



**HAL**  
open science

# **INVAPROM Espèce végétale invasive et production de matière organique dans une annexe de l'hydrosystème Loire**

Catherine Boisneau, B. Ruaux, N. Richard

## ► **To cite this version:**

Catherine Boisneau, B. Ruaux, N. Richard. INVAPROM Espèce végétale invasive et production de matière organique dans une annexe de l'hydrosystème Loire. [Rapport de recherche] Université de Tours. 2011. ⟨hal-02175548⟩

**HAL Id: hal-02175548**

**<https://hal.science/hal-02175548v1>**

Submitted on 5 Jul 2019

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

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



HAL Authorization

# INVAPROM

Espèce végétale invasive et production  
de matière organique dans une annexe  
de l'hydrosystème Loire

C. Boisneau, B. Ruaux, N. Richard

Université de Tours CITERES

2011



# Sommaire

<b>Sommaire .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Matériel et méthodes.....</b>	<b>6</b>
2.1 Site d'étude .....	6
2.2 Mesures et analyses communes aux trois questions .....	8
2.2.1 Suivi physicochimique en continu.....	8
2.2.2 Prélèvements et analyses d'eau .....	9
2.2.3 Détermination de la masse sèche, de la matière minérale et des quantités de carbone et azote des végétaux.....	11
2.3 Analyses spécifiques aux trois questions .....	12
2.3.1 Question 1 : identifier et quantifier la part des jussies dans la production de matière organique <i>in situ</i> .....	12
2.3.2 Question 2A : quantifier la dégradation des feuilles et tiges hors période de végétation et sur long terme .....	13
2.3.3 Question 2B : quantifier la dégradation des feuilles de l'année en cours...15	
<b>3 Traitements statistiques .....</b>	<b>17</b>
<b>4 Résultats .....</b>	<b>19</b>
4.1 Débit de la Loire à Langeais .....	20
4.2 Fonctionnement physicochimique de l'annexe.....	21
4.2.1 Au cours de la déconnexion.....	21
4.2.2 Au cours des connexions/déconnexions .....	27
4.3 Question 1 : identifier et quantifier la part des jussies dans la production de matière organique <i>in situ</i> .....	34
4.3.1 Calendrier des relevés de terrain .....	34
4.3.2 Variables abiotiques .....	34
4.3.3 Phénologie de <i>L. grandiflora</i> .....	36
4.3.4 Domaine de vitalité : chlorophylle a et phéopigment .....	37
4.3.5 Article sur la production de matière organique.....	38
4.4 Question 2A : Quantifier la dégradation des feuilles et tiges hors période de végétation .....	51
4.4.1 Calendrier des relevés de terrain .....	51
4.4.2 Perte de masse des feuilles et tiges.....	51

4.4.3	Teneur en matière organique .....	52
4.4.4	Évolution des teneurs en carbone et azote des feuilles et tiges de <i>L. grandiflora</i> .....	53
4.4.5	Évolution des communautés de macroinvertébrés .....	54
4.4.6	Discussion sur la dégradation des feuilles et tiges de l'année précédente .	56
4.5	Question 2B : quantifier la dégradation des feuilles lors de la période de végétation .....	58
4.5.1	Calendrier des relevés de terrain .....	58
4.5.2	Pertes de masse des feuilles après 28 jours .....	58
4.5.3	Teneurs en matière organique des feuilles .....	59
4.5.4	Teneurs en carbone et azote des feuilles.....	60
4.5.5	Évolution des communautés de macroinvertébrés .....	60
4.5.6	Discussion sur la dégradation des feuilles de l'année .....	62
<b>5</b>	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Communications écrites et orales du projet.....</b>	<b>66</b>
6.1	Présentation EPL, mai 2009 .....	66
6.2	Présentation orale lors du colloque ECOVEG 6, 31 mars au 2 avril 2010.....	66
6.3	Présentation orale lors du colloque Ecologie 2010, 2-4 septembre 2010 .....	67
6.4	Présentation affichée lors du colloque Ecologie 2010, 2-4 septembre 2010.....	68
6.5	Présentation affichée lors du séminaire ONEMA-CEMAGREF, 12-14 octobre 2010 .....	69
6.6	Présentation orale EPL, 24-25 mai 2011 .....	70
	<b>Liste des sigles et abréviations.....</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>72</b>
	<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>75</b>
	<b>Liste des figures .....</b>	<b>76</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>80</b>

# 1 Introduction

Les deux principales sources d'énergie des écosystèmes continentaux sont l'énergie solaire et la matière organique. Dans un cours d'eau, les radiations solaires sont à l'origine de la production primaire produite *in situ*. La matière organique est en grande partie allochtone et provient des parties supérieures du cours d'eau ou des écosystèmes terrestres adjacents. Elle se présente sous trois formes, la matière organique grossière (CPOM), la matière organique fine (FPOM) et la matière organique dissoute (DOM) (Allan and Castillo 2007 ; Giller and Malmqvist 2006). La contribution relative de ces ressources change le long du continuum amont-aval et dans la mosaïque des ensembles fonctionnels d'une plaine alluviale (Vannote et al. 1980). Les apports de matière organique présentent également une dynamique saisonnière en lien avec la phénologie des végétaux (McDowell and Fisher 1976) avec un maximum à l'automne.

La dégradation de la matière organique, notamment des feuilles d'arbres ou des morceaux de macrophytes, passe par plusieurs étapes. Dans un premier temps, un mouillage des feuilles conduit à la perte de la matière organique dissoute, pour environ 5 à 25% de la biomasse (Webster and Benfield 1986). La deuxième phase est due à une activité microbienne et fongique (hyphomycètes). Ces organismes attaquent et décomposent les composés végétaux, notamment la lignine, la cellulose, les polyphénols et d'autres composés carbonés. Leur activité est fonction de la température, de la vitesse du courant et de la disponibilité en nutriments dans la colonne d'eau. Une concentration élevée en nutriments et une température élevée accélèrent l'activité microbienne (Baldy et al. 2007 ; Bärlocher et al. 2008 ; Elwood et al. 1981; Gonçalves et al. 2007 ; Tank and Webster 1998 ; Tank et al. 1993). Le taux de décomposition des feuilles de végétaux est fonction de l'espèce végétale et notamment de son rapport C/N. Les espèces à faible rapport C/N ont un taux de décomposition plus élevé, ainsi les macrophytes sont plus rapidement décomposés que les espèces ligneuses (Allan and Castillo 2007 ; Giller and Malmqvist 2006).

Ce n'est que lorsque les microorganismes et les champignons ont commencé leur décomposition que les invertébrés déchetteurs peuvent consommer les feuilles. En effet, l'hydrolyse enzymatique opérée par les microorganismes et les champignons rend les végétaux assimilables pour les invertébrés qui contribuent, à leur tour, pour 25 à 40% du taux de décomposition de la matière organique grossière (Webster and Benfield 1986). De nombreuses études ont montré que les communautés biologiques régulent d'importants processus écologiques comme la production, la décomposition, ... et que des

changements dans la composition des communautés peuvent altérer la structure et le fonctionnement des écosystèmes (Naeem et al. 1994 ; Petchey et al. 2004). Ainsi, dans certains cours d'eau, la composition des communautés et la richesse en déchetes, plus que leur abondance, sont positivement corrélées avec le taux de décomposition de la litière (Dangles and Malmqvist 2004; Jonsson et al. 2001 ).

Dans une plaine alluviale, la mosaïque des ensembles fonctionnels et le gradient de connexion avec le chenal principal conduisent à une hétérogénéité spatiale de la matière organique et à des dynamiques saisonnières variées. Dans les ensembles partiellement connectés, la dynamique des apports est liée à la phénologie des végétaux environnants, aux herbiers s'y développant mais aussi aux imports et exports, eux-mêmes liés à la dynamique hydrologique. En Loire moyenne, l'incision du lit associée à une modification du régime thermique et hydrologique (Boisneau et al. 2008 ; Moatar and Gailhard 2006) contribuent à augmenter la durée de déconnexion de ces ensembles et ainsi à réduire la circulation de la matière organique. On peut donc supposer que les bras temporairement connectés le seront de moins en moins fréquemment, de moins en moins longtemps et fonctionneront avec une part de matière organique produite *in situ* de plus en plus importante. La colonisation des annexes hydrauliques par diverses plantes exotiques comme les jussies (*Ludwigia* spp.) et la forte production de biomasse de ces espèces, jusqu'à 4,5 kg de matière sèche/m<sup>2</sup> dans les une annexe d'un cours d'eau eutrophe (Lambert et al. 2010), devrait encore renforcer l'abondance de la matière organique d'origine macrophytique *in situ*. Or, les flux de matière et d'énergie peuvent être perturbés par les espèces invasives qui modifient les structures d'habitat et influencent la composition des communautés benthiques (Thompson and Townsend 2003). Le fonctionnement de ces annexes est donc fortement susceptible d'être modifié en allant dans le sens d'un fort dépôt de matière organique et donc à moyen terme d'un comblement plus rapide.

Le projet INVAPROM a pour objectif de mesurer l'impact des jussies appartenant à l'espèce *Ludwigia grandiflora* spp. *hexapetala*, espèce végétale invasive, sur la production de matière organique dans une annexe de l'hydrosystème Loire, ce qui a été peu étudié en grand cours d'eau. Il s'articule autour de deux questions, la première (Q1), relative à la production de matière organique, vise à identifier et quantifier la part des jussies dans la production de matière organique *in situ*. L'hypothèse selon laquelle la biomasse de jussie constitue la majeure partie de la matière organique (MO) au sein de l'annexe, sera notre hypothèse de départ. Nous prévoyons également une accumulation de cette MO.

La seconde question traitera de la fonction de dégradation de la matière organique par les communautés d'invertébrés déchetiers, également *in situ*. Nous supposons que le taux de dégradation de la MO et que les densités d'invertébrés déchetiers augmentent avec les densités de jussie. La quantification de l'activité de dégradation de la matière organique par les invertébrés déchetiers est faite en deux temps. L'expérience A a pour objectif de quantifier la dégradation des feuilles et tiges de l'année précédente (Q2A) tandis que l'expérience B a pour objectif de quantifier la dégradation des feuilles de l'année en cours (Q2B).

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Site d'étude

Le site d'étude retenu est une annexe hydraulique, localisée en Loire moyenne, à Bréhémont à une quarantaine de kilomètre en aval de Tours. En tant que site de référence du Plan Loire Grandeur Nature, elle a été l'objet de nombreuses études notamment sédimentologiques, floristiques, hydrobiologiques et paysagères.

L'annexe est située en rive gauche de la Loire entre la levée et les îles de la Ferrandière, Chevrou, Gouiller et Buisson (Figure 1). Ce bras est connecté au bras principal de la Loire lorsque les débits à Langeais dépassent les  $550 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Rodrigues 2004). Ainsi, à l'étiage, il se trouve déconnecté et est constitué d'une succession de fosses temporaires ou permanentes de tailles et de profondeurs variables (longueur : 10 à 30 m ; largeur : 10 à 15 m et profondeur : 0,2 à 2,5 m environ). Ces dernières semblent être alimentées par la nappe d'accompagnement de la Loire.

Le choix final des stations a été réalisé en fonction des densités de *L. grandiflora* présentes, du recouvrement arboré et de la durée de déconnexion, la plus longue possible (Figure 2).

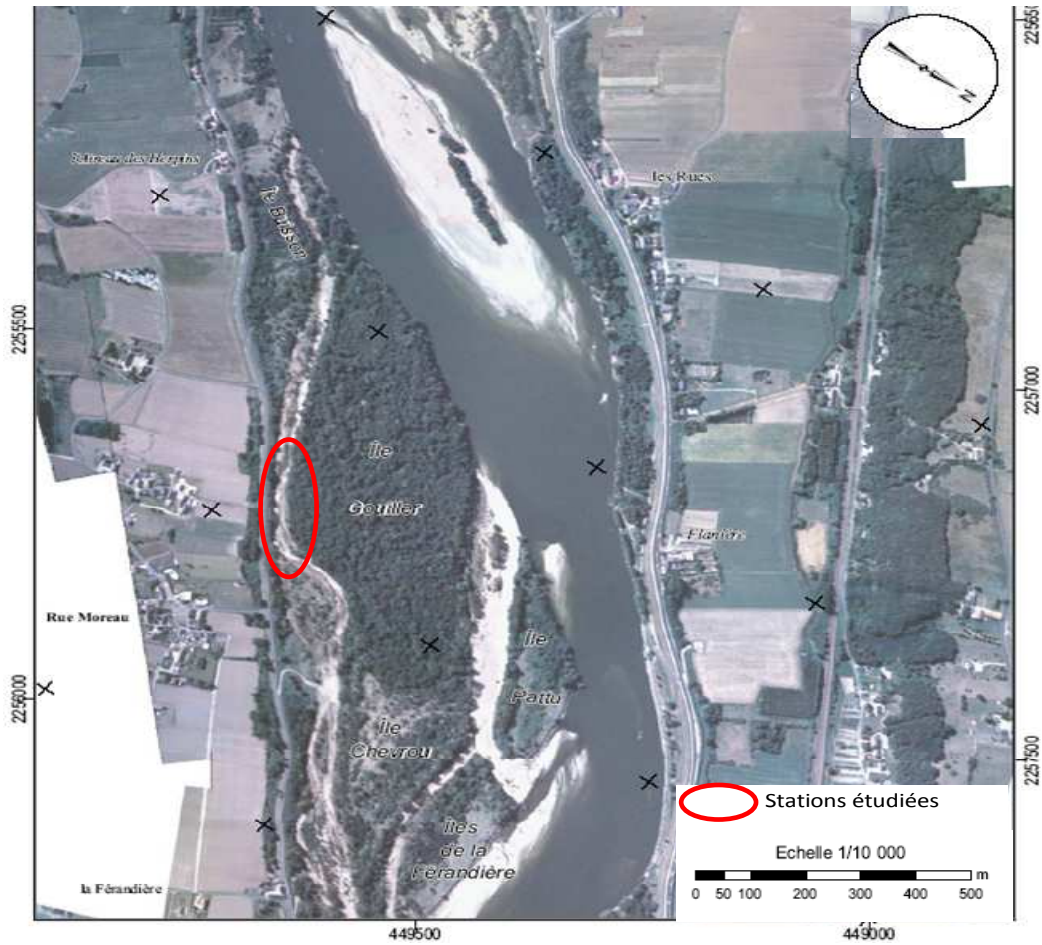


Figure 1 : Localisation générale du site d'étude. Source : SIEL, Bréhémont-Rupuanne, le lit de la Loire en 1999, Lo186, DIREN)

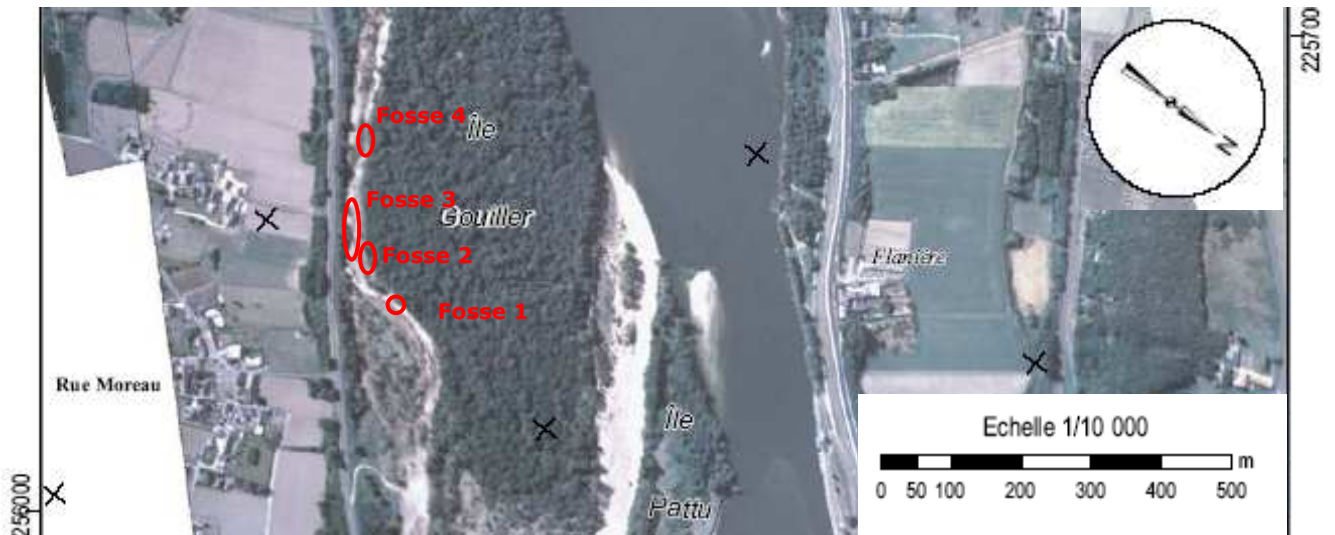


Figure 2 : Localisation des stations étudiées (4 fosses temporaires ou permanentes) sur le bras secondaire du site de Bréhémont. Source : SIEL, Bréhémont-Rupuanne, le lit de la Loire en 1999, Lo186, DIREN

## 2.2 Mesures et analyses communes aux trois questions

### 2.2.1 Suivi physicochimique en continu

Grace à deux sondes posées à 10 cm du substrat, des mesures en continu avec un pas de temps horaire ont été réalisées dans les fosses 3 (ombrage nul) et 4 (ombrage fort). Ces deux sondes multi-paramètres (MS5 OTT) mesurent la température de l'eau, la conductivité, le pH et le dioxygène dissous (Figure 3, Tableau 1).



**Figure 3 : Sonde multiparamètres MS5 et ses consommables**

**Tableau 1 : Caractéristique des capteurs de la sonde MS5**

Capteurs	Plage de mesure	Précision	Résolution
Oxygène dissous (luminescence) LDO	0 - 20 mg/l	±0,1mg/l pour les valeurs ≤ 8 mg/l ±0,2mg/l pour les valeurs > 8 mg/l	0,01 mg/l
Conductivité spécifique	0 - 100mS/cm	±0,5 % de la valeur mesurée ±0,001 mS/cm	0,001
pH	0 - 14 unités pH	±0,2 unités pH	0,01 unité pH
Température	-5 / +50°C	±0,1 °C	0,01 °C

Les sondes ont été relevées et étalonnées environ une fois par mois. L'étalonnage est triple pour le pH (pH4, 7 et 10), double pour la conductivité (0,1 mS/cm et 0,5 mS/cm) et est réalisé sur air saturé à température et pression ambiante pour l'oxygène dissous. Les données, transférées sous tableur Excel, ont servi à la construction d'une

base de données des paramètres physico chimiques à laquelle sont ajoutées les valeurs pour le chenal principal de la Loire provenant du CPNE d'Avoine situé à quelques kilomètres à l'aval de Bréhémont. L'absence de corrélations entre les valeurs de pH, les concentrations de dioxygène et la conductivité de la Loire et des deux fosses, n'a pas permis de reconstituer l'ensemble de données manquantes pour cause de dérive de certains paramètres ou de batterie trop faible pour d'autres. Seules les mesures de température ont pu être reconstituées puisque les corrélations entre les températures de la Loire et les températures des fosses présentent des  $r^2$  forts et significatifs (Loire-fosse 3 :  $r^2 = 0.929$ ,  $n=2687$  ; Loire-fosse 4 :  $r^2 = 0.892$ ,  $n=1027$ ). Les petites interruptions de saisie liées aux opérations de maintenance ont été corrigées au moyen de moyennes mobiles non pondérées sur cinq points.

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques des eaux des fosses et de la Loire a été conduite à partir des valeurs moyennes journalières et des écarts entre les minima et maxima journaliers. La comparaison entre les fosses et le chenal principal de la Loire s'est appuyée sur des analyses de variance à un facteur.

## 2.2.2 Prélèvements et analyses d'eau

Quelle que soit l'expérience (Q1, Q2A et B), lors de chaque passage de mesure de la production ou de la dégradation, des prélèvements d'eau ont été réalisés à proximité du substrat en suivant le protocole développé par Bacchi (2000) (Figure 4, Tableau 2).

**Tableau 2 : Contenu des analyses physico-chimiques**

	<b>Q1</b> production	<b>Q2A</b> dégradation année précédente	<b>Q2B</b> dégradation année en cours
<b>FOND</b>	Ammonium, Nitrate, Chlorophylle a, Phéopigments, Phosphore total  (1 mesure par classe d'ombrage)	Ammonium, Nitrate, Chlorophylle a, Phéopigments, Phosphore total  + sur 3 campagnes : DBO5, DCO, COT	Ammonium, Nitrate, Chlorophylle a, Phéopigments, Phosphore total
<b>SURFACE</b>	-	Sur 3 campagnes : DBO5, DCO, COT, Ammonium, Nitrate, Chlorophylle a, Phéopigments, Phosphore total	-



**Figure 4 : Prélèvement d'eau (13 juillet 2009) juste au dessus de la litière**

Les flacons utilisés pour le stockage et le transport sont fournis par le Laboratoire de Touraine qui a la charge des analyses. Les flacons de polyéthylène sont préalablement stérilisés par le laboratoire. Sur le terrain, ils sont rincés avec l'eau à prélever, remplis à ras bord et fermés hermétiquement. Ils sont ensuite transportés à 4°C à l'abri de la lumière.

**Tableau 3 : Méthodes et limites de quantification des paramètres chimiques mesurés (source : Laboratoire de Touraine)**

Paramètres	Méthode d'analyse	Limite de quantification
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	NF EN ISO 11732	0.05 mg.L-1
Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	NF EN ISO 13395	3 mg.L-1
Chlorophylle a	XPT 90 117	
Phéopigments	XPT 90 118	
Phosphore total	NF EN ISO 11885	0.05 mg.L-1
DBO5	NF EN 1899	
DCO	NF T 90 101	
COT	NF EN 1484	0.5 mg.L-1
C pour C/N	NF ISO 14235	
N pour C/N (azote Kjeldahl)	NF ISO 11261	

Ne pouvant suivre aisément la quantité de phytoplancton présent, son évaluation se fait par le biais de la mesure des pigments chlorophylliens spécifiques de la matière végétale soit vivante : **chlorophylle a**, soit dégradée : les **phéopigments**.

### 2.2.3 Détermination de la masse sèche, de la matière minérale et des quantités de carbone et azote des végétaux

Afin de déterminer la masse sèche, les différents végétaux ont été passés en étuve à 105°C et cela jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids constant. Celui-ci a été atteint après minimum 48h. Les mesures de poids ont été réalisées sur deux balances :

- pour les grandes quantités sur une balance Sartorius TE 612, max 610g d=0,01g
- pour les plus faibles poids, sur une balance de précision Sartorius TE 2145, max 210g d=0,1mg

Afin de déterminer les matières minérales, les teneurs en carbone et azote, les échantillons séchés sont broyés et tamisés en une poudre dont les particules n'excèdent pas 0,250 mm. Les méthodes suivantes ont été fournies par Mr Carre, directeur de laboratoire Agronomie au Laboratoire de Touraine (20/01/2011).

Les **matières minérales** sont déterminées sur une prise d'essai de l'échantillon préparé pour analyse. La prise d'essai est portée progressivement dans un four jusqu'à 550°C. La différence de masse avant et après calcination est utilisée pour calculer le taux de matière minérale. Les résidus sont pesés à masse constante.

Le **carbone organique** présent dans la prise d'essai est oxydé dans un mélange d'une solution de bichromate de potassium (en excès) et d'acide sulfurique à une température de 135°C. Les ions bichromates qui colorent la solution en orange, sont réduits en ions  $\text{Cr}^{3+}$  qui colorent la solution en vert. L'intensité de ce vert est mesurée par spectrophotométrie. Partant de l'hypothèse que l'oxydation d'un atome de carbone de matière organique produit quatre électrons, il existe une relation entre le  $\text{Cr}^{3+}$  formé et la quantité de carbone organique. La méthode est calibrée en utilisant le glucose comme source de carbone oxydable.

La minéralisation de l'échantillon en milieu acide fort et en présence de cuivre transforme la plupart des **composés azotés** présents en sulfate d'ammonium. On ajoute du sulfate de potassium pour réaliser la minéralisation à la température appropriée. La distillation du minéralisât en milieu alcalin dans une solution d'acide borique en excès permet de libérer l'ammoniac pour former une solution de sulfate de bore. La teneur en azote ammoniacal de cette solution est analysée par dosage en retour. Ces opérations sont réalisées automatiquement par un appareillage dédié.

## 2.3 Analyses spécifiques aux trois questions

### 2.3.1 Question 1 : identifier et quantifier la part des jussies dans la production de matière organique *in situ*

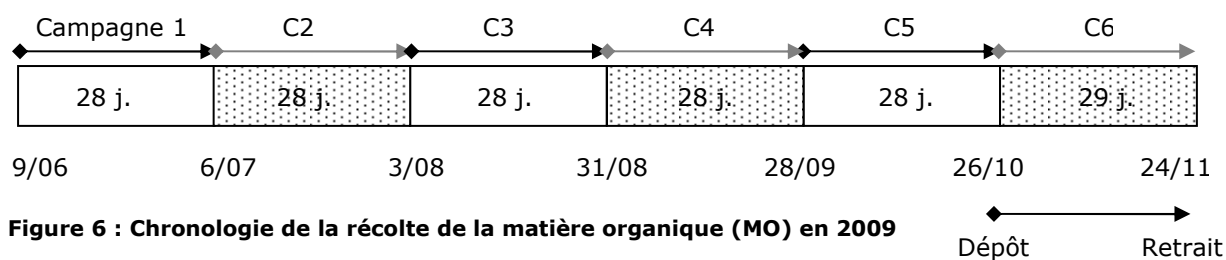
Tout le travail a été conduit à partir de récoltes *in situ*. Dans l'annexe hydraulique, trois secteurs correspondant à trois classes de recouvrement par les strates arborées et arbustives ont été sélectionnées, 0%, 0 à 75% et R>75%. Ces trois classes seront dénommées par la suite, respectivement : ombrage nul, ombrage moyen et ombrage fort.

