis. Cette hypothèse expliquerait en partie les pourcentages de survie des peupliers noirs observés après les crues sur la barre de Mareau-aux-Prés (Chapitre 5). Sur substrats sableux, la variabilité génétique permet au moins à quelques semis de survivre (si le substrat de germination n'est pas érodé), alors que sur substrat sablo-graveleux, soit toute la cohorte survit, soit toute la cohorte meurt (processus à seuil). Cette hypothèse est à moduler en fonction des intensités de processus érosion/dépôt ; s'ils sont vraiment très faibles (comme lors des crues estivales observées en 2013), aucune différence de taux de survie ne sera observée entre les deux substrats. Dans le cas d'une forte épaisseur de sédiments érodée, par exemple pour une crue de forte amplitude, la diversité racinaire observée sur le sable ne sera pas suffisante pour résister aux contraintes.

Sur les substrats sablo-graveleux, lorsque les contraintes ne sont pas trop fortes, le développement des semis, avant crue, pourrait permettre à un grand nombre de plants de survivre.

Le maintien de plusieurs individus rétroagit également de façon plus importante sur l'environnement en jouant le rôle de massif freinant les écoulements (Petryk et Bosmajian, 1975 ; Fathi-Maghadam et Kouwen, 1997 ; Wu *et al.*, 1999), piégeant et fixant des sédiments (Graf, 1978; Fielding *et al.*, 1997; Wende and Nanson, 1998; Kollmann *et al.*, 1999; Gurnell *et al.*, 2001; Nakayama *et al.*, 2002; Francis *et al.*, 2006 ; Euler et Herget, 2012 ; Euler *et al.*, 2014 ; Manners *et al.*, 2014) réduisant ainsi les contraintes s'exerçant sur les végétaux. **Sur une barre sédimentaire sur laquelle les sédiments s'organisent selon un granoclassement amont-aval, la survie des individus dépendra, dans la partie amont, de la balance entre les contraintes menant à l'érosion des particules et la force nécessaire à l'arrachage du fait d'une diversité de morphologie et croissance plus faible sur ce type de substrat que pour les substrats sableux.** Si les semis survivent, ils peuvent rapidement engendrer une zone d'abri à l'aval permettant l'installation de nouveaux semis (Gurnell *et al.*, 2005).

7.2.2. Influence des paramètres hydro-sédimentaires sur la survie

7.2.2.1. Contrôle à l'échelle régionale : variabilité hydrologique

Les processus intervenant dans l'évolution d'une barre forcée au cours des crues et dans la survie des semis de Salicacées qui y sont recrutés peuvent être appréhendés selon différentes échelles spatiales et temporelles.

Influence de la submersion sur les semis

Les variations hydrologiques peuvent être appréhendées à l'échelle de la phase de crue, de la crue, de la succession de crue ou du cycle hydrologique (sur une année). Les échelles de temps plus longues ne concernant pas notre approche.

La Loire dans le secteur étudié est principalement soumise à des crues d'hiver et parfois printanières. Durant les deux années d'étude de ce secteur, nous avons également observé des submersions survenant pendant la période estivale avant les conditions d'étiage de septembre.

Les contraintes potentiellement appliquées aux semis (vitesses d'écoulement, épaisseur de sédiments érodés et/ou déposés) augmentent avec le débit. La période d'occurrence des crues au cours du cycle végétatif des semis des espèces étudiées peut influencer leur survie au cours de la première année. Ainsi, **deux types d'années hydrologiques peuvent se distinguer** : les années hydrologiques sans submersion de la barre pendant la période de croissance suivant la germination et les années avec submersions pouvant affecter le développement et la survie des semis.

Les quatre types de succession de contraintes identifiés dans le chapitre 5 (i) arrachage par la force de traînée, (ii) arrachage par la force de traînée associée à l'érosion du substrat, (iii) enfouissement, (iv) alternance d'érosion et enfouissement peuvent être observés. Selon la durée de submersion et l'intensité des écoulements, le stress peut engendrer la mort, la fragilisation ou l'adaptation et le renforcement des semis qui leur permettra de résister aux crues subséquentes.

La résistance à la force de traînée et à l'érosion du substrat est dépendante de la croissance et de la morphologie des semis avant l'apparition du stress ainsi que de l'intensité de ce dernier (énergie atteinte, durée, fréquence). **Lorsqu'ils surviennent pendant la période de croissance, ces stress peuvent engendrer une adaptation des végétaux**. Certaines de ces adaptations (*e.g.* cernes de croissance excentriques, cicatrices d'impacts/frottement, inclinaison) ont été décrites dans la littérature pour des individus plus âgés (Hupp, 1988) et à l'échelle des massifs (Nakayama *et al.*, 2002). Pour les jeunes semis, ces stress pourraient favoriser le développement d'une architecture racinaire asymétrique adaptée à une contrainte directionnelle horizontale (cf. paragraphe 2.1.2.) ou un port incliné conséquence de l'effet de trainée (Fielding et Alexander, 2001) ou de l'enfouissement permettant de réduire la résistance à l'écoulement. Cependant, les études sur l'adaptation du système racinaire des semis de Salicacées à une contrainte directionnelle horizontale restent à être entreprises.

Contrôle de l'apport sédimentaire

L'apport sédimentaire est tributaire des variations hydrologiques en crue. **Ces deux paramètres conditionnent les processus hydro-sédimentaires qui surviennent sur la barre et définissent le cadre des contraintes exercées sur les jeunes semis.** Deux composantes des variations hydrologiques peuvent être distinguées pour leur influence sur l'apport sédimentaire et l'évolution de la barre.

La première composante est la **succession des épisodes de crue**, la seconde concerne **leur intensité**, dont l'influence sera détaillée à l'échelle de la barre (cf. paragraphe 7.2.2.2.). Ces **deux composantes sont déterminantes dans le phasage** (hystérèses de la charge de fond) et **la quantité** de l'apport sédimentaire provenant du chenal principal de la Loire (Claude *et al.*, 2012 ; Rodrigues *et al.*, 2006) et plus largement au sein des systèmes fluviatiles sablo-graveleux (Frings et Kleinhans, 2008, Claude *et al.*, 2012) et graveleux (Reid *et al.*, 1997). Pour une succession de crues hivernales de faibles intensités, environ 1000 $m^3.s^{-1}$, et inférieures à la crue de retour 2 ans (1700 $m^3.s^{-1}$), l'apport sédimentaire survient après le pic de crue.

Pour une crue printanière d'intensité supérieure à la crue de retour 2 ans, survenant après une succession de crues hivernales de faibles intensités, l'apport sédimentaire survient pendant la montée de crue entre 1200 et 1900 $m^3.s^{-1}$. **Les pulsations du débit solide sont dépendantes de l'histoire hydro-sédimentaire à l'amont** (migration de barres dans le chenal principal, rupture d'armures, érosion de berges) ; **il est donc possible que cet apport sédimentaire survenant en fin de montée de crue soit également à mettre en relation avec la succession des crues hivernales et des processus (dépôt/stockage) qu'elles ont engendrés en amont**. Les variations hydrologiques ainsi que le phasage des apports de sédiment vont influencer à la fois le recrutement et la survie des ligneux pionniers. Le moment ou survient l'apport sédimentaire peut également influencer les contraintes appliquées aux semis car il modifie la balance énergétique sur la barre et donc les processus d'érosion et de dépôt.

7.2.2.2. Contrôle de la dynamique hydro-sédimentaire d'une barre forcée dans la survie des semis

Avantages des barres forcées pour la survie

Les 3 paramètres morphologiques de forçage qui s'exercent sont i) un seuil, ii) un élargissement du lit et iii) une légère inflexion dans la forme en plan du lit. L'hypothèse avancée dans le chapitre 3 (Wintenberger *et al.*, révisions majeures [corrigé] dans *Geomorphology*) stipule que le potentiel de recrutement des ligneux pionniers est le même pour les barres libres et forcées (sédiments remaniés en crue, nus, disponibilité en eau) mais que ces dernières, du fait de leur « relative stabilité associée au forçage local » seraient plus propices à la survie des jeunes ligneux recrutés. *A contrario*, les barres libres sont des macroformes qui migrent relativement rapidement, caractérisées par une mobilisation de la majorité du stock sédimentaire en crue (Rodrigues *et al.*, 2012) qui engendre des contraintes plus fortes pour les jeunes ligneux pionniers.

Influence du phasage des processus d'érosion-dépôt

Les variations hydrologiques et l'apport sédimentaire contrôlés régionalement (cf. section 7.2.2.1) s'expriment à différentes échelles temporelles allant de la phase de crue au cycle hydrologique annuel. Selon l'intensité de crue, les tendances générales des processus d'érosion dépôt ne surviennent pas au même moment (Chapitre 4). Ainsi, pour les **faibles intensités de crue** (< 1200 $m^3.s^{-1}$ [crue biennale = 1700 $m^3.s^{-1}$]) **la barre est principalement soumise à de l'érosion** lors de la montée de crue.

Après le pic de crue, l'apport sédimentaire survient et se traduit par une **tendance au dépôt généralisée**. Pour les **crues de plus fortes intensités** (>1700 $m^3.s^{-1}$) survenant après plusieurs crues de faibles amplitudes, **l'apport sédimentaire survient au milieu de la montée de crue sur la partie aval de la barre et se poursuit par un apport amont sur l'ensemble de la barre au pic de crue**. Le phasage de l'apport sédimentaire a une influence potentielle sur les semis de ligneux recrutés au printemps précédant les crues. **Au cours d'une montée de crue, avant l'apport sédimentaire, les semis sont principalement soumis à la (i) force de traînée ainsi qu'à (ii) l'érosion du substrat les supportant** (dépendante de l'excès de contrainte de cisaillement permettant d'atteindre le seuil de mise en mouvement des sédiments [balance énergétique entre les sédiments stockés sur la barre et le gradient des vitesses d'écoulement à proximité du fond]). Ainsi, **lorsque l'apport sédimentaire survient après le pic de crue**, **les semis et le stock sédimentaire sur lequel ils ont poussé sont soumis à de fortes contraintes pendant le pic, contrairement aux cas où l'apport sédimentaire survient avant le pic de crue**. **L'apport sédimentaire modifie cette balance énergétique favorisant des processus de dépôt pouvant mener à l'enfouissement, total ou partiel, des semis limitant ainsi l'érosion de leur substrat d'ancrage et la force de trainée qui leur est appliquée** (Figure 7-3).

Figure 7-3 : Peupliers noirs enfouis dont la surface opposable à l'écoulement est réduite.

En raison du phasage de l'apport sédimentaire (avant ou après pic de crue), les forces de traînée associées aux vitesses maximales observées à proximité du pic de crue, ne correspondent pas forcément à la contrainte maximale appliquée aux semis dans le cas d'un enfouissement préalable. **Ainsi, la force de traînée maximale appliquée aux semis lors d'un cycle hydrologique n'est pas uniquement fonction des intensités de débits mais également des pulsations du transport solide et des processus d'érosion-dépôt survenant sur l'unité morphologique considérée**. Par exemple, dans notre cas, il est impératif de prendre en considération l'apport sédimentaire délivré à la barre qui modifie les contraintes exercées sur le semis : protection contre l'arrachage et l'érosion mais vulnérabilité vis-à-vis de l'enfouissement.

Le **fonctionnement hydrosédimentaire de la barre forcée** étudiée s'opère selon un **modèle à 5 stades** développé dans le chapitre 4 :

- *Stade 1 :* phase érosive des dépôts sédimentaires de la barre en début de montée de crue. Les dunes se développent à partir du stock sédimentaire préexistant ;
- *Stade 2 :* phase d'engraissement associée à l'apport sédimentaire latéral du chenal principal (morphologie convexe) ;
- *Stade 3 :* phase de construction. Allongement, étalement latéral à la fin du stade de montée de crue et au début de la décrue ;
- *Stade 4 :* déclin. Etalement asymétrique et aplanissement de la barre.
- *Stade 5 :* érosion des marges et du front de la barre lors de la déconnexion. L'extension de la barre, et de ce fait l'espace disponible pour le recrutement de graines, diminue fortement pour ces niveaux.

Influence potentiel du mode de transport des sédiments

L'apport sédimentaire se traduit de manière instantanée par un dépôt sur la barre. Cependant, les dépôts observés ne correspondent qu'à une vision instantanée d'un état transitoire en raison de la dynamique à laquelle est soumise la barre. En effet, ces dépôts constituent en réalité un stock sédimentaire en mouvement sur le dos de la barre se manifestant principalement sous forme de dunes superposées. Les dunes peuvent également se développer à partir du stock sédimentaire en place induisant la mise en mouvement de la couche active dont la profondeur est difficile à estimer. Cependant, elle concerne la partie supérieure du substrat dans lequel les semis ont pu germer**. Des questions quant à l'interaction entre les semis et le développement des dunes peuvent se poser**. La présence des semis modifie-t-elle la profondeur de la couche active ? Les semis sont-ils cassés, arrachés par la mise en mouvement de ces sédiments ? Lorsque les dunes sont alimentées par l'apport sédimentaire provenant du chenal principal, les semis, alors enfouis sous cet apport, sont-ils soumis à des phénomènes abrasifs de la progression des dunes (même si les vitesses de progression des dunes restent faibles [vitesses maximales mesurées de 80.10^{-5} $m.s^{-1}$]) ?

Influence du forçage de la barre

Pour les conditions de débits rencontrées pendant cette étude, **deux zones à comportement hydrosédimentaire différent sont mises en évidence pour les barres issues d'un forçage de type seuil.** Ces zones influencent le potentiel de développement et de survie des ligneux pionniers lors des premières phases de colonisation de ces espaces. Une **zone stable morphologiquement au cours des crues inférieures à la crue biennale**, localisée dans la partie amont et centrale. La granularité grossière et plurimodale est propice au développement d'armures qui n'ont pas rompues pour les crues survenues entre 2012 et 2014. Leur seuil de rupture est sans doute atteint pour des événements de fréquence de retour supérieure à 2 ans (un profil longitudinal témoigne de l'érosion à l'amont de la barre pour une crue de cette intensité). Pour cette zone stable, deux comportements sédimentaires se distinguent. **Au cours des crues de faible intensité, le seuil de rupture des armures n'est pas atteint et les semis bénéficient d'une protection vis-à-vis de l'érosion du substrat.** Dans ce cas, la forte résistance à l'écoulement opérée par les particules grossières de l'armure, dont le D_{90} était du même ordre de grandeur que la taille des semis recrutés, assure une dissipation de l'énergie (Church *et al.*, 2012) susceptible de réduire la force de trainée exercée sur les semis. **Au cours des crues de plus forte intensité entrainant une rupture des armures, la survie des semis dépendra alors de l'ancrage racinaire et de l'épaisseur de la sous-couche érodée après la rupture de l'armure**. **La zone mobile** plutôt sableuse, localisée sur les marges et dans la partie aval de la barre, est fortement remobilisée au cours des crues avec parfois des hauteurs d'érosion importantes, proches ou supérieures à la profondeur d'enracinement des semis (ordre de grandeur métrique). **Ces sédiments sableux étant mobiles pour des gammes de faibles débits, les semis peuvent être arrachés du fait de la mobilisation du stock sédimentaire alors même que la force de trainée associée aux écoulements appliqués à ces semis est faible.** La survie des semis dépend de la balance entre l'érosion du substrat et la force d'ancrage de ceux-ci. La force d'ancrage elle-même est modifiée au cours du temps, en fonction (i) de la durée de la force de traînée appliquée au semis, (ii) à mesure que le système racinaire est excavé par l'érosion du substrat et concerne plutôt le rapport des forces exercées localement.

Rapport de force : contrainte de cisaillement vs traits biologiques des semis

Les grandes tendances observées à l'échelle de la barre peuvent être modulées par des effets locaux. L'érosion du substrat de germination d'un ligneux pionnier dépend du profil de vitesse et de la taille des grains à proximité du jeune plant.

La variabilité granulométrique au sein de la barre étudiée, sur les deux zones évoquées ci-dessus (stable et mobile), implique des processus d'arrachage différents en fonction du niveau énergétique atteint. Dans le cas d'un épisode fortement énergétique ($\tau >> \tau_{c(D90)}$), la forte intensité des processus érosifs se traduit par la mobilisation de l'essentiel des fractions granulométriques en place (cf. fig. 3.8 de Bridge, 2003, p. 51). Dans ce cas, la survie des semis est plutôt dépendante des conditions hydrauliques et sédimentaires régnant sur la barre (à proximité du chenal principal, les contraintes (vitesses d'écoulement, profondeur) ont tendance à être plus fortes. Dans ces secteurs les semis ont plus de risque de subir une érosion de leur substrat de germination parfois supérieure à la profondeur d'enracinement des jeunes arbres.

Dans le cas d'un épisode peu énergétique ($\tau > \tau_{c(D10)}$), la contrainte de cisaillement est suffisamment importante pour permettre la mise en mouvement d'une partie du stock sédimentaire et engendrer (i) des processus d'armurage (lorsque le stock sédimentaire est plurimodal) ou (ii) d'érosion autour des semis pour des sédiments fins non cohésifs. Dans les deux cas, les traits biologiques vont exercer une influence forte sur la capacité de survie des semis car les contraintes sont faibles.

Sur les substrats sablo-graveleux, les semis ont tendance à être plus petits que sur les substrats sableux pouvant leur conférer une meilleure adaptation pour résister à la force de trainée. Les semis sur substrats sableux sont quant à eux plus grands, opposant une surface plus grande à l'écoulement mais sont caractérisés par un système racinaire plus ramifié. Ce type de développement peut favoriser la fixation des sédiments, favorisant une protection contre l'érosion. L'arrachage des semis dépend du rapport entre l'ancrage assuré par le système racinaire et la hauteur de tige (surface opposable à l'écoulement soumise à la force de traînée). Un des paramètres clés pour appréhender cette force, non étudié ici, est la flexibilité des semis qui permet de diminuer cette force. Ainsi, la différence de croissance du système aérien pour les peupliers noirs ayant poussés sur substrats sableux ou sablo-graveleux pourrait être à l'origine d'une différence de flexibilité des semis qu'il serait intéressant d'étudier. Comme développé au début de cette synthèse (cf. section 2.1.2.) le système racinaire est également un point clé de l'ancrage, notamment vis-à-vis de la longueur d'enracinement mais également de l'architecture des racines qui n'a pas été étudiée ici.

Pour résumer, les traits biologiques vont donc jouer, à l'échelle locale, un rôle prépondérant sur la survie lors des épisodes de crue de faible énergie ; pour les crues importantes l'érosion du substrat et les fortes contraintes exercées sur les tiges se solderont par une forte mortalité.

Les traits biologiques des plants ont été analysés comme un facteur de survie indépendamment de l'effet de la densité d'implantation des semis. Toutefois, à l'échelle locale, le développement des végétaux rétroagit sur la résistance à l'écoulement (Li et Shen, 1973 ; McKenney *et al.*, 1995 ; Fathi-Maghadam et Kouwen, 1997 ; Darby, 1999 ; Wu *et al.*, 1999 ; Antonorakis *et al.*, 2010 ; Vargas-Luna *et al.*, 2014) et la fixation des dépôts. La résistance à l'écoulement causée par la végétation dépend de sa taille, de sa flexibilité, de sa densité et de son degré de submersion (Thompson et Roberson, 1976, p. 288). Dans notre étude *in situ*, aucun lien direct n'a été observé entre la densité des semis et leur survie. Cela pourrait néanmoins constituer des perspectives d'expérimentations à mener en laboratoire pour identifier cet effet et son accroissement au cours du développement végétal (*e.g.* n+1 à n+3). L'influence de la densité de peuplement peut également s'exercer sur la fixation des sédiments. Pour les substrats grossiers, il semble peu probable que des systèmes racinaires de jeunes ligneux pionniers influencent fortement la stabilité des sédiments. De plus, il a été observé que le chevelu racinaire des individus de *P. nigra* et *S. alba* développés sur substrats grossiers était beaucoup moins développé que sur substrat sableux. Sur ces derniers, ces deux espèces présentent des systèmes racinaires ramifiés dès la première saison de croissance qui peuvent engendrer une meilleure fixation des sédiments (Edmaier *et al.*, 2014). **En plus de modifier la résistance à l'écoulement, une forte densité d'implantation pourrait engendrer un enchevêtrement des racines** permettant i) une meilleure stabilisation des sédiments (augmentant ainsi la force nécessaire à leur mise en mouvement) et ii) une augmentation de la force nécessaire à l'arrachage des semis leur conférant une stabilité.

Poids relatif des types de contraintes sur la survie

Quatre types de succession de contraintes susceptibles d'engendrer la disparition des semis de ligneux pionniers tout juste recrutés ont été identifiés (Chapitre 5) et apparaissent selon des modalités spatio-temporelles spécifiques. La vulnérabilité des semis face à ces contraintes n'est pas identique ; ceci se traduit par des taux de survie variés en fonction du type de succession de processus. Ces points reprennent et complètent les travaux récents d'Edmaier *et al.* (2011).

Les différents types identifiés sont :

- *Type I :* arrachage par la force de traînée (mortalité associée 0,1 % à l'échelle de la barre) ;
- *Type II :* arrachage par association de l'érosion du substrat et de la force de trainée appliquée à la tige (mortalité associée 28 %) ;
- *Type III :* enfouissement survenant après l'application de la force de trainée (mortalité associée 13,6 %) ;
- *Type IV :* succession de l'érosion puis de l'enfouissement (mortalité associée 50,6 %).

Le type I, arrachage par la force de traînée seule signifie que les forces nécessaires à l'arrachage des plantules est plus forte que la force de mise en mouvement des particules. Ce type dépend à la fois du substrat sur lequel les semis ont recrutés et du développement postérieur des armures mais également des caractéristiques biologiques des végétaux. Au vu des résultats obtenus en pépinière**, il apparait que la force nécessaire à l'arrachage d'un plant de peuplier noir dépend de la longueur de la racine principale** (pivot). Les expériences n'ont pas permis de mettre en évidence un trait biologique facilement quantifiable qui permette de rendre compte de la force d'ancrage d'un semis : **la biomasse racinaire semble à cet égard être le paramètre le plus représentatif** (malgré les pertes liées à la rupture des racines fines lors de l'arrachage des individus). Comme exposé dans le chapitre 6 (expérimentations *ex situ*), **il semble que la force d'ancrage soit moins dépendante des racines secondaires pour ce stade de croissance**. Lors de l'arrachage, cette catégorie plus fragile et fine des racines casse. Cette partie contribue peu à la mesure de biomasse racinaire ; c'est sans doute pour cette raison que ce trait apparaît comme le meilleur indicateur de la force nécessaire à l'arrachage. Le système racinaire étant difficile à étudier sur le terrain en plus de son caractère destructif, il serait intéressant de chercher un trait biologique extérieur (appareil aérien) qui soit corrélé avec cette valeur de biomasse racinaire afin de pouvoir évaluer facilement sur le terrain la force d'ancrage des semis recrutés à la fin de la saison de croissance. **Les forces nécessaires à l'arrachage des peupliers n'apparaissent pas significativement différentes entre les substrats testés** *ex situ* : sableux, sablo-graveleux et bi-couche (0,1 m de sable en surface et sablo-graveleux en profondeur). En revanche, les hauteurs de tige le sont.