Des boîtes perforées, sans couvercle, ont été déposées durant 28 ou 29 jours dans chaque classe d'ombrage. Ces boîtes de récolte d'une surface de 1/20 m<sup>2</sup> étaient destinées à recevoir la MO produite par les jussies et par les autres végétaux aquatiques ou terrestres. Les boîtes ont été déposées, par groupes de deux, attachées à un piquet (Figure 5). Neuf réplifications de deux boîtes ont été mises en place pour chaque classe d'ombrage. A chaque fois, la zone de dépôt des boîtes a été notée de manière à ne pas les installer deux fois au même endroit au cours de la saison.



**Figure 5 : Boîtes de récolte de la matière organique : (a) boîtes posées sur le fond, mises en place le 9 juin, juste avant leurs récoltes, et (b) mise en place de nouvelles boîtes (6 juillet 2009)**

Le dépôt des boîtes a été réalisé entre le 9 juin et le 26 octobre 2009, durant la période de croissance des jussies et à l'automne afin de cerner les périodes d'apport de MO dans les annexes (Figure 6). Cinquante quatre boîtes (18 boîtes x 3 classes d'ombrages) seront déposées et/ou retirées toutes les 4 semaines. Les 54 dernières boîtes ont été relevées le 24 novembre 2009. A cette date la croissance des jussies était nulle.



Lors de la mise en place des boîtes, les hauteurs d'eau, les profondeurs de substrat meuble, les hauteurs maximales des *L. grandiflora* ainsi que leurs stades de développement et la présence des organes reproducteurs ont été notés (Tableau 4).

**Tableau 4 : Stade de développement et les différents organes reproducteurs des *L. grandiflora* observés**

Stade de développement	
Aquatique immergée :	écophase aquatique, forme immergée
Aquatique à la surface :	écophase aquatique, forme rosette
Aquatique émergée :	écophase aquatique, forme dressée
Terrestre érigée :	écophase exondée, forme dressée
Organes reproducteurs	
	avec bourgeons
	avec fleurs
	avec fruits

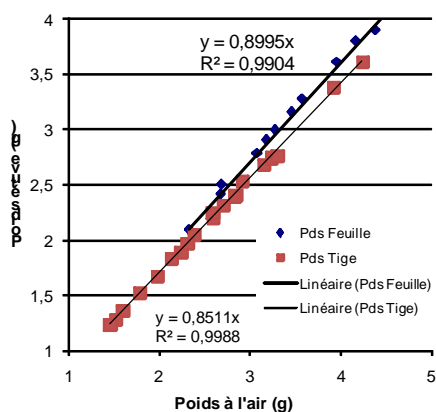
Lors du retrait des boîtes, les jussies présentes au dessus (surface d'1/20<sup>ème</sup> de m<sup>2</sup>) ont été coupées, constituant ainsi la biomasse épigée. Leurs biomasses sèches ont été déterminées. Lorsque les quantités de jussie étaient suffisantes, pour chaque recouvrement arboré, la biomasse de matière minérale et leur rapport C/N ont été évalués sur trois échantillons stochastiques.

Lors de chaque retrait, la MO récoltée a été identifiée à l'espèce ou au genre et quantifiée. Pour l'ensemble des boîtes, la biomasse sèche de chaque espèce végétale a été évaluée après séchage en étuve. Pour un ou trois échantillons de *L. grandiflora* (en fonction des quantités récoltées) pris au hasard au sein de chaque classe d'ombrage, la biomasse de matière minérale et leur rapport C/N ont été évalués. Pour la MO de *Populus* sp et *Salix* sp, les mêmes mesures ont été effectuées sur 1 ou 3 échantillons par campagne (en fonction des quantités récoltées) sans tenir compte des classes d'ombrage.

### 2.3.2 Question 2A : quantifier la dégradation des feuilles et tiges hors période de végétation et sur long terme

Les jussies (feuilles et tiges) utilisées dans cette partie proviennent de *L. grandiflora* prélevées à Tours sur le Cher, le 10 novembre 2008. Les jussies récoltées ont été séchées à l'air à température ambiante. Pour une partie, les tiges et feuilles ont

été séparée afin d'obtenir un ratio poids de tige/poids de feuille proche de celui *in situ*. Ce ratio est de  $0,68 \pm 0,03g$  ( $n=30$ , moy $\pm$ ES). Pour une autre partie, les tiges et feuilles séchées à l'air ont été séchées à l'étuve ( $105^{\circ}C$ ) jusqu'à poids constant afin d'obtenir un ratio poids de matière sèche (MS) à l'air/poids MS à l'étuve (Figure 7). Pour les feuilles, le rapport entre MS à l'étuve/MS à l'air est égal à 0,90 et pour les tiges à 0,85.



**Figure 7 : Relations entre poids de matière sèche à l'air et poids de matière sèche à l'étuve des tiges et des feuilles de *L. grandiflora* récoltées en novembre 2008, N=20**

Des paniers (boîtes grillagées fermées), d'une surface de  $100\text{ cm}^2$  et de mailles de 1 mm ou 10 mm, ont été remplis de tiges et de feuilles de jussie. Deux densités (notées A et X) de feuilles et de tiges associées ont été choisies (Tableau 5).

**Tableau 5 : Poids sec à l'air et à l'étude, en fonction de leur densité, des feuilles et tiges déposées *in situ* le 20 ou 26 octobre 2009**

Poids	À l'air		À l'étuve	
Densité <b>A</b> :	Feuilles	2,9 g	4,9 g	2,6 g
	Tiges	2,0 g		1,7 g
Densité <b>X</b> :	Feuilles	5,8 g	9,8 g	5,2 g
	Tiges	4,0 g		3,4 g

Les paniers ont été distribués sur huit lignes, en alternant les mailles de différentes tailles et les densités de jussies qu'ils contiennent (Figure 8a). Sur chaque ligne, 32 paniers ont ainsi été accrochés. Les lignes ont été mises en place, dans la fosse 3, les 20 et 26 octobre 2009 (Figure 8b). Elles ont été relevées une à une tout au long de la période de repos de la végétation et de la période de végétation suivante (à  $t=28\text{js}$ ,  $85\text{js}$ ,  $147\text{js}$ ,  $197\text{js}$ ,  $224\text{js}$ ,  $260\text{js}$ ,  $294\text{js}$  et  $329\text{js}$  i.e. en nombre de semaines T4, T13, T21, T29, T33, T38, T43 et T48).

Le seuil de 10°C pour l'eau est reconnu comme un seuil thermique au-delà duquel l'activité biologique de nombreuses espèces animales et végétales démarre après une saison hivernale sous des climats tempérés (Daufresne et al. 2003 ; Estrella et al. 2007). La mi-mars est la période pour laquelle ce seuil est franchi pour l'eau de la Loire dans la région de Langeais (Boisneau, données non publiées). Nous aurons donc la totalité de la période de repos ainsi que la période d'activité biologique suivante puisque l'expérience s'est déroulée sur 11 mois (jusqu'au 20 septembre 2010).

Sur chaque panier relevé, le poids de matière sèche à l'étuve de feuilles et de tiges, la matière minérale et le rapport C/N ont été mesurés. Ils ont été comparés à un échantillon de feuilles et de tiges de *L. grandiflora* récolté en 2008 mais non déposé dans l'eau (la référence : t0).



**Figure 8 : Paniers petite maille (diamètre 1mm) et grande maille (diamètre 10 mm) disposés sur une ligne (a) ; Mise en place d'une ligne 20 octobre 2009 (b)**

En laboratoire, les invertébrés ont été séparés des feuilles et tiges de jussies. La biomasse sèche (MS) et de matière minérale (MM) des feuilles et tiges de jussies ont été évaluées séparément. Les invertébrés ont été triés, identifiés au genre, à la tribu ou à l'espèce et dénombrés. L'ensemble des taxons est conservé dans l'alcool.

### **2.3.3 Question 2B : quantifier la dégradation des feuilles de l'année en cours**

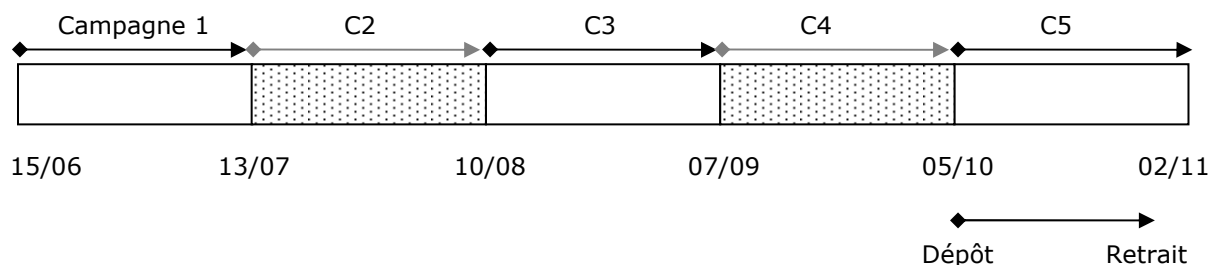
Les jussies (exclusivement des feuilles) utilisées dans cette partie proviennent de *L. grandiflora* prélevées à Bréhémont quelques semaines avant leur dépôt sur le terrain (Tableau 6). Les feuilles ont toutes été séchées à l'air puis à l'étuve (MS à l'étuve). Les paniers, d'une surface de 100 cm<sup>2</sup> (10 x 10 x 1,5 cm), étaient identiques à ceux utilisés lors du précédent protocole sur la dégradation de la MO. Les paniers de mailles 1 mm

(PM) et de maille 10 mm (GM) ont été remplis de 2,5 g (MS à l'étuve) de feuilles. Ils ont été déposés par groupes de quatre attachés à un piquet. Douze piquets ont été disposés, dans un herbier de jussie, au sein de la fosse 3.

**Tableau 6 : Récapitulatif de l'expérimentation**

Date de récolte des feuilles	Date de dépôt des paniers	Nb jour dans l'eau	Nombre de paniers étudiés	
			PM	GM
9/06/2009	15/06/2009	28	11	11
6/07/2009	13/07/2009	28	16	16
3/08/2009	10/08/2009	28	16	16
10/08/2009	07/09/2009	28	16	16
10/09/2009	05/10/2009	29	16	16

Le premier dépôt de boîtes (N =11 par taille de maille) a été réalisé le 15 juin 2009 afin d'échantillonner les feuilles de jussie dès le début de la saison de végétation. Les retraits et nouveaux dépôts, se sont étalés tous les 28 jours de mi-juillet à début novembre 2009 (Figure 9). Lors de chaque campagne, mis à part la première, 24 paniers de chaque diamètre de maille ont été mis en place. La dernière série de boîtes a été relevée le 2 novembre 2009.



**Figure 9 : Chronologie de la récolte des paniers sur la dégradation de la matière organique en période de végétation**

Lors de la récolte chaque boîte a été individualisée et les invertébrés neutralisés avec de l'éthanol dénaturé ou du formol afin d'éviter le risque de prédation dans les échantillons. L'éthanol a été utilisé lors des deux premières campagnes mais ne nous a pas satisfaites. Les macroinvertébrés et les feuilles n'ayant pas été bien fixés même avec l'ajout de 500ml d'éthanol par prélèvement.

Seize paniers ont été choisis aléatoirement parmi les 24 déposés. Les invertébrés ont été séparés des feuilles de jussies, triés, identifiés au genre, à la tribu ou à l'espèce pour les taxons considérés comme décheteteurs selon Tachet et al., (2000). Les autres

taxons sont conservés dans l'alcool. Les biomasses sèches (MS) et de matière minérale (MM) des jussies ont été évaluées.

### 3 Traitements statistiques

Tout au long de ce rapport lorsqu'une moyenne est donnée, elle est associée à l'erreur standard de l'échantillon (moy±ES).

L'ensemble des traitements statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel XLSTAT®. Des tests paramétriques et non paramétriques ont été réalisés en fonction de la nature et du nombre d'individus ainsi que des questions posées. Pour chaque test, le seuil de tolérance choisi a été de 5%.

Par exemple, afin de comparer les taux de décomposition, nous avons réalisé des régressions linéaires ou des régressions non-linéaires puis testé la normalité des résidus. Lorsque ceux-ci sont distribués normalement, nous avons réalisé des ANOVA afin de déterminer si les courbes de régression sont semblables ou non.

Comme test non-paramétriques, nous avons utilisé fréquemment des tests de Mann-Whitney pour comparer deux échantillons et des tests de Kruskal-Wallis pour comparer plus de deux échantillons. Ces tests ont été utilisés, par exemple, pour comparer les variables environnementales et les biomasses entre recouvrements arborés et dates (juin à novembre 2009, question 1).

Pour les paramètres physico-chimiques, des reconstitutions de série de température ont pu être réalisées car des corrélations fortes et significatives ont été trouvées entre les températures de la Loire et les températures des fosses. Pour les petites interruptions de données suite aux opérations de maintenance, les données manquantes ont été corrigées à l'aide de la méthode des moyennes mobiles non pondérées sur cinq points.

Pour le matériel végétal, les taux de décomposition (k) des feuilles ou des tiges ont été calculés comme suit :  $k = - (\ln (\% \text{masse restante}/100\%)) / \text{temps (année)}$ , le temps en année étant calculé par n jour restée dans l'eau/365jours.

Pour les invertébrés, leur nombre au sein de chaque panier a été rapporté à la masse sèche des feuilles (ou feuilles et tiges) de *L. grandiflora* restant dans le panier considéré (i.e. nombre d'individu/gMS restante).

Sur chaque échantillon, les descripteurs synthétiques et les indices courants de mesure de structure des communautés ont été calculés :

- la richesse taxonomique (S),

- l'indice de biodiversité de Shannon (H') à l'aide de la formule suivante  $H' = -\sum p_i \log_2 p_i$ , où  $i$  : un taxon et  $p_i$  : la proportion d'un taxon  $i$  par rapport au nombre total de taxon (S) qui se calcule de la façon suivante :  $p(i) = n_i/N$  où  $n_i$  est le nombre d'individus pour le taxon  $i$  et  $N$  est l'effectif total de l'échantillon,

- l'équitabilité (J'), se calcul à partir des deux indices précédemment cités.  $J' = H'/\log_2(S)$ ,

- l'indice de persistance (P) avec  $P=1-T$  et  $T=(C+E)/Sc$  où C : nombre de taxon apparus, E : nombre de taxon disparus et Sc : nombre de taxon total dans les deux communautés.

L'indice de Shannon (H') et l'équitabilité (J') s'appuyant sur les fréquences relatives des taxons et leur richesse, permettent de juger de la stabilité des communautés. L'indice de persistance (P) a permis de comparer de façon synthétique deux communautés.

## 4 Résultats

Cette partie présente l'ensemble des résultats obtenus et analysés au cours de ce projet. Elle débute par une présentation des évolutions du débit de la Loire à Langeais. Le débit de la Loire et les hauteurs d'eau associées étant les principaux facteurs influençant indirectement les phases de modifications physico-chimiques au sein de l'annexe.

Les modifications physico-chimiques seront décrites dans une seconde partie en distinguant deux périodes :

- La première de **déconnexion**. L'annexe est déconnectée du chenal principal sur une longue période au cours de l'été et l'automne 2009.
- La seconde de **connexions**. L'annexe est connectée ponctuellement de janvier à fin juin 2010. Ces connexions d'intensités et de durées variables modifient de façon importante les conditions physicochimiques au sein de l'annexe.

Par la suite, au cours de la phase de déconnexion de 2009, la production endogène des zones en eau de l'annexe sera présentée et qualifiée. La part de *L. grandiflora* dans celle-ci sera quantifiée.

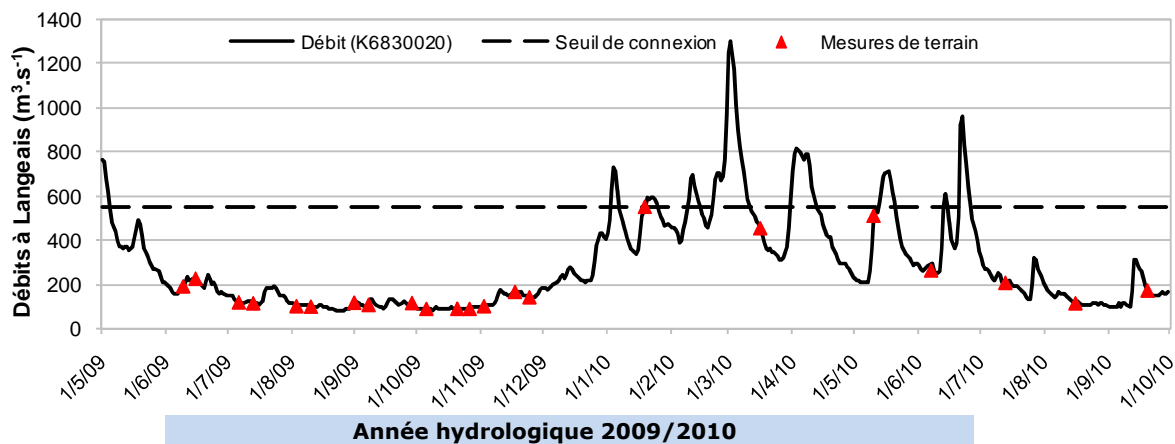
Pour finir, la dégradation des feuilles et tiges de *L. grandiflora* sera présentée :

- dans un premier temps sur une longue période (11 mois), principalement au cours de la phase de connexions
- puis sur la période de production de matière organique végétale, qui coïncide avec la période de déconnexion de l'annexe.

Dans cette étude sur la décomposition des feuilles et tiges de *L. grandiflora*, les communautés de macroinvertébrés aquatiques, principalement les décheteteurs, sont présentés.

## 4.1 Débit de la Loire à Langeais

Lors de notre étude, le bras secondaire a été déconnecté du 7 mai 2009 au 2 janvier 2010. Les fosses étudiées étaient alors seulement alimentées par la nappe alluviale ou une autre nappe.



**Figure 10 : Débits journaliers moyens de 2009 et 2010, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne**

A Langeais, l'année hydrologique 2009/2010 est caractérisée par une période d'étiage (juin à décembre 2009) et une période de crues successives (3 janvier au 26 juin 2010, Figure 10). En étiage, les débits sont proches de 90-170 m<sup>3</sup>/s. De janvier à mars 2010, les épisodes de crues se succèdent rapidement, avec un maximum de 1300 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> le 2 mars 2010. Ensuite, les épisodes de crue s'espacent (1 par mois) d'avril à fin juin, avec un maximum de 960 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> le 22 juin 2010. En juillet 2010 débute une nouvelle période d'étiage.

A partir du 5 mai 2009 et jusqu'au 2 janvier 2010, l'annexe a été déconnectée du chenal principal. A partir du 3 janvier et jusqu'au 26 juin 2010, l'annexe a été connectée temporairement au cours de huit périodes. Au maximum, la connexion a duré 19 jours (fin février/début mars 2010). Elle est restée déconnectée du chenal principal du 26 juin 2010 et jusqu'au 17 novembre 2010.

Les mesures ponctuelles de chimie de l'eau ont toutes été effectuées hors période de connexion de l'annexe. En 2010, certaines mesures ont été réalisées juste avant ou après un épisode de connexion.

## 4.2 Fonctionnement physicochimique de l'annexe

### 4.2.1 Au cours de la déconnexion

L'analyse des modalités de fonctionnement des fosses est basée sur les données de la fosse 3, la mieux renseignée. Les variables, température de l'eau, pH, conductivité et dioxygène dissous, enregistrées en continu et les mesures ponctuelles d'azote, de phosphore et chlorophylle a sont utilisées (Figure 12 à Figure 17). Différentes phases, correspondant à différentes modalités de fonctionnement entre le 19 août 2009 et le 3 janvier 2010 sont identifiables (Figure 11).

1- **Phase de production biologique intense et de dégradation intense, du 19/08/2009 (J232) au 21/10 (J295)** : la température de l'eau décroît mais présente de fortes variations nyctémérales en lien avec la température de l'air et la saison. La conductivité reste relativement stable avec des petites variations journalières. Le pH, entre 7,1 et 7,4 reste stable avec des variations quotidiennes liées à l'activité photosynthétique et au processus de dégradation. Le dioxygène dissous présente de très faibles concentrations,  $\sim 1\text{mg.L}^{-1}$ , ce qui correspond à de très faibles taux de saturation. Les variations quotidiennes sont importantes, en lien avec l'activité photosynthétique, les processus de respiration et de dégradation de la matière organique (MO). La chlorophylle a (mesure indirecte du phytoplancton) est élevée tout comme les concentrations en ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) alors que les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) sont en faibles quantités ( $<3\text{mg.L}^{-1}$ ). Les conditions sont hypoxiques à certaines heures de la journée. Ceci traduit un milieu riche en nutriments où les algues et les macrophytes sont très abondants, en phase de production biologique intense.

2- **Phase de production biologique importante et de dégradation intense, du 22/10 (J296) au 2/11 (J307)** : La température continue à diminuer tout comme la longueur du jour. Ceci réduit l'activité des végétaux ce qui se traduit par une diminution du dioxygène dissous et de ses amplitudes quotidiennes. Le pH augmente et présente des variations nyctémérales plus importantes que dans la phase précédente. L'activité de production est moins intense alors que les processus de dégradation sont toujours importants et actifs.

3- **Dominance de la phase de dégradation mais celle-ci est ralentie, du 3/11 (J308) au 10/11 (J316)** : L'activité de photosynthèse par les micro et macrophytes est moins importante, la consommation de phosphore est moindre.

L'activité de dégradation est largement dominante mais celle-ci est ralentie par le froid (température moyenne de 8.6°C). Les processus de réduction sont moins importants.

4- **Phase de dégradation très forte, du 11/11 (J316) au 18/11 (J323)** : La température décroît un peu moins rapidement, la température moyenne est légèrement plus élevée que précédemment et les amplitudes quotidiennes sont deux fois moins importantes. La conductivité augmente très légèrement, les variations nyctémérales sont plus importantes que dans la phase précédente. Cette phase traduit un changement majeur dans le fonctionnement, l'activité de dégradation est très forte, tandis que l'activité de production est réduite, les concentrations de dioxygène restent très faibles  $< 1 \text{mg.L}^{-1}$ .

5- **Phase de reprise de l'activité microphytique, du 19/11 (J324) au 15/12 (J350)** : le dioxygène qui présente un niveau moyen plus élevé avec un retour à des variations journalières élevées. On assiste à une reprise d'une activité photosynthétique hivernale microphytique.

6- **Phase de dégradation intense de la matière organique, du 16/12/2009 (J351) au 3/01/2010 (J3)** : Nous n'avons pas de données ponctuelles pour le nitrate, l'ammonium, la chlorophylle a et le phosphore total. La température est stable, autour de 5°C. Les variations quotidiennes sont faibles. La conductivité est stable avec des variations quotidiennes faibles tandis que le pH diminue lentement. Le dioxygène est très faible  $\ll 1 \text{mg.L}^{-1}$  avec une quasi absence de variation quotidienne. Cette phase est une phase de dégradation intense de la matière organique.