Les peupliers poussant sur substrats sableux ont tendance à avoir une hauteur, un diamètre et une biomasse de tige plus élevés que ceux ayant poussé sur les autres substrats ; ceci induit une surface opposée à l'écoulement et une force de trainée plus importantes. Ceci implique que, **pour des gammes de vitesses identiques, les semis recrutés sur les secteurs à granularité grossière seront soumis à une force de trainée plus faible que les semis sur substrat sableux et seront logiquement moins vulnérables à l'arrachage par le Type I.** Cependant, ce sont sur les secteurs à armure qu'il est le plus aisé d'identifier ce type processus, comme il a été mis en évidence dans le chapitre 5, car ces secteurs ne présentent pas d'érosion. ***A contrario,* les mortalités observées sur le sable sont souvent associées à de l'érosion du substrat, ne permettant pas de distinguer le Type I du Type II.** De ce fait, on peut se poser la question de l'existence du processus de Type I dans le cas de jeunes semis recrutés sur substrat sableux. Le Type II dépend également de la balance entre les forces de cisaillement, la taille des grains et la force d'ancrage. Ce processus représente 28 % de la mortalité des semis de peuplier noir au cours des crues subséquentes à leur recrutement. **Il n'est pas exclu que dans ces 28 %, une partie des semis aient été arrachés du substrat avant la mise en mouvement des sédiments mais il n'est pas possible de distinguer le processus de Type I dans ce cas**. Lorsque les forces de cisaillement sont suffisamment élevées pour mettre en mouvement les sédiments, cela ne signifie pas forcément que les semis de ligneux pionniers seront arrachés. Comme il a été détaillé précédemment, l'érosion du substrat n'induit pas forcément un arrachage du semis car même si sa force d'ancrage diminue avec la mise à jour de son système racinaire, la force de traînée doit également diminuer en raison de la flexion du plant qui doit être plus élevée en raison d'une rigidité des racines plus faible que celle de la tige.

Le Type III représente presque 14 % des cas de mortalité des semis de peupliers noirs au cours des crues subséquentes à leur recrutement. Ce processus a été mis en évidence dans des secteurs avec de l'enfouissement cependant il était impossible avec les mesures réalisées dans ce travail de déterminer les causes réelles de la mortalité : enfouissement, arrachage par la force de traînée ou abrasion liée au déplacement des sédiments enfouissant les semis.

Le Type IV n'est pas un processus au sens propre mais une succession de deux processus. Néanmoins, il est difficile en conditions *in situ* de distinguer le processus conduisant à la mort des semis. Il serait peut-être nécessaire d'étudier les différentes modalités de survie des semis à l'enfouissement et d'intégrer une modalité avec un système racinaire excavé.

7.3. Influence des travaux d'entretien du lit

7.3.1. Influence sur la dynamique hydro-sédimentaire

L'un des objectifs des travaux réalisés sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés est la remobilisation sédimentaire pour participer à l'enrayement du processus d'incision généralisée sur l'ensemble de la Loire moyenne et aval, phénomène principalement lié aux activités anthropiques. Les travaux ont permis de recharger le chenal principal avec les sédiments piégés par la végétation depuis son installation entre 2004 et 2005 (10500 m^3). L'étude menée sur la remise en mouvement de la barre sédimentaire au cours des crues nous a permis de mettre en évidence sa spécificité de barre forcée qui lui confère une position fixe au sein du lit (Chapitre 4). Plusieurs aspects sont à noter concernant l'influence des travaux sur le transport sédimentaire :

(i) la remobilisation des sédiments est rapide, attestée par le développement des dunes selon un processus régressif à partir du stock sédimentaire en place dès la submersion de la barre et pour des débits relativement faibles (530 $m^3.s^{-1}$). Cette rapide remobilisation confirme les résultats d'autres travaux d'entretien (dévégétalisation/scarification) menés en Loire moyenne (*e. g.* sites de Givry-Fourchambault, Orléans). Ce phénomène s'explique par la grande mobilité des sédiments du lit de la Loire illustrée par une valeur importante de θ Shields critique (Claude *et al.*, Rodrigues 2014 ; Rodrigues *et al.*, *in press*). Toutefois, les dunes ne se développent pas dans la partie la plus amont de la barre, caractérisée par des sédiments très hétérométriques, pouvant limiter le développement des mésoformes du lit (Kleinhans *et al.*, 2002). De plus, malgré le mélange des sédiments associé aux travaux, les faibles intensités de crue survenues après ces travaux ont certainement favorisé la reformation rapide des armures, protégeant ainsi le stock sédimentaire sous-jacent et limitant sa remobilisation. Ainsi, les travaux ont été efficaces pour remobiliser les sédiments sableux de la partie aval de la barre mais pas les sédiments hétérométriques dans la partie amont. Les deux zones, stable et mobile, identifiées au cours de ce travail sont une conséquence d'un jeu complexe entre les facteurs morphologiques de forçage de la barre (seuil, élargissement, faible sinuosité du chenal) et les variations hydrologiques. La barre sédimentaire forcée constitue un stock sédimentaire dont seule une partie est libérée et renouvelée au cours des épisodes de crues de faibles intensités. Les travaux d'entretien de dévégétalisation/reprofilage/scarification sont efficaces pour restaurer la capacité hydraulique et permettre la remobilisation d'une partie des sédiments.

En revanche, ils n'agissent pas sur les facteurs de forçage à l'origine de la formation et de la position statique dans le lit de cette barre. Seule la modification des facteurs de forçage pourrait engendrer une remobilisation complète de la barre sédimentaire. Ce modèle schématique de la dynamique de la barre prévaut tant que les dépôts ne font pas l'objet d'une fixation par les végétaux (notamment ligneux pionniers).

(ii) Les travaux ne permettent pas la remobilisation complète du stock sédimentaire de la barre. En revanche, l'apport sédimentaire provenant du chenal principal n'est plus piégé par la végétation ligneuse pionnière et continue de participer au transport solide dans ce secteur. Il transite sur le dos de la barre, également sous forme de dunes, participant à la modification de la morphologie de cette macro-forme non-migrante au sein du lit mineur. A partir de la célérité et de la morphologie des dunes, des taux de transports variant de 0,05 $kg.s^{-1}.m^{-1}$ à 0,23 $kg.s^{-1}.m^{-1}$ ont été calculés la première année suivant les travaux. Ils sont comparables aux taux de transport calculés dans le chenal principal de la Loire à l'aval de Tours par Claude *et al.* (2012).

(iii) La seconde année après travaux, les taux de transport n'ont pas été calculés mais les mesures bathymétriques et les chaines d'érosion attestent du transport de sédiments notamment au sein de la zone mobile (Figure 5-7 et 5-8 chapitre article survie *P. nigra*), principalement caractérisée par des fractions sableuses, pour des débits ne dépassant pas la crue biennale. Ainsi, l'efficacité des travaux est attestée sur les deux années suivantes, malgré le recrutement de la végétation ligneuse pionnière dès l'année suivant les travaux.

7.3.2. Influence des travaux sur les peuplements arasés

L'objectif de restauration de la capacité hydraulique du fleuve consiste à éliminer l'obstacle à l'écoulement que constitue la végétation ligneuse pionnière. Les travaux entrepris ont été :

- la coupe à blanc des parties aériennes de la végétation ligneuse ;
- l'export des sédiments, piégés sur la barre par la végétation ligneuse et contenant les systèmes racinaires, dans le chenal principal générant l'abaissement de la cote topographique ;
- la scarification et l'arrachage des racines restantes par une sous-soleuse type « arrache-poireaux ».

L'élimination et l'export des systèmes racinaires implantés avant travaux a permis de fortement limiter la recolonisation par rejet de pousses végétatives contrairement à ce qui a été observé sur d'autres chantiers. Nous souhaitions l'étudier sur l'entrée de chenal secondaire de Montlouis-sur-Loire (Figure 7-4c et d), mais un problème de coordination avec les services locaux de gestion du lit de la Loire n'ont pas permis cette étude.

La reproduction par voie végétative sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés est apparue quasiment inexistante (Figure 7-4b) hormis quelques cas dont il est difficile de savoir s'il s'agit de résidus de matériel végétal abandonné après travaux ou de propagules déposées par la suite. Dans tous les cas, les travaux ont eu comme conséquence la disparition sur ce secteur des populations initialement installées sur ce site et donc la perte de ce patrimoine génétique. Des techniques différentes ont été employées sur le site de Montlouis-sur-Loire avec abandon du matériel végétal sur site après travaux (Figure 7-4c). L'année suivante, l'entrée de chenal secondaire de Montlouis-sur-Loire présentait une forte proportion de rejet de peupliers noirs (figure 7-4d).

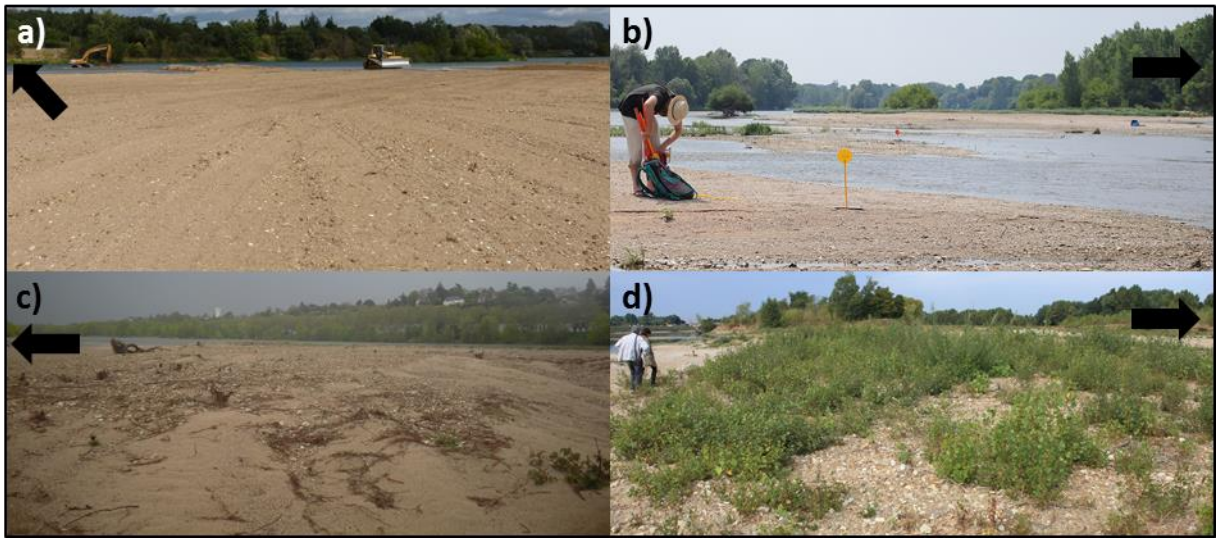


Figure 7-4 : La barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés après travaux d'entretien (export du matériel végétal) en 2012 (a) et pendant l'été suivant (absence de rejets) en 2013 (b). L'entrée de chenal secondaire de Montlouis-sur-Loire après travaux d'entretien (abandon sur site du matériel végétal) en 2011 (c) et pendant l'été suivant (forte proportion de rejets) en 2012 (d). Les flèches noires indiquent la direction du nord.

7.3.3. Durabilité des opérations de dévégétalisation

7.3.3.1. Rappel des conditions avant travaux d'entretien en 2012

La barre de Mareau-aux-Prés a fait l'objet de travaux d'entretien en 2003 ((M. Chantereau, Loiret Nature Environnement, communication personnelle), à la suite desquels un recrutement de peupliers noirs a été observé en 2004 et 2005 (M. Villar, données non publiées). Le suivi de la végétation entre 2005 et 2012 n'a pas révélé de nouvelles installations de semis de ligneux pionniers sur la barre. Les premières cohortes installées ont permis la formation d'îlots par fusion des trainées sédimentaires engendrées par l'obstacle à l'écoulement que constituait la végétation. Cependant, sur les marges de la barre, des environnements non colonisés perduraient, ainsi qu'un sous-chenal d'écoulement. Deux hypothèses sont possibles pour ces zones, soit les conditions ne sont pas favorables à la germination et la survie des semis pendant la période estivale, soit la dynamique hydro-sédimentaire présente des contraintes trop fortes pour la survie de semis en crue. L'augmentation des contraintes liées à l'écoulement sur les marges et dans le sous-chenal est une explication possible car les vitesses d'écoulement sont accélérées en raison de la réduction de la section d'écoulement liée à la végétation.

7.3.3.2. Recolonisation en 2013

La barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés reformée (altitude, granularité des sédiments) à la fin de la période de crue post-travaux a été favorable à l'installation de semis principalement de peupliers noirs mais également de saules blancs, et ce malgré une émersion tardive (Chapitre 5). L'abaissement de la cote topographique a certainement limité la colonisation de la barre par des espèces invasives dont les conditions d'installation sont différentes des espèces ligneuses pionnières (*e.g.* altitude topographique supérieure par rapport au niveau d'étiage) comme il a été observé sur un autre site proche de la ville d'Orléans (Sandillon).

Le suivi de la recolonisation par les ligneux pionniers suite aux travaux de 2012 nous permet d'observer quatre cas (Figure 7-5A) :

- absence de recrutement en 2013 sur des zones où il n'y avait pas de végétation ligneuse en 2012 avant les travaux ;
- absence de recrutement sur des zones où il y avait de la végétation en 2012 avant les travaux ;
- recrutement sur des zones sans végétation en 2012 avant travaux ;
- recrutement sur des zones déjà végétalisées en 2012 avant travaux.

Le recrutement post-travaux sur la barre s'est opéré à la fois sur les zones sableuses et sablo-graveleuses, même si les semis de saules blancs sont plutôt localisés dans la partie amont de la barre (caractérisée par la présence de surfaces armurées) et mélangés à des semis de peupliers noirs. Il est à noter que les zones de recrutement correspondant à des secteurs non colonisés par la végétation ligneuse pionnière avant travaux sont localisées principalement sur les marges de la barre et dans la zone mobile de cette dernière. **Les semis localisés à proximité des marges n'ont d'ailleurs pas survécus en 2014 (Figure 7-5B) alors qu'aucun épisode de crue très important n'est survenu (intensité de crue la plus élevée était inférieure à la crue biennale). Un nombre important de semis recrutés dans des secteurs végétalisés avant travaux n'ont également pas survécu à la première année de crue** et ne sont plus présents en 2014. **Ils sont principalement localisés sur les marges** en rive gauche à l'amont de la barre **et également au centre de la barre où se localisait l'ancien sous-chenal d'écoulement entre les îlots**, présent avant les travaux. Dans la zone stable, les semis ayant survécu dans des secteurs sans végétation avant travaux se trouvent néanmoins à proximité de secteurs végétalisés avant ces travaux. Dans la zone mobile, quelques peupliers noirs ont survécu, localisés vers la rive gauche où les vitesses d'écoulement sont généralement moins fortes. De plus, une partie importante des secteurs végétalisés en 2012 sur lesquels il n'y a pas eu de recrutement en 2013 sont localisés à l'aval de ces anciens massifs de ligneux pionniers.

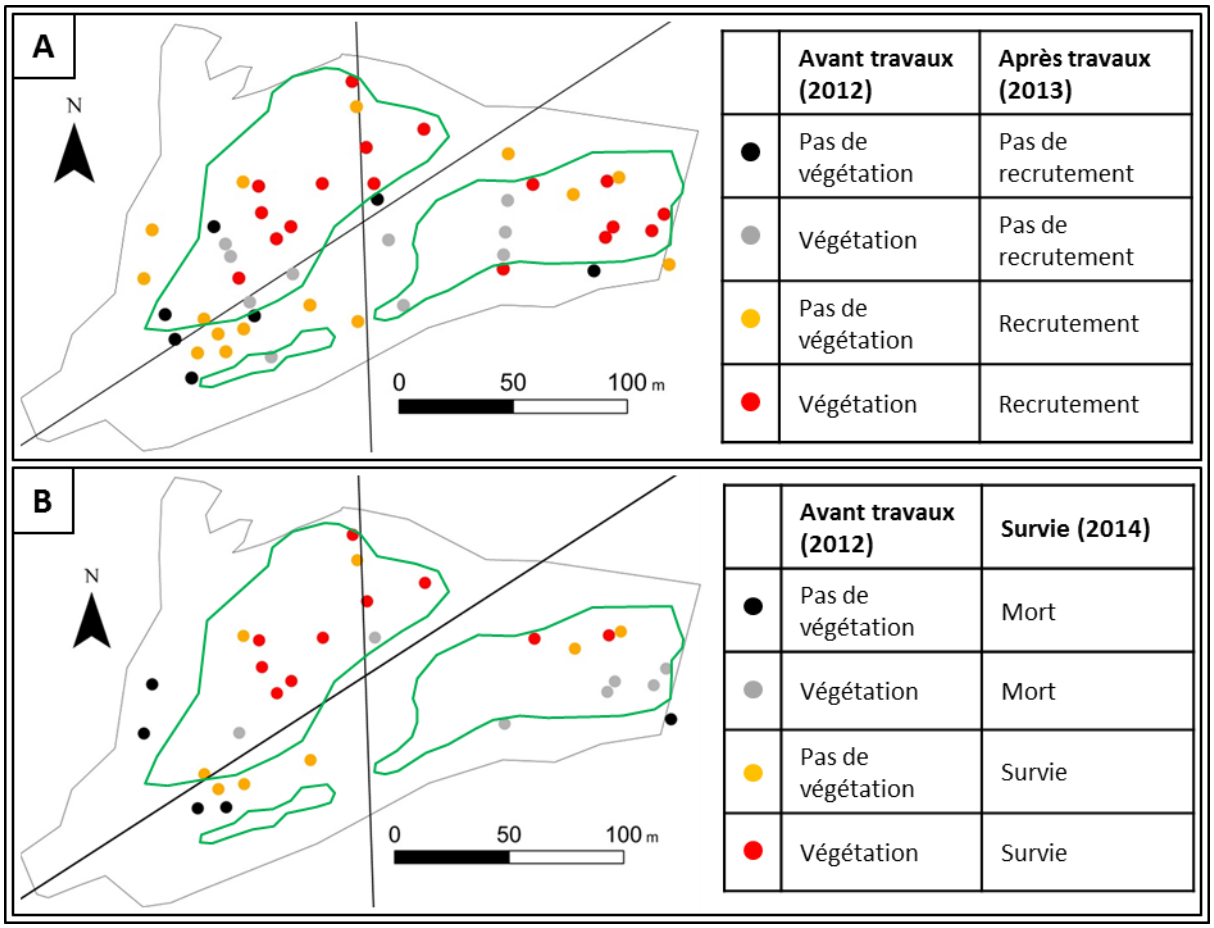


Figure 7-5 : A) Localisation des zones de recrutement et d'absence de recrutement en 2013 représentées par rapport à la présence ou l'absence de végétation en 2012 avant travaux ; B) survie des semis installés en 2013 représentée en fonction de la présence ou non de végétation en 2012 avant travaux à la même localisation. Pour les deux cartes, les zones matérialisées par une courbe verte représente le contour des îlots végétalisés avant les travaux.

Toutes ces observations laissent penser que l'ensemble de la barre est propice au recrutement, en revanche seuls quelques secteurs présentent les conditions favorables à la survie. Ces secteurs correspondent principalement à la zone stable mais également pour quelques semis à la zone mobile en crue, mais pour laquelle les contraintes en crue sont plus faibles car éloignées du chenal principal. La survie dans les secteurs à granularité grossière et stable de la barre laisse penser qu'une petite partie des semis sont suffisamment robustes, même après une courte période de croissance, pour survivre aux contraintes de l'écoulement. Cette observation associée aux forces nécessaires à l'arrachage mesurées au cours des expériences *ex situ* laisse supposer que l'ancrage racinaire des semis d'une année peut être relativement fort.

Les facteurs de forçage qui permettent le développement de la barre par la diminution du potentiel énergétique (élargissement, diminution de la pente de la ligne d'eau) engendrent des contraintes d'écoulement probablement moins fortes que sur des barres sédimentaires de type libre (migrantes). **Le forçage hydraulique induit donc une répartition relativement fixe dans le temps et l'espace des contraintes et la définition de zones d'abri relativement stables**. Les semis peuvent dès lors s'y installer et survivre ((zones d'abri correspondant aux zones où la végétation s'était déjà implantée entre 2004 et 2012). Sur cette barre, **d'autres secteurs moins propices à l'installation et à la survie** (du fait de contraintes plus importantes) **ont vu le maintien de certains semis** (car leur croissance a été importante et les intensités et fréquences des crues survenues après leur recrutement relativement faibles). **Enfin, certains secteurs ne semblent pas initialement propices à l'installation ou la survie des semis.**

L'installation des végétaux dans les zones d'abri permet la formation d'obstacles à l'écoulement permettant le développement des massifs ligneux vers l'aval (Gurnell *et al.*, 2005). Nous pouvons émettre l'hypothèse que, malgré une période d'installation réduite de ligneux pionniers par voie sexuée en 2013, l'hydrologie de faible intensité entre 2013 et 2014 a permis le maintien des semis dans des secteurs sur lesquels des semis s'étaient déjà installés. Malgré une mortalité importante des semis recrutés, des débits inférieurs à la crue biennale sont néanmoins propices à la survie de quelques individus. Il serait intéressant de suivre la survie l'année 2015 et les quelques années suivantes pour voir si la trajectoire d'évolution sera la même que celle mise en évidence dans le chapitre 3.

Ainsi**, une part importante du recrutement après travaux se localise dans les secteurs anciennement colonisés par la végétation ligneuse pionnière**. Sur ces zones, aucun rejet des anciens peuplements n'a été observé. Bien que ce ne soit pas l'objectif initial des travaux, la présence de semis sur des espaces anciennement végétalisés souligne le **potentiel de ces travaux à recréer des espaces favorables au recrutement des semis** de *P. nigra* principalement et *S. alba*. De plus, l'abaissement topographique a permis à l'ancienne île en formation (2003 – 2012) de rapidement reprendre une dynamique de barre non-migrante forcée dont le fonctionnement hydro-sédimentaire apparaît propice à la survie des semis à l'année n+1 et **donc au renouvellement des populations** des espèces étudiées.