	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	JANV		
	PHASE 1 PRODUCTION BIOLOGIQUE INTENSE & DEGRADATION INTENSE		PHASE 2 PRODUCTION PLUS FAIBLE & DEGRADATION INTENSE	PHASE 3 DEGRADAT° DOMINE MAIS RALENTIE	PHASE 4 DEGRADAT° TRES FORTE	PHASE 5 REPRISE DE L'ACTIVITE BIOLOGIQUE (MICROPHYTIQUE)	PHASE 6 DEGRADATION INTENSE DE LA MATIERE ORGANIQUE	PASSAGE D'UNE CRUE
TEMP.	∖ TENDANCE A LA BAISSSE -15°C ∖		∖ -10,6°C	∖ -8,6°C	∖ -9,9°C	∖ TENDANCE A LA BAISSSE ∖ -8,1°C	± TENDANCE STABLE (-5°C) ±	
Δj TEMP.	+++ VARIATIONS QUOTIDIENNES TRES FORTES -2,1°C +++		+++ -2,4°C +++	+++ -1,9°C	++ -0,8°C	++ VAR QUOTID < A VANT -0,8°C ++	+ VAR QUOTID FAIBLES -0,5°C +	
COND.	± TENDANCE STABLE 631µS.cm <sup>-2</sup> ±		± 650µS.cm <sup>-2</sup>	± 620µS.cm <sup>-2</sup>	∕ 655µS.cm <sup>-2</sup>	∕ TENDANCE A LA HAUSSE 665µS.cm <sup>-2</sup> ∕	± TENDANCE STABLE 779µS.cm <sup>-2</sup> ±	
Δj COND.	+ VARIATIONS QUOTIDIENNES FAIBLES 14µS.cm <sup>-2</sup> +		+ 13µS.cm <sup>-2</sup>	+ 15µS.cm <sup>-2</sup>	++ 31µS.cm <sup>-2</sup>	++ VAR QUOTID PLUS FORTE 23µS.cm <sup>-2</sup> ++	+ VAR QUOTID FAIBLES 10µS.cm <sup>-2</sup> +	
pH	± TENDANCE STABLE 7,2 ±		∕ 7	∕ 7,2	∕ 7,2	∕ TENDANCE CROISSANTE 7,4 ∕	∖ TENDANCE DECROISSANTE 7,4 ∖	
Δj pH	+++ VARIATIONS QUOTIDIENNES FORTES 0,16 +++		∕+ 0,12 ∕+	++ 0,13	++ 0,13	++ 0,13	+ VAR QUOTID FAIBLES 0,09 +	
LDO	FAIBLES CONCENTRATIONS - 1mg.L <sup>-1</sup>		+ 0,2 mg.L <sup>-1</sup> +	1mg.L <sup>-1</sup>	0,3mg.L <sup>-1</sup>	NIVEAU MOY 2,8mg.L <sup>-1</sup>	FAIBLE 0,5mg.L <sup>-1</sup>	
Δj LDO	+++ VARIATIONS QUOTIDIENNES TRES FORTES 3mg.L <sup>-1</sup> +++		+ 0,6mg.L <sup>-1</sup> +	++ 2,2mg.L <sup>-1</sup> ++	++ 1,2mg.L <sup>-1</sup> ++	+++ VAR QUOT. ELEVEES 2,2mg.L <sup>-1</sup> +++	+ VAR QUOTID FAIBLES 0,6 +	
NO3	<3 CONCENTRATIONS FAIBLES		<3	<3	<3	<3		
NH4	0,08 ++ CONCENTRATION ELEVEE ++ 0,24		0,12	0,18	0,21	<0,05 ∖ TENDANCE DECROISSANTE ∖		
PTOT	1,01 ∖ TENDANCE DECROISSANTE ∖ 0,87		0,53	0,44	0,56	0,92 ∕ TENDANCE CROISSANTE ∕		
CHLORO a	161 ∖ TENDANCE DECROISSANTE ∖		33	58	29	66	61	

Légende :  
 Tendence : Croissante (bleu), Stable (vert), Décroissante (orange)  
 Variation quotidienne : Forte (bleu foncé), Moyenne (bleu clair), Faible (orange)  
 Δj : Variation quotidienne 15 =moyenne des valeurs sur la période  
 Absence de données (blanc)

Figure 11 : Synthèse des conditions physicochimiques présentes dans l'annexe en période de déconnexion

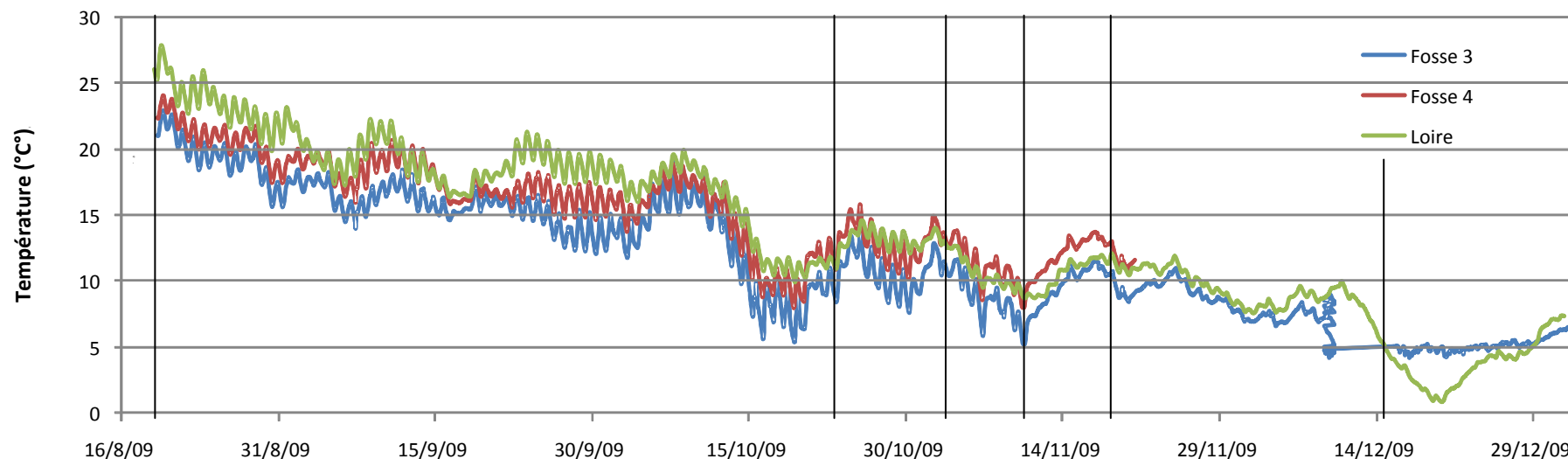


Figure 12 : Température de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci

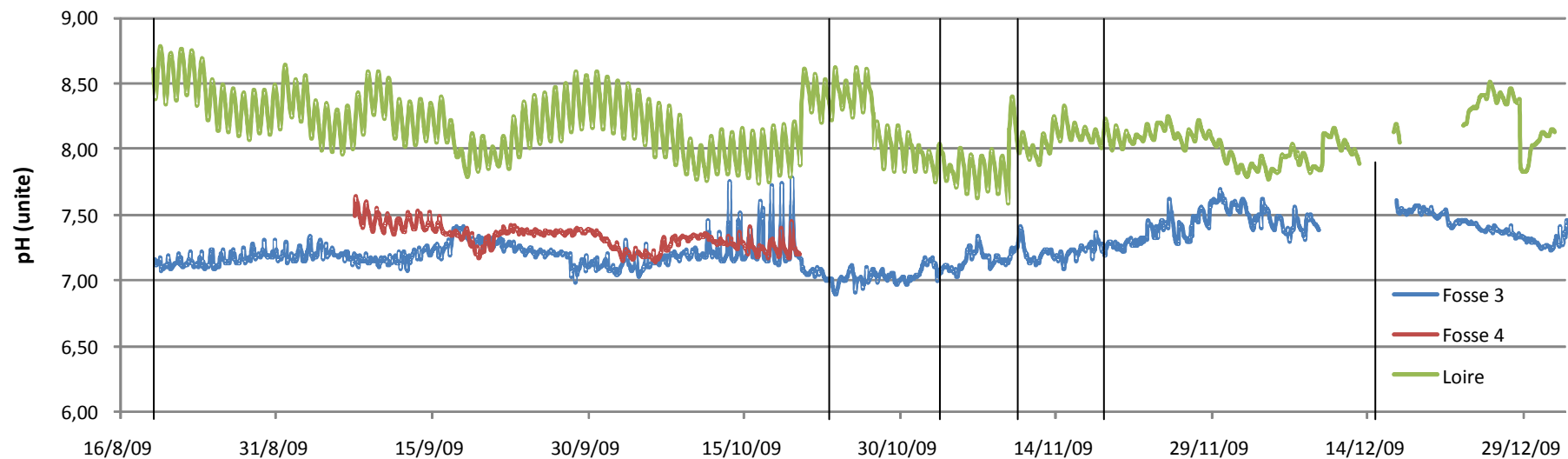


Figure 13 : pH de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci

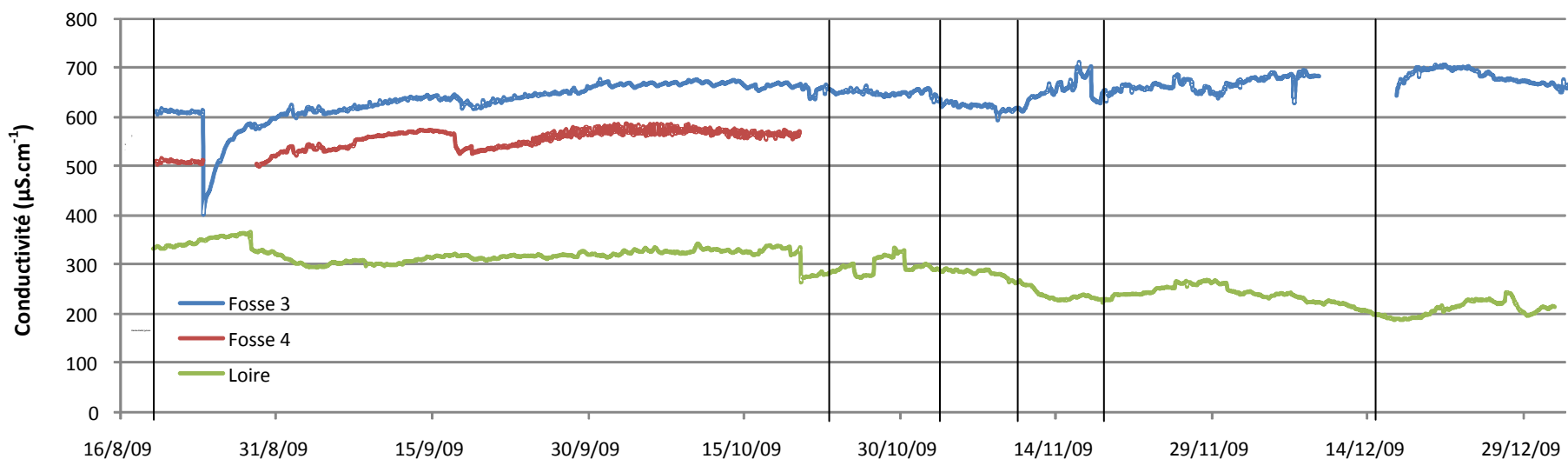


Figure 14 : Conductivité de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci

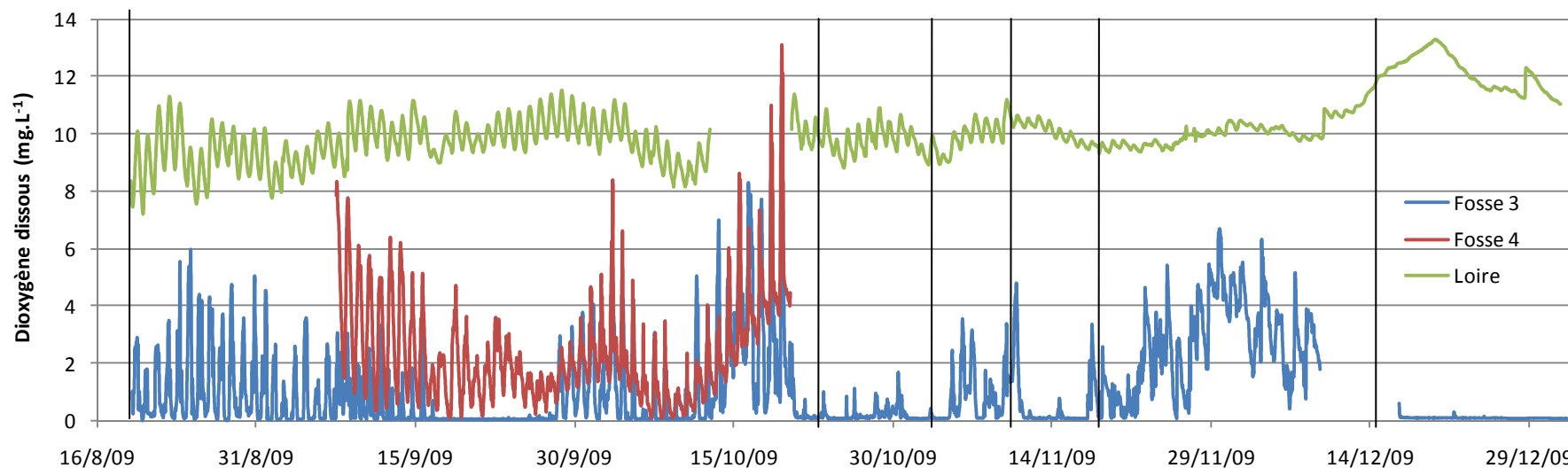


Figure 15 : Dioxygène dissous l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci

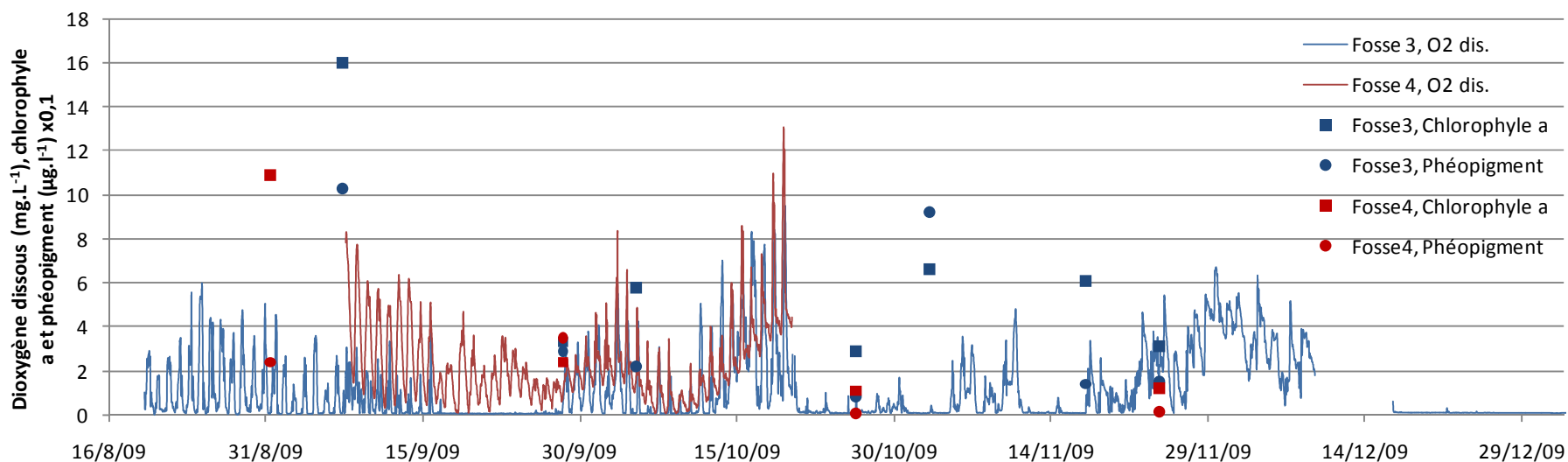
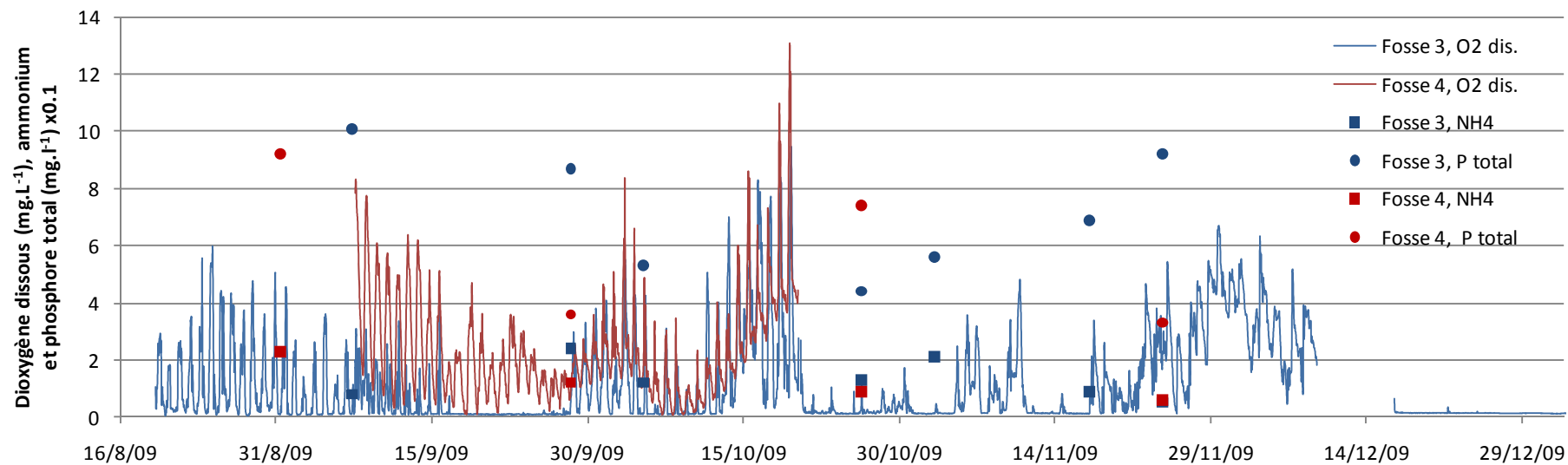


Figure 16 : Dioxygène dissous, phéopigments et chlorophylle a au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) durant la période de déconnexion



**Figure 17 : Dioxygène dissous, ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et phosphore total au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) durant la période de déconnexion**

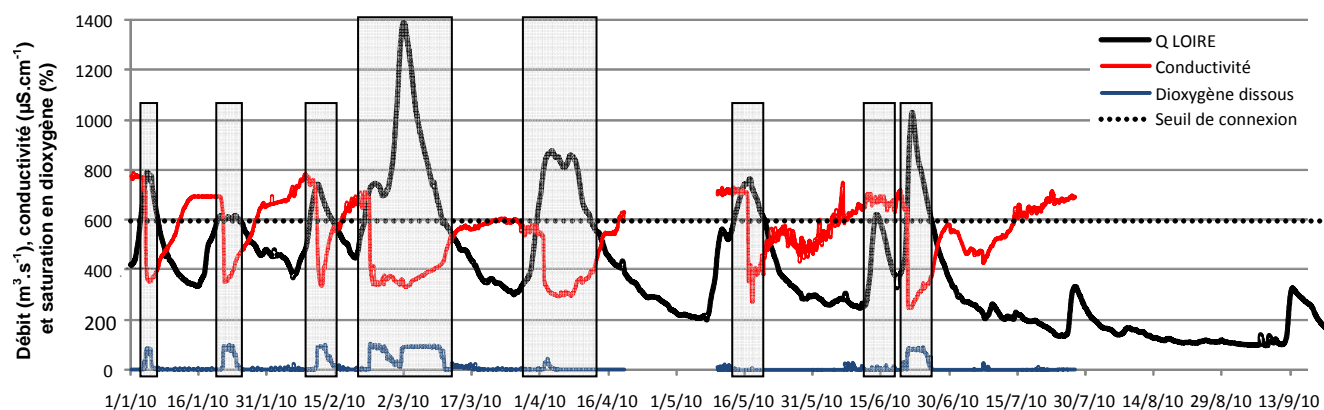
Les données de nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ne sont pas représentées car inférieures à 3mg.l<sup>-1</sup> seuil de détection du laboratoire de Touraine.

## 4.2.2 Au cours des connexions/déconnexions

L'analyse des modalités de fonctionnement des fosses lors des séquences connexions-déconnexions est basée sur les données de la fosse 3 (mesures au fond), la mieux renseignée. Les variables, température de l'eau, pH, conductivité et dioxygène dissous, enregistrées en continu (1fois/heure) et les mesures ponctuelles d'azote, de phosphore et chlorophylle a puis de DBO5, DCO et COT (sur 3 campagnes) sont utilisées (Figure 21 à Figure 27Figure 28).

Entre le 4 janvier 2010 et la déconnexion estivale, 8 épisodes de connexion se sont succédés (

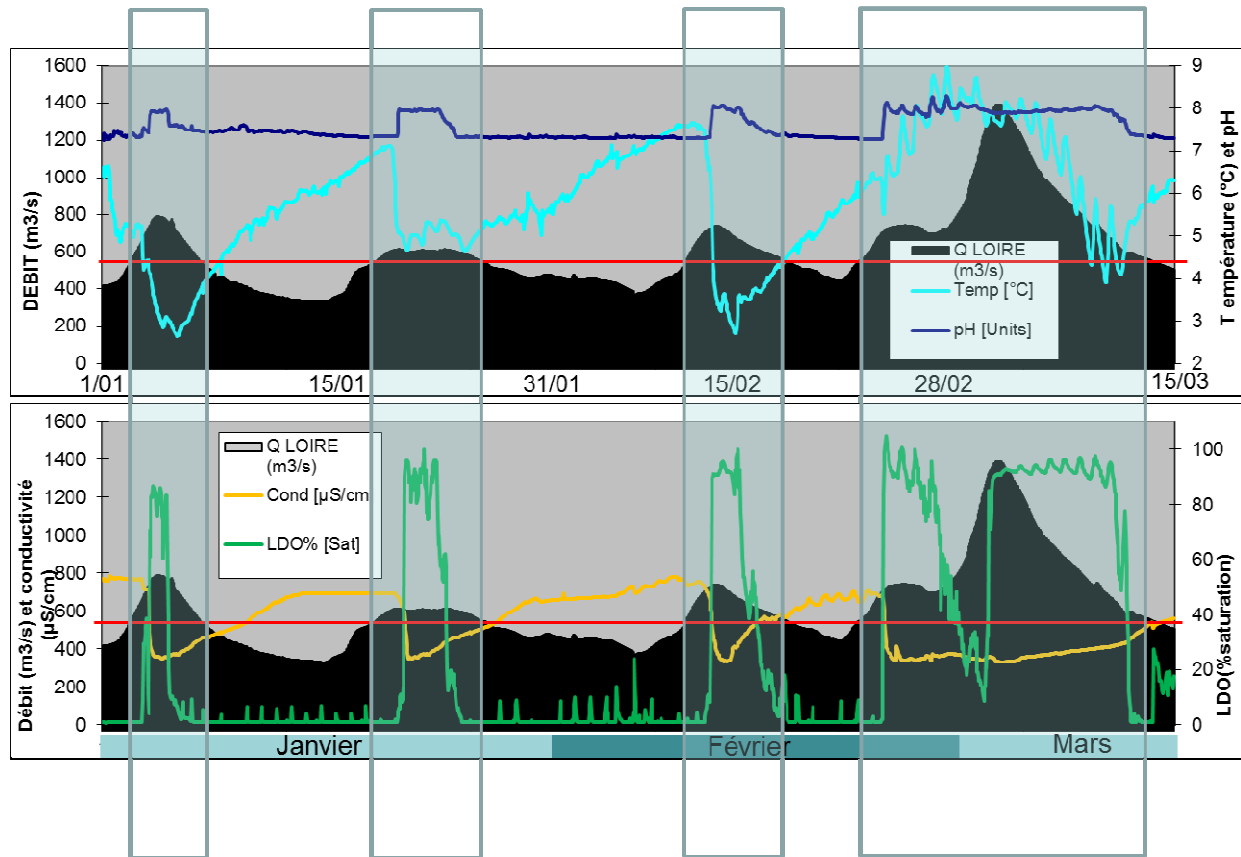
Figure 18).



**Figure 18 : Évolution du débit de la Loire ainsi que de la conductivité et du pourcentage de saturation en oxygène, à 10cm au-dessus du substrat (fond), dans la fosse 3 (Q horaire LOIRE, source : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne)**

**Tableau 7 Durée et vitesse moyenne d'évolution des paramètres lors des phases de connexions hivernales unimodales**

	1	2	3	4	5
Durée (% du temps de connexion du bras)	18%	10%	27%	34%	11%
Oxygène (LDO %/h)	0	6	0,2	-1,9	-0,06
pH (unité/h)	0	0,04	0,001	-0,01	0,001
Conductivité (µS/h)	-0,4	-17	-3	1	2
Température (°C/h)	-0,02	-0,12	0,02	0	0,02



**Figure 19 : Évolution du débit de la Loire et de la température de l'eau, du pH, de la conductivité et de LDO lors des 4 premières séquences de connexion/déconnexion de la fosse (mesures à 10 cm au dessus du fond)**

L'analyse des phases de connexion a montré que les différents paramètres physico chimiques ne présentent pas les mêmes patterns. Le pH et le dioxygène présentent une évolution en forme de créneau tandis que la conductivité et la température chutent brutalement mais montrent un retour aux valeurs antérieures à la connexion très progressif (Figure 19). L'analyse des patterns des connexions unimodales, calées sur l'évolution de la courbe du dioxygène durant la connexion, montre 5 phases illustrées ici sur la 2<sup>o</sup> connexion (

Figure 20).

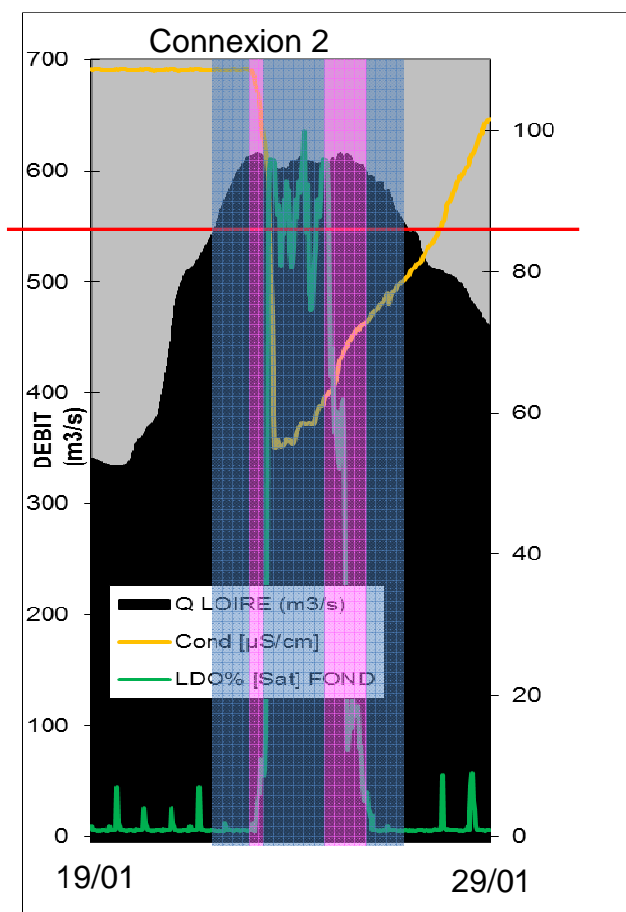
**Phase 1** : le bras est connecté mais l'eau de la Loire n'est pas encore arrivée jusqu'à la fosse qui se trouve en aval, la physico chimie de l'eau est identique à celle observée en séquence de déconnexion.

**Phase 2** : Connexion de la fosse, arrivée des premières masses d'eau qui se traduit par des changements brutaux pour tous les paramètres. Ceci se traduit par une forte augmentation de la LDO passant de 0.9-1% jusqu'à la valeur maximale (toujours supérieure à 80%) avec des taux de croissance de 2.9 à 11% de LDO/h (Tableau 7).

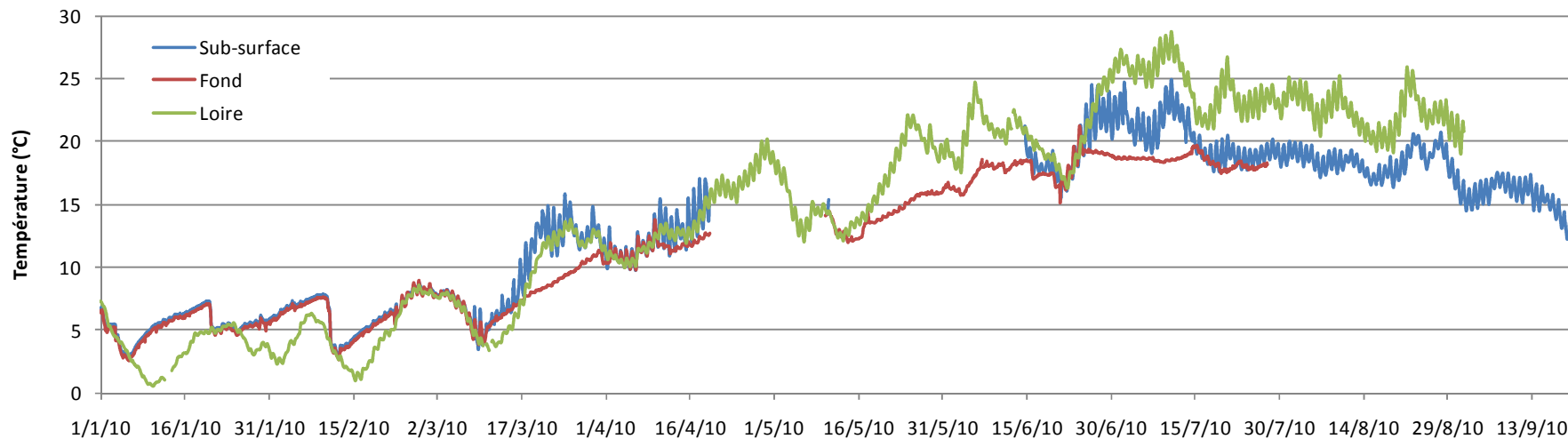
**Phase 3 :** Connexion de la fosse, débit circulant. Les paramètres physico chimiques sont identiques à ceux de la Loire.

**Phase 4 :** Connexion de la fosse et fin de l'arrivée de l'eau du chenal, les masses d'eau se mélangent. On observe à nouveau des changements brutaux pour LDO, avec une forte décroissance, présentant un sursaut et se terminant par des valeurs identiques à celles de la phase 1, autour de 1%. Le pH suit un pattern similaire tandis que le retour aux valeurs de la phase 1 est plus progressif pour la température et la conductivité.

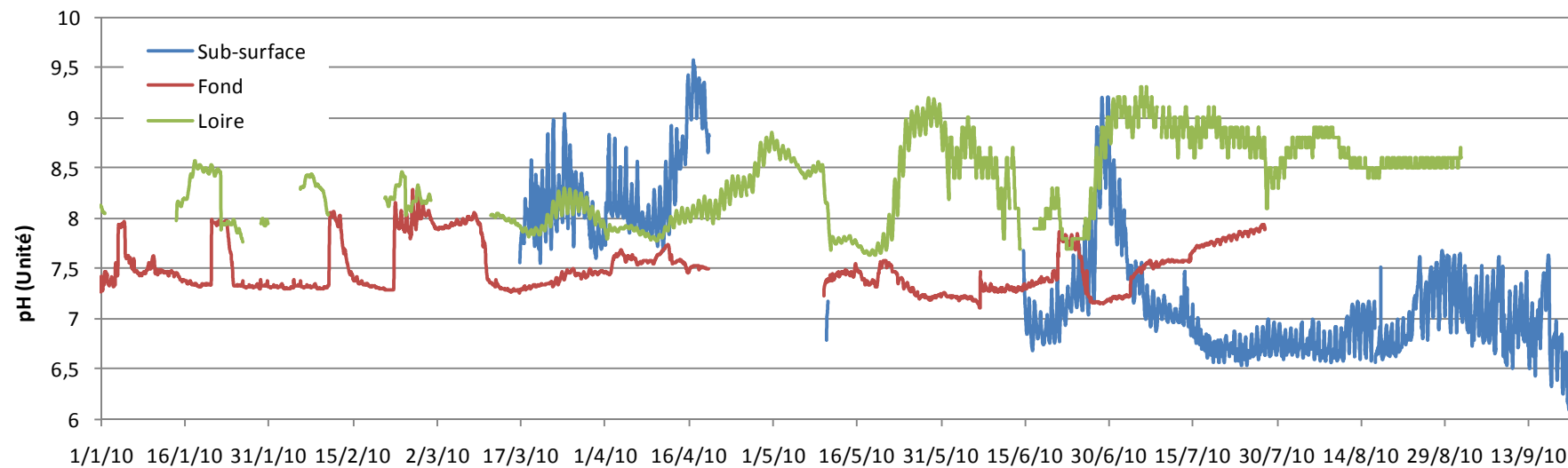
**Phase 5 :** Connexion du bras mais pas de la fosse, absence de débit circulant, la masse d'eau est plus grande. Le pH et LDO ont atteints des valeurs identiques à celles observées lors de la phase 1 alors que celles-ci ne sont pas atteintes pour la température et la conductivité. Ceci traduit une très activité de dégradation de la MO.



**Figure 20 :** Évolution des différents paramètres, température de l'eau, pH, conductivité et di oxygène lors d'une séquence de connexion entre la fosse et la Loire, illustration sur la séquence 2.



**Figure 21 : Température de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci**



**Figure 22 : pH de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci**

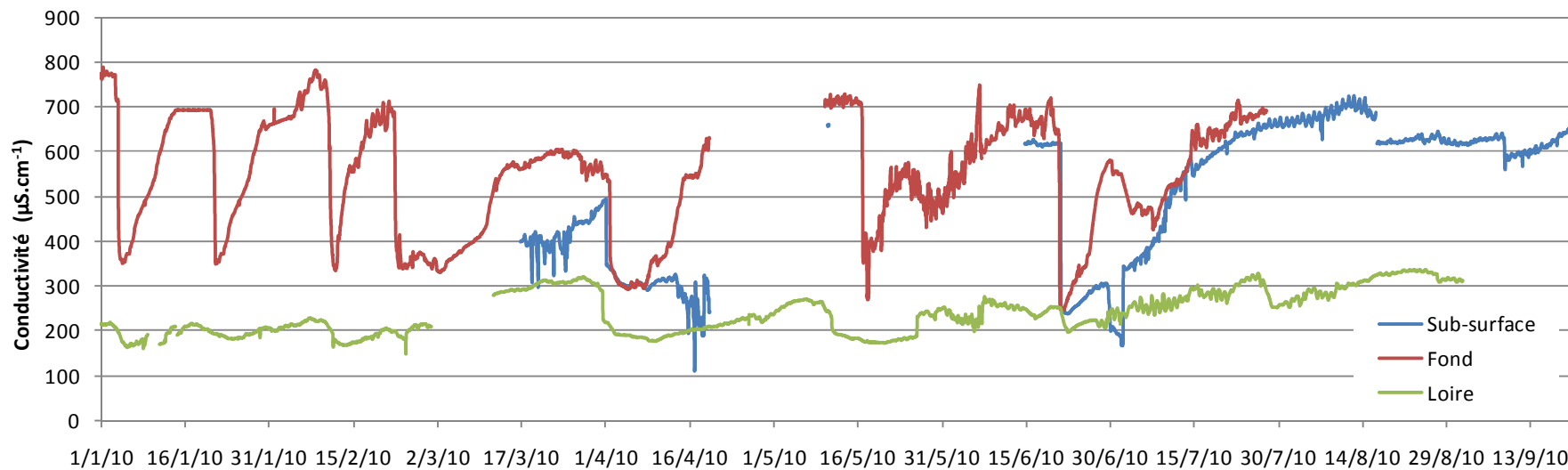


Figure 23 : Conductivité de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci

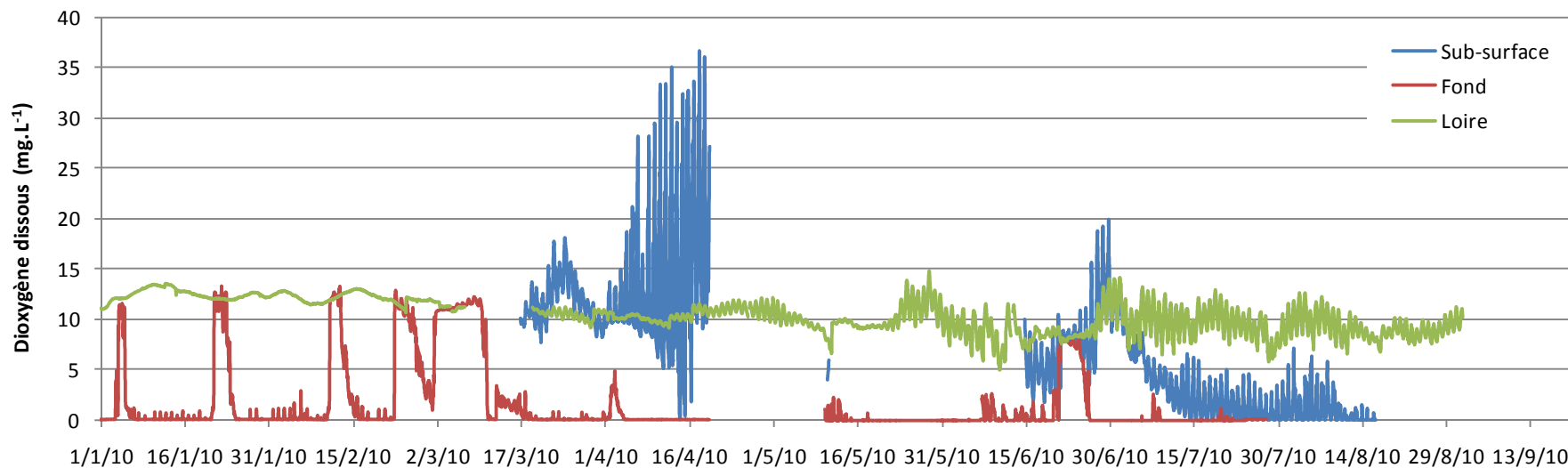


Figure 24 : Dioxygène dissous de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci

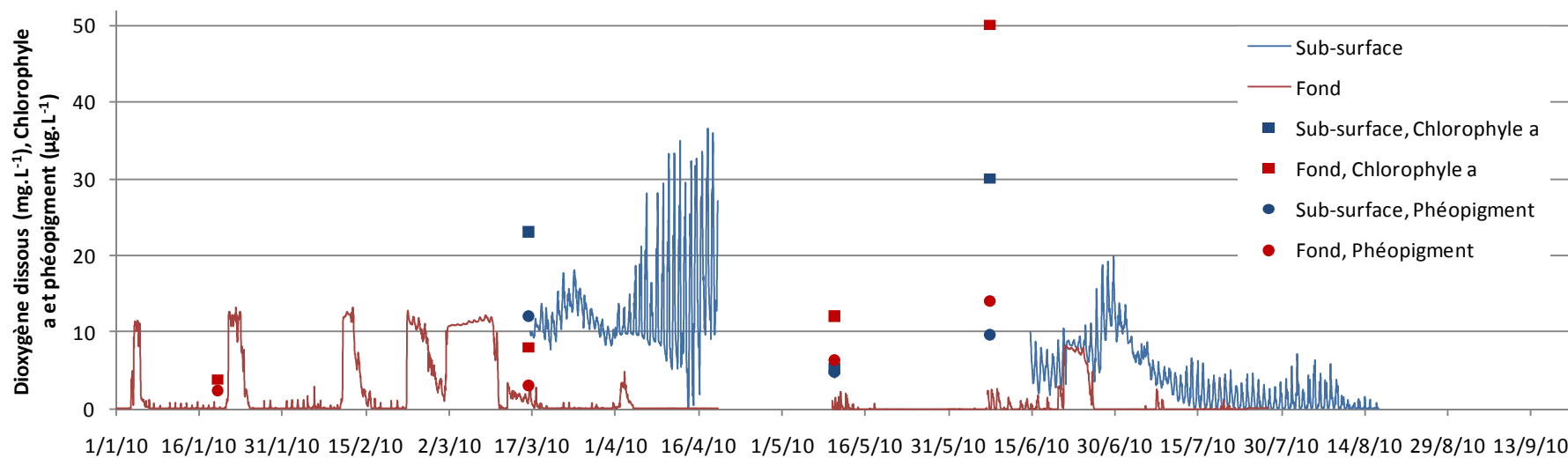


Figure 25 : Dioxygène dissous, phéopigments et chlorophylle a au sein de l’annexe (fosse 3) durant des périodes de connexion/déconnexion

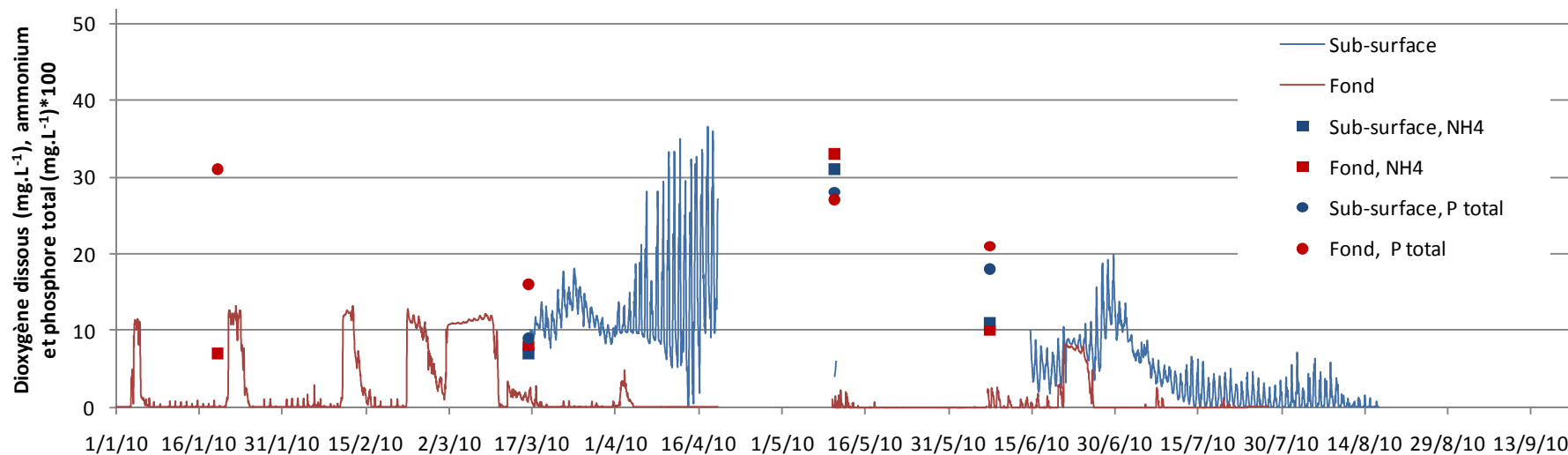


Figure 26 : Dioxygène dissous, ammonium et phosphore total au sein de l’annexe (fosse 3) durant des périodes de connexion/déconnexion

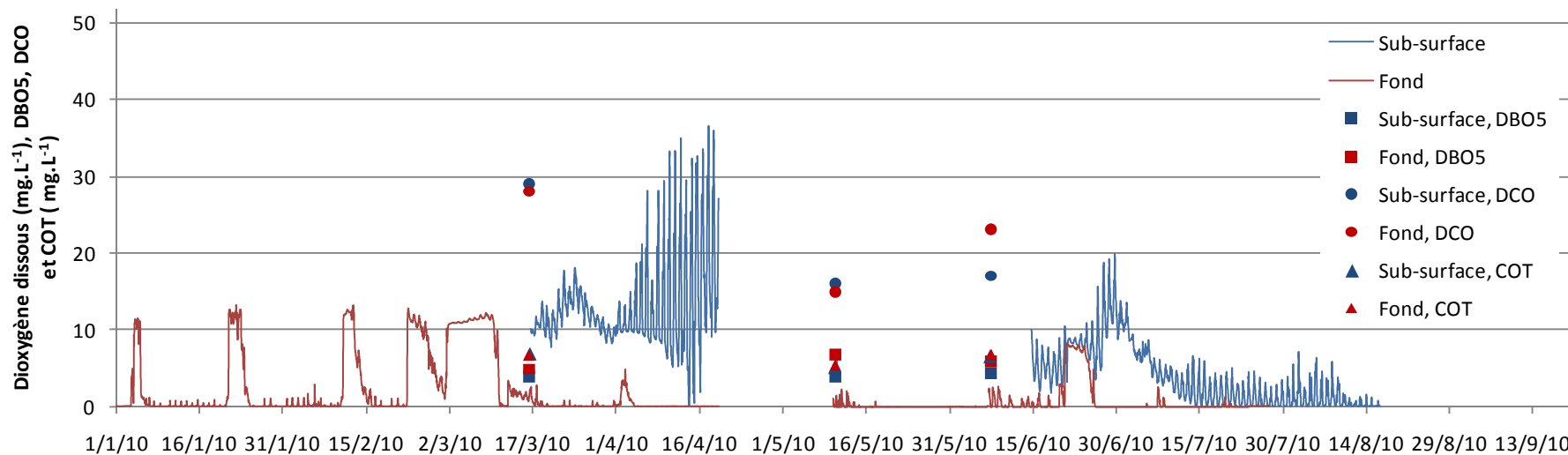


Figure 27 : Dioxygène dissous, DBO<sub>5</sub>, DCO et COT au sein de l’annexe (fosse 3) durant des périodes de connexion/déconnexion

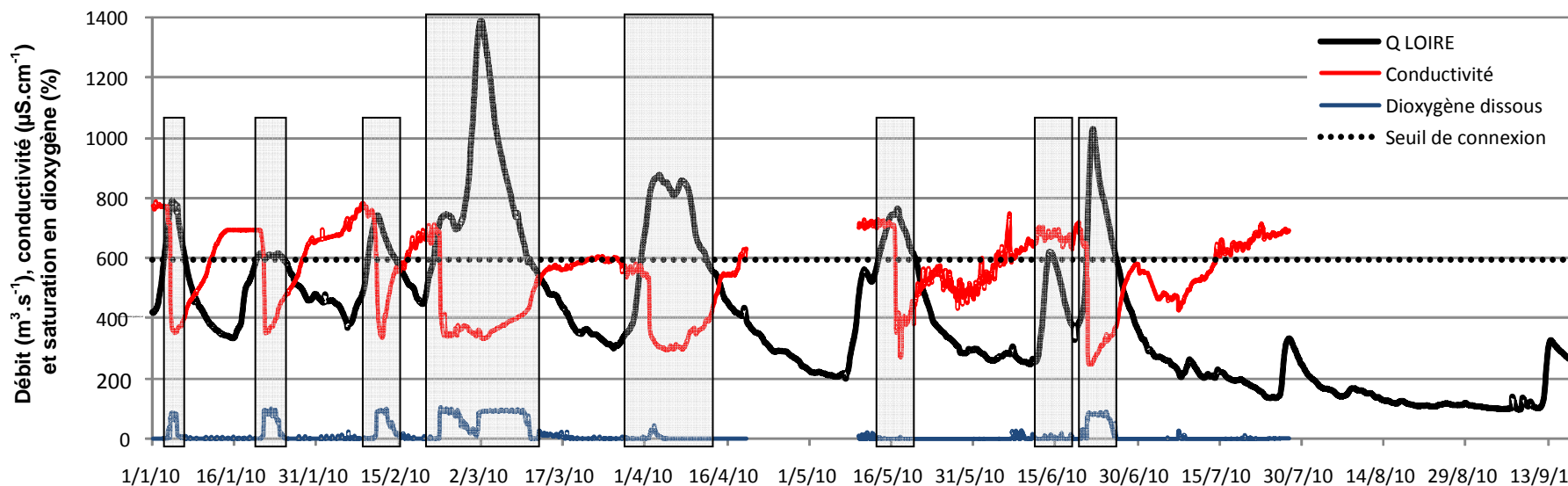


Figure 28 : Évolution du débit de la Loire ainsi que de la conductivité et du pourcentage de saturation en oxygène, au dessus du substrat (fond), dans la fosse 3 (Q horaire LOIRE, source : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne)

### 4.3 Question 1 : identifier et quantifier la part des jussies dans la production de matière organique *in situ*

#### 4.3.1 Calendrier des relevés de terrain

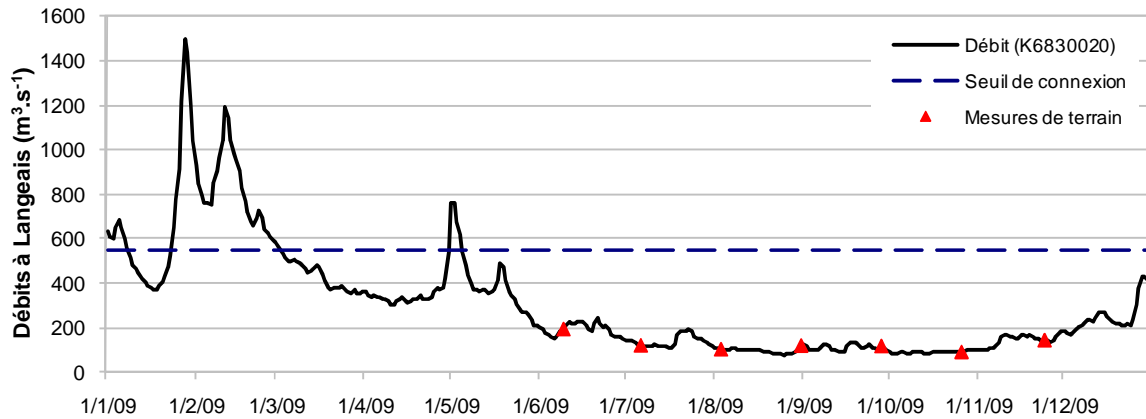


Figure 29 : Débits journaliers moyens de 2009, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne

Lors de cette expérience, nous avons réalisés des dépôts et prélèvements *in situ* du 9 juin 2009 au 24 novembre 2009 (Figure 29). La méthode est décrite §2.3.1 (p12).