Cependant, même si les objectifs initiaux de restaurer la capacité hydraulique des écoulements de crue ainsi que de favoriser la remobilisation et le transfert des sédiments en charge de fond dans ce secteur sont atteints pour les deux années suivants les travaux, la recolonisation rapide par les semis amène à s'interroger sur leur durabilité. En effet, si les variations hydrologiques ne fournissent pas d'épisodes de crue d'intensité suffisante pour « éliminer » les semis de ligneux pionniers qui s'installent sur la barre, leur développement et la fixation des sédiments sous-jacents amèneront à conduire des travaux équivalents dans le futur.

Un équilibre entre les travaux d'entretien répondant à la nécessité d'assurer la sécurité des biens et des personnes et les enjeux écologiques peut certainement être trouvé. Les travaux ont un premier effet à court terme de réduction de la biodiversité au moins floristique pour l'environnement (R. Chevalier, communication personnelle). Néanmoins, en créant une perturbation artificielle, ils permettent le développement d'une phase pionnière dans la succession biogéomorphologique fluviale que la dynamique hydro-sédimentaire actuelle du fleuve a du mal à recréer en raison de la régulation des débits (écrêtement des crues et soutient du débit d'étiage). Les travaux de Rodrigues (2004) ont montré que l'influence maximale pour des végétaux des mêmes espèces (mais issus d'une reproduction végétative) sur la résistance à l'écoulement et le stockage sédimentaire est atteint lorsque ces sujets sont âgés d'une dizaine d'années, âge pour lequel les individus issus de reproduction sexuée deviennent mature sexuellement. Au regard de ces éléments, il serait pertinent de tester des travaux permettant à la fois d'atteindre les objectifs hydrauliques tout en conservant des îlots « refuges » constitués d'arbres matures sexuellement permettant d'assurer un brassage génétique pour les populations à venir. Ce processus pourrait être couplé avec un phasage des travaux permettant de créer une mosaïque de stades de succession. Pour les unités morphologiques type barre forcée, des travaux seront toujours nécessaires tant que les paramètres de forçage seront présents. Ainsi la stabilité (à l'échelle séculaire) de ces unités morphologiques peut permettre d'élaborer des plans de gestion s'inscrivant sur une longue durée.

Chapitre 8 : Conclusion et perspectives

8.1. Conclusion

Ce travail de thèse s'intègre dans une approche biogéomorphologique des interactions entre dynamique fluviale et végétation ligneuse. La régression des forêts associées au corridor fluvial en raison de l'artificialisation des cours d'eau justifie de travailler sur ces compartiments de l'hydrosystème fluvial dont la richesse environnementale n'est plus à démontrer. Ce travail s'est plus particulièrement concentré sur deux espèces ligneuses pionnières, le peuplier noir et le saule blanc, sur une rivière sablo-graveleuse de plaine : la Loire moyenne (France). L'objectif était de comprendre comment ces espèces survivent aux contraintes de crue pendant leur premiers stades de croissance suivant leur recrutement et, une fois installées, comment influencent-elles l'évolution des barres sédimentaires jusqu'à atteindre l'âge de maturité (8-10 ans). D'un point de vue scientifique, le but était de détailler l'enchaînement des trois premières phases de succession biogéomorphologiques : géomorphologique, pionnière et biogéomorphologique. Cependant, à l'instar de nombreuses rivières, la Loire a subi et continue de subir une pression anthropique forte ce qui nous a amené à orienter ce travail sous un angle appliqué relatif à la gestion du lit des cours d'eau (cas de la Loire). La philosophie générale de ce travail était de mieux comprendre le système étudié pour concilier les différents enjeux (écologiques et aux autres) qui parfois semblent contradictoires afin de favoriser une gestion raisonnée de ces habitats remarquables de Loire. Pour mener à bien ce travail, nous avons défini **quatre axes de recherche** articulés selon une approche *in situ* renforcée par des expérimentations *ex situ*. Pour chacun des axes de recherche, des questions scientifiques et appliquées ont émergées permettant de répondre à la problématique générale de la thèse. Des questions scientifiques plus spécifiques ont été identifiées et présentées au sein de chaque chapitre, notamment dans le cadre de l'approche *in situ*.

Le travail de thèse s'est focalisé sur le site de Mareau-aux-Prés, localisé dans la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin en aval de la ville d'Orléans [45]. Le site étudié est une barre forcée de centre de chenal localisée au sein d'un complexe d'îles de maturité différente associée à la présence de seuils naturels rocheux dans un secteur de faible sinuosité et d'élargissement de la bande active.

Les expérimentations ***ex situ*** ont été réalisées en conditions semi-contrôlées dans la pépinière de Guéméné-Penfao (ONF) [44]. Une fosse artificielle a été créée pour y semer des graines de peupliers noirs et de saules blancs afin de comprendre le développement des semis en fonction de la granularité du substrat sur lequel ils s'implantent ainsi que de définir en fonction de ces substrats des seuils de tolérance aux contraintes exercées lors des crues sur ces semis, notamment la force nécessaire à l'arrachage et la profondeur d'enfouissement.

Dans un premier temps nous avons tenté de comprendre **l'impact des pratiques d'entretien du lit** en Loire moyenne (dévégétalisation, reprofilage, scarification) sur (i) la **remobilisation des stocks sédimentaires**, notamment sur les modalités et intensité de déstockage des sédiments devant permettre de lutter contre l'incision du chenal principal, (ii) l'influence des nouvelles unités morphologiques créées où rajeunies sur le recrutement et la **survie des peupliers noirs et des saules blancs**. L'objectif principal était donc de caractériser la phase géomorphologique afin de déterminer son influence potentielle sur la survie des semis de ligneux pionniers.

Ce premier point a été traité dans le chapitre 2, présenté sous forme d'article soumis à la revue *Geomorphology* et intitulé *Dynamics of a non-migrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France).* Cet article est basé sur un large jeu de données récoltées sur le site de Mareau-aux-Prés pendant les périodes de basses eaux et lors des crues. L'objectif est de comprendre l'influence des variations hydrologiques sur la dynamique d'une barre forcée, et des dunes superposées, associée à une perturbation fixe dans le lit (seuil) à partir d'un lit plan artificiel engendré lors de travaux d'entretien du lit. Nous avons plus précisément tenté de déterminer l'influence de l'apport et de la disponibilité sédimentaire dans l'évolution morphologique de la barre au cours des crues ainsi que des dunes qui s'y développent. Nous avons également cherché (i) à comprendre comment les variations hydrologiques modifient le poids des facteurs de forçages de la barre (seuil *vs* élargissement et inflexion) à l'origine de sa spécificité de barre forcée de centre de chenal et de sa dynamique au cours des épisodes de crue et (ii) comment par rapport aux autres barres non-migrantes, une barre forcée associée à une perturbation fixe dans le lit peut influencer l'évolution de la bande active dans ce secteur. A partir des données topographiques, bathymétriques (mono- et multi-faisceaux), granulométriques et courantométriques, nous avons détaillé et proposé un modèle conceptuel de la dynamique de la barre selon les différentes phases de crue pour une succession de crues ainsi que les interactions avec les dunes superposées.

Ainsi, dans une rivière sablo-graveleuse de plaine, la dynamique d'une barre non-migrante de centre de chenal forcée par un seuil peut se résumer à une zone relativement stable constituant un « nucléus » atour duquel l'étalement des marges, l'allongement du front et le gonflement du dos de la barre se produisent au cours des épisodes de crues. Pendant la phase de décrue, l'asymétrie des lignes d'eau des chenaux environnants (principal et secondaire) induit la remobilisation des sédiments déposés sur le sommet de la barre et son expansion latérale. De plus, pour des débits suffisamment faibles, des érosions importantes sont enregistrées sur les marges et le front de barre. Les dunes se développent instantanément à partir du lit plan artificiellement créé par les travaux d'entretien du lit selon un processus régressif uniquement observé lors de la première submersion de la macroforme. Le développement des dunes est fortement dépendant des sédiments (phasage, quantité et taille des grains) délivrés par le chenal principal pour les épisodes de crue de forte intensité et par la disponibilité des sédiments contrôlée par les armures et la partie non-alluviale associée au seuil pendant les crues de plus faible intensité. Toutefois, la taille et la forme des dunes restent relativement stables au cours de l'étude même si des adaptations aux variations hydrologiques ont été notées selon une faible hystérèse anti-horaire pour la crue de plus forte intensité. Ainsi, les dunes superposées sont principalement influencées par l'apport et la disponibilité sédimentaire, la taille des grains, la puissance de la crue et dans une moindre mesure par la hauteur d'eau. Les paramètres de forçages (perturbation fixe [seuil] *vs* forme en plan [élargissement, inflexion]) gouvernent la présence, la dynamique ainsi que l'évolution à « long terme » de la dynamique de la barre non-migrante. Le rôle de ces paramètres sur la dynamique de la barre s'additionne mais le poids chacun varie en fonction du débit. Ainsi, pour les faibles débits, l'influence du seuil domine, notamment sur les écoulements locaux. Pour les intensités de débits élevés, le seuil influence toujours la disponibilité en sédiments mais les écoulements (direction, pente ligne d'eau) sont plus influencés par les paramètres de forme en plan.

Cet article a permis de comprendre les modalités de remobilisation sédimentaire ainsi que la dynamique d'une barre forcée au cours des épisodes de crue. Ainsi, nous avons pu définir une influence potentielle sur la survie de semis de ligneux pionniers (dans leurs premiers stades) qui s'installeraient sur cet environnement au regard des contraintes identifiées dans le fonctionnement morphologique de la barre. Tout d'abord, l'identification d'une zone stable et d'une zone mobile suggère des contraintes moins fortes dans la zone stable que dans la zone mobile.

La mise en évidence des phasages des processus érosion-dépôt en fonction de l'intensité et de la succession des crues permet également de caractériser les contraintes potentielles qui pourraient être appliquées aux futurs jeunes semis recrutés.

Dans un second temps nous avons donc travaillé sur la capacité des jeunes semis à survivre aux contraintes survenant au cours des épisodes de crues post recrutement. Nous avons à la fois recherché les paramètres abiotiques et biotiques influençant le potentiel de survie lors de la phase d'installation ainsi que les contraintes maximales supportées en fonction de ce potentiel. Cette seconde étape nous a permis de répondre aux questions et objectifs posés dans l'axe 3, défini au début de la thèse, à travers les chapitres 5 et 6.

Le chapitre 5 correspond à l'article accepté avec corrections majeures dans la revue *Earth Surface Processes and Landforms* intitulé *The survival of Populus nigra L. seedlings to alluvial bar dynamics* ainsi qu'à la partie additionnelle correspondant à la survie du saule blanc. Suite à l'étude de la dynamique hydro-sédimentaire de la barre forcée, nous avons posé l'hypothèse que ce type de barre était une unité morphologique préférentielle pour la survie des semis de *P. nigra* et S. *alba* aux contraintes exercées lors des crues survenant pendant la première année après le recrutement (par opposition aux barres migrantes/libres). Des mesures *in situ* ont été réalisées sur la barre de Mareau-aux-Prés à la fois sur la dynamique hydro-sédimentaire (topographie, bathymétrie, granulométrie, chaines d'érosion, courantométrie) et sur la végétation (densité, espèce, type de reproduction, hauteur). Hormis l'absence de recrutement sur les altitudes extrêmes, il a été identifié que la dynamique de la barre avait peu d'influence sur la distribution du recrutement des semis de peupliers noirs. En effet, le recrutement a réussi sur des substrats et gammes d'altitude variés ainsi que sur les deux zones, stables et mobiles évoquées supra. En revanche, le recrutement réussi des semis de saule blanc a été principalement localisé dans la partie amont de la barre, sur la zone stable et sont quasiment absents sur la zone mobile sableuse à l'aval de la barre. Les hauteurs d'érosion-dépôt ont été plus faibles sur la zone stable que sur la zone mobile et la survie y a été plus importante. La répartition de la survie ne s'explique pas uniquement par le recrutement initial dans la zone stable ou la zone mobile. Les contraintes appliquées aux semis dépendent des paramètres régissant la dynamique de la barre à savoir : le phasage des processus d'érosion et de dépôt, l'apport sédimentaire, la taille des grains et la vitesse des écoulements.

A l'échelle de nos placettes d'observation, nous avons pu identifier quatre types de succession de processus hydro-sédimentaires à l'origine de la disparition des semis, (i) arrachage par la seule force de traînée exercée sur la tige (assimilé au Type I d'Edmaier *et al.*, 2011), (ii) arrachage associé à l'érosion du substrat de germination (assimilé au Type II d'Edmaier *et al.*, 2011), (iii) enfouissement précédé de la force de traînée, (iv) succession de l'érosion du substrat et de l'enfouissement. La combinaison et la succession de processus (en crue) complique la détermination des seuils de tolérance des semis aux contraintes. Le contexte de rivière sablo-graveleuse à charge sédimentaire hétérométrique permet le développement d'armure et ainsi l'identification du processus d'arrachage par la seule force de traînée, difficile à séparer de l'érosion du substrat dans le cas d'un substrat sableux. Ainsi, nous avons pu quantifier la part des quatre types de succession dans la mortalité des semis de peupliers noirs pour une barre sédimentaire donnée. Toutefois, la mise en évidence des contraintes appliquées aux semis n'est pas suffisante pour comprendre la répartition de leur survie. Nous avons ainsi essayé de coupler la survie avec le paramètre de hauteur de tige, qui offre la surface opposable à l'écoulement et qui définit en partie la force de traînée appliquée au semis. Il est apparu que dans la zone stable, les semis avec des hauteurs plus importantes présentaient des taux de survie supérieurs. En revanche, aucun lien n'a été trouvé entre la hauteur et les taux de survie sur la zone mobile. A l'issu de l'analyse de la survie des semis sur la barre, il est apparu que les facteurs biologiques influençant leur ancrage devait être analysés pour comprendre la répartition de leur survie et leur résistance aux contraintes.

Nous proposons un modèle simplifié à l'échelle de la barre qui détaille la succession des processus appliqués aux semis en fonction de leur localisation et selon le granoclassement longitudinal (classique) développé sur la barre. Cette distribution spatiale des contraintes induit des adaptations spécifiques des semis le long de la barre forcée.

Le chapitre 6, concentré sur les expérimentations menées *ex situ*, découle directement des questions sur les facteurs biologiques d'ancrage et de croissance identifiée dans le chapitre 5. Les conditions environnementales, même au sein d'une même unité morphologique, peuvent être variées (*e.g.* distance à la nappe, granulométrie, ensoleillement, disponibilité en nutriment, etc…) et l'étude du développement des semis en conditions *in situ* nécessite la prise en compte d'un grand nombre de variables et rendent difficile la distinction des facteurs dans le développement des semis. De plus, l'étude du développement, notamment racinaire, des semis *in situ* se révèle destructive et ne permet pas de réaliser des investigations réalisées sur plusieurs années.

De ce fait, nous avons développé une approche *ex situ* en conditions semi-contrôlées dans laquelle nous avons testé l'influence de la structure sédimentaire (taille des grains et organisation stratigraphique) sur la croissance racinaire et aérienne des semis de peupliers noirs et de saules blancs. Nous avons également tenté de déterminer les forces nécessaires à l'arrachage et les seuils de profondeurs d'enfouissement. La germination des graines de saules blancs en conditions semi-contrôlées s'est avérée difficile, nous avons néanmoins obtenu des résultats préliminaires sur le développement des semis de cette espèce. En revanche, la germination des graines de peupliers noirs, bien maîtrisée, nous a permis d'étudier le développement des semis en fonction du substrat avec une bonne représentativité statistique. Les résultats ont montré que la croissance des peupliers noirs était significativement différente entre le substrat sableux et le substrat sablo-graveleux. En revanche, l'organisation stratigraphique (couche de sable sur substrat sablo-graveleux) n'a pas révélé une différence importante avec les résultats obtenus sur le substrat sablo-graveleux. Les peupliers noirs ayant poussés sur substrat sableux ont tendance à être plus grands et à présenter un système racinaire plus ramifié en comparaison de ceux ayant poussés sur un substrat sablo-graveleux (plus petit, système racinaire moins ramifié). Les résultats préliminaires obtenus pour les saules montrent la même tendance avec une distinction qui apparaît encore plus importante. La longueur cumulée moyenne du système racinaire des saules ayant poussés sur substrat sableux est six fois plus élevées que celles pour ceux sur substrats sablo-graveleux. En revanche, la longueur de la racine principale des peupliers noirs n'est pas significativement différente entre les substrats suggérant une croissance en profondeur similaire. Les résultats des forces nécessaires à l'arrachage ne mettent pas en évidence de différence significative entre les substrats bien que cette force puisse être assez variable d'un individu à l'autre, de moins de 5 N à plus de 50 N. Ces résultats nous amènent à penser que la force nécessaire à l'arrachage dépend de l'ancrage procuré par la racine pivot, les racines secondaires dans un premiers temps jouant plutôt un rôle d'alimentation en nutriment. Cependant, ces résultats ne concernent que la première année de croissance des semis qui n'ont subi aucune contrainte directionnelle. De plus, l'ancrage racinaire n'est pas le seul paramètre de stabilité des plants, leur taille peut également influencer la force de traînée qui leur sera appliquée. Nous avons suggéré que les semis développés sur substrat sableux pourraient être soumis à une force de traînée plus importante que les semis sur substrat sablo-graveleux.

Ces deux chapitres nous ont donc permis d'identifier les conditions de survie des semis aux contraintes exercées lors des crues à la fois selon un prisme abiotique en identifiant les types de contraintes et leurs intensités ainsi que selon un prisme biologique en étudiant le développement des semis de peupliers noirs et de saules blancs pour des conditions similaires à celles de Loire moyenne et leur influence dans les seuils de contraintes tolérés par ces espèces lors de leur première année d'installation. La force d'ancrage semble être identique entre les substrats et déterminée par la racine principale constituant le pivot. La différence de survie selon les substrats sera donc plutôt le reflet des combinaisons de facteurs tels que :

- la croissance aérienne offrant la surface opposable à l'écoulement qui va en partie définir la force de traînée appliquée aux plants ;
- la ramification du système racinaire qui, si elle n'augmente pas la force nécessaire à l'arrachage, peut néanmoins influencer la cohésion des sédiments sur le substrat sableux pour lequel les systèmes racinaires sont justement plus ramifiés ;
- l'énergie disponible pour la force d'arrachage. Une des hypothèses proposées dans ce travail est que les armures limitent la force de traînée par la dissipation d'énergie qu'elles engendrent (frottement et turbulence à proximité du fond) ;
- le potentiel énergétique déterminant les intensités des processus-érosion-dépôt.

Nous avons, à travers les trois chapitres 4, 5 et 6, déterminé les processus qui permettent de passer de la phase géomorphologique à la phase pionnière durant laquelle les semis s'installent mais n'exercent pas encore de rétroaction forte sur la dynamique hydro-sédimentaire. La question qui demeure est : « quels sont les processus et les vitesses d'édification d'une île pionnière à partir d'une barre sédimentaire forcée après le recrutement des ligneux pionniers dans une rivière sablo-graveleuse de plaine ? » Cette question a été exposée dans l'axe 4, concernant donc la vitesse d'évolution du système dans les premières années et notamment les rétroactions entre la végétation ligneuse et la dynamique fluviale. Ce quatrième axe a principalement été développé dans le chapitre 3. Même si d'un point de vue conceptuel, ce chapitre amène des réponses à la suite des chapitres 4, 5 et 6, les résultats sont issus de travaux menés toujours sur la même barre sédimentaire mais avant les travaux d'entretien du lit que nous avons suivi au cours de cette thèse.

De ce fait, dans un souci de respect de la chronologie de l'histoire du site étudié nous avons présenté les chapitres dans cet ordre. Le chapitre 3 est associé à l'article accepté dans la revue *Geomorphology* et intitulé *Fluvial islands: first stage of development from non-migrating (forced) bars and woody-vegetation interactions*. Cet article met en évidence la rétroaction exercée par le peuplier noir sur une barre sédimentaire forcée et son évolution rapide vers une forme de l'île. Ainsi, la végétation dense piège les sédiments au cours des épisodes de crue et induit une signature spécifique de la topographie et de la granularité des sédiments. Deux processus de dépôt combinés ont pu être mis en évidence (i) la génération de figures d'obstacles dans la direction aval conduisant à (ii) une accrétion de la barre selon un processus régressif et une accentuation des pentes sur les marges préfigurant les futures berges d'une île. Les changements morphologiques observés sur la barre sont contrôlés par l'apport sédimentaire en charge de fond provenant du chenal principal et dévié par la végétation précédemment établie. Les îlots de végétation déclenchent une ségrégation granulométrique (sédiments fins dans les parties végétalisées *vs* grossiers avec parfois développement d'armures dans les sous-chenaux environnements) supposée influencer la déconnexion entre les îlots et les chenaux environnants. La fixation des sédiments est fortement influencée par les caractéristiques de la végétation. En revanche, la hauteur de sédiments déposés lors des crues n'est pas directement liée à la densité de la végétation ou paramètre de rugosité associé.

A l'issu de cet article, un modèle conceptuel suggère que l'archivage des sédiments et les changements morphologiques sont rapides au cours de la première étape du développement d'une barre forcée en île (phase biogéomorphologique) associée à la végétalisation du site par l'installation de semis d'espèces ligneuses pionnières tel que le peuplier noir. *A contrario*, lorsque la barre est suffisamment élevée pour être submergée uniquement lors des épisodes de crues de fortes amplitudes, l'évolution morphologique vers l'île établie est plus lente. Dans une rivière sablo-graveleuse, la végétation ligneuse pionnière augmente de manière significative le potentiel de conservation des sédiments conduisant à des dépôts quasi-continus sur l'ensemble de la première phase d'édification.

Enfin, nous avions déterminé un dernier axe, l'axe 2, plutôt ciblé sur des considérations de gestion du lit de la Loire et de ses conséquences. L'objectif de ce second axe était de déterminer le potentiel de certaines modalités de travaux d'entretien du lit à pouvoir favoriser la reproduction sexuée et le renouvellement des populations de peuplier noir et de saule blanc et donc l'apparition d'une phase pionnière dans le cycle biogéomorphologique.