#### 4.3.2 Variables abiotiques

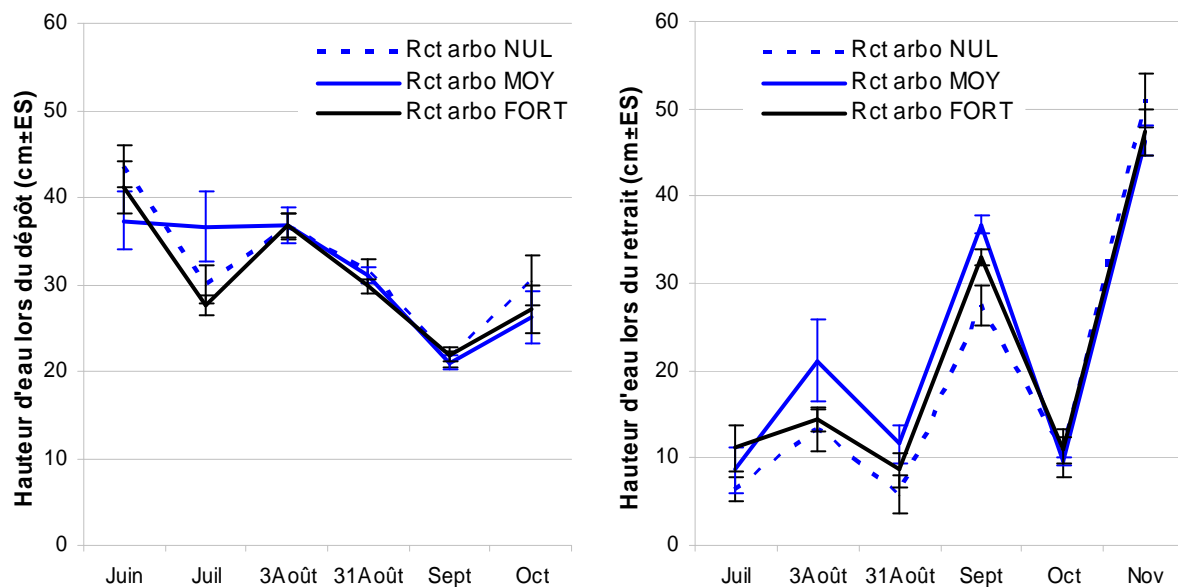
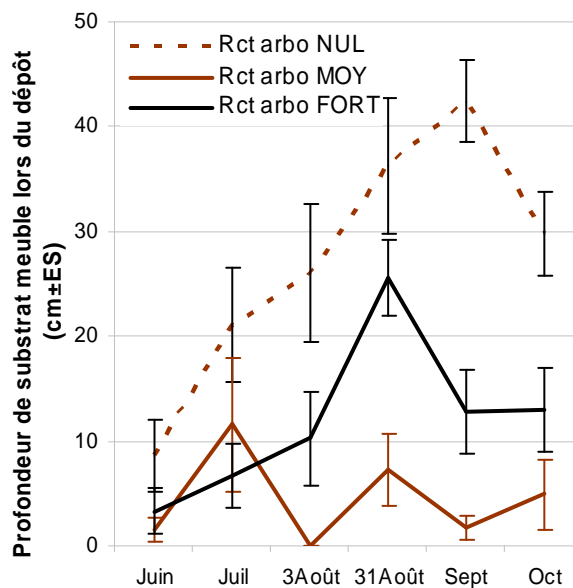


Figure 30 : Hauteur d'eau lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boîtes de récolte de la matière organique pour les trois classes de recouvrements arborés étudiées

Lors du **dépôt** des boîtes de récolte de la matière organique, les hauteurs d'eau varient au cours de la saison mais sont identiques à chaque date entre les trois recouvrements arborés (Figure 30).

Lors des **retraits**, les hauteurs d'eau sont identiques entre les trois recouvrements arborés sauf fin septembre 2009 (Rct NUL  $27,6 \pm 2,32$ cm, Rct MOY  $36,7 \pm 1,05$ cm, Rct FORT  $33,0 \pm 0,99$ cm) (Figure 30).



**Figure 31 : Profondeur de vase lors dépôt des boîtes de récolte de la matière organique pour les trois classes de recouvrements arborés étudiées**

Lors des deux premières campagnes, les profondeurs de substrat meuble sont identiques. Par la suite, elles divergent. Les profondeurs de substrat meuble des stations à recouvrement arboré nul sont alors toujours supérieures à celles des recouvrements arborés moyens (Figure 31).

### 4.3.3 Phénologie de *L. grandiflora*

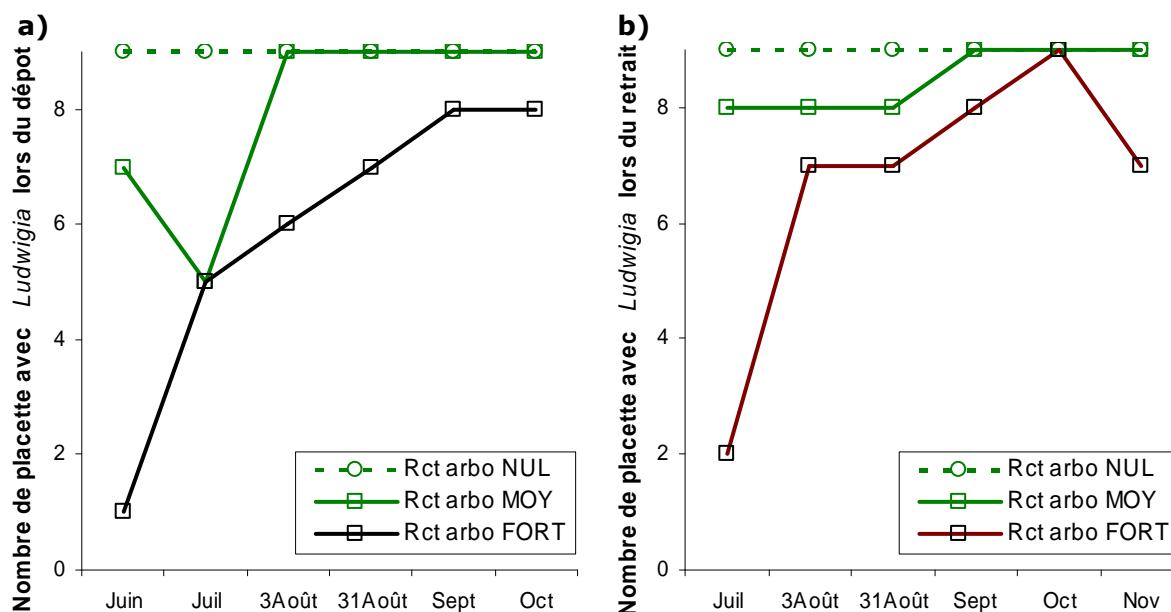


Figure 32 : Nombre de placettes étudiées contenant *L. grandiflora* lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boîtes de récoltes de la matière organique (maximum 9 boîtes)

Dès Juin, *L. grandiflora* est présente et bien développé sur les zones exemptes de couvert arboré (Figure 32, Figure 33). Ce développement se maintient tout au long de la saison (jusqu'à novembre). Sur les zones les plus ombragées (Rct arbo Fort), la présence de *L. grandiflora* est faible en juin. Elle augmente jusqu'en septembre pour finalement diminuer en novembre. La présence de *L. grandiflora* pour un recouvrement arboré moyen est intermédiaire aux deux précédemment cités.

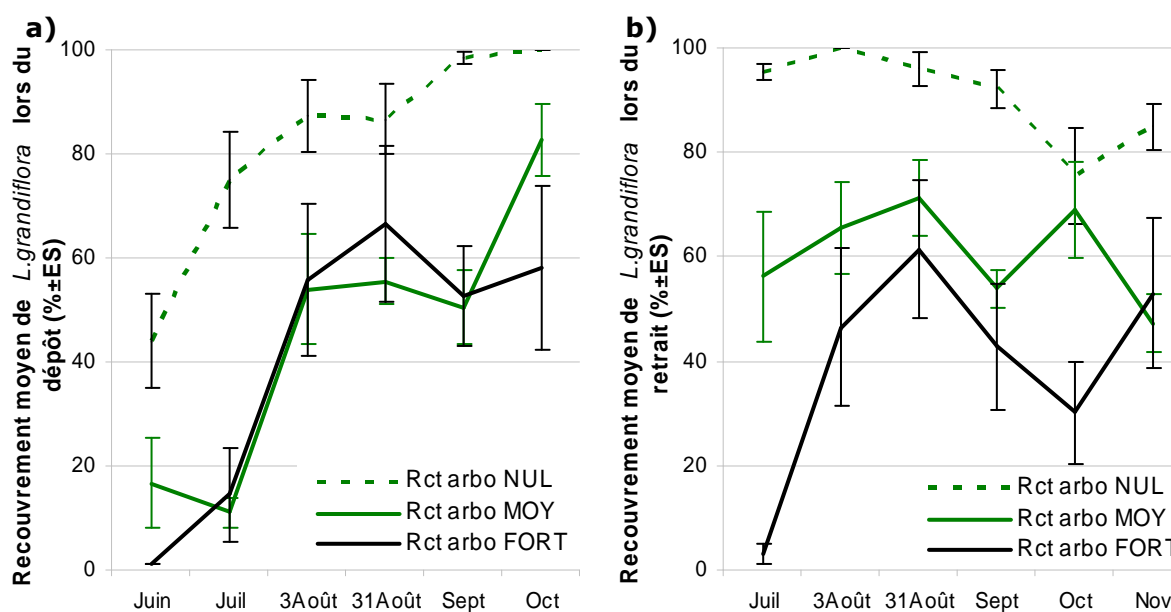
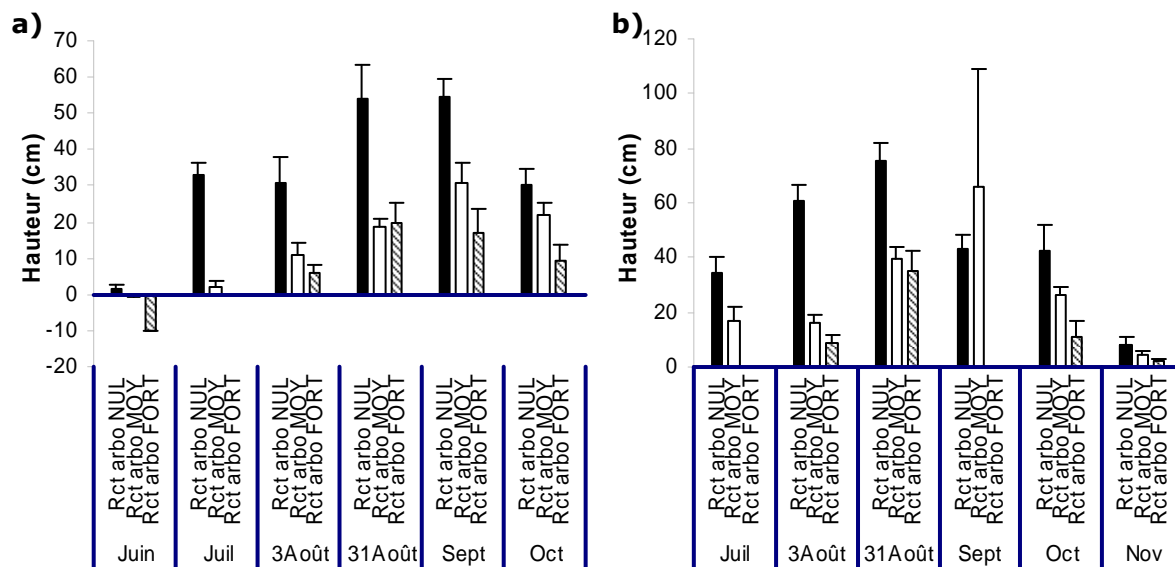


Figure 33 : Recouvrements de *L. grandiflora* lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boîtes de récoltes de la matière organique (sans prise en compte des valeurs nulles)

Lors de chaque campagne les recouvrements de *L. grandiflora* sont significativement différents (Figure 33). Celui du recouvrement arborescent nul étant toujours le plus fort (Kruskall & Wallis,  $\alpha=0,05$ ). Les jussies y sont en herbiers denses et cela dès juillet 2009.



**Figure 34 : Hauteur par rapport à la ligne d'eau de *L. grandiflora* lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boîtes de récolte de la matière organique (sans prise en compte des valeurs nulles). La Ligne d'eau coupe l'axe des ordonnées à zéro.**

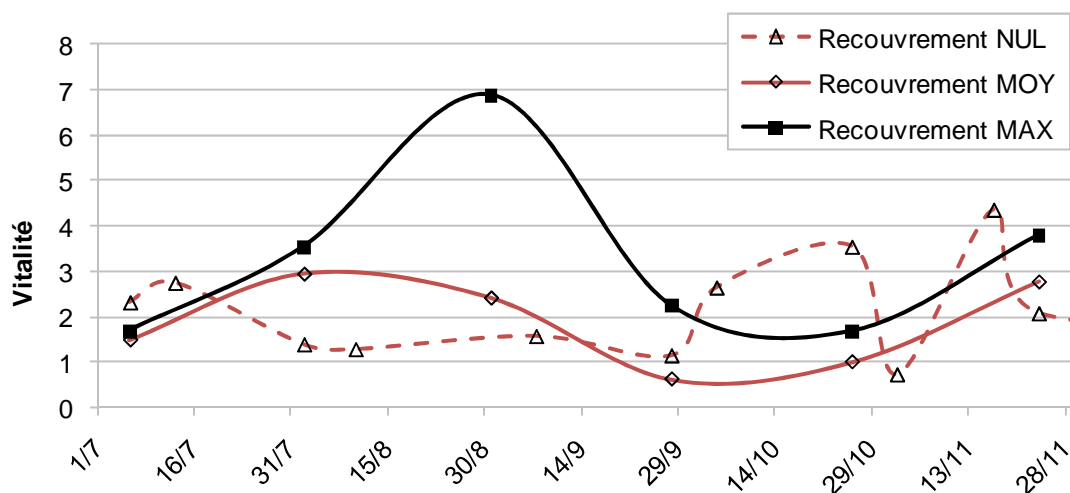
Lors des dépôts, quel que soit le recouvrement arboré, les herbiers de *L. grandiflora* se développent verticalement de juin à septembre avant de s'affaisser (Figure 34). Le développement vertical de *L. grandiflora* est toujours plus important pour la modalité « recouvrement arborescent nul » (Kruskall & Wallis,  $pval < 0,05$ ).

Lors des retraits, les mêmes tendances se dessinent. En novembre les tiges se sont fortement affaissées et ne dépassent que peu la surface de l'eau. Les hauteurs de jussies sont alors identiques quel que soit le recouvrement arborescent.

#### 4.3.4 Domaine de vitalité : chlorophylle a et phéopigment

Le GIP Loire estuaire utilise un indicateur dénommé : **la vitalité**. Son objectif est d'apprécier la présence et la vitalité de la population phytoplanctonique à partir de la concentration de deux pigments : chlorophylle a et phéopigments. La vitalité, part de la matière vivante sur la matière morte, s'exprime par le rapport de leurs concentrations respectives.

$$\text{Vitalité} = \frac{\text{Matière vivante exprimée par la concentration en Chl a}}{\text{Matière morte exprimée par la concentration en Phéop}}$$



**Figure 35 : Domaine de vitalité pour les trois conditions d'ombrage arboré**

Pour les trois recouvrements arborés, la vitalité est relativement importante tout au long de la saison (Figure 35). Peu de valeurs sont inférieures à 1 (phéopigments > chlorophylle a). Les plus fortes proportions de matière phytoplanctonique morte sont notées à partir de fin septembre.

Il semble y avoir un décalage dans le temps des variations de la vitalité entre les trois recouvrements arborés. Celle-ci augmente en premier pour un recouvrement arboré nul, puis moyen et pour finir maximum. Ces variations étant d'amplitudes très diverses.

#### 4.3.5 Article sur la production de matière organique

Après analyse des données, la classe d'ombrage intermédiaire a été retirée pour plus de clarté à la présentation de nos résultats. L'article suivant ayant pour titre « Litter production by exotic water primrose in back waters and comparison with natural riverine forest », traite de la production de matière organique au sein de l'annexe de Bréhémont.

##### Abstract

To test the hypothesis whether *L. grandiflora* affects litter dynamics in backwaters, we compared backwater areas with numerous mats of *L. grandiflora* and areas with few mats of *L. grandiflora*, paying attention to *in situ* : (i) litterfall dynamics, and (ii) accumulation of organic matter.

Shading regulates mats development and reduces their biomass production.

The amount of exogenous (riparian trees) and autochthonous (*L. grandiflora*) inputs were quasi similar, but the seasonality of litter inputs differed between riparian trees (mainly *Populus* and *Salix*) and *L. grandiflora*. Ash free dry mass and C:N ratio differed between macrophytes and trees.

## Introduction

Theoretical models (Vannote et al., 1980) predict increasing importance of autochthonous production by periphyton and aquatic vascular plants for middle-order streams but less importance of these sources in very large streams, mainly due to light limitation by suspended mineral and organic matter and plankton. The relative dominance of exogenous vs autochthonous sources of matter and energy has been shown to vary between stream systems and with local conditions within streams (Cummins et al., 1983; Minshall et al., 1983). Backwaters systems are generally characterised by expensive submerged and emergent macrophytes beds, and usually support greater phytoplankton densities than the rivers they are derived from (Boon, 1990). In these shallow floodplain waterbodies, primary producers, mainly algae and macrophytes, and autochthonous organic matter are the major sources of energy, biomass and oxygen. They generate different temporal and spatial fluxes.

The production of primary biomass is very dependent on local conditions such exposure to light and nutrient availability (Cronin and Lodge, 2003). The spatial distribution of incident radiation in the water body is much related to weather conditions, and to diurnal and seasonal changes. A reduced water level over slightly deeper aquatic areas improves light penetration and enhances aquatic macrophytes growth (Dale, 1986). The light field is also modified by the riparian vegetation, and by competition processes among individual macrophytes stands (Janauer, 2001).

When they are present in backwater, invasive macrophytes participate and change ecosystem processes including production, decomposition, nutrient cycling, hydrology, chemical parameters and others (Elton, 1958; Vitousek, 1990; D'Antonio and Vitousek, 1992; Vitousek et al., 1997). Several *Ludwigia* species are invasive in Europe and have been reported to have great impacts on ecosystems they invade due to their rapid growth rate that often result to dense mats (Sheppard et al., 2006). *L. grandiflora* and *L. peploides*, introduced in France at the beginning of the 19th century (Dandelot, 2004) are largely widespread in backwaters of the river Loire. The damage caused by these non-native invasive plants are directly linked to their biomass (Lambert et al., 2010). But, very few figures are available for standing biomass, and most of them being "grey literature".

To our knowledge, no previous research has specifically addressed the quantification of matter production by an invasive macrophyte in backwater of large rivers. This may be due to the inherent difficulty of studying this part of large rivers and to the lack of uniformly satisfactory methods efficient enough for routine assessments of live or dead organs (stems, leaves, fruits ...) of the season biomass (Westlake, 1963).

Moreover, optimum growth rate can't really be done under field conditions with destruction-free methods in situ (Janauer, 2001) but stratified biomass sampling can "give a good approximation".

The aims of this research were to quantify and determine the composition, in a former channel invaded by *L. grandiflora*, i) of in situ biomass production and ii) of in situ and, riparian provided, necromass. This was investigated within two shaded categories, open and closed canopy.

## **Materials and methods**

### *Study site*

The River Loire (France) is a 1000 km long river. The study site is located in its flood plain, 761 km downstream its source (0° 24'E, 47°19'N). The floodplain is 735m wide and the main channel is about 300m wide. The annual average flow is 429 m<sup>3</sup>. s<sup>-1</sup> (1985-2006, discharge values for the recording site of Langeais, Ministry of Ecology and Sustainable Development). The study site is disconnected from the active channel according to water discharge of 550 m<sup>3</sup>. s<sup>-1</sup> and contains water during summer. The substrate is sandy and muddy and the average depth of mud is 0.2 m during study summer. It is surrounded by trees, shrubs and lowland vegetation. Two canopy covers were identified, open canopy where no trees or shrubs were surrounding the area and closed canopy where trees or shrubs were covering more than 75% of the water surface.

Inside the backwater, from spring to autumn, water temperature was recorded, every hour, by a data logger located 10 cm above the mattress of plants roots. Only a few species of macrophytes can survive unless ambient temperature during the growing season reaches at least 10 °C (Sculthorpe, 1967 ; Christy and Sharitz, 1980 ; Best and Boyd, 2003 ; Lacoul and Freedman, 2006). This threshold was reached the 3<sup>rd</sup> April 2009. From this date, the mats started to grow from vegetative underground structure.

### *Field work: necromass and biomass harvest*

In each canopy cover, 18 harvest boxes (1/20m<sup>2</sup>) were placed at ground level. Each box consisted of a rectangular collector pierced to allow water circulation. Samples were collected monthly from June to November 2009. Before collecting the boxes,

macrophytes growing above were harvested. Their phenology (emerged, erected, flowering, fruits, ...) was also registered.

#### *Laboratory analyses*

All samples of leaves, stems ... from biomass (green shoots) or necromass (all vegetal matter fallen) were washed individually with tap water to remove sand, mud and macroinvertebrates. They were identified to genus for leaf trees, to species for macrophytes. However, some unidentifiable fragments (debris) were found. For all samples, dry mass (dw) was determined after drying at 105°C to constant weight. When possible, three samples of each taxon were used to determine carbon, nitrogen and mineral matter contents according to the effective French standards (NF ISO 14235 and NF ISO 11261).

Daily variation of biomass (RGR) and necromass (Fall Rate) production were calculated using relative growth rate method (Lorenzen et al., 2001).  $RGR = (\ln W_f - \ln W_i) / n$ ,  $W_f$  : final dry weight ;  $W_i$  : initial dry weight;  $\ln$  : natural logarithm,  $n$  : number of days.

Variations of production of biomass or necromass were calculated over a period of 28 days except for April to June biomass. The duration of this period is longer, 94 days, starting the 3<sup>rd</sup> April 2009. Necromasses initial weights, null in the field, were considered as 0.001 g for log transformation.

#### *Statistical analyses*

Because we never found normality distribution of our data, non-parametric tests (Wilcoxon or Kruskal Wallis) were used after having applied, when required, Bonferroni corrections for multiple comparisons. Correlations were tested with Spearman rank tests. All analyses were performed with Excelstats®.

## Results

### Biomass

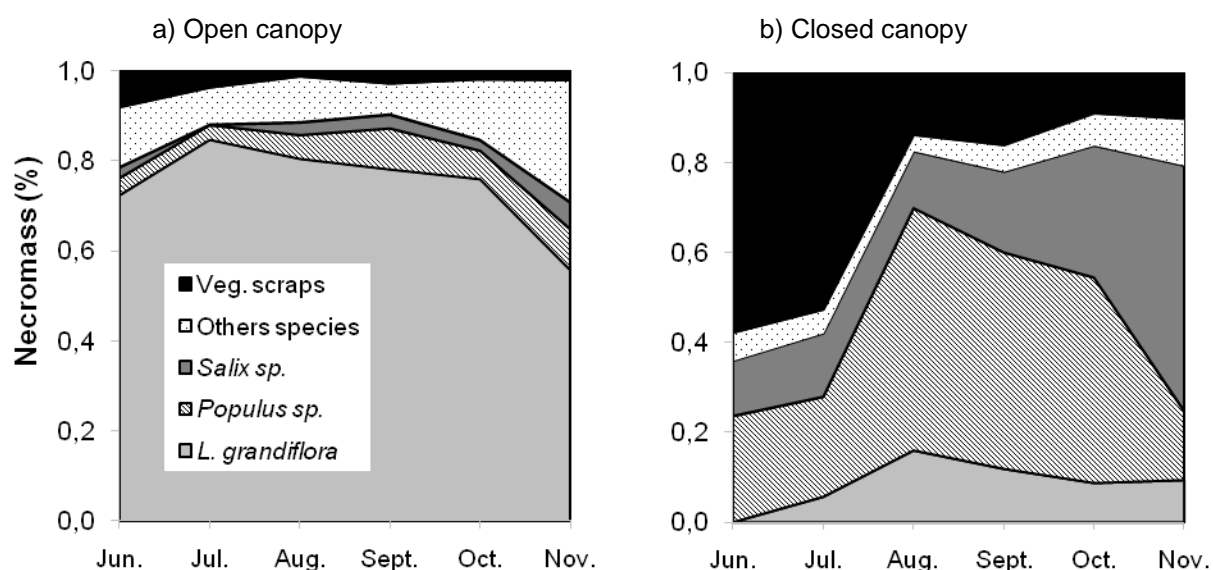
**Table 1: Total biomass of macrophytes harvest between April and November 2009 and proportions of *L. grandiflora***

	April-Jun.	July.	August	Sept.	Oct.	Nov.
<i>Open canopy</i>						
Nm	18	18	18	18	18	18
Total biomass (g dw.m <sup>-2</sup> )	246,6 ± 21,4 a	431,5 ± 36,6 b	481,9 ± 61,9 b	357 ± 42,8 ab	334,8 ± 36,7 ab	250,6 ± 25,2 a
Part of <i>L. grandiflora</i> (%)	98,9 ± 1,1	100 ± 0	100 ± 0	99,8 ± 0,1	99,9 ± 0	94,3 ± 5,5
<i>Closed canopy</i>						
Nm	5	13	13	16	18	18
Total biomass (g dw.m <sup>-2</sup> )	4,4 ± 2,2 a	60,4 ± 16,03 ab	166,5 ± 32,8 b	168,5 ± 58,4 b	97,4 ± 25,73 ab	75,6 ± 18,39 ab
Part of <i>L. grandiflora</i> (%)	77,5 ± 19,5	91,6 ± 7,6	98,9 ± 0,6	100 ± 0	79,3 ± 6,1	65,5 ± 10

Nm: Number of samples containing at least one macrophyte (biomass); Mean±SE, Kruskal-Wallis test with Bonferroni correction  $\alpha=0.0033$ , the letter indicates differences between biomass

Total biomasses showed a seasonal pattern (Kruskal-Wallis with Bonferroni correction, table 1) related to phenology, in open canopy, *L. grandiflora* was in bud in June and with fruits in August. The maximum of production took place one month later in closed canopy where buds were present only in August, and fruits in September. Masses collected in open canopy are always higher, at least twice as large, (Mann-Whitney,  $\alpha<0.05$ ). Whatever the canopy cover, *L. grandiflora* contributed at least for 65% of the total biomass. Very few other macrophytes species were collected *Ceratophyllum demersum*, *Spirodela polyrhiza*, *Lemna trisulca* and *L. minor*.