Cet axe n'a pas fait l'objet d'un chapitre indépendant mais le croisement des résultats obtenus sur (i) la dynamique de la végétation ligneuse sur la barre avant les travaux (Chapitre 3), (ii) la dynamique hydro-sédimentaire suite aux travaux (Chapitre 4) et (iii) l'installation ainsi que la survie des semis de peupliers noirs et de saules blancs (Chapitre 5) permettent de répondre à l'objectif défini dans cet axe. Les travaux ont été réalisés sur une île pionnière issue de l'interaction entre dynamique fluviale et végétation ligneuse pionnière suite à l'installation de semis de peuplier noir. Les parties aériennes des ligneux ont été broyées et les sédiments auxquels étaient intégrées les racines ont été exportés dans le chenal principal. Les dernières racines présentes ont été arrachées par le passage d'une sous-soleuse. Enfin, la barre a été reprofilée pour obtenir une surface sub-tabulaire homogénéisée, calée à la cote topographique correspondant à l'altitude du sous-chenal d'écoulement développer entre les îlots végétalisés avant les travaux. Au printemps-été 2013 suivant les travaux, des semis de peupliers noirs et de saules blancs a ont été observés. La quasi-totale absence de rejet des anciens peuplements a également été notée. De ce point de vue, les travaux ont permis à un nombre significatif de semis de s'installer avec pour certaines placettes observées plus de 180 semis/m² de peupliers noirs à la fin de la période estivale. Les semis ayant résisté à la période estivale ont pour une grande partie (environ 90 % pour les peupliers noirs) disparu au cours des épisodes de crues d'hiver suivant leur installation. En revanche, les semis survivants se localisent principalement dans les zones initialement végétalisées avant travaux. Ainsi, des questions quant à la vitesse et les processus d'évolution de la barre dans les prochaines années se posent et notamment sur la possibilité de retrouver un état proche de l'état initial avant travaux. Cette possibilité est sans doute fortement associée à la spécificité de la barre forcée de l'environnement étudié (*e.g.* zones d'abri dynamique). Si dans le cas de barres forcées, les vitesses et processus sont similaires au cours du temps ainsi que l'évolution du style fluviatile qui en découle, alors on peut noter l'importance de faire un suivi après les travaux ainsi que l'importance de réaliser des états initiaux avant travaux.

8.2. Perspectives

8.2.1. A court terme

8.2.1.1. Valorisation

Le premier objectif est de corriger les articles soumis et présentés dans ce manuscrit. Le second objectif est de transformer le chapitre 6 en article scientifique et de le soumettre à une revue d'audience internationale. Un article de synthèse de l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit est également envisagé.

D'un point de vue appliqué, les nouvelles connaissances présentées dans ce travail de thèse devront être intégrées aux guides déjà rédigés sur les pratiques d'entretien du lit de Loire. Des actions de formation sur les pratiques d'entretien pourraient également être proposées au service en charge de la gestion du lit de la Loire.

8.2.1.2. Dynamique d'une barre forcée

L'analyse de la dynamique de la barre forcée réalisée au cours de nos travaux devra être poursuivie car elle constitue une originalité par rapport à la littérature existante sur les barres non migrantes (forcées par un seuil). Par exemple, l'interaction entre l'évolution de la barre et la migration des dunes superposées pourra être complétée. Les données disponibles pour étudier de la morphologie des dunes en fonction de la localisation sur la barre (front/dos et rive gauche/rive droite) s'avèreront à cet égard riche d'enseignements. Ce travail n'a pas encore été réalisé car il n'était pas central par rapport à la problématique générale de la thèse.

De plus, l'étude à l'échelle locale mentionnée ci-dessus pourra être contextualisée avec des données bathymétriques, granulométriques et de courantométrie déjà récoltés au sein du chenal principal et du chenal secondaire à partir de l'amont du complexe d'îles végétalisées et jusqu'à l'aval. Ces résultats de terrain pourront à terme être comparés à des études de modélisation hydrosédimentaire physiques et numériques.

8.2.2. A moyen terme

8.2.2.1. Evolution de la barre force vers une île pionnière

Le suivi de la barre sédimentaire tout juste recolonisée par la végétation ligneuse pionnière apparaît nécessaire afin de boucler le cycle entre la phase géomorphologique et la phase biogéomorphologique dans une continuité temporelle. De plus, ce suivi permettra de confirmer ou d'infirmer les propositions d'évolution suggérer dans le chapitre de synthèse. Plus largement, il semble opportun de poursuivre le projet BioMareau (initié dans le cadre du PLGN III) pour analyser la co-évolution de la formation d'une île pionnière après travaux d'entretien et la réponse/adaptation des communautés vivantes se développant sur ou aux alentours du site. Les résultats présentés dans cette thèse laissent supposer, si les populations implantées survivent, que l'évolution du site pourrait suivre une tendance proche de la transformation étudiée entre 2007 et 2012 (chapitre 3). Si tel est le cas, la comparaison entre les résultats acquis dans ce travail et ceux à venir permettra d'affiner (en fonction de l'hydrologie et du développement d'autres espèces végétales), le modèle et la vitesse d'évolution proposés dans le chapitre 3.

8.2.3. A long terme

8.2.3.1. Pour les espèces étudiées

Ce travail constitue une première étape dans la connaissance de la structure des systèmes racinaires des semis de peupliers noirs et de saules blancs. Dans l'avenir il serait intéressant de travailler sur l'architecture racinaire des semis ainsi que des jeunes arbres en s'appuyant sur les recherches menées sur le déracinement des ligneux par le vent qui permet une relative transposition puisque la contrainte principale appliquée est sub-horizontale. Il serait notamment intéressant de tester la modification de l'architecture racinaire en fonction de l'application de la contrainte liée à l'écoulement pour différentes conditions d'écoulements et de croissance des semis ainsi que les conditions de cette adaptation du système racinaire (phasage entre contrainte et cycle végétatif).

En parallèle, des travaux en canal artificiel pourraient être conduits afin de déterminer les seuils d'arrachage sur un lit composé de particules grossières. L'objectif serait de tester différent(e)s tailles/âges de semis sur un substrat à granularité uniforme et grossière, en vue de (i) quantifier l'effet de la résistance à l'écoulement opérée par les particules grossières et la possible protection des jeunes semis (évoquée dans le chapitre synthèse), ii) d'analyser et quantifier le rôle de la flexibilité sur le processus d'arrachage lors des stades juvéniles, iii) d'analyser le possible processus d'abrasion des jeunes végétaux en crue, iv) d'éclaircir le poids des paramètres durée et intensité de submersion (vitesse d'écoulement) permettant d'atteindre l'arrachage.

8.2.3.2. Pour la morphologie fluviale

Une des hypothèses avancée dans cette thèse est qu'une barre forcée par une perturbation fixe (seuil) dans le lit est favorable à la survie des semis des espèces pionnières (ici Populus nigra et Salix alba). Cependant, cette hypothèse devra faire l'objet de futures recherches. Ceci pourrait passer par une approche à deux échelles spatio-temporelles : l'unité morphologique au cours des épisodes de crue et le corridor fluvial à une échelle séculaire. A l'échelle de l'unité morphologique, les processus entre barre migrante/barre non-migrante pourrait être comparés, avec une distinction entre les barres non migrantes associées à un forçage stationnaire et les barres non-migrantes forcées par un changement de direction des berges (e.g. barre de méandre). Ces barres se distinguent des barres migrantes car leur migration se manifeste à des échelles de temps beaucoup plus longues (séculaire vs crue). A l'échelle du corridor, il serait opportun de suivre la dynamique de colonisation (voie végétative et reproduction sexuée) par les ligneux pionniers de ces unités sédimentaires (barres migrantes/non-migrantes). A titre d'application, ceci pourrait conduire à une optimisation de la planification des travaux d'entretien du lit du fleuve (couplage hydrologie, saison d'émission des graines, potentiel de survie différents pour les deux types de barres évoquées ci-dessus).

Bibliographie

Abbe T.B. et Montgomery D.R. 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. Geomorphology 51: 81-107.

Abernethy B., Rutherfurd I.D. 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. Hydrological Processes 15: 63–79.

Ahn C., Mosera K.F., Sparks R.E. et White D.C. 2007. Developing a dynamic model to predict the recruitment and early survival of black willow (*Salix nigra*) in response to different hydrologic conditions. Ecological Modelling 204: 315-325. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2007.01.006

Alabyan A.M. et Chalov R.S. 1998. Types of river channel patterns and their natural controls. Earth Surface Processes and Landforms 23: 467–474. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199805)23:5<467::AID-ESP861>3.0.CO;2-T

Allain-Jegou C. 2002. Relations végétation - écoulement - transport solide dans le lit des rivières. Etude de l'Isère dans le Grésivaudan., Ph.D. thesis, INPG, Grenoble.

Allen J.R.L. 1968. Current ripples - Their relation to patterns of water and sediment motion. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 433p.

Amoros C. et Petts G. 1993. Hydrosystèmes fluviaux. Collection d'écologie. Masson, Paris, 300 pp.

Antonarakis A.S. Richards K.S., Brasington J. et Muller E. 2010. Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning. Water Resources Research, 46 : 1-12.

Ashley G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem. Journal of Sedimentary Research. 60: 160-172. DOI: 10.2110/jsr.60.160

Ashmore P.E. 1991. How do gravel-bed rivers braid. Canadian Journal of Earth Sciences. 28: 326-341. DOI: 10.1139/e91-030

Ashmore P.E. 1982. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. Earth Surface Processes and Landforms. 7: 201-225. DOI: 10.1002/esp.3290070301

Ashworth P.J. 1996. Mid-Channel bar growth and its relationship to local flow strength and direction. Earth Surface Processes and Landforms. 21: 103-123. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199602)21:2<103::AID-ESP569>3.0.CO;2-O

Ashworth P.J., Best J.L., Roden J.E., Bristow C.S. et Klaassen G.J. 2000. Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh. Sedimentology. 47: 533-555. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00305.x

Ashworth P.J., Ferguson R.I., Ashmore P.E., Paola C., Powell D.M. et Prestegaards K.L. 1992. Measurements in a Braided River chute and lobe: 2. Sorting of bed load during entrainment, transport, and deposition. Water Resources Research 28: 1887-1896. DOI: 10.1029/92WR00702

Auble G.T., Friedman J.M. et Scott M.L. 1994. Relating Riparian Vegetation to Present and Future Streamflows. Ecological Applications, 4(3): 544-554. DOI: 10.2307/1941956

Auble G.T. et Scott M.L. 1998. Fluvial disturbance patches and cottonwood recruitment along the Upper Missouri River, Montana. Wetlands. Vol. 18, No. 4: 546-556 DOI: 10.1007/BF03161671

Babonaux Y. 1970. Le lit de la Loire : étude d'hydrodynamique fluviale. Bibliothèque nationale, Paris, 252 pp.

Bacchi M. et Berton J.P. 1997. Guide méthodologique d'entretien du lit de la Loire, DIREN Centre - ADESVV, Chinon, 95 pp.

Barsoum N. 2002. Relative contributions of sexual and asexual regeneration strategies in *Populus nigra* and *Salix alba* during the first years of establishment on a braided gravel bed river. Evolutionary Ecology 15: 255-279. DOI: 10.1023/A:1016028730129

Bartholdy J., Flemming B.W., Bartholomä A. et Ernstsen, V.B. 2005. Flow and grain size control of depth-independent simple subaqueous dunes. Journal of Geophysical research, 110, F04S16, 12p.Best, J. L., Ashworth P. J., Bristow, C. S. et Roden J. E. 2003. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh, Journal of Sedimentary Research. 73(4): 516–530. DOI: 10.1306/010603730516

Bendix J. et Stella JC. 2013. Riparian vegetation and the fluvial environment: a biogeographic perspective. IN : Shroder J.F. (Editor-in-chief), Butler D.R. et Hupp C.R. (Volume Editors). Treatise on Geomorphology, Vol 12, Ecogeomorphology, San Diego: Academic Press; 2013. p. 53-74.

Bertoldi W., Gurnell A.M., Drake N. 2011. The topographic signature of vegetation development along a braided river: results of a combined analysis of airborne lidar, colour air photographs and ground measurements. Water Resources Research, 47, W06525.

Bittner L.D. 1994. River bed response to channel width variations: Theory and expermients, University of Illinois, Urbana-Champaign.

Blondeaux P. et Seminara G. 1985. A unified bar-bend theory of river meanders. Journal of Fluid Mechanics 157: 449-470. DOI: 10.1017/S0022112085002440

Blott S.J. et Pye K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms. 26: 1237-1248. DOI: 10.1002/esp.261

Booy G., Hendricks R.J.J., Smulders M.J.M., Groenendael J.M.V. et Vosman B. 2000. Genetic diversity and the survival of populations. Plant Biology 2: 379-395. DOI: 10.1055/s-2000-5958

Bornette G., Tabacchi E., Hupp C., Puijalon S. et Rostan J.C. 2008. A model of plant strategies in fluvial hydrosystems. Freshwater Biology 53 : 1692-1705. DOI:10.1111/j.1365-2427.2008.01994.x

Bouma T.J., Nielsen K.L. et Koutstaal B. 2000. Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. Plant and soil 218: 185-196. DOI:10.1023/A:1014905104017

Braatne J.H., Rood S.B. et Heilman P.E. 1996. Life History, Ecology and conservation of Riparian cottonwoods in North America. Chapter 3 in: Biology of *Populus* and its implications for management and conservation. Stettler, R. F., Bradshaw, H. D., Heilman, P. E. et Hinckley, T. M. 359 p. ISBN 0-660-16506-6

Braun-Blanquet J. 1964. Flanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde. 3rd ed. Springer-Verlag, Wien.

Brice J.C. 1964. Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska. U.S. Geological Survey Prof. Paper, 422D, 1-41.

Bridge J.S. 2003. Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record. Blackwell, Oxford. 491p.

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

Bridge J.S. et Best J.L. 1988. Flow, sediment transport and bedform dynamics over the transition from dunes to upper stage plane beds, Sedimentology, 35, 753-764.

Bridge J.S. et Gabel S.L. 1992. Flow and sediment dynamics in a low sinuosity, braided river: Calamus River, Nebraska Sandhills. Sedimentology. 39: 125-142. DOI:10.1111/j.1365-3091.1992.tb01026.x

Bristow C.S. 1987. Brahmaputra River: channel migration and deposition. In: Recent Developments in Fluvial Sedimentology (Eds Ethridge, F. G., Flores, R. M. et Harvey, M. D.), SEPM, Special Publications, 39, 63-74p.

Brossé R. 1982. Les processus sédimentaires dans le fleuve Loire., Université d'Angers, Angers, 350 pp.

Burke M., Jorde K. et Buffington J.M. 2009. Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: Changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North American river. Journal of Environmental Management 90: 224–236. DOI:10.1016/j.jenvman.2008.07.022

Cabezas A., Gonzalez E., Gallardo B., Garcia M., Gonzalez M. et Comin F.A. 2008. Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for restoration and management. Aquatic Sciences 70: 361-376. DOI:10.1007/s00027-008-8059-4

Callander R.A. 1969. Instability and river channels. Journal of Fluid Mechanics. 36: 465-480. DOI:10.1017/S0022112069001765

Carling P.A., Golz E., Orr H.G. et Radecki-Pawlik A. 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. Sedimentology. 47: 227-252. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00290.x

Charron I., Johnson E.A. et Martin Y.E. 2011. Tree establishment on bars in low-order gravel-bed mountain streams. Earth Surface Processes Landforms, 36, 1522–1533.

Chevalier R. et Martin H. 2015. BioMareau Tâche 1.1 Cartographie des communautés végétales. Rapport d'avancement du projet Biomareau 23 p.

Chiatante D., Sarnataro M., Fusco S., Di Iorio A. et Scippa G.S. 2003. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of Fraxinus ornus L. and Spartium junceum L. growing on slopes. Plant Biosystems 137 : 47-55. DOI: 10.1080/11263500312331351321

Chiatante D., Sarnataro M., Fusco S., Di Iorio A. et Scippa G.S. 2002. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of *Fraxinus ornus* L. and *Spartium junceum* L. growing on slopes. Plant Biosystems 137: 47-55. DOI: 10.1080/11263500312331351321

Claude N. 2015. Interactions entre végétation, processus hydro-sédimentaires et morphodynamique des cours d'eau : état de l'art et principes de modélisation. Synthèse bibliographique, EDF R&D, 84 p.

Claude N. 2012. Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse : influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France), PhD thesis, Université de Tours, 365 p.

Claude N., Rodrigues S. et Braud S. 2008. Suivi de l'état physique du lit la Loire au cours d'opérations de restauration et d'entretien. Guide Méthodologique. ISBN: 978-2-11-098556-9, DREAL Centre, 75p.

Claude N., Rodrigues S., Bustillo V., Bréhéret J.G., Macaire J.J. et Jugé P. 2012. Estimating bedload transport in a large sand–gravel bed river from direct sampling, dune tracking and empirical formulas. Geomorphology. 179: 40-57. DOI:10.1016/j.geomorph.2012.07.030

Claude N., Rodrigues S., Bustillo V., Bréhéret J.G., Tassi P. et Jugé P. 2014. Interactions between flow structure and morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France, Water Resources Research, 50, 2850–2873. DOI: 10.1002/2013WR015182

Coleman J.M. 1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. Sedimentary Geology. 3: 129-239. DOI: 10.1016/0037-0738(69)90010-4

Colombini M., Seminara G. et Tubino M. 1987. Finite-amplitude alternate bars. Journal of Fluid Mechanics. 181: 213-232. DOI: 10.1017/S0022112087002064

Combroux I., Bornette G., Amoros C. 2002. Plant regenerative strategies after a major disturbance: the case of a riverine wetland restoration. Wetlands, 22, 234-245.

Comiti F., Da Canal M., Surian N., Mao L., Picco L. et Lenzi M.A. 2011. Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years. Geomorphology 125: 147-159. DOI:10.1016/j.geomorph.2010.09.011

Copeland R.R. 2000. Determination of flow resistance coefficients due to shrubs and woody vegetation. US army corps of engineers, ERDC/CHL HETN-II-3, 8 p.

Corenblit D., Davies N.S., Steiger J., Gibling M.R. et Bornette G. 2014. Considering river structure and stability in the light of evolution: feedbacks between riparian vegetation and hydrogeomorphology. Earth Surface Processes and Landforms. DOI: 10.1002/esp.3643

Corenblit D., Tabacchi E., Steiger J. et Gurnell A.M. 2007. Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. Earth-Science Reviews 84: 56-86. DOI:10.1016/j.earscirev.2007.05.004

Corenblit D., Baas A.C.W., Bornette G., Darrozes J., Delmotte S., Francis R.A., Gurnell A.M., Julien F., Naiman R.J. et Steiger J. 2011. Feedbacks between geomorphology and biota controlling. Earth Surface Processes and Landforms: a review of foundation concepts and current understandings. Earth-Science Reviews, 106, 307-331.

Corenblit D., Gurnell A.M., Steiger J. et Tabacchi E. 2008. Reciprocal adjustments between landforms and living organisms: Extended geomorphic evolutionary insights. Catena: 73: 261-273. DOI:10.1016/j.catena.2007.11.002

Corenblit D., Steiger J., González E. Gurnell, A.M., Charrier G., Darrozes J., Dousseau J., Julien F., Lambs L., Larrue S., Roussel E., Vautier F. et Voldoire O. 2014. The biogeomorphological life cycle of poplars during the fluvial biogeomorphological succession: a special focus on *Populus nigra* L.

Corenblit D., Steiger J., Gurnell A.M., Tabacchi E., Roques L. 2009. Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. Earth Surface Processes and Landforms, 34, 1790-1810.

Cornier T. 2002. La végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou: essai de modélisation de l'hydrosystème, Université François Rabelais de Tours, Tours, France. 228p.

Coutts M.P., Nielsen C.C.N. et Nicoll B.C. 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. Plant and Soil 217: 1-15.

Crosato A., Desta F.B., Cornelisse J., Schuurman F. et Uijttewaal W.S.J. 2012. Experimental and numerical findings on the long-term evolution of migrating alternate bars in alluvial channels. Water Resources Research, 48, W06524, DOI:10.1029/2011WR011320.

Crosato A. et Mosselman E. 2009. Simple physics-based predictor for the number of river bars and the transition between meandering and braiding. Water Resources Research 45: W03424. DOI: 10.1029/2008WR007242.

Crosato A., Mosselman E., Desta F.B. et Uijttewaal, W.S.J. 2011. Experimental and numerical evidence for intrinsic nonmigrating bars in alluvial channels, Water Resources Research, 47, W03511.

Crouzy B., Edmaier K., Pasquale N. et Perona, P. 2013. Impact of floods on the statistical distribution of riverbed vegetation. Geomorphology, 202, 51-58.

Dacharry M. 1996. Les grandes crues historiques de la Loire. La Houille Blanche 6-7: 47- 53. DOI: http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1996067

Dalrymple R.W. et Rhodes R.N. 1995. Estuarine dunes and bars. In: Geomorphology and Sedimentology of Estuarines. Developments in sedimentology (Eds Perillo, G. M. E.), Elsevier, 53, 359-422p. ISBN 9400701233, 9789400701236

Danjon F. 2011. Croissance, architecture des racines et stabilité des arbres forestiers. Habilitation à diriger des recherches. Université de Bordeaux I. 57 p.

Danjon F. et Reubens B. 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. Plant and Soil 303: 1-34. DOI: 10.1007/s11104-007-9470-7

Darby S.E., Simon A. 1999. Incised river channels. Processes, forms, engineering and management. Wiley, Chichester, 442 pp.

Detriché S., Rodrigues S., Macaire J.J., Bonté P., Bréhéret J.G., Bakyono J.P. et Juge P. 2010. Caesium-137 in sandy sediments of the River Loire (France): assessment of an alluvial island evolving over the last fifty years. Geomorphology, 115, 11-22.

Dhivert E., Grosbois C., Rodrigues S., Desmet M. 2015. Influence of fluvial environments on sediment archiving processes and temporal pollutant dynamics (upper Loire River, France). Science of the total Environment 505 :121-136.

Di Iorio A., Lasserre B., Scippa G. S. et Chiatante D. 2005. Root system architecture of Quercus pubescens trees growing on different sloping conditions. Annals of Botany 95: 351-361.

Dietrich W.E., Smith J.D. 1984. Bed load transport in a river meander. Water Resour. Res. 20: 1355-1380.

Dion R. 1961. Histoire des levées de la Loire. Paris. 312p.

Dixon M. 2003. Effects of flow pattern on riparian seedling recruitment on sandbars in the Wisconsin River, Wisconsin, USA. Wetlands 23: 125-139. DOI: 10.1672/0277-5212(2003)023[0125:EOFPOR]2.0.CO;2

Duband D. 1996. La genèse des crues dans le bassin de la Loire. La Houille Blanche, 6/7: 54-62.

Dupuy L. Fourcaud T. et Stokes A. 2005. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. European Journal of Soil Science 56: 319-327. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2004.00666.x

Dykaar B.B. et Wigington P.J. 2000. Floodplain formation and cottonwood colonization patterns on the Willamette River, Oregon, USA. Environmental Management 25 (1) : 87-104

Lefloch E. et Aronson J. 1994. In colloque « Recréer la Nature, EGP/Ministère de l'Environnement.