## Necromass



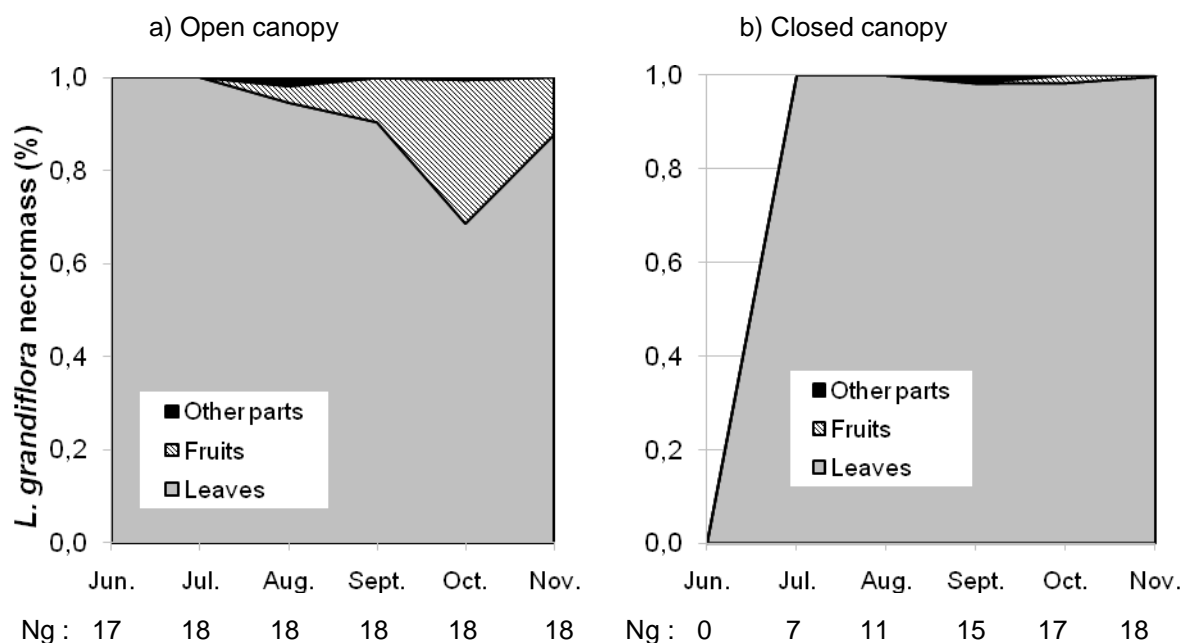
**Fig 1: Percentages of main taxa in necromass harvested between June and November in (a) open canopy and (b) closed canopy**

**Tab. 2: Total necromass harvest between July and November 2009 and proportions of *L. grandiflora***

	Jun	July	August	Sept.	Oct.	Nov.
<i>Open canopy</i>						
NI	17	18	18	18	18	18
Total necromass (g dw.m <sup>-2</sup> )	16,6 ± 2,19 a	21,3 ± 2,96 ab	25,1 ± 2,62 ab	37,5 ± 4,9 bc	65,1 ± 6,74 c	47,6 ± 4,16 c
Part of <i>L. grandiflora</i> (%)	82,1 ± 3,4	93,6 ± 2,3	92,4 ± 2,3	81,7 ± 3,4	84,2 ± 2,7	63 ± 4,2
<i>Closed canopy</i>						
NI	18	18	18	18	18	18
Total necromass (g dw.m <sup>-2</sup> )	20,3 ± 4,94 a	24,5 ± 5,53 a	50,8 ± 8,78 ab	60,7 ± 7,81 b	69,2 ± 5,59 bc	112,6 ± 7,2 c
Part of <i>L. grandiflora</i> (%)	0 ± 0	4,6 ± 2,6	11,2 ± 2,8	11,2 ± 2,9	8,9 ± 1,7	8,8 ± 2,1

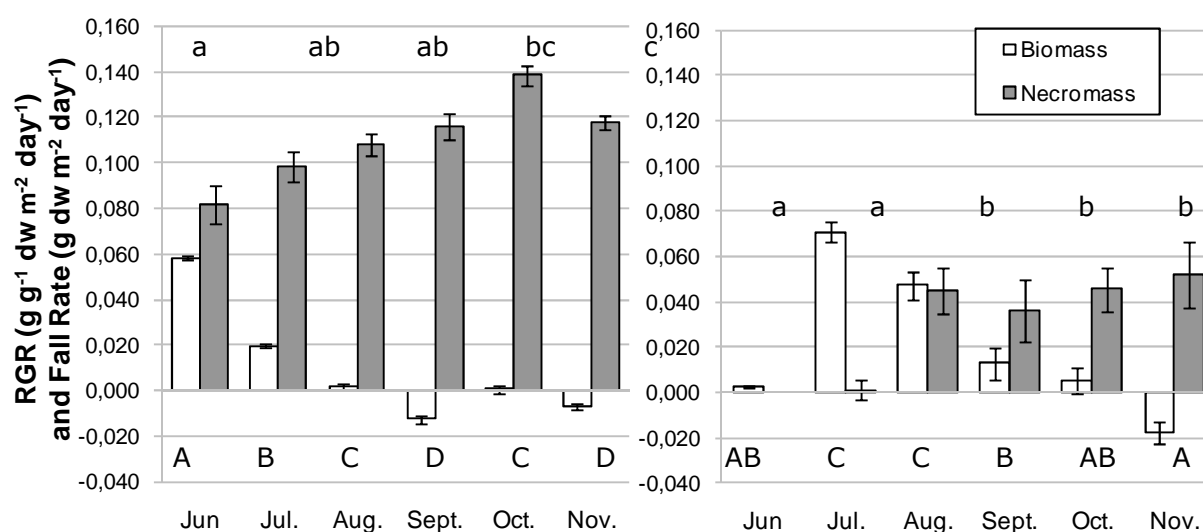
NI: Number of samples containing at least one piece of litter; Mean±SE, n=18, Kruskal-Wallis test with Bonferroni correction  $\alpha=0.0033$  in each canopy class, the letter indicates differences between biomass

Necromasses were differing according to the type of canopy. They were always increasing in the closed canopy whereas the maximum was reached in October for the open canopy (table 2). Differences in necromasses between the types of canopy are significant from August to November (Mann-Whitney  $\alpha < 0.05$ ) but the taxa constituting the necromasses were different. In the open canopy, *L. grandiflora* was the main provider and in the closed canopy *L. grandiflora* provided for less than 12%. The others sources were vegetation scraps in Jun and July, *Populus* sp. from August to October and *Salix* sp. in November (figure 1). For both canopy cover, other species (figure 1) were mostly *Ulmus* sp and *Fraxinus* sp for, at least, 70% in open canopy and 90% in closed canopy. Necromasses of trees were leaves and mostly leaves for *L. grandiflora* (figure 2). *L. grandiflora* fruits were showing a strong seasonal pattern in open canopy (figure 2).



**Fig. 2: Parts of *L. grandiflora* in necromass harvest between June and November in open canopy and closed canopy; Ng: Number of samples containing at least one *L. grandiflora* in necromass (n max=18)**

### Biomass et necromass productivities



**Fig 3: RGR (biomass) and Fall Rate (necromass) of *L. grandiflora* during the growing season, on 28 days periods, for (a) open canopy and (b) closed canopy (Mean  $\pm$  SE). \*: Calculated on 94 days, April to June. Capital or small letters indicate significant ( $p < 0.05$ ) differences (Kruskal Wallis test) on respectively biomass or necromass.**

In open canopy, RGRs decrease from June to September (Kruskal-Wallis corr. Bonferroni  $\alpha = 0.0033$ , figure 3). In closed canopy, RGRs decrease from July to October. RGR (g.g<sup>-1</sup>dw.m<sup>2</sup>.day<sup>-1</sup>) was higher in the close ( $0.02 \pm 0.002$ ) than in open canopy ( $0,008 \pm 0.001$ ). But Fall Rates, always positive, were higher in open ( $0.11 \pm 0.007$ ) than in closed canopy ( $0.03 \pm 0.011$ ). They were increasing until October in open canopy as they were stable from August to November in closed canopy (Kruskal-Wallis corr. Bonferroni  $\alpha = 0.05$ , figure 3).

### Necromass composition

Between the two shading conditions, the levels of mineral matter, nitrogen and carbon of *L. grandiflora* did not differ (Tab 3). In open canopy, nitrogen content increased over time ( $R^2 = 0.906$ ,  $p < 0.01$ , Spearman test) but Carbon content did not follow the same trend ( $R^2 = 0,1146$ ,  $p > 0,05$ ). The C: N ratio between the two classes of shading were also different (Closed c.  $12,02 \pm 0,6$  ; Open c.  $15,6 \pm 0,86$  ;  $U = 60$ ,  $p = 0,042$ ).

Carbon and mineral matter content of necromasses of tree and *L. grandiflora*, leaves differed (Tab 3). Mineral matter content was higher for *L. grandiflora* while, carbon content of *L. grandiflora* was smaller than in *Populus* or *Salix*.

**Tab. 3: Mineral matter, nitrogen and carbon content of *L. grandiflora*, *Populus* and *Salix* necromass (mainly leaves) (Mean±SE)**

	<i>L. grandiflora</i> open canopy	<i>L. grandiflora</i> closed canopy	<i>Populus</i> sp.	<i>Salix</i> sp.	Kruskall-Wallis test
<i>N</i>	18	4	14	12	
Mineral matter	23.07±1.46 a	24.4±2.34 a	13.78±1.14 b	15.72±1.99 b	K:20.695 p=0.0001
%N (leaves)	1.87±0.09 a	2.09±0.04 a	1.77±0.04 a	1.83±0.05 a	K:5.471 p=0.14 n.s.
%C (leaves)	27.99±0.9 a	25.29±2.15 a	39.21±0.67 b	38.66±0.9 b	K:35.028 p<0.0001

## Discussion

*L. grandiflora* is the main endogenous source of biomass in backwater. It still contributes over 65% of the biomass produced whatever the canopy covers. Other macrophytes are present in small numbers and produce little biomass. They were identified to be "rooted floating" for *Lemna* sp. or "submerged" for *C. demersum*. *L. grandiflora*, belonging to the functional group (creeping emergent, Sculthorpe, 1967 275), stands above the water, forms dense beds and shade the underlying water. It may limit other macrophytes development by competing for light and also for nutrients.

Whatever the shading conditions, the biomasses of *L. grandiflora* follow the same temporal pattern. During the growing season, they increase until the flowering stage and then decrease, following the classic pattern of development of plants (Westlake, 1966 1456). The maximum biomass, around 500 g dw m<sup>-2</sup>, measured in this study is somewhat low compared to those of *Ludwigia* spp. found in France (200-4 500 g dw m<sup>-2</sup> (Lambert et al., 2010 1507)), *L. peploides* in California (500-700 g dw m<sup>-2</sup>) or others creeping emerging plants (400-800g dw m<sup>-2</sup>, Rejmankova (1992)). This difference can be explained by our choice to take into account only the erected part of *L. grandiflora* (mostly stems and leaves) produced during the growing season, and not the creeping stems and roots present in soil or mud. This choice is justified because (i) the date of production of creeping stems cannot be known with certainty and (ii) the extraction of these long stems (several meters) should have disturbed the stand and the plants growth inducing a strong experimental bias.

A smaller biomass and a one-month lag in *L. grandiflora* development are observed between the two shading conditions. In closed canopy, biomass is reduced and delayed. Shading plays an important role on the amount of biomass produced by *L. grandiflora* as noted by Hussner (2009). A dense riparian border would thus limit the growth of *L. grandiflora* and could be a management tool for this invasive plant.

Following a classic pattern of development, the maximum RGRs occur two months preceding the biomass maximum (open canopy: June and August, closed canopy: July to September). In open canopy, the maximum RGR (0.058 g g<sup>-1</sup> dw day<sup>-1</sup>) is 20% lower than in the shaded area (0.071 g g<sup>-1</sup> dw day<sup>-1</sup>). The maximum RGRs are in the same order of magnitude than those observed under experimental conditions by Hussner (2009 ; 2010).

The largest reductions in RGRs are observed in July (open canopy) and September (closed canopy) and are not associated with a sharp increase of necromass. This can be explained by a higher resource allocation to reproductive organs because these decreases coincided with the appearance of flowers and fruits. The fruits also play an important role in the evolution of necromass with a time lag of two months. This time lag may be related to their hydrochory. They can float a few weeks to more than three months Ruaux (2009), so they will appear after the dead leaves in the necromass.

The amounts of necromasses of *L. grandiflora* are logically related to biomass. Necromass production is smaller in closed canopy where dead tree leaves necromass (230 g dw.-M<sup>2</sup> in 6 months) is higher than for *L. grandiflora* (35 g dw. m<sup>-2</sup>). During the experiment, the amount of *L. grandiflora* necromasses in open canopy (dw 173g.-m<sup>2</sup>) are almost equivalent to those of tree leaves in closed canopy. In backwaters, the presence of invasive macrophytes lead to some homogenization of the spatial deposition of organic matter, ie a large endogenous necromass in open canopy and an exogenous dominant necromass in closed canopy.

Few differences were noted in the composition of the necromasses. Leaves nitrogen content of *Populus* and *Salix* and of *L. grandiflora* in open canopy were identical. However, *L. grandiflora* carbon content is lower and the mineral content is higher than those of tree leaves. This is consistent with many data indicating that carbon content is

lower in macrophytes compared to wood and for the contents of mineral matter (Allan, 1995).

The presence of *L. grandiflora* necromasses may alter the quality of organic matter in this backwater and its rates of decomposition. The decomposition of organic matter is depending on 1) the availability of nutrients that can be used by decomposers, among other factors. In general, high concentrations of dissolved nutrients, primarily nitrogen (N) and phosphorus (P) accelerate this process (Kaushik & Hynes 1971, Elwood et al 1981, Valiela et al 1985), 2).a low C:N ratio that generally makes litter much more suitable for litter decomposition (Godshalk and Wetzel, 1978). But, *L. grandiflora* contains many phenolic compounds Dandelot (2008) that may encounter a high degradation rate (Cronin and Lodge, 2003 1420).

The dense beds of *L. grandiflora* in the backwaters produce an endogenous organic matter especially in sunny areas. These large amounts can build-up of anoxic conditions. From an ecosystem standpoint, the most important consequences of macrophyte decay are release of dissolved substances, deoxygenation and sediment accretion (Carpenter and Lodge, 1986). In order to limit the quantities of organic matter produced by these macrophytes, measures such as conserving riparian vegetation and providing shade by trees should help to reduce the amount of organic matter.

### References

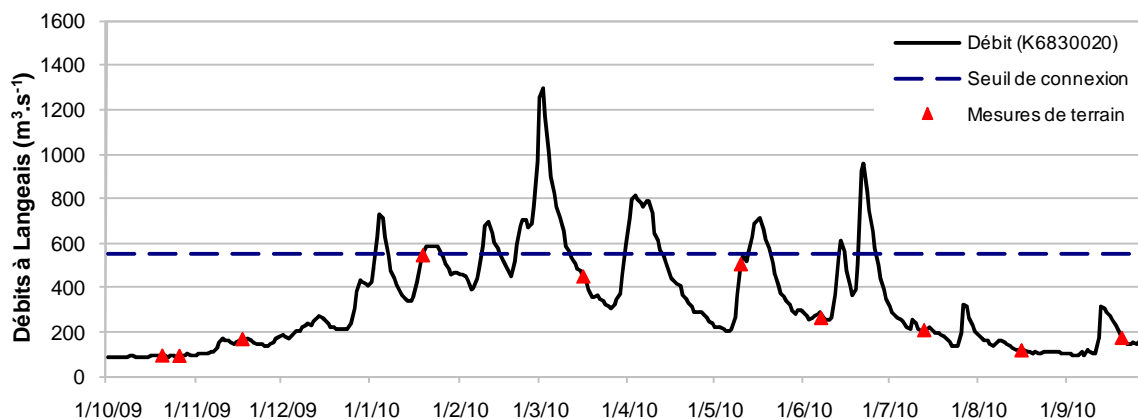
- Best, E.P.H., Boyd, W.A., 2003, A simulation model for growth of the submerged aquatic macrophyte sago pondweed (*Potamogeton pectinatus* L.). US Army Corps of Engineers, Washington DC.
- Boon, P.I., 1990. Organic matter breakdown and nutrient regeneration in Australian freshwaters. II. Spatial and temporal variation, and relation with environmental conditions. Archiv fur Hydrobiologie 117, 405:436.
- Carpenter, S.R., Lodge, D.M., 1986. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. Aquat. Bot. 26, 341-370.
- Christy, E.J., Sharitz, R.R., 1980. Characteristics of three populations of a swamp annual under different temperature regimes. Ecology 6, 454-460.

- Cronin, G., Lodge, D.M., 2003. Effects of light and nutrient availability on the growth, allocation, carbon/nitrogen balance, phenolic chemistry, and resistance to herbivory of two freshwater macrophytes. *Oecologia* 137, 32-41.
- Cummins, K.W., Sedell, J.R., Swanson, F.J., Minshall, G.W., Fisher, S.G., Cushing, C.E., Petersen, R.C., Vannote, R.L., 1983, Organic matter budgets for stream ecosystems: Problems in their evaluation. In: Barnes, J.R., Minshall, G.W. (Eds.), *Stream ecology*. Plenum, New York, pp. 299-353.
- D'Antonio, C.M., Vitousek, P.M., 1992. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 23, 63-87.
- Dale, H.M., 1986. Temperature and light: The determining factors in maximum depth distribution of aquatic macrophytes in Ontario, Canada. *Hydrobiologia* 133, 73-77.
- Dandelot, S., 2004, *Les Ludwigia spp. invasives du Sud de la France : historique, biosystématique, biologie et écologie*. Université Paul CEZANNE, Aix-Marseille III, Marseille, p. 207.
- Dandelot, S., Robles, C., Pech, N., Cazaubon, A., Verlaque, R., 2008. Allelopathic potential of two invasive alien *Ludwigia* spp. *Aquat. Bot.* 88, 311-316.
- Elton, C.S., 1958, *The ecology of invasions of animals and plants*. Methuen, London.
- Hussner, A., 2009. Growth and photosynthesis of four invasive aquatic plant species in Europe. *Weed Research.* 49, 506-515.
- Hussner, A., 2010. Growth response and root system development of the invasive *Ludwigia grandiflora* and *Ludwigia peploides* to nutrient availability and water level. *Fundamental and Applied Limnology* 177, 189-196.
- Janauer, G.A., 2001. Is what has been measured of any direct relevance to the success of the macrophyte in its particular environment? *J. Limnol.* 60, 33-38.
- Lacoul, P., Freedman, B., 2006. Environmental influences on aquatic plants in freshwater ecosystems. *Environ. Rev.* 14, 89-136.
- Lambert, E., Dutartre, A., Coudreuse, J., Haury, J., 2010. Relationships between the biomass production of invasive *Ludwigia* species and physical properties of habitats in France. *Hydrobiologia* 656, 173-186.
- Lorenzen, B., Brix, H., Mendelssohn, I.A., McKee, K.L., Miao, S.L., 2001. Growth, biomass allocation and nutrient use efficiency in *Cladium jamaicense* and *Typha domingensis* as affected by phosphorus and oxygen availability. *Aquat. Bot.* 70, 117-133.

- Minshall, G.W., Petersen, R.C., Cummins, K.W., Bott, T.L., Sedell, J.R., Cushing, C.E., Vannote, R.L., 1983. Interbiome comparison of stream ecosystem dynamics. *Ecol. Monogr.* 53, 1-25.
- Rejmankova, E., 1992. Ecology of creeping macrophytes with special reference to *Ludwigia peploides* (H.B.K.) Raven. *Aquat. Bot.* 43, 283--299.
- Ruaux, B., Greulich, S., Haury, J., Berton, J.-P., 2009. Sexual reproduction of two alien invasive *Ludwigia* (Onagraceae) on the middle Loire River, France. *Aquat. Bot.* 90, 143-148.
- Sculthorpe, C.D., 1967, *The biology of aquatic vascular plants*. Edward Arnold, London.
- Sheppard, A.W., Shaw, R., Sforza, R., 2006. Top 20 environmental weeds for classical biological control in Europe: a review of opportunities, regulations and other barriers to adaptation. *Weed Research* 46, 93-117.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., Cushing, C.E., 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci./J. can. sci. halieut. aquat.* 37, 130-137.
- Vitousek, P.M., 1990. Biological invasions and ecosystem processes: towards an integration of population biology and ecosystem studies. *Oikos* 57, 7-13.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J.M., 1997. Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277, 494 - 499.
- Westlake, D.F., 1963. Comparisons of plant productivity. *Biological Reviews* 38, 385-425.
- Westlake, D.F., 1966, Some basis data for investigation of the productivity of aquatic macrophytes. In: Goldman, C.R. (Ed.), *Primary productivity in aquatic environments*. University of California Press, Ltd., Berkeley and Los Angeles, California, pp. 229-248.

## 4.4 Question 2A : Quantifier la dégradation des feuilles et tiges hors période de végétation

### 4.4.1 Calendrier des relevés de terrain



**Figure 36 : Débits journaliers moyens de 2009 et 2010, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne**

Les expériences de quantification de la dégradation des feuilles et des tiges hors période de végétation s'étalent sur onze mois, d'octobre 2009 à septembre 2010 (Figure 36). Après la première mise en place des lignes de décomposition, nous les avons relevées après 28, 85, 147, 197, 224, 260, 294 et 329 jours (§2.3.2, p13).

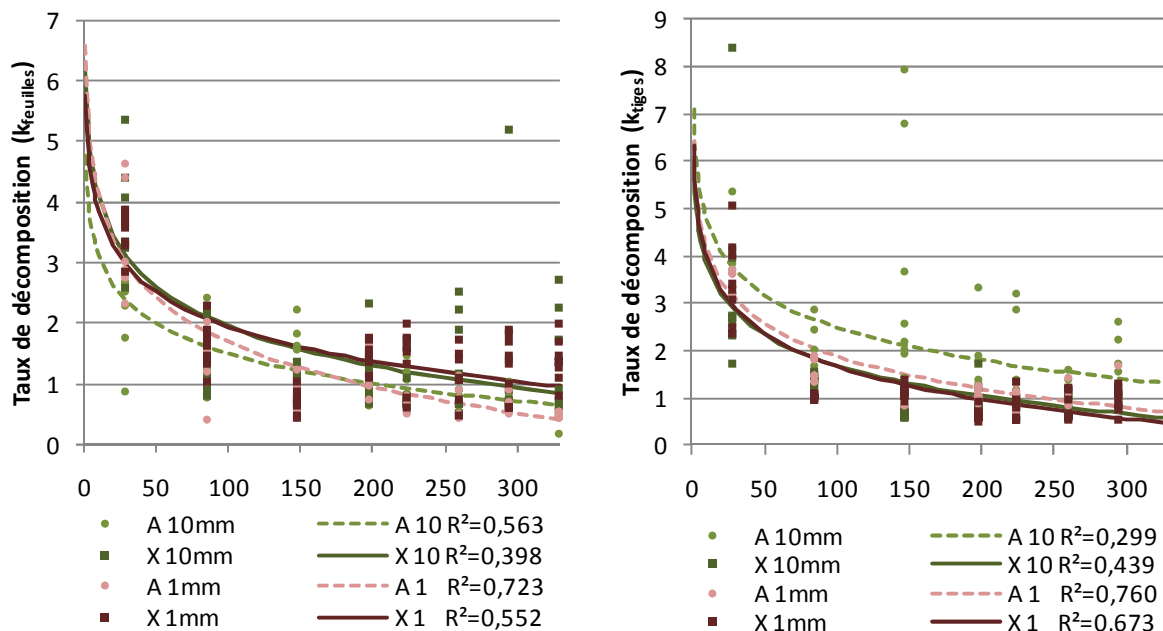
### 4.4.2 Perte de masse des feuilles et tiges

Les taux de décomposition des feuilles et des tiges de *L. grandiflora* sont corrélés aux temps d'immersion dans l'eau (Spearman,  $\alpha < 0,05$ ). Ils suivent une courbe logarithmique en fonction du temps (Figure 37). Ils sont les plus importants juste après leur immersion et quelles que soient les densités ou diamètres des mailles des paniers.

Pour les feuilles et les tiges, les taux de décomposition diffèrent entre les quatre modalités (ANCOVA p-value  $< 0,05$ ). Cette différence en fonction des densités de feuilles et des diamètres de maille est peu marquée pour les feuilles (Tukey test) mais elle l'est plus pour les tiges, où le taux de décomposition est le plus rapide pour celles entreposées dans les paniers à faible densité initiale (densité A) et à grande maille (10 mm) (Tukey test, Tableau 8).