Edmaier K., Burlando P. et Perona P. 2011. Mechanisms of vegetation uprooting by flow in alluvial non-cohesive sediment. Hydrology Earth System Sciences 15: 1615–1627. DOI: 10.5194/hess-15-1615-2011

Edmaier K., Crouzy B., Ennos R., Burlando P. et Perona P. 2014. Influence of root characteristics and soil variables on the uprooting mechanics of *Avena sativa* and *Medicago sativa* seedlings. Earth Surface Processes and Landforms 39: 1354-1364. DOI: 10.1002/esp.3587

Eekhout J.P.C. et Hoitink A.J.F. 2013. Morphodynamic regime change induced by riparian vegetation in a restored lowland stream. Earth Surface Dynamics Discussions 1: 711-743. DOI:10.5194/esurfd-1-711-2013

Eekhout J.P.C., Hoitink A.J.F. et Mosselman E. 2013. Field experiment on alternate bar development in a straight sand-bed stream. Water Resources Research. 49: 8357–8369. DOI: 10.1002/2013WR014259

Ennos A.R. 1993. The Scaling of Root Anchorage. Journal of Theorical Biology 161: 61-75. DOI: 10.1006/jtbi.1993.1040

Euler T., Herget J. 2012. Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments. Catena 91, 35–46.

Euler T., Zemke, J., Rodrigues, S. et Herget J. 2014. Influence of inclination and permeability of solitary woody riparian plants on local hydraulic and sedimentary processes. Hydrological Processes, 28, 1358–1371.

Ewing K. 1996. Tolerance of four wetland plant species to flooding and sediment deposition. Environmental and Experimental Botany 36: 131-146.

Fathi-Maghadam M. et Kouwen, N. 1997. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. Journal of Hydraulic Engineering, 123: 51-57.

Federici B. et Paola C. 2003. Dynamics of channel bifurcations in noncohesive sediments. Water Resources Research 39: 1162. DOI: 10.1029/2002WR001434

Felten J., Kohler A., Morin E., Bhalerao R.P., Palme K., Martin F., Ditengou F.A. et Legué V. 2009. The Ectomycorrhizal *Fungus Laccaria* bicolor Stimulates Lateral Root Formation in Poplar and *Arabidopsis* through Auxin Transport and Signaling. Plant Physiology 151: 1991-2005. DOI: 10.1104/pp.?109.?147231

Fielding C.R. et Alexander J. 2001. Fossil trees in ancient fluvial channel deposits : evidence of seasonal and longer-term climatic variability. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 170: 59-80.

Fielding C.R., Alexander J., Newman-Sutherland E. 1997. Preservation of *in-situ*, arborescent vegetation and fluvial bar construction in the Burdekin River of north Queensland, Australia. Paleogeogr., Paleoclimatol., Palaeoecol., 135, 123-144.

Flemming B.W. 2000. The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. In: Marine Sandwave Dynamics, Proceedings of an International Workshop, Lille (France). 55-60p.

Flemming B.W. 1988. Zur klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler transportkörper. Bochumer geologische und geotechnische arbeiten. 29: 44-47.

Folk R.L. et Ward W.C. 1957. Brazos river bar: a study of the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 1, 3-26.

Fourniguet J. et Trautmann F. 1985. Carte géologique au 1/50000 – Redon 419. BRGM, Orléans.

Foussadier R. 1998. Initiation des successions vegetales dans les lits endigues des cours d'eau alpins. Influence des parametres abiotiques sur la regeneration des salicacees. PhD thesis, Université de Grenoble 1, 236 p.

Francis R., Corenblit D. et Edwards P. 2009. Perspectives on biogeomorphology, ecosystem engineering and self-organisation in island-braided fluvial ecosystems. Aquatic Sciences 71: 290–304.

Francis R.A., Gurnell A.M., Petts G.E. et Edwards P.J. 2006. Riparian tree establishment on gravel bars: interactions between plant growth strategy and the physical environment. In: Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Bristow, C.S., Petts, G.E., Jarvis, I. (Eds.), Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management. International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 36. Blackwell, Malden, MA, pp. 361–380.

Freeman G.E., Rahmeyer W.H., Copeland R.R. 2000. Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation, US Army corps of engineers, ERDC/CHL TR 00-25, 33 pp.

Friedman J.M., Osterkamp W.R. et Lewis W.M. 1996. The role of vegetation and bed-level fluctuations in the process of channel narrowing. Geomorphology. 14: 341-351. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00047-9

Frings R.M. et Kleinhans M.G. 2008. Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. Sedimentology. 55: 1145-1171.

Fuller I.C. et Hutchinson E. 2007. Sediment flux in a small gravel-bed stream: response to channel remediation works. New Zealand Geographer 63, 169–180.

Gaeuman D. et Jacobson R.B. 2007. Field assessment of alternative bed-load transport estimators. J. Hydraul. Eng. 133: 1319. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1319)

Gautier E. et Grivel S. 2006. Multi-scale analysis of island formation and development in the Middle Loire River, France, In J.S. Rowan, R.W. Duck, A. Werrity, Sediment dynamics and the hydromorphology of fluvial systems, IAHS, Publ., 306, 179-187.

Genet M., Stokes A., Salin F., Mickovski S., Fourcaud T., Dumail J. et Van Beek R. 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. Plant and Soil 278: 1-9. DOI: 10.1007/s11104-005-8768-6

Gibling M.R. et Davies N.S. 2012. Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution. Nature Geoscience, 5, 99-105.

Gibling M.R., Davies N.S., Falcon-Lang H.J., Bashforth A.R., DiMichele W.A., Rygel M.S. et Ielpi A. 2013. Palaeozoic co-evolution of rivers and vegetation: a synthesis of current knowledge. Proceedings of the Geologists' Association.

Gilvear D. et Willby N. 2006. Channel dynamics and geomorphic variability as controls on gravel bar vegetation; river Tummel, Scotland. River Research and Applications 22 : 457-474.

Gladwin D.N. et Roelle J.E. 1998. Survival of plains cottonwood (Populus deltoides subsp.Monilifera) and saltcedar (Tamarix ramosissima) seedlings in response to flooding. Wetlands 18 (4): 669-674. DOI: 10.1007/BF03161681

Gonzalez E. et Comin F.A. 2010. Seed dispersal, germination and early seedling establishment of *Populus alba* L. under simulated water table declines in different substrates. Trees 24: 151-163. DOI: 10.1007/s00468-009-0388-y

Gonzalez E., Gonzalez-Sanchis M., Cabezas A., Comin F. A. et Muller E. 2010. Recent Changes in the Riparian Forest of a Large Regulated Mediterranean River: Implications for Management. Environmental Management 45: 669–681. DOI 10.1007/s00267-010-9441-2

Graf W.L. 1978. Fluvial adjustments to the spread of tamarisk in the Colorado Plateau region. Geological Society of America Bulletin, 89: 1491-1501.

Gran K. et C. Paola. 2001. Riparian vegetation controls on braided stream dynamics. Water Resour. Res., 37(12), 3275–3283, doi:10.1029/2000WR000203.

Grelon J. 1976. Contribution à une étude écologique et dynamique de la végétation des grèves et des îles de la Loire, à Vouvray (Indre-et-Loire) et à St Jean-de-la-Croix (Maine-et-Loire). Paris sud - Orsay, 125 pp.

Grivel S. 2008. La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion, 518 p.

Grosbois C., Meybeck M., Lestel L., Lefèvre I. et Moatar F. 2012. Severe and contrasted polymetallic contamination patterns (1900–2009) in the Loire River sediments (France). Science of the Total Environment, 435-436, 290-305.

Guilloy H., González E., Muller E., Hughes F.M.R. et Brasoum N. 2011. Abrupt Drops in Water Table Level Influence the Development of *Populus nigra* and *Salix alba* Seedlings of Different Ages. Wetlands 31: 124. DOI: 10.1007/s13157-011-0238-8

Guilloy-Froget H., Muller E., Barsoum N. et Hughes F.M.R. 2002. Dispersal, germination, and survival of *Populus nigra* L. (*salicaceae*) in changing hydrologic conditions. Wetlands 22: 478-488. DOI: 10.1672/0277-5212(2002)022[0478:DGASOP]2.0.CO;2

Gurnell A.M. 2013. Plants as river system engineers. Earth Surface Processes Landforms 39: 4-25. DOI: 10.1002/esp.3397

Gurnell A.M., Bertoldy W. et Corenblit D. 2012. Changing river channels: The roles of hydrological processes, plants and pioneer fluvial landforms in humid temperate, mixed load, gravel bed rivers. Earth-Science Reviews 111: 129-141. DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.11.005

Gurnell A.M., Morrissey I.P., Boitsidis A.J., Bark T., Clifford N.J., Petts G.E. et Thompson K. 2006. Initial Adjustments Within a New River Channel: Interactions Between Fluvial Processes, Colonizing Vegetation, and Bank Profile Development. Environmental Management 38: 580-596. DOI: 10.1007/s00267-005-0190-6

Gurnell A.M. et Petts G.E. 2006. Trees as riparian engineers: the Tagliamento river, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 31: 1558–1574.

Gurnell A.M., Petts G.E., Hannah D.M., Smith B.P.G., Edwards P.J., Kollmann J., Ward J.V. et Tockner K. 2001. Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed fiume Tagliamento, Italy. Earth Surface Processes and Landforms 26: 31-62. DOI: 10.1002/1096-9837(200101)26:1<31::AID-ESP155>3.0.CO;2-Y

Gurnell A.M., Tockner K., Edwards P.J. et Petts G.E. 2005. Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. Frontiers in Ecology and Environment, 3 (7), 377 – 382.

Handfus T. 2011 : Suivi morphologique du lit de la Loire en relation avec les travaux de raccourcissement des épis de Basse Loire. Rapport de stage M2 HBV, université de Tours, 83p.

Handfus T., Jugé P. et Rodrigues S. 2013. Opération de remodelage des épis du site de Chalonnes/Loire : Actualisation du suivi relatif à la dynamique hydrosédimentaire - Campagne N°4. Rapport technique pour le compte de VNF, université de Tours, 66 p

Haschenburger J.K. et Cowie M. 2009. Floodplain stages in the braided Ngaruroro River, New Zealand, 103, 466-475.

Hassan MA. 1990. Scour, fill, and burial depth of coarse material in gravel bed streams. Earth Surface Processes and Landforms, 15, 341–356.

Hassan M.A., Schick A.P. et Shaw P.A. 1999. The transport of gravel in an ephemeral sandbed river. Earth Surface Processes et Landforms 24: 623–640.

Heritage G.L., Milan D.J., Large A.R.G. et Fuller I.C. 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. Geomorphology 112, 334-344.

Hey R.D. 1978. Determinate hydraulic geometry of river channels. Journal of the Hydraulics Division. 104: 869-885.

Hickin E.J. 1984. Vegetation and river channel dynamics. The Canadian Geographer / Le Géographe canadien, 28: 111–126. DOI: 10.1111/j.1541-0064.1984.tb00779.x

Hoekstra P., Bell P., Van Santen P., Roode N., Levoy F. et Whitehouse R. 2004. Bedform migration and bedload transport on an intertidal shoal. Continental Shelf Research. 24: 1249-1269. DOI: 10.1016/j.csr.2004.03.006

Hooke J., et Yorke L. 2011. Channel bar dynamics on multi-decadal timescales in an active meandering river. Earth Surface Processes Landforms 36, 1910–1928.

Horton J.L. et Clark J.L. 2001. Water table decline alters growth and survival of *Salix gooddingii* and *Tamarix chinensis* seedlings. Forest Ecology and Management 140: 239-247. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00314-5

Hupp C.R. 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. In: Flood geomorphology. (Eds V. Baker, R. Kochel et P. Patton), pp. 335-356. Wiley, New York.

Hupp C.R. et Osterkamp W.R. 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. Geomorphology 14: 277-295. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00042-4

Ielpi A., Gibling M.R., Bashforth A.R., Lally C., Rygel M.C. et Al-Silwadi S. 2014. Role of vegetation in shaping Early Pennsylvanian braided rivers: Architecture of the Boss Point Formation, Atlantic Canada. DOI: 10.1111/sed.12109

Jackson R.G. 1975. Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. Bulletin of the Geological Society of America. 86: 1523-1533. DOI: 10.1130/0016-7606(1975)86<1523:HAAAUM>2.0.CO;2

Johnson W.C. 2000. Tree recruitment and survival in rivers: influence of hydrological processes. Hydrological Processes 14: 3051-3074. DOI: 10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<3051::AID-HYP134>3.0.CO;2-1

Jones C.M. 1977. Effects of varying discharge regimes on bed-form sedimentary structures in modern rivers. Geology, 5: 567-570.

Jones C.G, Lawton J.H et Shachak M. 1996. Organisms as Ecosystem Engineers. Ecosystem Management 2: 130–147. DOI: 10.1007/978-1-4612-4018-1_14

Junk W.J., Bayley P.B., et Sparks R.E. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences 106 : 110-127.

Kalischuk A.R., Rood S.B. et Mahoney J.M. 2001. Environmental influences on seedling growth of cottonwood species following a major flood. Forest Ecology and Management 144: 75–89. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00359-5

Karrenberg S., Blaser S., Kollmann J., Speck T. et Edwards P.J. 2003. Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment. Functional Ecology 17: 170–177. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2003.00709.x

Karrenberg S., Edwards P. J. et Kollmann J. 2002. The life history of *Salicaceae* living in the active zone of floodplains. Freshwater Biology 47: 733–748. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2002.00894.x

Karrenberg S. et Suter M. 2002. Phenotypic trade-offs in the sexual reproduction of Salicaceae from flood plains. American Journal of Botany 90 (5): 749-754. DOI: 10.3732/ajb.90.5.749

Kiss T. et Sipos G. 2007. Braid-scale channel geometry changes in a sand-bedded river: Significance of low stages. Geomorphology. 84: 209-221. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.01.041

Klaassen G. J. et Masselink G. 1992. Planform changes of a braided river with fine sand as bed and bank material. In: Proceedings 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany. 459-471p.

Kleinhans M.G. et Van Den Berg J.H. 2011. River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method. Earth Surface Processes and Landforms. 36: 721–738. DOI: 10.1002/esp.2090

Kleinhans M.G., Wilbers A.W.E. De Swaaf A. et Van Den Berg J.H. 2002. Sediment supply-limited bedforms in sand-gravel bed rivers. Journal of sedimentary Research. 72: 629-640. DOI: 10.1306/030702720629

Knighton D. 1998. Fluvial forms and processes: a new perspective. Oxford University. 383p.

Kollmann J., Vieli M., Edwards P.J., Tockner K. et Ward J.V. 1999. Interactions between vegetation development and island formation in the Alpine river Tagliamento. Applied vegetation science, 2: 25-36.

Kondolf G.M. et Curry R.R. 1984. The role of riparian vegetation in channel bank stability: Carmel River, California. In: California riparian systems: ecology, conservation, and management. Warner RE, Hendrix KM (eds). University of California Press, Berkeley et Los Angeles, 124-133.

Kostaschuk R.A., et Best J. 2005. Response of sand dunes to variations in tidal flow: Fraser Estuary, Canada, Journal of Geophysical Research, 110, F04S04. DOI: 10.1029/2004JF000176

Kostaschuk R.A., Church, M.A. et Luternauer J.L. 1989. Bedforms, bed material, and bedload transport in a salt-wedge estuary: Fraser River, British Columbia. Canadian Journal of Earth Sciences. 26: 1440-1452. DOI: 10.1139/e89-122

Kramer K., Vreugdenhil S.J. et Van Der Werf D.C. 2008. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain. Forest Ecology and Management 255: 3893–3903. DOI:10.1016/j.foreco.2008.03.044

Kranjcec J., Mahoney J.M. et Rood S.B. 1998. The responses of three riparian cottonwood species to water table decline. Forest Ecology and Management 110: 77–87. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00276-X

Kuhnle R.A., Horton J.K., Bennett S.J. et Best J.L. 2006. Bed forms in bimodal sand–gravel sediments: laboratory and field analysis. Sedimentology, 53: 631–654. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2005.00765.x

Kui L., Stella J.C., Lightbody A. et Wilcox C. 2014. Ecogeomorphic feedbacks and flood loss of riparian tree seedlings in meandering channel experiments. Water resources Research 50: 9366-9384. DOI: 10.1002/2014WR015719

Lane E. 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, volume 81, pages 1–17.

Lanzoni S. 2000a. Experiments on bar formation in a straight flume: 1. Uniform sediment. Water Resource Research, 36: 3337-3349. DOI: 10.1029/2000WR900160

Lanzoni S. 2000b. Experiments on bar formation in a straight flume: 2. Graded sediment. Water Resource Research, 36: 3351-3363. DOI: 10.1029/2000WR900161

Laronne J.B, Outhet D.N., Carling P.A. et McCabe T.J. 1994. Scour chain employment in gravel bed rivers. Catena 22: 299–306.

Laronne J.B. et Sholmi Y. 2007. Depositional character and preservation potential of coarse-grained sediments deposited by flood events in hyper-arid braided channels in the Rift Valley, Arava, Israel. Sedimentary Geology 195, 21–37.

Latapie A. 2011. Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial: exemple de la Loire Moyenne, Univsersté François Rabelais de Tours, Tours, France. 279p.

Latapie A., Camenen B., Rodrigues S., Paquier A., Bouchard J.P. et Moatar F. 2014. Assessing channel response of a long river influenced by human disturbance. Catena. 121: 1-12. DOI: 10.1016/j.catena.2014.04.017

Leopold L.B. et Wolman M.G. 1957. River channel patterns: braided, meandering, and straight. United States Geophysical Survey, Professional Paper 262-B.

Li R.M. et Shen H.W. 1973. Effect of tall vegetations on flow and sediment. Journal of hydraulic division, 99: 793-814.

Lisle T., Iseya F. et Ikeda H. 1993. Response of a channel with alternate bars to a decrease in sediment supply of mixed-size bed load: a flume experiment. Water Resource Research, 29: 3623-3629.

Lorin J. 2003. Etude granulométrique du site expérimental du Fresnes/Ingrandes. Données laboratoire et analyses, 100 p.

Macaire J.J., Gay-Ovejero I., Bacchi M., Cocirta C., Patryl L. et Rodrigues S. 2013. Petrography of alluvial sands as a past and present environmental indicator: Case of the Loire River (France). International Journal of Sediment Research 28: 285–303. DOI:10.1016/S1001-6279(13)60040-2

Mahoney J.M. et Rood S.B. 1998. Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment - an integrative model. Wetlands 18: 634-645. DOI: 10.1007/BF03161678

Mahoney J.M. et Rood S.B. 1992. Response of a hybrid poplar to water table decline in different substrates. Forest ecology and management 54: 141-156. DOI: 10.1016/0378-1127(92)90009-X

Malavoi J.R. 2002. Hydrologie et géomorphologie fluvial. In Bouchardy C., La Loire – Vallées et vals du grand fleuve sauvage, Paris, pp. 77-99.

Manners R.B., Schmidt J.C. et Scott M.L. 2014. Mechanisms of vegetation-induced channel narrowing of an unregulated canyon river: Results from a natural field-scale experiment. Geomorphology, 211, 100-115.

Maroder H.L., Prego I.A., Facciuto G.R. et Maldonado S.B. 2000. Storage behaviour of *Salix alba* and *Salix matsudana* seeds. Annals of botany 86: 1017-1021. DOI: 10.1006/anbo.2000.1265

McKenney R., Jacobson R.B. et Wertheimer R.C. 1995. Woody vegetation and channel morphogenesis in low gradient, gravelbed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas. Geomorphology, 13, 175–198.

Mclelland S.J., Ashworth P.J., Best J.L., Roden J. et Klaassen G.J. 1999. Flow Structure and Transport of Sand-Grade Suspended Sediment around an Evolving Braid Bar, Jamuna River, Bangladesh. In: Fluvial Sedimentology VI: International Association of Sedimentologists, Special Publication 28 (Eds Smith, N. D. et Rogers, J.), Blackwell Publishing Ltd., 43-57p.

Mikus P., Wyzga B., Kaczka R.J., Walusiak E. et Zawiejska J. 2013. Islands in a European mountain river: Linkages with large wood deposition, flood flows and plant diversity. Geomorphology, 202, 115-127.

Miori S., Repetto R. et Tubino M. 2006. A one-dimensional model of bifurcations in gravel-bed channels with erodible banks. Water resour. res. 42: W11413.

Moggridge H.L. et Gurnell, A.M. 2009. Controls on the sexual and asexual regeneration of Salicaceae along a highly dynamic, braided river system. Aquatic Sciences 71: 305-317.

Moore I.D., Grayson R.B. et Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes 5, 3–30.

Morisawa M. 1968. Streams: their dynamics and morphology, New-York, Mc Graw-Hill

Mosselman E., Tubino M. et Zolezzi G. 2006. The overdeepening theory in river morphodynamics: two decades of shifting interpretations. In Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics – River Flow 2006; 1175–1181.

Nabet F. 2013. Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée. Geography. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.

Naiman R.J., Bechtold J.S., Drake D.C., Latterell J.J., O'Keefe T.C. et Balian E.V. 2005. Origins, Patterns, and Importance of Heterogeneity in Riparian Systems. In : Lovett GM, Turner MG, Jones, CG et Weathers KC (éd.), Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes. Springer New York, 200, 425 p. DOI: 10.1007/b104357

Nakayama K., Fielding C.R. et Alexander J. 2002. Variations in character and preservation potential of vegetation-induced obstacle marks in the variable discharge Burdekin River of north Queensland, Australia. Sedimentary Geology, 149: 199-218.

Nanson G.C. et Knighton A.D. 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. Earth Surface Processes and Landforms, 21, 217-239.

Naqshband S. 2014. Morphodynamics of river dunes: suspended sediment transport along mobile dunes and dune development towards upper stage plane bed. PhD thesis, University of Twente, 149 p. Nanson, G.C., Beach, H.F., 1977. Forest succession and sedimentation on a meandering river floodplain, northeast British Columbia, Canada. Journal of Biogeography 4, 229– 251.

Nepf H. et Ghisalberti M. 2008. Flow and transport in channels with submerged vegetation *Acta Geophysica* 56 (3), 753-777.

Nicoll B. et Dunn A. 1999. The effects of wind speed and direction on radial growth of structural roots. In: Proceedings of the conference "The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology", Bordeaux, 20-24 July 1998, Series: 'Developments in Plant and Soil Sciences', vol 87,A., S. (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.61-76

Olesen K.W. 1984. Alternate bars in and meandering of alluvial rivers. In: River Meandering, Proc. Conf. Rivers 1983, New Orleans, Ed. C.M. Elliott, ASCE, 1984, pp.873-884.

Osterkamp W.R. 1998. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake river, Idaho. Wetlands, 18: 530-545.

Osterkamp W.R., Hupp C.R. et Stoffel M. 2012. The interactions between vegetation and erosion: new directions for research at the interface of ecology and geomorphology. Earth Surface Processes Landforms 37: 23-36. DOI: 10.1002/esp.2173

Paola C. 1996. Incoherent structure: turbulence as a metaphor for stream braiding. In: Coherent flow structures in open channels, eds. Ashworth, P.J., Bennett, S.J., Best, J.L., Mc Lelland, S.J. John Wiley and Sons, pp. 706-723.

Parker G. 1976. On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. Journal of Fluid Mechanics. 76: 457-480. DOI: 10.1017/S0022112076000748

Parker G. et Johanneson H. 1989. Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels. In: River meandering, AGU, Water Resources Monograph 12, Eds. S. Ikeda and G. Parker, pp.379-415.

Peters J.J. 1978. Discharge and sand transport in the braided zone of the Zaire estuary. Netherlands J. Sea Res. 12: 273-292.

Peters J.J. et Sterling A. 1975. Mateba 12: la méthode des dragages dirigés. Laboratoire de recherches hydrauliques, 11-29p.

Petryk S. et Bosmajian G. 1975. Analysis of flow through vegetation. Journal of the Hydraulics Division, 101: 871-884.

Piégay H., Pautou G. et Ruffinoni C. 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau - écologie, fonctions et gestion. Paris : Institut pour le développement forestier, 463 pp.

Pinay G., Décamps H., Chauvet H. et Fustec E. 1990. Functions of ecotones in fluvial systems. In : Naiman R.J. et Décamps, The Ecology and Management of Aquatic Terrestrial Ecotones, Unesco, Paris et Parthenon, p. 141-169.

Pinto Martins D., Bravard J.P. et Stevaux J.C. 2009. Dynamics of water flow and sediments in the upper Paraná River between Porto Primavera and Itaipu Dams, Brazil. Lat. Am. j. sedimentol. basin anal. 16: 111-118.

Pollen N. et Simon A. 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. Water Resources Research 41: W07025.

Polzin M.L. et Rood S.B. 2006. Effective disturbance: seedling safe sites and patch recruitment of riparian cottonwoods after a major flood of a mountain river. Wetlands 26: 965-980. DOI: 10.1672/0277-5212(2006)26[965:EDSSSA]2.0.CO;2

Pyrce R.S. et Ashmore P.E. 2005. Bedload path length and point bar development in gravel-bed river models. Sedimentology 52: 839-857. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2005.00714.x

Reesink A.J.H., Ashworth P.J., Sambrook Smith G.H., Best J.L., Parsons D.R., Amsler M.L., Hardy R.J., Lane S.N., Nicholas A.P., Orfeo O., Sandbach S.D., Simpson C.J. et Szupiany R.N. 2014. Sacles and causes of heterogeneity in bars in a large multi-channel river: Rio Parana, Argentina. Sedimentology, DOI: 10.1111/sed.12092.

Reesink A.J.H. et Bridge J.S. 2011. Evidence of bedform superimposition and flow unsteadiness in unit-bar deposits, South Saskatchewan River, Canada. Journal of Sedimentary Research. Vol. 81 no. 11: 814-840. DOI: 10.2110/jsr.2011.69

Reesink A.J.H. et Bridge J.S. 2009. Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars – Part 2, further experiments. Sedimentary Geology 222: 274-300. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2009.09.014

Reesink A.J.H. et Bridge J.S. 2007. Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars. Sedimentary Geology 202: 281-296. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2007.02.005

Reid I., Bathurst J.C., Carling P.A., Walling D.E. et Webb B.W. 1997. Sediment erosion, transport and deposition. In: Applied fluvial geomorphology for river engineering and management. (Eds C.R. Thorne, R.D. Hey et M.D. Newson), pp. 95-135. John Wiley & Sons, Chichester.

Reinfelds I. et Nanson G.1993. Formation of braided river floodplains,Waimakariri River, New Zealand. Sedimentology, 40, 1113–1127.

Repetto R., Tubino M. et Paola C. 2002. Planimetric instability of channels with variable width. Journal of Fluid Mechanics. 457: 79-109.

Richards K.S. 1982. Rivers: Form and Process in Alluvial Channels. The Blackurn Press, New York. 361p.

Richardson W.R. et Thorne C.R. 2001. Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river: Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh. Geomorphology. 38: 185-196. DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00080-5

Richardson W.R. et Thorne C.R. 1998. Secondary Currents around Braid Bar in Brahmaputra River, Bangladesh. J. Hydraul. Eng. 124: 325-327.

Richardson W.R., Thorne C.R. et Mahmood S. 1996. Secondary flow and channel changes around a bar in the Brahmaputra river, Bangladesh. In: Coherent flow structures in open channels (Eds Ashworth, P. J., Bennet, S. J., Best, J. L. et McLelland, S. J.), John Wiley and Sons, Ltd, 519-543p.

Robinson D. 1994. The responses of plants to non-uniform supplies of nutrients. New Phytologist 127:635–674. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1994.tb02969.x

Rodrigues S. 2004. Dynamique sédimentaire et végétation: évolution de chenaux fluviatiles en Loire moyenne (France), Univsersté François Rabelais de Tours, Tours, France. 431p.

Rodrigues S., Bréhéret J.G., Macaire J.J., Greulich S. et Villar M. 2007. In channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire, France. Sedimentology. 54: 223-242. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2006.00832.x

Rodrigues S., Bréhéret J.G., Macaire J.J., Moatar F., Nistoran D. et Jugé P. 2006. Flow and sediment dynamics in the vegetated secondary channels of an anabranching river: The Loire River (France). Sedimentary Geology. 186: 89-109. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.11.011

Rodrigues S., Claude N., Juge P. et Breheret J.G. 2012. An opportunity to connect the morphodynamics of alternate bars with their sedimentary products. Earth Surface Processes and Landforms. 37: 240-248. DOI: 10.1002/esp.2255

Rodrigues S., Claude N., Moatar F. 2012. Sediment transport in Encyclopedia of Environmetrics Second Edition, A.-H. El-Shaarawi et W. Piegorsch (eds). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 2398-2413. DOI: 10.1002/9780470057339.vas010.pub2.

Rodrigues S., Gautier J.N. 2007. Réponse morphologique des chenaux alluviaux aux travaux d'entretien : cas des chenaux secondaires végétalisés de la Loire moyenne. La Houille-Blanche, 1, 86-94.

Rodrigues S., Mosselman E., Claude N., Wintenberger C.L., Juge P. (sous presse). Alternate bars in a sandy gravel bed river: generation, migration and interactions with superimposed dunes. Earth Surface Processes and Landforms. DOI: 10.1002/esp.3657.

Rood S.B., Kalischuk A.R., et Mahoney J.M. 1998. Initial cottonwood seedling recruitment following the flood of the century of the Oldman River, Alberta, Canada. Wetlands 18: 557-570. DOI: 10.1007/BF03161672

Rood S.B., Zanewich K., Stefura C. et Mahoney J.M. 1999. Influence of water table decline on growth allocation and endogenous gibberellins in black cottonwood. Tree Physiology 20: 831-836. DOI: 10.1093/treephys/20.12.831

Rubey W.W. 1933. Equilibrium conditions in debris-laden streams, 14th annual Meeting, Transactions of the American Geophysical Union, pp. 479-505

Schnitzler A., Gafta D. et Cornier T. Concepts architecturaux et particularités écosystémiques des ripisylves. In : Piégay H., Pautou G. et Ruffinoni C. 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau - écologie, fonctions et gestion. Paris : Institut pour le développement forestier, 463 pp.

Schumm S.A. 1977. The fluvial system. Wiley-Interscience, New York. 338p.

Scippa G.S., Di Michele M., Di Iorio A., Costa A., Lasserre B. et Chiatante D. 2006. The Response of Spartium junceum roots to slope: Anchorage and gene factors. Annals of Botany 97: 857-866.

Scippa G.S., Trupiano D., Rocco M., Di Iorio A. et Chiatante D. 2008. Unravelling the response of poplar (*Populus nigra*) roots to mechanical stress imposed by bending. Plant Biosystems 142: 401-413. DOI: 10.1080/11263500802151058

Scott M.L., Friedman J.M., et Auble G.T. 1996. Fluvial process and the establishment of bottomland trees. Geomorphology 14: 327-339. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00046-8

Scott M.L., Shafroth P.B. et Auble G.T. 1999. Responses of Riparian Cottonwoods to Alluvial Water Table Declines. Environmental Management 23: 347-358. DOI: 10.1007/s002679900191

Segelquist C.A., Scott M.L. et Auble G.T. 1993. Establishment of *Populus deltoides* Under Simulated Alluvial Groundwater Declines. American Midland Naturalist 130: 274-285. DOI: 10.2307/2426127

Seminara G. et Tubino M. 1989. Alternate bars and meandering: free, forced and mixed interactions. In: River meandering (Eds Ikeda, S. et Parker, G.), American Geophysical Union - Water Resources Monographs 12, Washington. 267-320p.

Shafroth P.B., Auble, G.T., Stromberg J.C. et Patten D.T. 1998. Establishment of woody riparian vegetation in relation to annual patterns of streamflow, Bill Williams River, Arizona. Wetlands 18: 577-590. DOI: 10.1007/BF03161674

Shafroth P.B., Stromberg J.C. et Patten D.T. 2000. Woody riparian vegetation response to different alluvial water table regimes. Western North American Naturalist 60: 66–76.

Shields A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung., Mitteilung der Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, 26 pp.

Sime L.C., Ferguson R.I. et Church M. 2007. Estimating shear stress from moving boat acoustic Doppler velocity measurements in a large gravel bed river. Water Resources Research 43: W03418. DOI: 10.1029/2006WR005069

Simons D.B., Richardson E.V. et Nordin C.F. 1965. Bedload equation for ripples and dunes, US Geological Survey Professional Paper 462-H.

Smith N.D. 1974. Sedimentology and bar formation in the upper Kicking Horse River, a braided outwash stream. J. Geol., 82: 205-223.

Southard J.B. et Boguchwal L.A. 1990. Bed configuration in steady unidirectional water flows; Part 2, Synthesis of flume data. Journal of Sedimentary Research. 60: 658-679. DOI: 10.1306/212F9241-2B24-11D7-8648000102C1865D

Steiger J., Tabacchi E., Dufour S., Corenblit D., et Peiry J.L. 2005. Hydrogeomorphic processes affecting riparian habitat within alluvial channel–floodplain river systems: a review for the temperate zone. River research and applications 21: 719-737. DOI: 10.1002/rra.879

Stella J.C., Battles J.J., McBride J.R. et Orr K. 2010. Riparian Seedling Mortality from Simulated Water Table Recession, and the Design of Sustainable Flow Regimes on Regulated Rivers. Restoration Ecology 18 : 284-294.

Stella J.C., Battles J.J., Orr K. et McBride J.R. 2006. Synchrony of seed dispersal, hydrologye and local climate in a semi-arid river reach in California. Ecosystems 9 : 1200-1214.

Stromberg J.C. 1997. Growth and survivorship of Fremont cottonwood, Godding willow, and Salt cedar seedlings after large floods in Central Arizona. Great Basin Naturalist 57(3) : 198-208.

Stromberg J.C., Tluczek M.G.F., Hazelton A.F., et Ajami H. 2010. A century of riparian forest expansion following extreme disturbance: Spatio-temporal change in *Populus/Salix/Tamarix* forests along the Upper San Pedro River, Arizona, USA. Forest Ecology and Management 259: 1181–1189. DOI:10.1016/j.foreco.2010.01.005

Struiksma N., Olesen K.W., Flokstra C. et De Vriend H.J. 1985. Bed deformation in curved alluvial channels. Journal of Hydraulic Research. 23: 57-79. DOI: 10.1080/00221688509499377

Suna H.L., Lia S.C., Xiongc W.L., Yanga Z.R., Cuib B.S. et Yangc T. 2008. Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis*. Ecological Engineering 32: 60-67. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.09.002

Tal M. et Paola C. 2010. Effects of vegetation on channel morphodynamics: results and insights from laboratory experiments. Earth Surface Processes and Landforms 35: 1014–1028. DOI: 10.1002/esp.1908

Tal M. et Paola C. 2007. Dynamic single-thread channels maintained by the interaction of flow and vegetation. Geology, 35;347-350.

Tamasi E., Stokes A., Lasserre B., Danjon F., Berthier S., Fourcaud T. et Chiatante D. 2005. Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. Trees 19 : 374-384. DOI: 10.1007/s00468-004-0396-x

Ten Brinke W.B.M., Wilbers A.W.E. et Wesseling C. 1999. Dune Growth, Decay and Migration Rates during a Large-Magnitude Flood at a Sand and Mixed Sand–Gravel Bed in the Dutch Rhine River System. In: Fluvial Sedimentology VI: International Association of Sedimentologists, Special Publication 28 (Eds Smith, N. D. et Rogers, J.), Blackwell Publishing Ltd., 15-32p.

Thaler P. et Pages L. 1998. Modeling the influence of assimilate availability on root growth and architecture. Plant Soil 201: 307-320. DOI: 10.1023/A:1004380021699

Thompson G.T. et Roberson J.A. 1976. A theory of flow resistance for vegetated channels. Transactions of the ASAE, 19: 288-293.

Thorne C.R. 1990. Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. In: Vegetation and erosion: processes and environments. (Ed J.B. Thornes), pp. 125-144. Wiley, New York.

Thorne P.D., Hardcastle P.J. et Soulsby R.L. 1993. Planform channel evolution of the Brahmaputra River, Bangladesh. In: Braided Rivers (Eds Best, J. L. et Bristow, C. S.), Geological Society Special Publication, London. 257-276p.

Timothy J., Pietsch G.C. et Nanson G.C. 2011. Bankfull hydraulic geometry; the role of in-channel vegetation and downstream declining discharges in the anabranching and distributary channels of the Gwydir distributive fluvial system, southeastern Australia, Geomorphology 129, 1-2, 152

Thoby V. et Ricou G. 2004. Restauration d'annexe hydraulique – Site de la Gentinière sur la Loire (commune de Chargé), Rapport Fédération de P^che d'Indre et Loire, 25p.

Trupiano D., Di Iorio A., Montagnoli A., Lasserre B., Rocco M., Grosso A., Scaloni A., Marra M., Chiatante D. et Scippa G.S. 2012. Involvement of lignin and hormones in the response of woody poplar taproots to mechanical stress. Physiologia Plantarum 146: 39–52. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01601.x

Tubino M. 1991. Growth of alternate bars in unsteady flow. Water Resources Research 27: 37-52. DOI: 10.1029/90WR01699

Tubino M., Repetto R. et Zolezzi, G. 1999. Free bars in rivers. Journal of Hydraulic Research, 37: 759-775.

Tuijnder A.P., Ribberink J.S. et Hulscher S.J.M.H. 2009. An experimental study into the geometry of supply-limited dunes. Sedimentology. 56: 1713-1727. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2009.01054.x

Van Den Berg J.H. 1987. Bedform migration and bed-load transport in some rivers and tidal environments. Sedimentology. 34: 681-698. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1987.tb00794.x

Van Der Mark C.F., Blom A. et Hulscher S.J.M.H. 2008. Quantification of variability in bedform geometry. Journal of Geophysical Research 113: F03020. DOI: 10.1029/2007JF000940

Van der Mark C.F., Blom A. et Hulscher, S.J.M.H. 2007. Variability in bedform characteristics using flume and river data. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM, 923-930. DOI: 10.1201/NOE0415453639-c117

Van der Nat D., Schmidt A.P., Tockner K., Edwards P.J. et Ward J.V. 2002. Inundation dynamics in braided floodplains (Tagliamento River, northeast Italy). Ecosystems 5: 636–647.

Van Dijk W. 2013. Meandering rivers: Feedbacks between channel dynamics, floodplain and vegetation. PhD thesis, University of Utrecht, 206 p.

Van Dijk W.M., Teske R., Van de Lageweg W. I. et Kleinhans M.G. 2013. Effects of vegetation distribution on experimental river channel dynamics, Water Resour. Res., 49, 7558–7574, DOI:10.1002/2013WR013574.

Van Splunder I., Coops H., Voesenek L.A.C.J. et Blom C.W.P.M.1995. Establishment of alluvial forest species in floodplains: the role of dispersal timing, germination characteristics and water level fluctuations. Acta. Bot. Neerl. 44:269–278.

Van Splunder I., Voesenek L.A.C.J., Coops H., De Vries X.J.A. et Blom C.W.P.M. 1996. Morphological responses of seedlings of four species of *Salicaceae* to drought. Canadian Journal of Botany 74: 1988-1995. DOI: 10.1139/b96-238

Vannote R.L., Wayne Minshall G., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E. 1980. The River Continuum Concept. Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques 37 : 130-137. DOI: 10.1139/f80-017

Vargas-Luna A., Crosato A. et Uijttewaal W.S.J. 2014. Effects of vegetation on flow and sediment transport: comparative analyses and validation of predicting models. Earth Surface Processes Landforms. DOI: 10.1002/esp.3633

Västilä K., Järvelä J., Aberle J. 2013 Characteristic reference areas for estimating flow resistance of natural foliated vegetation. Journal of Hydrology 492, 49-60.

Villar M. 2011. Conservation des ressources génétiques du peuplier noir dans son habitat : bases biologiques, génétiques et écologiques, Habilitation Dissertation, 112 pp.

Villard P.V. et Church M. 2005. Bar and dune development during a freshet: Fraser River Estuary, British Columbia, Canada. Sedimentology. 52: 737-756. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2005.00721.x

Villard P.V. et Church M. 2003. Dunes and associated sand transport in a tidally influenced sand-bed channel: Fraser River, British Columbia. Canadian Journal of Earth Sciences. 40: 115-130. DOI: 10.1139/e02-102

Vreugdenhil S.J., Kramer K. et Pelsma T. 2006. Effects of flooding duration, -frequency and –depth on the presence of saplings of six woody species in north-west Europe. Forest Ecology and Management 236: 47-55.

Wende R. and Nanson G.C. 1998. Anabranching rivers: ridge-form alluvial channels in tropical northern Australia. Geomorphology, 22, 205-224.

Whiting P.J., Dietrich W.E. 1991. Convective accelerations and boundary shear stress over a channel bar. Water Resour. Res. 27: 783-796.

Wilcock P.R. 1996. Estimating Local Bed Shear Stress from Velocity Observations. Water Resources Research 32: 3361. DOI: 10.1029/96WR02277

Wilcox A.C. et Shafroth P.B. 2013. Coupled hydrogeomorphic and woody-seedling responses to controlled flood releases in a dryland river. Water Resources Research 49 : 2843-2860. DOI:10.1002/wrcr.20256

Williamson L.C., Ribrioux S.P.C.P., Fitter A.H. et Ottoline Leyser H.M. 2011. Phosphate Availability Regulates Root System Architecture in Arabidopsis. Plant physiology 226 : 875-882. DOI: 10.?1104/?pp.?126.?2.?875

Wintenberger C.L., Rodrigues S., Claude N., Breheret J.G. et Villar M. (revisions mineures) Dynamics of non-migrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France). Geomorphology.

Wintenberger C.L., Rodrigues S., Breheret J.G. et Villar M. (révisions majeures). Fluvial islands: first stage of development from forced bars and vegetation interactions. Geomorphology.

Wintenberger C.L., Rodrigues S., Breheret J.G. et Villar M. (révisions majeures). The survival of Populus nigra L. seedlings to alluvial bar dynamics. Earth Surface Processes and Landforms.

Wintenberger C. 2011. Transformation d'une barre sédimentaire de la Loire Moyenne en île : influence de la végétation ligneuse. Master's Thesis, University of Tours, 50 p.

Wu F.C., Shao Y.C. et Chen Y.C. 2011. Quantifying the forcing effect of channel width variations on free bars: Morphodynamic modeling based on characteristic dissipative Galerkin scheme. Journal of Geophysical Research 116: F03023. DOI: 10.1029/2010JF001941

Wu F.C., Shen H.W. et Chou Y.J. 1999. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. Journal of Hydraulic Engineering, 125: 934-942.

Wu F.C. et Yeh T.H. 2005. Forced bars induced by variations of channel width: Implications for incipient bifurcation. J. Geophys. Res. 110: F02009.

Yang C.T. et Song C.C.S. 1979. Theory of minimum rate of energy dissipation. Journal of the Hydraulics Division. 105: 769-784.

Zanoni L., Gurnell A.M., Drake N. et Surian N. 2008. Island dynamics from analysis of historical maps and air photographs. River Research and Applications 24: 1141–1159.

Zolezzi G., Bertoldi W. et Tubino M. 2006. Morphological analysis and prediction of river bifurcations. In: Braided Rivers Process, Deposits, Ecology and Management (Eds Sambrook Smith, G. H., Best, J. B., Bristow, C.S., Petts, G.E.), Special publication - International association of sedimentologists, 36, 233-256p.

Zolezzi G., Guala M., Termini D. et Seminara G. 2005. Experimental observations of upstream overdeepening. Journal of Fluid Mechanics 531: 191–219

Zolezzi G. et Seminara G. 2001. Downstream and upstream influence in river meandering; Part 1, General theory and application to overdeepening. J. Fluid Mech., 438: 183-211.

Annexes

Annexe 1 Liste des communications

Communications orales (auteur)

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.-G., JUGE P., VILLAR M., (2014). Salicaceae seedlings development associated with river dynamics: field study enriched by experimental approach. Communication orale à European Geosciences Union General Assembly 2014, 2 mai 2014, Vienne.
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2013). Processus de remise en mouvement d'une barre alluviale dans une rivière sablo-graveleuse. Communication orale au 14e congrès français de sédimentologie, 7 novembre 2013, Paris.
WINTENBERGER C., CARRIERE T., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2013). Dynamique hydro-sédimentaire et entretien du lit en Loire Moyenne : influence sur les peupliers noirs et les saules blancs. Rencontre chercheur-gestionnaire de la plateforme Recherche/Données/Informations du Plan Loire Grandeur Nature, 18 septembre 2013, Orléans (France).
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2013). Dynamique hydro-sedimentaire et entretien du lit en Loire Moyenne influence sur les peupliers noirs et les saules blancs. Réunion de travail de la plateforme Recherche/Données/Informations du Plan Loire Grandeur Nature, 22-23 mai 2013, Bruxelles (Belgique).
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Influence de la dynamique hydro-sédimentaire et des travaux d'entretien du lit sur la survie des populations au stade juvénile de *Populus nigra* L. et *Salix alba* en Loire Moyenne : étude du site de Mareau-aux-Prés. Communication orale au Conseil Scientifique de la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin, 18 décembre 2012, Orléans (France).
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Influence de la dynamique hydro-sédimentaire et des travaux d'entretien du lit sur la survie des populations au stade juvénile de *Populus nigra* L. et *Salix alba* en Loire Moyenne : étude du site de Mareau-aux-Prés. Communication orale dans le cadre du projet BioMareau, 18 décembre 2012, Orléans (France).
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Visite de terrain du site de Mareau-aux-Prés dans le cadre d'une rencontre de la Zone Atelier Loire, 4-5 octobre 2012, Orléans (France).
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Influence de la dynamique hydro-sédimentaire et des travaux d'entretien du lit sur les populations de peupliers noirs et saules blancs en Loire Moyenne. Communication orale au Club des gestionnaires des levées et du lit du bassin de la Loire, 4 avril 2012, Orléans (France).
WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Impact de la dynamique hydro-sédimentaire et des travaux d'entretien sur le renouvellement des communautés de *Salicaceae* en Loire Moyenne. Communication orale à l'Atelier « jeunes chercheurs » de la plateforme RDI du Plan Loire Grandeur Nature, 21-22 novembre 2011, Angers (France).