**Tableau 8 : Moyennes estimées des taux de décomposition et résultats des tests de Tukey (X forte densité initiale ; A : faible densité initiale ; 1 mm : panier à petite maille ; 10 mm : grande maille)**

Modalité	k feuille moyen	Groupes Tukey	k tige moyen	Groupes Tukey
X 1mm	1,568	A	1,206	B
X 10mm	1,525	A B	1,261	B
A 1mm	1,205	B C	1,429	B
A 10mm	1,176	C	2,032	A

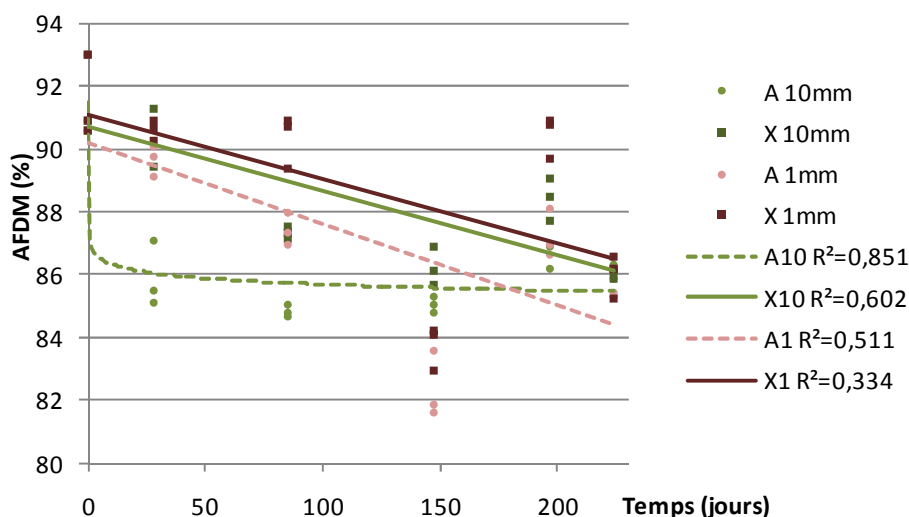


**Figure 37 : Taux de décomposition des feuilles et tiges de *L. grandiflora* au cours du temps (jours) en fonction de la densité des celles-ci (respectivement A=2,9g et 2g et X=5,8g et 4g à l'air) et du diamètre des mailles des paniers (1=1 mm et 10= 10 mm), n=64**

#### 4.4.3 Teneur en matière organique

Les teneurs en matières organiques couramment appelées AFDM (Ash Free Dry Mass= Masse sèche sans cendre) sont calculées à partir des taux de matière minérale mesurés par le Laboratoire de Touraine.

Les AFDM des feuilles et tiges de *L. grandiflora* diminuent en fonction du temps d'immersion. Cette diminution suit un modèle linéaire sauf pour les paniers à grande maille et à faible densité initiale de feuilles et tiges (A 10 mm, modèle logarithmique, Figure 38). Dans un premier temps la diminution des teneurs en AFDM des feuilles et tiges « A10mm » est très rapide.



**Figure 38 :** Évolution au cours du temps du pourcentage d'AFDM des feuilles et tiges de *L. grandiflora* en fonction de la densité initiale de celles-ci (respectivement A=2,9g et 2g et X=5,8g et 4g à l'air) et du diamètre des mailles des paniers (1=1 mm et 10= 10 mm), n=18

Dans ce modèle, 45,8% de la variabilité des teneurs en AFDM est expliquée par la densité initiale, le diamètre des mailles et le temps (ANCOVA). La taille des mailles influence peu le modèle (Tukey test,  $p=0,3$ ), par contre la densité initiale a un effet significatif sur l'évolution des teneurs en AFDM (Tukey test,  $p=0,002$ ). Lorsque les densités initiales sont faibles, les pertes de matières organiques sont plus rapides.

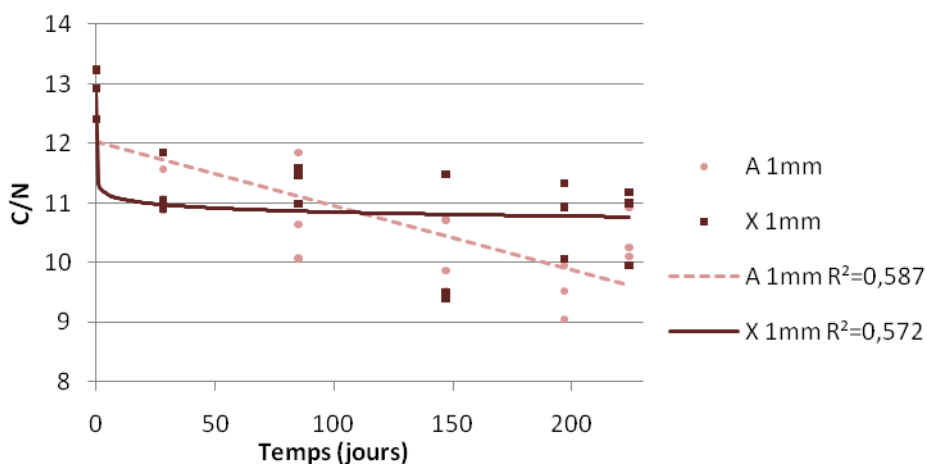
#### 4.4.4 Évolution des teneurs en carbone et azote des feuilles et tiges de *L. grandiflora*

Les teneurs en carbones et azotes des feuilles et tiges de *L. grandiflora* ont été mesurés avant leur dépôt dans le milieu aquatique puis à cinq reprises jusqu'à 224 jours après leur dépôt et seulement pour les paniers de petites maille (1mm) pour des questions de coûts.

Les teneurs en carbones mesurées sont dispersées. Il n'existe pas de corrélation entre les faibles densités initiales (A1mm) et le temps (Spearman  $pval=0,308$ ). En revanche, il existe une corrélation entre les fortes densités initiales (X1mm) et le temps (Spearman  $pval=0,04$ ). Les données suivent une courbe logarithmique avec une chute brutale des teneurs en carbone dès le dépôt dans le milieu aquatique.

Les teneurs en azote des feuilles et des tiges ne sont pas corrélées avec le temps pour la modalité forte densité initiale (X 1mm, Spearman  $pval=0,091$ ). En revanche,

elles sont corrélée (Spearman  $pval < 0.0001$ ) et augmentent linéairement au cours du temps pour la modalité faible densité initiale (A 1mm).

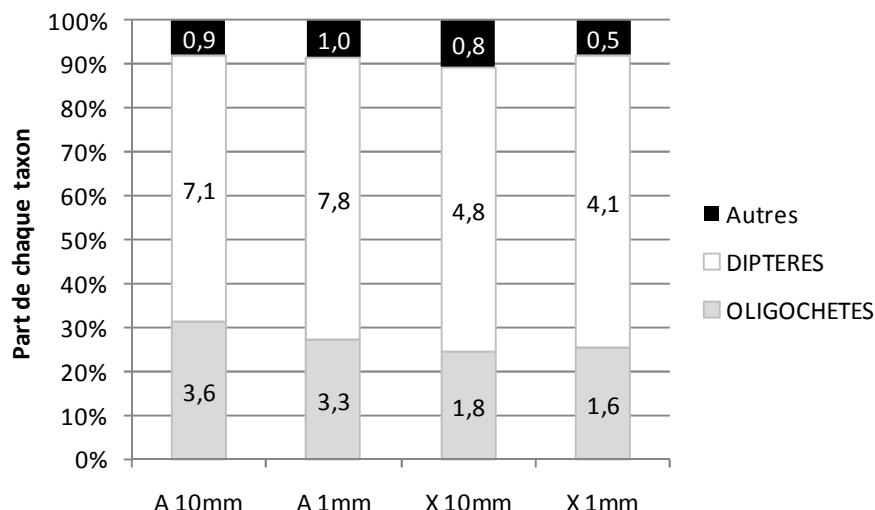


**Figure 39 : Évolution au cours du temps des teneurs du rapport carbone sur azote (C/N) de *L. grandiflora* en fonction de la densité initiale (A=2,9g et 2g et X=5,8g et 4g à l'air), n=18**

Les rapports C/N des feuilles et tiges de *L. grandiflora* des deux modalités de densité initiale (A et X) sont corrélés avec le temps (Spearman  $pval < 0.05$ ). Pour les faibles densités initiales (A), le rapport C/N diminue linéairement au cours du temps. Pour les fortes densités initiales (X), le rapport diminue fortement au cours des 28 premiers jours (Figure 39).

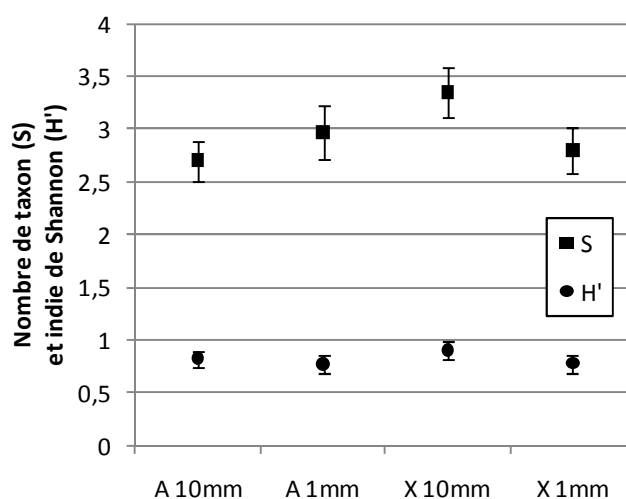
#### 4.4.5 Évolution des communautés de macroinvertébrés

Lors de chaque relève de paniers, le contenu en invertébrés a été identifié et quantifié (cf partir 232). Le nombre de macroinvertébrés est rapporté au poids sec final de feuilles et tiges de *L. grandiflora*. Des différences sont notées entre les quatre modalités (densité de feuilles initiale et diamètre des mailles), (F : 5,958,  $pval = 0,003$  ; Figure 40). En revanche, la variable diamètre des mailles n'a pas de poids significatif dans le modèle, ce qui est confirmé par le test de Tukey ( $pval = 0,484$ ). Par contre, la densité initiale des feuilles et tiges au sein des paniers influence le nombre d'individus de macroinvertébrés recensés (Tukey test,  $pval = 0,001$ ). Les paniers de faible densité de feuilles et de tiges initiale (A) ont un nombre d'invertébrés presque deux fois plus importants (A=  $13 \pm 1,5$  ind/poids sec final ; X=  $7 \pm 0,6$  ind/poids sec final).



**Figure 40 : Répartition du nombre d'individus par poids sec final de *L. grandiflora* des oligochètes, diptères et autres macroinvertébrés présents dans les paniers de feuilles et tiges de *L. grandiflora* (les étiquettes donnent les moyennes du nombre d'individus, n=40)**

La richesse taxonomique (S) et l'indice de Shannon (H') sont faibles pour les quatre modalités. La richesse taxonomique est maximale pour la modalité « forte densité initiale et grande maille » :  $3,35 \pm 0,24$  taxons (Figure 41) L'indice de Shannon est maximal ( $0,90 \pm 0,08$ ) pour la même modalité, mais elle n'est pas significativement supérieure aux autres valeurs. Aucun effet de la taille des mailles ou des densités initiales des feuilles et tiges de *L. grandiflora*, n'est noté pour ces deux indices (ANOVA à 2 facteurs pour **S** :  $F = 0,724$ , pval : 0,486 ; pour **H'** :  $F = 0,769$ , pval : 0,465). Les valeurs faibles de la richesse taxonomique entraînent celles de l'indice de Shannon, de plus, un taxon domine, les chironomini (Diptères).



**Figure 41 : Nombre de taxon (S) et indice de Shannon (H') pour les quatre modalités (diamètre de maille x densité initiale), moyenne  $\pm$  ES, n=40**

Après 85 jours d'immersion, le nombre d'individus par poids sec final de feuilles et tiges de *L. grandiflora* est significativement le plus élevé ( $18,62 \pm 2,85$  ;  $F = 9,339$   $pval < 0,00001$  ; Tukey test  $pval < 0,011$ , Figure 42). La diversité taxonomique est quant à elle, significativement plus importante après 28 jours d'immersion ( $4,38 \pm 2,85$  ;  $F = 25,19$ ,  $pval < 0,0001$  ; Tukey test  $pval < 0,0001$ ). Les mangeurs de sédiments fins et les déchiqueteurs, sont principalement des Chironomini (Diptères) et les Oligochètes (Tachet et al. 2000). Cette dominance entraîne de très faibles indices de diversité globaux.  $H'$  est le plus élevé après 147 jours d'immersion mais est significativement égal à celui calculé après 28 jours d'immersion ( $F = 10,943$   $pval < 0,0001$  ; Tukey test, Figure 42). Néanmoins, la richesse taxonomique évolue faiblement au cours du temps. Elle est la plus importante en novembre 2009 (après 28 jours d'immersion).

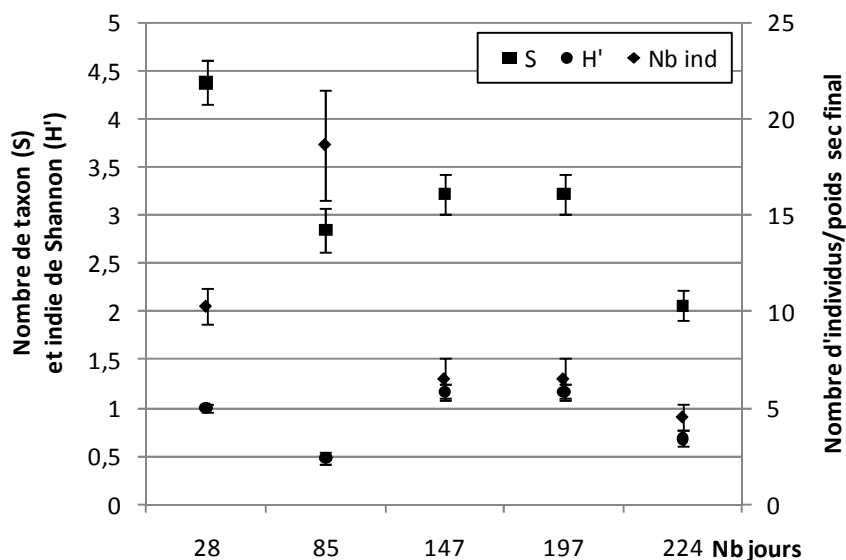


Figure 42 : Nombre de taxon (S), indice de Shannon (H') et nombre d'individus en fonction du nombre de jour d'immersion des feuilles et tiges de *L. grandiflora*, toutes modalités confondues, moy  $\pm$  ES, n=36

#### 4.4.6 Discussion sur la dégradation des feuilles et tiges de l'année précédente

Les pertes de masses des feuilles comme des tiges de *L. grandiflora* sont les plus fortes au cours des 28 premiers jours. Ces pertes rapides sont principalement dues au lessivage des particules peu liées. En revanche, la très forte perte de tige au sein des grandes mailles et faible densité initiale peut être imputée à un biais expérimental. Dans cette modalité, le nombre de tiges initial est très faible (2-3 morceaux) et les tiges

passent facilement au travers des mailles lors de la manipulation des paniers (mise en place, retrait et flux d'eau). Les pertes importantes de biomasses de tige sont donc sans doute sur estimées.

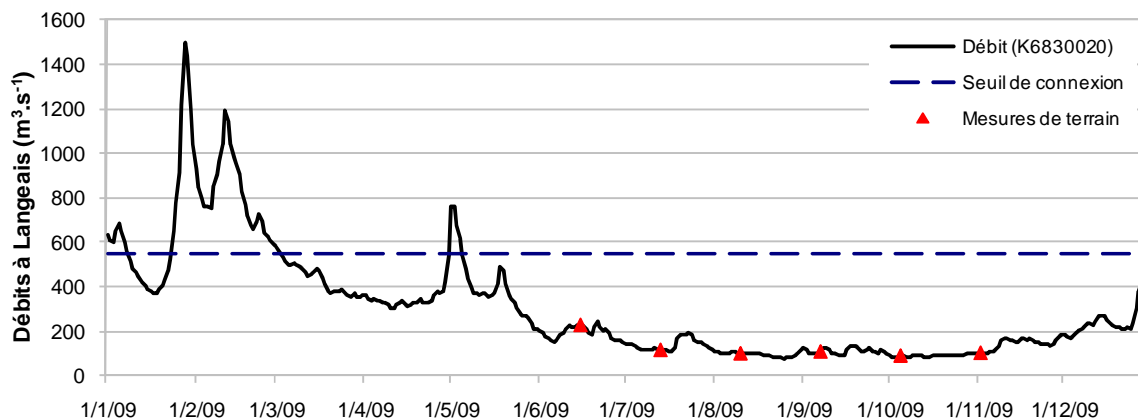
Les teneurs en matière organique diminuent linéairement au cours du temps quelle que soit la modalité initiale (diamètre des mailles et densité). Le modèle de perte de matière organique diffère pour la modalité grande maille-faible densité et est sans doute lié comme précédemment à un biais expérimental. Les pertes de matière organique étant plus rapides pour les faibles densités initiales.

Les rapports C/N ont été mesurés seulement sur les petites mailles. Cela permet d'éviter le biais expérimental dû aux grandes mailles. Ces rapports évoluent différemment en fonction de la densité initiale de feuilles et tiges de *L. grandiflora* au sein des paniers. Le rapport C/N pour les faibles densités initiales diminue régulièrement au cours du temps passant de 13 à 10 après 224 jours dans l'eau. Cette baisse est principalement due à l'augmentation linéaire des teneurs en azote dans les fragments végétaux. Pour les fortes densités initiales, la diminution du rapport C/N est rapide au cours des 28 premiers jours d'immersion. Celle-ci est principalement liée à la chute brutale des teneurs en carbone du matériel végétal.

Peu de temps après leur immersion, les feuilles et les tiges de *L. grandiflora* sont colonisées par des macroinvertébrés. Cette colonisation rapide des débris végétaux par les macroinvertébrés a été bien étudiée (Cummins 1973 ; McArthur and Barnes 1988 ; Wallace and Webster 1996). En revanche, au cours de cette étude, les effectifs les plus importants ont été dénombrés après 85 jours (janvier 2010). Cette augmentation du nombre d'individus est peut être due à une certaine protection contre le courant que procure les paniers car l'échantillonnage a été réalisé consécutivement à la première crue. De plus, le nombre de macroinvertébrés colonisant les feuilles et tiges de *L. grandiflora* est influencé par le diamètre des mailles. Contrairement à nos attentes, leur nombre est plus important dans les petites mailles. Peut-être que les petites mailles fournissent un abri aux mangeurs de sédiments fins et aux déchiqueteurs en limitant le nombre et la taille des prédateurs.

## 4.5 Question 2B : quantifier la dégradation des feuilles lors de la période de végétation

### 4.5.1 Calendrier des relevés de terrain



**Figure 43 : Débits journaliers moyens de 2009, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne**

Cette expérience s'étale sur cinq mois : de juin 2009 à octobre 2009. Après la première mise en place des paniers de décomposition, nous les avons relevés et déposés tous les 28 jours (§2.3.3, p15) (Figure 43).

### 4.5.2 Pertes de masse des feuilles après 28 jours

Après 28 jours d'immersion dans la fosse de l'annexe hydraulique, il reste  $73\% \pm 0,95$  du poids initial de feuille pour les paniers à petites mailles et  $60\% \pm 1,63$  pour les paniers à grandes mailles. Les pertes de masse des feuilles de *L. grandiflora* au sein des paniers à grandes mailles sont significativement plus importantes qu'au sein des paniers à petites mailles (Mann-Whitney  $p < 0,05$ ).

Les poids secs restants suivent le même pattern pour les deux diamètres de maille. Les plus fortes pertes sont notées en Aout (Figure 44).

Chaque mois, à partir d'aout, les pertes de biomasses sont significativement plus importantes pour les grandes mailles (Wilcoxon,  $p < 0,05$ ).

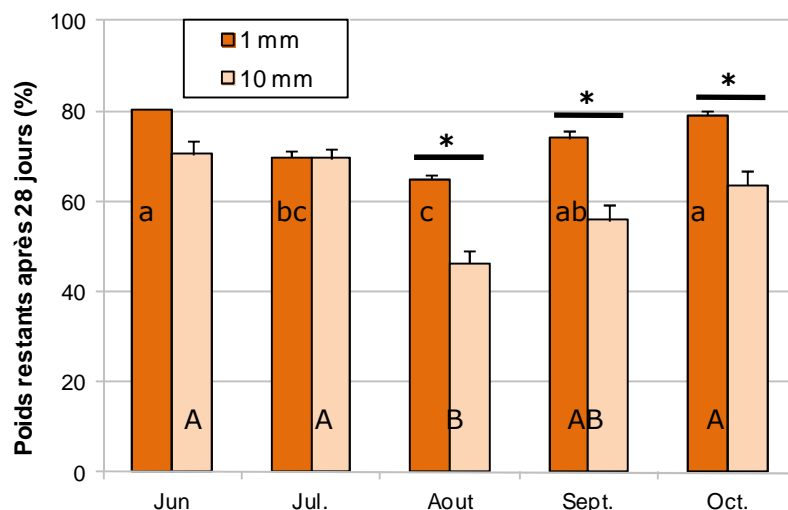


Figure 44 : Poids sec des feuilles de *L. grandiflora* restants après 28 jours d'immersion dans l'eau (1mm : panier à petites mailles ; 10 mm : panier à grandes mailles ; Minuscules et majuscules : comparaison respectivement entre petites mailles et grandes mailles par les tests de Kruskal-Wallis avec correction Bonferroni ; \* différence significative entre grandes et petites mailles pour le mois)

#### 4.5.3 Teneurs en matière organique des feuilles

Les teneurs en matières organique des feuilles de *L. grandiflora* récoltées entre juin et aout restent stables au cours du temps (Kruskal-Wallis,  $p=0,024$ , Figure 45). Seules les teneurs en MO des feuilles du 9 juin et du 10 aout 2009 diffèrent significativement (respectivement  $72,9\% \pm 1,93$  vs  $87,2\% \pm 0,12$ ).

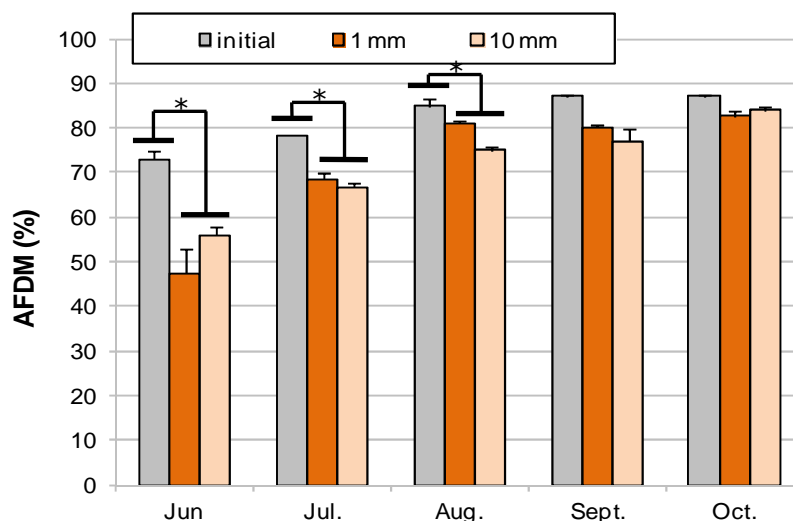


Figure 45 : Évolution des teneurs en AFDM des feuilles de *L. grandiflora* avant (initial) et après immersion (PM : 1mm et GM : 10 mm) dans l'eau (\* : différence significative, Mann-Whitney)

Après 28 jours d'immersion, pour les deux diamètres de mailles, les teneurs en MO des feuilles de *L. grandiflora* tendent à augmenter. Mais, seules les teneurs en MO des feuilles diffèrent significativement entre juin et octobre 2009. Les teneurs de juin

sont significativement plus faibles que celles d'octobre (PM :  $47,4\% \pm 5,4$  vs  $82,6\% \pm 1,3$  ; GM :  $55,9\% \pm 1,9$  vs  $83,9\% \pm 0,7$ ).

En 28 jours, au sein des feuilles, une diminution des teneurs en matières organiques est observée. Elle est significative de juin à aout (Mann-Whitney,  $p < 0,05$ , Figure 45).

#### 4.5.4 Teneurs en carbone et azote des feuilles

- *Composition des feuilles de L. grandiflora fraîchement tombées*

Les teneurs en carbone et azote des feuilles de *L. grandiflora*, ne varient pas de manière significative. Les teneurs en Carbone varient autour de  $34\% \pm 0,85$  pour le carbone, et  $2\% \pm 0,07$  pour l'azote, avec un ratio de C:N de  $17.5 \pm 0.7$ .

- *Composition des feuilles de L. grandiflora après passage dans l'eau*

Chaque mois, aucune différence dans les teneurs en carbone ou en azote n'a été relevée entre les deux diamètres de maille.

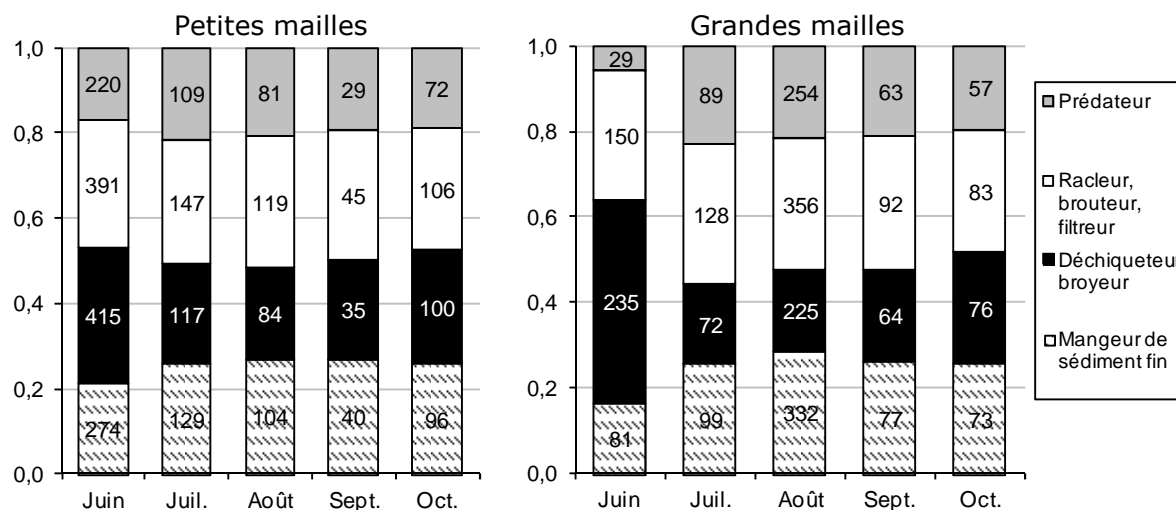
Pour les feuilles déposées 28 jours dans l'eau, entre juin et octobre, dans les paniers à petites mailles, les teneurs en carbone et en azote ne sont pas significativement différentes (C :  $33,6 \pm 1,27$  ; N :  $2,7\% \pm 0,11$ ). Pour les grandes mailles, quelques différences significatives apparaissent. Les teneurs en carbone du mois de juin sont inférieures à celles du mois d'octobre ( $25\% \pm 1,19$  vs  $37,7\% \pm 0,38$ ). Les teneurs en azote des feuilles immergées au mois d'aout sont supérieures à celles des feuilles immergées au mois d'octobre ( $2,92\% \pm 0,14$  vs  $2\% \pm 0,07$ ) (Test de Kruskal-Wallis et correction de Bonferroni).