Communications orales (auteur associé)

RODRIGUES S., CLAUDE N., WINTENBERGER, C., LATAPIE, A., VALVERDE, L., JUGE P., BREHERET, J-.G. (2013). Dynamique hydro-sédimentaire des chenaux de la Loire : processus et quantification. *Communication orale à l'Assemblée Générale de la Zone Atelier Loire, Le Mans, 25 octobre 2013.*
RODRIGUES S., CLAUDE N., WINTENBERGER, C., LATAPIE, A., VALVERDE, L., JUGE P., BREHERET J-.G. (2013). Dynamique hydro-sédimentaire des chenaux de la Loire : comprendre les processus pour une meilleure gestion. *Communication orale au 7ème rendez-vous chercheurs/gestionnaires, Plan Loire Grandeur Nature, Orléans, 18 septembre 2013.*
RODRIGUES S., JUGÉ P., CLAUDE N., WINTENBERGER, C. (2013). Effects of discharge variations on alternate migrating bars formation and dynamics in a real river. *Communication orale à 10th International Conference on Fluvial Sedimentology, Leeds, United-Kingdom, 14-19 juillet, p. 211.*
RODRIGUES S., CLAUDE N., WINTENBERGER C., LATAPIE A., VALVERDE L., JUGE P., BREHERET J.-G. (2012). The Loire River: a natural laboratory for fluvial process sedimentology. Communication orale invitée au ANR GESTRANS Workshop, 21-23 Novembre 2012, Grenoble (France).
RODRIGUES S., WINTENBERGER C., CLAUDE N., DESMET M., RAUX J., BEAUFORT A., JUGE P., (2012). Visite technique de la chaine de mesure du transport solide en système alluvial organisée dans le cadre du colloque Morphodynamique et Transport Solide : du terrain aux modèles, 16 et 17 octobre 2012, Chinon (France).

RODRIGUES S., BREHERET J.-G., CLAUDE N, WINTENBERGER C., JUGE, P., (2012). Consequences of alternate bars dynamics on sedimentary archives in large sandy disconnected river channels. Communication orale au FLuvial Archive Group Biennal meeting, Remich, Luxembourg, September 3-4, 2012, abstract book, p.27.

VILLAR M., BASTIEN C., BRIGNOLAS F., CHAMAILLARD S., CHANTEREAU M., FORESTIER O., JORGE V., RODRIGUES S. et WINTENBERGER C. Populations naturelles du Peuplier noir (*Populus nigra* L.) en Loire : inventaire, diversité génétique et adaptation aux variations de l'environnement. Communication orale à I.S.Rivers, 26-28 juin 2012, Lyon (France).

Posters (auteur)

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2013). Erosion, uprooting and burying stresses during floods: what is the influence on Salicaceae seedlings survival pattern? Survival study of P. nigra recruited on a non-migrating bar in a sandy-gravel bed river. Présentation poster au colloque American Geophysical Union (AGU), 19 december 2014, San Francisco (USA).

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2013). The sediment, the black poplar and the beaver : story of the formation process of a mid-channel island. Présentation poster au 2ème colloque biennal des Zones Ateliers, 12-13 décembre 2013, Paris (France).

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., VILLAR M., (2013), BREHERET J.G. The key role of pioneer woody vegetation in mid-channel bar metamorphosis to island : case study from the River Loire (France). Présentation poster à SedNet, 06 novembre 2013, Lisbonne (Portugal).

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., VILLAR M., (2013), BREHERET J.G. The key role of pioneer woody vegetation in mid-channel bar metamorphosis to island : case study from the River Loire (France). Présentation poster à la Conférence Internationale de Sédimentologie Fluviale (ICFS), 14-19 juillet 2013, Leeds (Grande-Bretagne).

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2013). The sediment, the black poplar and the beaver : story of the formation process of a mid-channel island. Présentation poster au colloque international HydroEco'2013, 13-16 mai 2013, Rennes (France).

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Biogeomorphic control of woody vegetation on alluvial bar. Présentation poster à Morphodynamique et Transport Solide : du terrain aux modèles, 16 et 17 octobre 2012, Tours (France).

WINTENBERGER C., RODRIGUES S., BREHERET J.G., VILLAR M., (2012). Trees biogeomorphic control on alluvial bars. Présentation poster à I.S.Rivers, 26-28 juin 2012, Lyon (France).

Posters (auteur associé)

RODRIGUES S., BREHERET, JG., CLAUDE N., WINTENBERGER, C., JUGE, P. (2013). Connecting modern alternate bars dynamics to their low-preservation potential sedimentary products in large sandy river channels. *Communication poster à 10th International Conference on Fluvial Sedimentology, Leeds, United-Kingdom, 14-19 juillet, p. 406.*

RODRIGUES S., CLAUDE, N., GANDUBERT, B., WINTENBERGER C., Jugé, P. BREHERET J.G. (2013). Influence of dunes on alternate bar migration in a sandy gravel river: the Loire (France). Poster présenté au colloque *Marine and River Dunes IV*, 15-17 avril, Bruges (Belgique), livre des résumés p. 233.

Articles (auteur)

WINTENBERGER, C.L., RODRIGUES, S., BREHERET, J.G., VILLAR, M. (in press). Fluvial islands: first stage of development from forced bars and vegetation interactions. Geomorphology.

WINTENBERGER, C. L., RODRIGUES, S., BREHERET, J.G., JUGÉ, P., VILLAR, M. (revisions majeures). The survival of *Populus nigra* L. seedlings to alluvial bar dynamics. Submitted to Earth Surface Processes and Landforms (Jan., 5, 2015).

WINTENBERGER, C.L., RODRIGUES, S., CLAUDE, N., BREHERET, J.G., VILLAR, M. (revisions mineures). Dynamics of non-migrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France). Geomorphology.

Articles (auteur associé)

RODRIGUES S., MOSSELMAN, E., CLAUDE, N., WINTENBERGER, C., JUGE, P. (*révisions majeures, Earth Surface Processes and Landforms*). Alternate bar development in a real river: combined effects of discharge variations, bank orientation and superimposed dunes.

Annexe 2 Résumé Colloque AGU, San Francisco (USA)

The fate of Salicaceae seedlings related to the dynamics of bars during floods: differentiating bed erosion, uprooting and burying.

Wintenberger, C. 1, Rodrigues, S. 1, Bréhéret, J.-G. 1, Jugé, P. 2, Villar, M3.

1 Université François Rabelais – Tours, E.A. 6293 GéHCO – GéoHydrosystèmes Continentaux, UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37 200 FRANCE.

2 Université François Rabelais – Tours, CETU ELMIS, 11 quai Danton, 37 500 FRANCE.

3 INRA Orléans UR 0588, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet Cedex, FRANCE.

Riparian vegetation is a key factor of the morphological evolution of river. In Europe, riparian Salicaceae is declining following the loss of potential recruitment areas associated with river management. As an exception for lowland rivers, the Loire River (France) shows, in its middle reaches, an efficient sexual regeneration of Populus nigra and Salix alba on bare sediments deposited during flood events.

In the literature, the influence of hydrological patterns as a key factor of the seedlings survival is well documented. Some studies focused on seedlings ability to withstand flood constraints and detailed the effect of duration and intensity of floods but few studies characterized precisely the processes applied on seedlings. As a working hypothesis, we consider that three types of flood stresses can induce mortality of seedlings: (i) uprooting by drag applied on the seedlings without sediment erosion, (ii) erosion of the recruited areas and (iii) burying. The distinction of these three processes allows identifying the importance of survival factors due to a strong sediment dynamics (e.g. erosion height > root height) or to the anchorage and resprouting ability.

The main issues are: what are the governing processes (type and intensity) determining survival or death of seedlings and which factor (fluvial dynamics vs. own characteristics of seedlings) controls their survival?

In-situ measurements were performed on a forced alluvial bar (20.000 m2) to detail the bar dynamics (bathymetry, topography, scour/fill processes, grain size surveys, flow velocity) and to survey the associated recruitment. On 48 plots (1.410 m2) the density, height and species (P. nigra and S. alba) were surveyed the year of recruitment (after dry period) and the next year after flood period.

We highlight the following phases of processes during floods. The erosion of substrate dominates at the beginning of the rising limb. The erosion or uprooting processes depend of the balance between available bed shear stress and sediment size. Then the deposit occurs on the back of the bar before the peak discharge and protects them against uprooting by burying during the higher energy of flow. At the end of the falling limb, sediments are reworked, decreasing the burying height of seedlings and allowing possible uprooting (drag) or erosion of sediments.

Annexe 3 Résumé Colloque Transport Solide, Tours (France)

Contrôle biogéomorphologique de la végétation ligneuse sur une barre sédimentaire alluviale

Wintenberger, C. 1, Rodrigues, S. 1, Bréhéret, J.-G. 1, Villar, M3.

1 Université François Rabelais – Tours, E.A. 6293 GéHCO – GéoHydrosystèmes Continentaux, UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37 200 FRANCE.

3 INRA Orléans UR 0588, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet Cedex, FRANCE.

La végétation ligneuse pionnière (e.g. Populus nigra et Salix spp) est en régression à l'échelle Européenne. Sur la Loire, ces espèces continuent à coloniser les sédiments par reproduction sexuée, engendrant un renouvellement des communautés mais également des problèmes vis-à-vis de l'écoulement en cas de crue. Le développement dans le chenal principal des ligneux pionniers constitue un enjeu écologique et un défi de gestion des systèmes fluviatiles.

Le suivi morphologique et sédimentologique d'une barre forcée de la Loire dans le secteur de Mareau-aux-Près (Loiret) révèle un processus d'amalgamation de traînées sédimentaires lié à la végétation dont résulte la formation de macro-formes topographiquement élevées séparées par un sous-chenal d'écoulement. Les crêtes délimitées par les ruptures de pente préfigurent les berges d'une future île. L'augmentation de l'élévation et le développement du filtre végétal ligneux entrainent une diminution de la capacité de transport sur la barre qui se traduit par un affinement de la médiane (D50) et du percentile grossier (D90) au cours du temps. Ce constat est à moduler en fonction de l'hydrologie. Un gradient amont-aval ainsi qu'un gradient altimétrique s'accentuent avec le développement d'armure à l'amont de la barre et dans les zones topographiques basses comme le sous-chenal.

La comparaison de la surface topographique entre 2007 et 2011 montre un déficit sédimentaire de 3000 m3 localisés dans les zones de végétation éparse et un bilan positif de + 7000 m3 pour les zones densément végétalisées. La comparaison interannuelle permet d'observer des surfaces fortement végétalisées dont le bilan sédimentaire univoque (toujours positif) représente une augmentation du stock de 1400 m3 en 2011. Les résultats des chaînes d'érosion attestent l'absence du processus d'érosion des sédiments malgré des valeurs de forces tractrices critiques inférieures à la force tractrice maximale de la crue survenue à la suite de leur dépôt.

Le site de Mareau-aux-Près fera en 2012 l'objet de travaux de dévégétalisation. Le suivi envisagé permettra d'apprécier (i) l'effet de ce type d'opération sur l'évolution ultérieure de la barre, (ii) sur les ajustements des salicacées recrutées aux contraintes des dynamiques hydrauliques et sédimentaires, (iii) sur les facteurs d'ancrage racinaire au cours des premières années, (iv) et sur les conséquences sur la diversité génétique des populations.

Les objectifs appliqués visent à comprendre l'influence des travaux de gestion sur la dynamique fluviale.

L'approche retenue repose sur des investigations in- et ex-situ. L'étude ex-situ concerne la germination contrôlée en pépinière de peupliers noirs et saules blancs afin d'étudier l'influence de la granularité des sédiments sur la structure et l'architecture racinaire et sur la résistance des semis à la contrainte d'écoulement et d'enfouissement l'année de leur installation. L'étude in-situ s'intéresse au suivi de la dynamique hydro-sédimentaire en crue et à l'étiage mis en parallèle avec le suivi du recrutement et la survie des jeunes plants.

Annexe 4 Résumé Colloque EGU, Vienne (Autriche)

Salix alba and *Populus nigra* seedlings resistance to physical hydro-sedimentary stresses: nursery experimental approach compared to in situ measurements

Wintenberger, C. 1, Rodrigues, S. 1, Bréhéret, J.-G. 1, Jugé, P. 2, Villar, M3.

1 Université François Rabelais – Tours, E.A. 6293 GéHCO – GéoHydrosystèmes Continentaux, UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37 200 FRANCE.

2 Université François Rabelais – Tours, CETU ELMIS, 11 quai Danton, 37 500 FRANCE.

3 INRA Orléans UR 0588, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet Cedex, FRANCE.

In Europe, riparian Salicaceae is declining following the loss of potential germination areas associated with river management. Nevertheless, as an exception for lowland rivers, the Loire River (France) shows in its middle reaches an efficient sexual regeneration of Populus nigra and Salix alba species on bare sediments deposited during flood events.

The study focuses on the influence of flow, sediment dynamics and fluvial maintenance operations on the establishment and survival of black poplar and white willow seedlings during the first year of development in a lowland sandy-gravel river, the Middle Loire. Main questions are: what is the influence of morphological and sedimentary features on seedlings recruitment and how do they withstand the hydro-sedimentary stresses occurring during high flow periods? How fluvial management works, and induced morphology and sedimentary features, modify the sediment dynamics and subsequent establishment and maintenance of seedlings?

To answer these questions, we developed an ex-situ approach which allowed, under controlled conditions, to determine the influence of the sedimentological characteristics of the substrate on the development and maintenance of seedlings with a specific focus on the root system. Three experiments were carried out for three sedimentary mixtures from the river (sand, sand-gravel and 0.2 m of sand superimposed on sand-gravel mixture) that correspond to grain size and stratigraphy conditions often observed on bars and secondary channels in the Loire.

The experimental design includes 108 plots of 1 m3, with 400 seeds per plot (corresponding to the Loire density measurements) and combining seeds from two species, three sedimentary mixtures, four replicates and three experiments. Experiment 1 (control) is based on the architecture of root systems using the WinRHIZO image analysis software. Experiment 2 is relative to the evaluation of constraints leading to “uprooting” of seedlings. Experiment 3 provides data on the seedlings survival once buried during a flood event. Genetic diversity of the seed lots will be investigated via biomass and shoot / root ratio.

Results reveal that willow seedlings have a higher density of roots compared to poplar. In sand mixture, poplar has a taproot system; in sand-gravel mixture, taproot is divided into several roots which leads to a branched root system. The required forces to uprooting are twice much important for sand-gravel mixture.

In situ measurements detail the sediment dynamics and morphological evolution during and after floods (topography, scour/fill processes, grain size surveys, flow velocity, sediment transport rates) on a managed alluvial bar. Results associated with floods occurring after fluvial management works highlight the rapid regeneration of bedforms associated with sedimentary and hydraulics constraints. This leads to the development of new morphological and sedimentological units, suitable for seedlings recruitment. Thirty plots measurements of seedlings (densities and species) established were associated with these news physical conditions over the bar. Black poplar and white willow appeared for a wide range of grain sizes and on specific morphological units. Seedlings survival will be analyzed with regard to physical constraints determined for each plot from measurements of hydro-sedimentary dynamics and then compared to ex situ results.

Annexe 5 Résumé Colloque Hydro-Eco, Renne (France)

The sediment, the black poplar and the beaver: story of the formation process of a mid-channel island in the Middle Loire

WINTENBERGER1 C., VILLAR2 M., RODRIGUES1 S., BREHERET1 J.G.

1GéoHydrosytèmes COntinentaux - UFR Sciences et techniques, Tours, France
2INRA - Centre d'Orleans UR 0588 Amelioration, Genetique et Physiologie Forestieres, Orléans, France

Fluvial island formation process can result from bar stabilization by woody pioneer vegetation which is itself influenced by other local scale parameters such as water availability and quality, sediment transport, uprooting and cutting during floods, by animals or fluvial management works. The aim of this study is to understand the complex influence of parameters influencing vegetation and its feedback on the alluvial island formation of Mareau-aux-Prés, in the River Loire (France) which is subject to incision and intense black poplar (Populus nigra L.) development. Since 2007, measurements performed on a mid-channel bar were carried out annually to detail sediment dynamics and morphological evolution (topographical, scour/deposition and grain size surveys). Height measurements performed together with density and diameter at the alluvial floor, 0.25 m, 0.5 m, 1.2 m and 2 m. Genetic richness was calculated via 10 microsatellite DNA markers with 288 trees' samples on 9 plots of four squares meter (32 per plot). Goals were (i) on one hand to discern vertical and lateral accretion of a mid-channel bar resulting from an amalgamation process of obstacles marks induced by trees, and (ii) on the other hand, to highlight on vegetation's role on sediment retention.

Vegetation's ability to induce sediment deposition and prevent erosion is due to flow resistance during floods. The nveg of Manning-Strickler deducted from Petryk and Bosmajian equation (1975) attests a stronger influence of density of stems on flow resistance rather than diameter in Mareau-aux-Prés. Vegetation data used for nveg calculation was measured at scour chains location in 2010, 2011 and 2012. Locally, the density may be constant or vary up to a factor 100. The density also varies from some stems to hundred stems per square meter from the alluvial floor to the canopy. Two controlling parameters were found to explain these results, namely sediment dynamics and beavers. Coppicing black poplar by beavers stimulates sprouting and growth of news stems inducing denser vegetation close to alluvial floor. Sediment deposition, up to 0.8 m, can bury stems and branches, or only cuttings and branches come out of alluvial floor. A high degree of clonality (genetic richness of 0.58 to 0.96) and the height/diameter ratio attest this coppicing process. For higher trees (2.25 m average), the diameter is correlated to the height whereas small trees (0.51 m average) aren't due to coppicing. Decreasing density can be explained by a sediment deposition which buried entirely some coppicing trees that beavers cut.

Annexe 6 Résumé Colloque ICSF, Leeds (UK)

The key role of pioneer woody vegetation in mid-channel bar metamorphosis to island: case study from the River Loire (France)

C. Wintenberger[1], S. Rodrigues[1], M. Villar[2] and J.G. Bréhéret[1]

[1] E.A 6293 GéHCO - GéoHydrosytèmes Continentaux, Faculté des Sciences et Techniques, Université François Rabelais, Parc de Grandmont, F-37200 Tours, FRANCE, coraline.wintenberger@etu.univ-tours.fr

[2] INRA, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, Orléans, France. marc.villar@orleans.inra.fr

1. Introduction

In the middle reaches of the Loire River, human activities have accelerated the incision process which caused severe morphological evolution of the river (e.g. disconnection of adjacent floodplain areas and alluvial bars). As a consequence, bars can be affected by a strong development of woody pioneers trees which trigger sediment accretion and fixing.

The conceptual model of alluvial island's proposed by Gurnell et al. (2001), highlights the key role played by vegetation in this process; nevertheless the vertical sediment deposition rates affecting islands during their first stage of development remains unknown. In other words, investigations detailing the first stage of development and involving woody pioneer trees are missing. This issue, which concerns initial island growth and rhythm of sediment archiving involving vegetation, is of key importance for fundamental aspects in both modern and ancient fluvial systems (Gibling and Davies, 2012). From an applied point of view, such studies are of interest for fluvial management, providing information on the intervention time scales and practices, especially in the management of flood water level.

The study site of Mareau-aux-Prés (France), located 10 km close to the city of Orléans, is an island and bar network developed downstream of a natural limestone riffle. The presence of this natural riffle is explained by intense sediment mining in this area which stopped in years 1990's. Downstream of the riffle, a 20 000 m² sandy-gravelly bar developed between 2003 and 2005; this bar was rapidly colonized by woody pioneer vegetation, mainly *Populus nigra* L. This paper will focus on the control exerted by the vegetation during the first stage of development of this bar.

2. Materials and methods

2.1 Morphological and sedimentological surveys

The topography of the bar was surveyed together with scour-fill processes on annual basis by measurements performed since 2007 to 2012.
Detailed topography was recorded according to10 m spaced cross sections using a DGPS and enriched with a set of spatial points, characterizing slope break. Data were integrated in a GIS software (ArcGIS 9) and 1 m mesh digital elevation models were created using the spatial analyst extension of ArcGis.
Scour chains were inserted into the river bed to measure the active layer of sediments stored on the bar.
Annual bulk samples were taken at each scour chain location. Grain size analyses were performed using dry sieving in order to quantify the critical shear stresses on the bar.

2.2 Physical parameters and mapping of vegetation

Density, maximal and minimal height and diameters were surveyed on 2 x 2 m plots centered on each scour chain location. Diameter for the smallest was measured on 0.1 m whereas for the largest, measure was Diameter Breast Height (DBH).
The Manning-Strickler roughness coefficient (n_{veg}) was calculated using the Petryk and Bosmajian (1975) equation for non-submerged vegetation:

$$n_{veg} = Rh^{2/3}\sqrt{\frac{C_d + \sum A_i}{2gAL}} \qquad (1)$$

where n_{veg} vegetation roughness, R_h hydraulic section assimilated to depth (m), C_d drag coefficient (equal to 1), $\sum A_i$ sum of areas of trees projected onto the wet section, g gravity ($m.s^{-2}$), A wetted section (m^2), L unit length of the study reach (m).

Cartography of *P. nigra*, based on dominance-abundance coefficient of Braun-Blanquet and evaluated with the percentage of recovery (Combroux *et al*, 2002), was realized with GPS and integer on GIS.

2.3 Hydrology and hydraulic parameters

Flood intensity, duration and frequency as well as submersion periods of the bar were evaluated using the data of the gauging station of Orleans located 10 km upstream. Water surface elevations, measured by DREAL Centre, allowed us to calculate depth of flow on the bar.

3. Results

3.1 Morphological evolution

Between 2007 to 2012, vertical accretion was observed on three morphological units with more than 1 m in some areas. These units were also characterized by lateral expansion. Different sediment deposition rates in a same morphological unit were recorded and shown to vary from simple to double.
Slopes, delimiting these units, are increasing from upstream to downstream while the top of these units tend to flatten out.
Formation of three islands, separated by a perennial sub-channel with initial bar elevation, is identified.

3.2 Sediment budget during floods

Since 2007, on the bar studied, about 7000 m^3 deposit of sediments occurred while 3000 m^3 were eroded. Areas with univocal process, fill (2000 m^3) or scour (40 m^3), were clearly identified and associated with the vegetated areas for deposition and sub-channel.
Scour chain results present some areas with no erosion whereas critical shear stress calculated with D_{90} was lower than shear stress during flood events. These are observed on vegetated area and sub-channel.
Areas of major sediment deposition varied from one year to the other.

3.3 Temporal grain size evolution and critical threshold for sediment motion

Spatial grain size distribution is organized according to a downstream and vertical fining which increased with time. D_{90} of sediments present in the vegetated areas and in the sub-channel were clearly different but they both have decreasing values with time..

3.4 Flow resistance induced by vegetation

For n_{veg} values < 0.017, resistance to the flow exerted by vegetation is correlated to diameters; while for n_{veg} values up to 0.03, density is the most important parameter.

4. Discussion and conclusions

The aim of this study was to understand the first stage of island edification and transformation time from an alluvial bar. Four morphologic units were identified: 3 vegetated islands and a sub-channel.
The three vegetated islands result of a combination of processes. On one hand, the morphology of the study reach contributes to sediment deposition since these units are located downstream a natural riffle (lee effect). This is also favourable for seed deposition and for sprouting of black poplars. According to the engineer species concept (Corenblit et al., 2011) pioneer woody vegetation participates to sedimentological processes and improves environmental conditions for their survival.
This concept is translated as a positive feed-back on sediment deposition rates observed in this study. More specifically, vegetation creates obstacles marks (Euler and Herget, 2011) which widen, grow and finally merge (Rodrigues *et al.*, 2007). Vegetation roughness induces a decrease in sediment transport capacity which contributes to rapid vertical accretion, and fining of trapped sediments (quantity of bedload sediment decreases relatively to suspended sediments). Moreover, vegetation increases threshold of sediment motion as a protection against erosion (McKenney et al., 1995).
Nevertheless, direct link between vegetation roughness and sediment deposition rates was not shown. We assume that the sediment supply coming from the main channel is of key importance to explain the sediment trapping by the vegetated filters. Further investigations, namely bathymetrical and flow dynamics surveys, will be carried out in this sense on the study site in the future.

Acknowledgments

This study is part of the Ph.D. thesis of the first author and is funded by the Master Plan Loire Grandeur Nature - FEDER (Presage n°34971), AELB (n° 2011C008), EPL (11-DR-RD-015) and Région Centre. Michel Chantereau and RN Saint-Mesmin are acknowledging for their help.

References

Combroux, I., Bornette, G., Amoros, C. **(2002) Plant regenerative strategies after a major disturbance : the case of a riverine wetland restoration.** ***Wetlands*****, 22, 234-245.**

Euler, T., Herget, J. (**2012) Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments.** ***Catena*****, 91, 35-46.**

Giling, M.R., Davies, N.S. (2012) **Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution.** ***Nature Geoscience*****, 5, 99-105.**

Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V., Tockner, K. (**2001) Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy.** ***Earth Surface Processes and Landforms*****, 26, 31-62.**

McKenney, R., Jacobson, R.B., Wertheimer, R.C. **(1995) Woody vegetation and channel morphogenesis in low-gradient, gravel-bed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas.** ***Geomorphology*****, 13, 175-198.**

Petryk, S. et Bosmajian, G. **(1975) Analysis of flow through vegetation.** ***Journal of the Hydraulics Division*****, 101, 871-884.**

Rodrigues, S., Bréhéret, J.G., Macaire, J.J., Greulich, S., Villar, M. **(2007) In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire, France.** ***Sedimentology*****, 54, 223-242.**

Annexe 7 Résumé Colloque ISRivers, Lyon (France)

Rôle clé de la végétation ligneuse pionnière dans la métamorphose des barres sédimentaires en île : cas de la Loire (France)

The key role of pioneer woody vegetation in mid-channel bar metamorphosis to island: case study from the River Loire (France)

Coraline Wintenberger1, Stéphane Rodrigues1, Marc Villar2, Jean-Gabriel Bréhéret1.

1 Université François Rabelais—Tours, CNRS/INSU, UMR 6113 Isto, équipe de Tours, Faculté des Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37 200 Tours, France (coraline.wintenberger@laposte.net ; srodrigues@univ-tours.fr). 2 INRA, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet Cedex, France (marc.villar@orleans.inra.fr).

1. INTRODUCTION

L'évolution morphologique récente de la Loire, notamment l'incision accélérée de son lit liée aux aménagements et usages, ont eu de nombreuses conséquences socio-environnementales imposant aujourd'hui une réflexion sur les axes de gestion de ce système fluvial. Les barres sédimentaires en sont une composante dont la formation est propice à l'installation et développement de la végétation ligneuse pionnière comme les S*alicaceae* facilitant leur transformation en île végétalisée. A ce titre, l'étude des mécanismes de construction, des vitesses d'archivage et de transformation des barres sédimentaires en île en lien avec la végétation, au-delà de présenter des réponses à un questionnement fondamental, offre des informations sur les échelles de temps d'intervention, spécialement dans le cadre de la gestion de la ligne d'eau de crue. Le site de Mareau-aux-Près, localisé 10 km à l'aval d'Orléans, est un complexe d'îles et de chenaux secondaires développés à l'aval d'un seuil naturel de calcaires résistants. Ce secteur a connu une incision jusqu'à l'arrêt des extractions de granulat en lit mineur, depuis un exhaussement de la ligne d'eau est observé. Une barre sédimentaire sablo-graveleuse à granularité étendue s'est formée au sein de cette configuration morphologique et fait l'objet de la présente étude.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Suivi morphologique et sédimentologique

Ce suivi s'est concentré sur l'étude de l'évolution en plan et en coupe de la topographie et sur les processus d'érosion-dépôt à un pas de temps annuel. La topographie a été suivie selon des profils transversaux espacés de 10 m avec une station totale, puis par GPS différentiel. Ce levé est enrichi par l'enregistrement de semis de points caractérisant les ruptures de pentes. A partir de ces données intégrées à un SIG (ArcGis), des modèles numériques d'altitude (MNA) de maille 1 m ont été construits par triangulation pour réaliser des bilans de stocks sédimentaires. Des chaînes d'érosion implantées dans le plancher alluvial ont permis de connaître la dynamique des processus érosion-dépôt sur la barre. Les sédiments ont été prélevés annuellement au droit des chaînes d'érosion en surface. Les histogrammes de distribution et courbes des fréquences cumulées ont été réalisées par tamisage à sec Ro-Tap et les paramètres granulométriques classiques lus et calculés ont été extraits (D50, D10, D90, déviation standard, asymétrie, grain moyen). Les forces tractrices critiques nécessaires à la mise en mouvement ont été estimées à partir des D50 et D90 grâce à l'application du critère adimensionnel de Shields.

2.2 Analyse et cartographie de la végétation

Au droit des chaînes d'érosion, sur des quadrats de 2m/2 m, le nombre de tiges sortant du plancher alluvial a été compté, la taille et le diamètre des cinq plus petits et cinq plus grands individus mesurée, respectivement à 0,1 m et 1,2 m de hauteur. Le coefficient maximal de rugosité de la végétation de Manning Strickler est calculé à partir des diamètres des plus grands individus et de la densité d'implantation. Tous les individus sont issus d'une même année d'implantation et ont donc le même âge. La cartographie de la végétation a été réalisée par pourcentages de recouvrements obtenus à partir du coefficient d'abondance-dominance de Braun-Blanquet, relevés avec le GPS et intégrés sous SIG.

2.3 Paramètres hydrologiques et hydrauliques

Les débits journaliers enregistrés à la station d'Orléans, ont permis d'évaluer l'intensité, la durée des crues et le temps de submersion de la barre. Les lignes d'eau fournies par la DREAL Centre donnent la hauteur d'eau en chacun des points de la barre assimilable au rayon hydraulique. Le rayon hydraulique obtenu à partir des lignes d'eau de module et de crue est utilisé pour le calcul de la force tractrice (équation générale) pour des débits caractéristiques.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Evolution morphologique

Quatre unités morphologiques ont été identifiées : 3 îlots et un sous-chenal. Les îlots résultent de la formation et fusion de figures d'obstacles. Les pentes les délimitant s'accentuent dans le temps depuis l'aval vers l'amont et la surface topographique s'aplanie au cours du temps.

Ce résultat diffère d'autres observations faites en Loire moyenne au sein de chenaux secondaires (Rodrigues *et al.*, 2007). Cette différence peut être associée à un contexte morphologique différent et au stade de maturité de la communauté végétale en place et de la barre étudiée. L'évolution n'est pas uniforme et les vitesses d'accrétion varient longitudinalement et latéralement en fonction de la quantité et de la direction apports solides par le chenal principal.
En plan, une augmentation de l'emprise spatiale des altitudes les plus élevées est observée. En 2007, le sommet de la barre culmine à plus de 84,9 m et représente 4,5 % de la surface étudiée contre 41 % en 2011. L'emprise spatiale des basses altitudes quant à elle ne varie pas. En coupe, le taux d'accrétion verticale le plus élevé est de 0,9 m en 5 ans avec une épaisseur déposée annuelle variable. Sur le même profil et la même unité, une seule phase d'accrétion de 0,4 m est enregistrée entre 2008 et 2009. Le sous-chenal présent sur la barre est une zone de transit de sédiments dont la topographie reste stable à une échelle pluriannuelle.

3.2 Quantification des stocks sédimentaires

La comparaison des modèles numériques d'altitude (MNA) de 2007-2011 donne un bilan de 3037 m^3 de sédiments érodés et 6859 m^3 déposés. Des zones à processus univoque, dépôt (2082 m^3) où érosion (40 m^3) ont été clairement identifiées et sont respectivement localisées sur les îlots et dans le sous-chenal où en amont de la barre.
Deux dynamiques hydrosédimentaires sont identifiées en fonction des intensités de crues. Les années à faible intensité de crue (<1100 $m^3.s^{-1}$), les hauteurs (volume/surface) de sédiments sont similaires (0,1 m) pour les deux processus. Les années à forte intensité de crue (>1500 $m^3.s^{-1}$), les hauteurs déposées (0,2 m) sont deux fois plus grandes que celles érodées (0,1 m).

3.3 Distribution granulométrique

La distribution spatiale de la granularité des sédiments s'organise selon un gradient amont-aval et altimétrique, qui s'accentue au cours du temps. A partir des valeurs de D_{90} deux populations sont identifiées, correspondant aux prélèvements dans le sous-chenal où en bordure d'îlot et sur les îlots. Pour ces deux populations, la valeur des D_{90} diminue sensiblement au cours du temps avec l'exhaussement du système par rapport aux chenaux environnants. L'accrétion rapide de la barre sédimentaire diminue la capacité de transport, engendre un affinement du stock sédimentaire piégé (diminution charriage, augmentation relative des sédiments issus de la suspension/saltation) et renforce le gradient granulométrique amont-aval.

3.4 La végétation comme frein à l'écoulement

Pour une population de végétation ligneuse de même âge, lorsque le coefficient de résistance à l'écoulement est faible (< 0,017), la résistance est mieux corrélée au diamètre des individus ; lorsqu'ils sont forts (> 0,03), elle est mieux corrélée à la densité d'implantation. Le double rôle de piège et stabilisateur de la végétation (McKenney *et al.*, 1995) par protection contre l'érosion est mis en évidence mais les taux de piégeage et les vitesses d'accrétion ne semblent pas corrélés uniquement à la résistance du filtre végétal mais également aux axes de charriage en provenance du chenal principal. Les résultats de chaînes d'érosion montrent une limite à l'utilisation du critère adimensionnel de Shields dans les zones végétalisées.

4 CONCLUSION

Cette étude a permis d'étudier les mécanismes des premiers stades de transformation d'une barre sédimentaire de centre de chenal en île en lien avec les *Salicaceae* dont le double rôle et l'effet de massif ont été mis en évidence. Au-delà de la compréhension des processus, elle a aussi permis de quantifier les vitesses de transformation et notamment celle d'accrétion, processus dominant.

Gurnell, A.M., Petts, G.E., Hannah, D.M., Smith, B.P.G., Edwards, P.J., Kollmann, J., Ward, J.V., Tockner, K., 2001. *Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy*. Earth Surface Processes and Landforms 26 : 31-62.

McKenney, R., Jacobson, R.B., Wertheimer, R.C., 1995. *Woody vegetation and channel morphogenesis in low-gradient, gravel-bed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas*. Geomorphology 13 : 175-198.

Rodrigues, S., Bréhéret, J.G., Macaire, J.J., Greulich, S., Villar, M., 2007. *In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire, France*. Sedimentology 54 : 223-242.

Annexe 8 Résumé Colloque ASF, Paris (France)

PROCESSUS DE REMISE EN MOUVEMENT D'UNE BARRE ALLUVIALE DANS UNE RIVIERE SABLO-GRAVELEUSE

Coraline WINTENBERGER(1), Stéphane RODRIGUES(1), Jean-Gabriel BREHERET(1), Philippe JUGE(2), Marc VILLAR(3)

(1) E.A 6293 GéHCO - GéoHydrosytèmes Continentaux, Faculté des Sciences et Techniques Université François Rabelais, Parc de Grandmont, 37200 Tours
(2) CETU Elmis Ingénieries, Université François Rabelais, 11 quai Danton 37500 Chinon
(3) INRA-Centre d'Orléans UR0588 Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, 2163 Avenue de la Pomme de Pin CS 40001 Ardon F-45075 ORLEANS
coraline.wintenberger@etu.univ-tours.fr

La Loire moyenne arbore un style à chenaux multiples caractérisé par la présence de chenaux secondaires et barres sédimentaires influencés par les activités humaines (*e.g.* endiguement, extraction de sédiments). Elles ont pour effet l'accélération du processus naturel d'incision, la déconnexion des annexes hydrauliques et leur végétalisation. La fixation par les végétaux d'une partie du stock alluvial entretient cette tendance. Afin d'enrayer l'incision du chenal principal, des travaux sont entrepris pour permettre la remobilisation des sédiments en crue. Les processus de remobilisation des barres sédimentaires, après travaux, sont mal connus et justifient la conduite d'investigations de terrain. La présente étude s'attache à comprendre la remobilisation sédimentaire, suite à des travaux, d'une barre de centre de chenal (2 ha), localisée à l'aval d'Orléans.

Deux levés topographiques de 0,2 points/m² (pré- et post-crue) ont permis de connaître l'évolution morphologique du site. Des sédiments localisés au droit de chaînes d'érosion ont fait l'objet d'analyses granulométriques. Seize campagnes de mesures combinant bathymétrie mono- et multi-faisceaux, courantométrie et prélèvements de sédiments ont été réalisées en crue. L'épaisseur du remplissage et la structure interne de la barre ont été mesurées avec un géo-radar (GPR).

La morphologie pré-crue, héritée des travaux, se caractérise par une topographie en sillon. Les sédiments sablo-graveleux sont mal triés (D_{50} = [0,5-17,8] mm ; D_{90} = [1,3-54,4] mm). Les données bathymétriques à haute résolution temporelle attestent une remobilisation effective dès la première crue après travaux (H_{eau} = [0,6-1] m). Les processus de mise en mouvement s'observent à l'échelle de la barre (macro-forme) et des méso-formes (dunes).

Un étalement longitudinal de la barre rythmé par l'hydrologie et une déformation de l'angle du front de progradation sont perceptibles. L'avancée du front s'observe en montée de crue et en décrue alors que son recul uniquement à la décrue. L'amplitude et la fréquence des crues modulent la morphologie de la barre (pente et forme). A l'aval, l'altitude de la barre varie sur 1 m de hauteur sous l'effet de la migration de dunes superposées. L'absence de dunes dans la zone amont explique une faible évolution altimétrique. Les dunes s'observent pour des débits de 400-2000 $m^3.s^{-1}$ sur un linéaire amont-aval évoluant au gré des épisodes hydrologiques suivis. La taille des dunes, calculée avec le code *Bedform Tracking Tool (*Van der Mark *et al.*, 2008), varie en hauteur (H_D = [0,1-0,8] m) et en longueur (L_D = [0,6-8] m). Les dunes ont un *steepness* (H_D/L_D), dont une valeur supérieure à 0,06 est associée aux dunes à l'équilibre (Carling, 2000), compris entre 0,05 et 0,16. Les taux de charriage calculés à partir du *dune tracking* (Simons *et al.*, 1965) et la résistance associée aux dunes permettent de déterminer l'éventuelle présence d'hystérèse du transport solide.

Carling PA, Gölz E, Orr HG, Radecki-Pawlik A. 2000. *The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany*. I. Sedimentology and morphology. Sedimentology, 47: 227-252.
Simons, D.B., Richardson, E.V., Nordine, C.F. 1965. *Bedload equation for ripples and dunes*, US Geological Survey Professional Paper 462-H.
Van Der Mark CF, Blom A, Hulscher SJMH. 2008. *Quantification of variability in bedform geometry*. J. Geophys. Res. 113: F03020.

Annexe 9 Fascicule de valorisation du PLNG III

Evaluation de l'influence de la dynamique hydro-sédimentaire et des travaux d'entretien du lit sur la survie des populations au stade juvénile de *Populus nigra* L. et *Salix alba* en Loire Moyenne

Coraline Wintenberger,
coraline.wintenberger@etu.univ-tours.fr
E.A 6293, GéoHydrosytèmes Continentaux, Université François Rabelais de Tours
Université François Rabelais de Tours
EMSTU
01/12/11
Défi 4 – Evaluer et favoriser l'adaptation aux changements globaux des forêts, prairies et milieux aquatiques
CT3 – Adaptation des organismes et des populations à leurs milieux

Les modifications des systèmes fluviaux affectent le renouvellement des populations de peuplier noir (*Populus nigra* L.) et de saule blanc (*Salix alba*) en diminuant les espaces potentiels de germination.
En Loire Moyenne, en conséquence directe de l'incision du fleuve, ces espèces se développent dans les annexes hydrauliques et fixent les sédiments, entrainant une banalisation écologique et une augmentation du niveau de la ligne d'eau de crue. En réponse à cette colonisation du milieu, des actions de dévégétalisation sont entreprises régulièrement par les services gestionnaires de l'Etat. Cependant, il n'existe pas ou peu d'information de l'impact réel des pratiques sur la dynamique hydro-sédimentaire ainsi que sur les espèces précitées.
La présente étude vise à apporter des connaissances sur (i) l'adaptation du système fluvial aux pratiques d'entretien réalisées sur les sédiments, (ii) l'adaptation de *P. nigra* et *S. alba* au stade juvénile aux contraintes physiques de l'écoulement (solide + liquide), (iii) l'impact de la gestion sur le renouvellement des populations de ces espèces, sur leur diversité génétique et sur le lien entre structure sédimentaire et microstructuration spatiale.
Afin de répondre aux différents objectifs déterminés, trois axes principaux de recherche sont définis :
- Impact des pratiques sur la remobilisation des stocks sédimentaires ;
- impact des travaux d'entretien sur le renouvellement des populations de *Salicaceae* ;
- impact des contraintes sur l'installation et le maintien des nouveaux semis.

Des expérimentations *ex situ* sont menées sur des semis de ces deux espèces pour comprendre l'influence de la structure sédimentaire et de la granularité, spécifique des unités morphologiques de Loire Moyenne, dans l'ancrage racinaire et quantifier la résistance des semis aux contraintes hydrauliques et sédimentaires.
In situ, les processus hydro-sédimentaires sont étudiés pour des sites perturbés et les évolutions morphologiques et sédimentologiques sont observées pour des sites témoin sur lesquels des semis de *P. nigra* et *S. alba* sont suivis (densité, ramification, hauteur).

Mots clés
Dynamique hydro-sédimentaire, *salicaceae*, dynamique des populations, gestion des milieux, ancrage racinaire

Directeurs de thèse :
Jean-Gabriel Bréhéret et Stéphane Rodrigues E.A 6293, GéoHydrosytèmes Continentaux, UFR Sciences et techniques, Université François Rabelais de Tours ;
Marc Villar, INRA, UR0588 Centre d'Orléans Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières.

Coraline WINTENBERGER

Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse

Thèse financée au titre du volet RDI du Plan Loire Grandeur Nature 2007-2013, et avec le soutien du fond européen de développement régional

Résumé

La présente analyse est ciblée sur la transition entre les **phases géomorphologiques, pionnières et biogéomorphologiques** décrites par le concept de succession biogeomorphologique fluviale d'une **rivière sablo-graveleuse de plaine**, la Loire moyenne. L'étude se focalise sur la **reproduction sexuée et la survie** (dans leur premiers stades, au cours des crues) de deux espèces de Salicacées : ***Populus nigra* L. et *Salix alba* L. sur une barre sédimentaire et repose sur des approches in- et ex-situ**. La dynamique hydro-sédimentaire d'une barre forcée influence le potentiel de survie des semis des ligneux pionniers. Les semis présentent des adaptations morphologiques différentes en fonction des conditions sédimentaires de germination modulant leur **potentiel de survie**. Trois modèles conceptuels sont proposés : (i) **dynamique d'une barre forcée** en crue, (ii) évolution longitudinale des **processus de mortalité des semis** selon le granoclassement amont-aval, (iii) vitesse d'évolution d'une **barre forcée vers une île pionnière** initiée par l'installation de semis de ligneux pionniers et archivage sédimentaire associé dans une rivière sablo-graveleuse de plaine.

Mots clés : Biogéomorphologie fluviale, *Populus nigra*, *Salix alba*, reproduction sexuée, barre forcée, île pionnière.

Résumé en anglais

The present study is focused on the three first stages: **geomorphic, pioneer and biogeomorphic** of the Fluvial Biogeomorphological Succession applied to a **sandy-gravel bed lowland river**: the Loire River (in its middle reaches). This work is based on both an *in* and *ex situ* approach. It analyses the **recruitment and survival during their first stages** of growth of two Salicaceae trees: ***Populus nigra* L. and *Salix alba* L. developed on a non-migrating (forced) bar.** The dynamics of this bar influences the survival potential of seedlings during floods. The seedlings adapt morphologically according to the sedimentary structure, and as a consequence, modify their survival potential. Three conceptual models detail: (i) the **dynamics of a mid-channel forced bar** during floods, (ii) the longitudinal evolution of the **mortality of seedlings** induced by the downstream fining of sediments, (iii) the sediment archiving and time needed to **reach a pioneer island state** from a non-migrating vegetated bar.

Keywords: fluvial biogeomorphology, *Populus nigra*, *Salix alba*, sexual reproduction, forced bar, pioneer island.