#### 4.5.5 Évolution des communautés de macroinvertébrés

43 taxa ont été déterminés sur l'ensemble des boîtes de décomposition (29 taxa dans les boîtes à grandes mailles et 25 taxa dans les boîtes à petites mailles). Le nombre d'invertébrés relevés au cours de cette étude est faible (environ  $108 \pm 10$  ind/boîte).

Un seul déchetiseur exclusif (trait 9 : modalité 3 = broyeur) a été noté: *Asellus aquaticus*. Au regard du mode d'alimentation (trait 9), 16 taxons peuvent être considérés comme déchetiseurs. Pour le type de nourriture (trait 8), 17 taxons peuvent être considérés, en partie, comme se nourrissant de débris végétaux supérieur à 1 mm. En grande partie, les taxons sont redondants pour les deux traits considérés. Mais quelques Gastéropodes (*Ancylus fluviatilis* et *Bithynia*) l'Éphéméroptère *Baetis*, le Mégaloptère *Sialis* ne présentent pas le mode d'alimentation Broyeur bien que pouvant se nourrir de

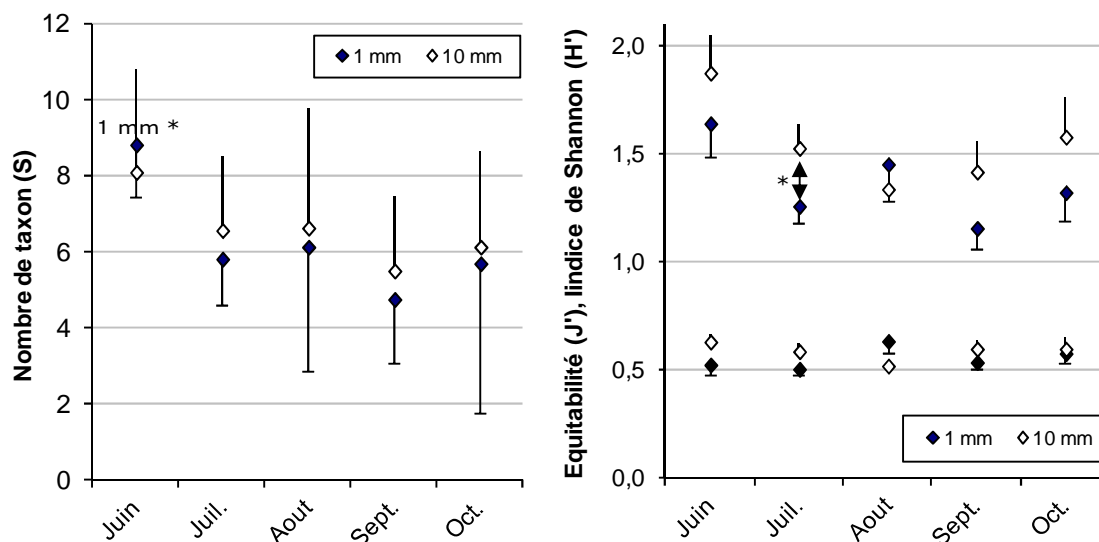
débris végétaux supérieur à 1 mm. A l'inverse, des diptères (*Ceratopogoninae*, Tr *Chironomini*) et deux coléoptères (*Haliphus*, *Laccophilus*) présentent seulement cette modalité (broyeur).



**Figure 46 : Distribution des macroinvertébrés, récoltés après 28 jours d'immersion, répartis entre quatre groupes fonctionnels de mode d'alimentation (Nb moyen d'ind/g sec de feuilles restantes)**

Des différences dans la distribution des invertébrés entre les 4 groupes fonctionnels sont notées au sein des paniers de grandes mailles et ceux de petites mailles lors des mois d'août et septembre (Mann-Whitney, Figure 46). Les groupes fonctionnels racleur, brouteur, filtreur dominant dans les deux cas. Les différences entre les communautés au sein des deux diamètres de maille peuvent être imputées au nombre d'invertébrés. Ceux-ci sont 3 fois plus nombreux pour les communautés des boîtes à grand diamètre de maille, en août et 2 fois plus nombreux en septembre. Mis à part en juin où les déchiqueteurs sont les plus nombreux, les racleurs, brouteurs et filtreurs dominant lors des campagnes suivantes pour les deux diamètres de maille des boîtes.

Chaque mois, entre les deux diamètres de maille, aucune différence dans la distribution des modalités des deux traits (mode d'alimentation et nourriture) étudiés a été observée (Mann-Whitney  $\alpha=0.05$ ). De plus, pour le même diamètre de maille, au cours de la saison d'étude, la distribution des modalités n'a pas évolué (5 échantillons et  $n=9$  pour le trait 8 ou  $n=7$  pour le trait 9 ; Kruskal-Wallis puis niveau de signification corrigé de Bonferroni  $\alpha: 0,005$ ). La distribution des modalités des deux traits biologiques étudiés n'a pas évolué.



**Figure 47 : Richesse taxonomique et indices de Shannon et Equitabilité (moy±ES n=11 en juillet et n=16 ensuite) 1 mm\* : différence significative au cours du temps pour les petites maille (1 mm) ; \* : différence significative entre les deux diamètres de mailles**

Il n'existe que peu de différences pour la richesse taxonomique et les indices de diversité utilisés. Celles-ci apparaissent en début de saison (juin et juillet, Figure 47). Pour les petites mailles, la richesse taxonomique (S) du mois de juin est supérieure à celles des mois suivants pour ce même diamètre de maille (Kuskall & Wallis (n=11 en juin puis 16)). En juillet, l'indice de Shannon est significativement différent entre les deux diamètres de maille (Mann-Withney). Il est noté une assez forte variabilité intra traitement entre les 11 ou 16 répliques.

**Tableau 9 : Indice de Persistance au cours du temps**

	Juin/Juil.	Juil./Août	Août/Sept.	Sept./Oct.
<b>1 mm</b>	0,611	0,458	0,727	0,500
<b>10 mm</b>	0,429	0,467	0,607	0,556

Quel que soit le diamètre de maille des paniers, la moitié des taxons identifiés diffère au bout d'un mois. Pour les deux diamètres de maille, la plus forte stabilité de taxon est relevée entre les mois août et septembre (Tableau 9).

#### 4.5.6 Discussion sur la dégradation des feuilles de l'année

Les pertes de masses des feuilles de *L. grandiflora* après 28 jours d'immersion dans l'eau sont plus importantes au sein des paniers à grandes mailles. Cette différence est due (i) à la perte de feuilles lors de la mise en place des boites, et/ou (ii) à l'activité plus importante des macroinvertrés. Les mailles étant plus grandes, la possibilité d'échappement des feuilles lors de la mise en place des paniers est plus importante. La

deuxième hypothèse ne peut être négligée car les macroinvertébrés sont plus nombreux dans les boîtes à grandes mailles que dans celles à petites mailles, principalement en août et septembre. Lors de ces deux mois, les différences de pertes de masse sont significatives entre les deux modalités (grande/petite maille).

Les teneurs en matière organique des feuilles de *L. grandiflora* fraîchement tombées augmentent lentement entre juin et août passant de 73% à 87%. Il semble donc y avoir une modification de la composition de ces feuilles au cours de la saison. En revanche, cette modification n'est pas significative pour les autres paramètres étudiés (carbone et azote).

En liaison avec les teneurs en matière organique initiales des feuilles fraîchement tombées, celles des feuilles immergées tendent à augmenter bien que cette augmentation ne soit significative qu'entre le mois de juin et le mois d'octobre. En revanche, après 28 jours d'immersion, les teneurs en matière organique diminuent significativement en début de saison. Lors des mois suivants, cette diminution se réduit (n'est plus significative). L'activité de décomposition étant en lien avec les températures (Bärlocher et al. 2008), et les températures de l'eau diminuant d'août à octobre (4.2.1, 21p).

Comme relevé dans la littérature (Hieber and Gessner 2002), des macroinvertébrés ont colonisés rapidement (moins de 4 semaines) les boîtes contenant les feuilles de *L. grandiflora* fraîchement tombées. Au vu des modes d'alimentation de ces macroinvertébrés, les déchiqueteurs-broyeurs dominent les communautés seulement en juin. Lors des quatre mois suivants les racleurs-brouteurs-filtreurs dominent. La dominance de ce mode d'alimentation montre que les feuilles de *L. grandiflora* servent de support aux macroinvertébrés avant d'être une source directe de nourriture. Cette fonction de support des feuilles dans les premiers stades de décomposition a été relatée par Allan & Castillo (2007) et Giller & Malmqvist (2006).

Bien qu'il y ait une assez grande rotation des taxons tous les mois, les communautés de macroinvertébrés sont peu diversifiées. Cette faible diversité est peut être due à une faible appétence des feuilles de *L. grandiflora* contenant de nombreux tannins (Dandelot et al. 2005) mais aussi aux conditions physicochimiques du milieu. Par exemple, les teneurs en oxygène très faibles (0 à 1 mg.L<sup>-1</sup>) ne permettent la présence que de taxons adaptés à ces conditions peu favorables ou très tolérants vis-à-vis de ce paramètre.

## 5 Conclusion générale

Le projet INVAPROM a pour objectif de mesurer l'impact des jussies appartenant à l'espèce *Ludwigia grandiflora* spp. *hexapetala*, espèce végétale invasive, sur la production de matière organique dans une annexe de l'hydrosystème Loire.

La première question, relative à la production de matière organique, visait à identifier et quantifier la part des jussies dans la production de matière organique *in situ*. L'hypothèse selon laquelle la biomasse de jussie constitue la majeure partie de la matière organique (MO) au sein de l'annexe, était notre hypothèse de départ. Nous prévoyions également une accumulation de cette MO. Les expériences de production *in situ* ont montré que les quantités de nécromasses de *L. grandiflora* sont logiquement liées aux biomasses. La production de nécromasse est plus faible en ombrage nul qu'en ombrage fort. Dans cette condition, la nécromasse de feuilles d'arbres (230g dw .m<sup>-2</sup> en 6 mois) domine largement celle de *L. grandiflora* (35g dw .m<sup>-2</sup>). Sur la période d'étude, les quantités de *L. grandiflora* en ombrage nul (173g dw .m<sup>-2</sup>) sont quasi équivalentes à celles des arbres en ombrage fort. Au sein de l'annexe hydraulique, la présence de ce macrophyte allochtone entraîne une certaine homogénéisation spatiale des dépôts de nécromasses. Afin de limiter les quantités de matière organique produites par ces macrophytes, des mesures de gestion visant à réduire la production par les macrophytes par un ombrage doivent être proposées. Notre hypothèse de départ se trouve validée dans les secteurs sans ombrage.

Notre étude a également permis d'identifier la dynamique temporelle de fonctionnement hydraulique et physico-chimique de l'annexe hydraulique sur un cycle hydrologique contenant une longue phase de déconnexion suivie d'une séquence de connexions-déconnexions avec la Loire. L'analyse des paramètres non conservatifs, mesurés *in situ* avec un pas de temps horaire a permis de cerner le mode de fonctionnement de cet habitat. L'annexe est alimentée par une ou plusieurs nappes phréatiques à conductivité plus élevées que celle de la Loire. La production primaire y est très importante, celle-ci tend à épuiser les ressources en nitrates. La durée de la période de production biologique (microphytes et macrophytes) y est plus longue que dans le chenal principal. Les organismes vivant dans les fosses de cette annexe sont soumis à des variations quotidiennes de dioxygène pouvant atteindre 100%, des périodes d'hypoxie et d'anoxie de plusieurs semaines. En phase de connexion, ils subissent des changements brutaux des conditions de pH, conductivité et de concentration en dioxygène.

La seconde question avait pour objectif de traiter de la fonction de dégradation de la matière organique par les communautés d'invertébrés déchetiers, également *in situ*. Nous avons supposé que le taux de dégradation de la MO et que les densités d'invertébrés déchetiers augmentent avec les densités de jussie. La quantification de l'activité de dégradation de la matière organique par les invertébrés déchetiers est faite en deux temps. L'expérience A a pour objectif de quantifier la dégradation des feuilles et tiges de l'année précédente (Q2A) tandis que l'expérience B a pour objectif de quantifier la dégradation des feuilles de l'année en cours (Q2B).

Les feuilles de *L. grandiflora* ont une décomposition lente car le rapport C:N initial, de  $17,5 \pm 0,7$ , est fort comparé à celui d'autres macrophytes (Royer and Minshall 1997). Le taux global de dégradation est faible tout au long de l'année, quelle que soit la densité de jussie, et en dépit des conditions du milieu, à caractère eutrophe, qui favorisent les communautés microbiennes assurant la décomposition (Royer and Minshall 1997). Au vu des conditions physico chimiques opérant dans la fosse, deux processus agissant en synergie peuvent également ralentir les processus de dégradation. L'alimentation en eau de la fosse se fait par une eau d'origine phréatique qui peut être désoxygénée. De même, les quantités importantes de matière organique peuvent entraîner des conditions anoxiques lors de leur décomposition qui peuvent inhiber l'activité des hyphomycètes (Bärlocher et al. 2008 ; Carpenter and Lodge 1986 ; Field and Webster 1983), voire réduire celles des invertébrés.

Nous avons également supposé que les communautés de macro-invertébrés colonisant les feuilles de *L. grandiflora* fraîchement tombées évoluaient au cours de la saison. Or celles-ci n'évoluent pratiquement pas, sont peu riches en taxons et ne consomment que faiblement la matière organique produite par les jussies. Cependant ces communautés d'invertébrés semblent jouer un rôle sur la vitesse de dégradation qui est un peu plus rapide en été. Les jussies constituent une nouvelle source de matière organique dans les annexes à laquelle les invertébrés ne seraient pas encore adaptés. De ce fait, la présence de *L. grandiflora* dans les annexes de la Loire moyenne contribue au stockage de la matière organique dans ces annexes où les processus d'atterrissement seront très probablement accélérés.

## 6 Communications écrites et orales du projet

Cette partie reprend, par ordre chronologique, l'ensemble des communications réalisées lors de ce projet. Actuellement deux communications orales et deux communications affichées ont été effectuées. Des articles scientifiques sont en cours de réalisations et ont été présentés dans les précédents chapitres de ce rapport.

### 6.1 Présentation EPL, mai 2009

Cette communication a été réalisée lors de la réunion de la plateforme RDI, à Bruxelles. Elle présentait le contexte, les objectifs et les moyens à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs. Les fonctions de production et de dégradation ont été détaillées en prenant comme modèle biologique : *Ludwigia grandiflora*.

Cette présentation est jointe au rapport sous la référence : [Boisneau&aal\_EPL\_2009.pdf]

### 6.2 Présentation orale lors du colloque ECOVEG 6, 31 mars au 2 avril 2010

**Référence de la présentation** : Ruaux B., Richard N., Boisneau C., 2010. Quelle est la part de *L. grandiflora* envahissante dans la production de matière organique au sein d'une annexe hydraulique ? 6<sup>ème</sup> colloque d'écologie des communautés végétales, 31 mars – 2 avril 2010, Rouen.

**Résumé** : En Loire moyenne, les modifications des régimes thermique et hydrologique contribuent à augmenter la durée de déconnexion des annexes hydrauliques et ainsi à réduire la circulation de la matière organique. La colonisation des annexes hydrauliques par les jussies (*Ludwigia* spp.) et la forte production de biomasse de ces espèces, devrait encore renforcer, *in situ*, l'abondance de la matière organique (MO) d'origine macrophytique.

Dans une annexe hydraulique, envahie par *L. grandiflora*, nous avons identifié et quantifié les apports endogènes de MO vivantes et mortes, au sein de trois classes d'ombrage arboré, de juin à novembre. En parallèle, température, pH, conductivité et dioxygène dissous ont été enregistrés en continu.

L'annexe présente un fonctionnement pour les paramètres physico-chimiques très différent de celui du chenal principal de la Loire. Les variations quotidiennes de pH et de dioxygène dissous, appuyées par des mesures de nitrates et d'ammoniaque montrent

une très forte activité biologique conduisant à des conditions d'hypoxie et d'anoxie au moins 2 à 3 heures par jour.

La production de MO vivante est constituée d'au moins 73% de *L. grandiflora* allant jusqu'à 2,6 g de matière sèche (MS).  $m^{-2}.j^{-1}$ . La production de MO morte est principalement due aux jussies, peupliers et saules dans des proportions variables selon l'ombrage et la saison. Les biomasses de jussie produites varient entre  $0,22 \pm 0,06$  gMS. $m^{-2}.j^{-1}$  d'août à novembre en condition fortement ombragée et  $1,95 \pm 0,22$  gMS. $m^{-2}.j^{-1}$  en octobre en ombrage nul. Les dynamiques de production présentent une saisonnalité plus marquée pour l'ombrage nul.

**Mots clés** : Production ; *L. grandiflora* ssp. *hexapetala* ; Loire moyenne, Matière organique ; Annexe hydraulique

Cette présentation est jointe sous la référence : [Ruaux&al\_ECOVEG.pdf]

### 6.3 Présentation orale lors du colloque Ecologie 2010, 2-4 septembre 2010

**Référence de la présentation** : Boisneau C., Ruaux B., Richard N., 2010. Quelles conditions physico-chimiques au sein d'une annexe hydraulique ? – Colloque « Ecologie 2010 », 2-4 septembre 2010, Montpellier.

**Résumé** : Les annexes hydrauliques font partie intégrante de la mosaïque des ensembles fonctionnels d'une plaine alluviale. A cette échelle, l'existence de divers gradients de connexion avec le chenal principal conduit à une variété des conditions environnementales présentant des dynamiques temporelles variées. Nous avons cherché à identifier les différentes phases de fonctionnement d'une annexe hydraulique, en Loire moyenne dont le débit de connexion est supérieur au module.

Des enregistrements, à pas de temps horaire, 10 cm au dessus du fond, avec une sondes multi-paramètres (MS5 OTT), de la température, de la conductivité, du pH et de la concentration en dioxygène accompagnés de mesures ponctuelles de phosphore total, ammonium, nitrates et chlorophylle a ont été utilisés de la mi août 2009 à la mi mars 2010.

Hors période de connexion, 6 phases de fonctionnement sont reconnues. Elles traduisent un milieu, alimenté par la nappe alluviale, riche en nutriments, à forte activité photosynthétique et siège d'une très forte activité de dégradation de la matière organique. Les conditions sont hypoxiques à certaines heures de la journée de la mi-août

jusqu'au 21 octobre. Elles sont hypoxiques en permanence, autour de 0.1mg/l, à partir de la mi-décembre.

Du 3 janvier 2010 au 17 mars 2010, 4 phases de connexion avec la Loire sont survenues. Chacune de ces phases se caractérise par une succession de 3 séquences, de durée variable, où les valeurs de température, conductivité, pH et concentration en dioxygène rejoignent celles de la Loire. Lors des phases de déconnexion, le retour aux valeurs antérieures se fait de manière très rapide, 46 heures pour le pH et le dioxygène et plus lentement, 15 jours pour température et 10 jours pour la conductivité.

Les conditions physico chimiques rencontrées dans les annexes hydrauliques sont très éloignées de celles du chenal principal. Elles traduisent une activité biologique très intense.

**Mots clés :** Annexe hydraulique, suivi horaire, dioxygène, conductivité, pH, température

Cette présentation est jointe au rapport sous la référence : [Boisneau&al\_ECOLOGIE2010.pdf]

## **6.4 Présentation affichée lors du colloque Ecologie 2010, 2-4 septembre 2010**

**Référence de la présentation :** Ruaux B., Richard N. et Boisneau C., 2010. Au sein d'une annexe hydraulique, quelle est la part de *L. grandiflora* envahissante dans la production de matière organique ? – Colloque « Ecologie 2010 », 2-4 septembre 2010, Montpellier.

**Résumé :** En Loire moyenne, les modifications des régimes thermique et hydrologique contribuent à augmenter la durée de déconnexion des annexes hydrauliques et ainsi à réduire la circulation de la matière organique. La colonisation des annexes hydrauliques par les jussies (*Ludwigia* spp.) et la forte production de biomasse de ces espèces, devrait encore renforcer, *in situ*, l'abondance de la matière organique (MO) d'origine macrophytique.

Dans une annexe hydraulique, envahie par *L. grandiflora*, nous avons identifié et quantifié les apports endogènes de MO vivantes et mortes, au sein de deux classes d'ombrage arboré. En parallèle, la température de l'eau a été enregistrée en continu.

La biomasse macrophytique est constituée d'au moins 65 % de *L. grandiflora* allant jusqu'à 482 gMS.m<sup>-2</sup> en condition d'ombrage nul. La nécromasse est constituée d'au moins 63% de *L. grandiflora* en ombrage nul (ON) et au maximum de 11% en ombrage fort (OF). Dans cette classe d'ombrage, les saules et les peupliers comptent pour plus de 3/4 des masses identifiés.

Les dynamiques de production de biomasses et nécromasses présentent une saisonnalité plus marquée en ombrage nul avec un décalage d'un mois et une production annuelle 2,6 fois supérieure. Les variations de production de biomasses deviennent négatives à partir de septembre en ombrage nul et d'octobre en ombrage fort. Respectivement, elles présentent un maximum de 6,7 gMS.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> en juillet (ON) pour 2,7 gMS.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup> en août (OF).

Les variations de production de biomasses et nécromasses ne sont pas corrélées à la température de l'eau, ni à la quantité de degrés jours pour des seuils de 10°C ou 12°C. Par contre, la production de MO par *L. grandiflora* est fortement influencée par l'ensoleillement.

Dans cette annexe, *L. grandiflora* est la principale productrice de MO d'origine macrophytique. En condition fortement ensoleillée, la production de nécromasse de *L. grandiflora* est quasi identique à celle, en condition ombragée, d'origine arborescente. Nous pouvons donc supposer que *L. grandiflora* induit une homogénéisation de la distribution de la MO dans les annexes hydraulique qu'elle colonise.

**Mots clés** : Production ; *L. grandiflora* ssp. *hexapetala* ; Matière organique ; Ombrage ; Loire moyenne ; Annexe hydraulique

Cette présentation réalisée au sein de la session « Conséquences écologiques et socioéconomiques des introductions d'espèces », est jointe au rapport sous la référence : [Ruaux&a1\_ECOLOGIE2010.pdf]

## **6.5 Présentation affichée lors du séminaire ONEMA-CEMAGREF, 12-14 octobre 2010**

**Référence de la présentation** : Ruaux B., Richard N., Boisneau C., 2010. Au sein d'une annexe hydraulique, quelle est la part de *L. grandiflora* envahissante dans la production de matière organique ? – Séminaire ONEMA- CEMAGREF « Gestion des espèces invasives en milieu aquatique », 12-14 octobre 2010, Paris.

Cette présentation est identique à celle affichée lors du colloque Ecologie 2010. Elle a été réalisée en tant qu'invitée à ce séminaire.

## **6.6 Présentation orale EPL, 24-25 mai 2011**

Cette présentation a été réalisée lors de la réunion de la plateforme RDI, à Bruxelles. Elle concernait (i) l'identification et la quantification de la part de *L. grandiflora* dans la production de MO dans une annexe de Loire ; (ii) la quantification de la consommation de cette MO par les invertébrés ; (iii) la dégradation de cette MO au cours et hors de la période de végétation.

Cette présentation est jointe au rapport sous la référence : [Boisneau&al\_EPL2011.pdf]

## Liste des sigles et abréviations

**COT - Carbone organique total.**

**DBO - Demande biochimique en oxygène.** Mesure de la quantité de matières organiques qui, lors de leur décomposition, sont susceptibles de consommer l'oxygène présent dans l'eau. Le 1er stade de décomposition, se rapportant aux composés carbonés, débute immédiatement et s'achève au bout de 20 jours environ, le 2ème stade, se rapportant aux composés azotés, ne commence qu'au bout d'une dizaine de jours et s'étend sur une période très longue.

**DBO<sub>5</sub> - Demande biochimique en oxygène sur 5 jours.** La mesure en continu de la DBO<sub>5</sub> n'est pas envisageable compte tenu du temps de l'analyse (5 jours)

**DCO - Demande Chimique en oxygène.** La DCO correspond à la quantité d'oxygène (en milligramme) qui a été consommée par voie chimique pour oxyder l'ensemble des matières oxydables présentes dans un échantillon d'eau de 1 litre. Elle est moins représentative que la DBO de la décomposition des matières organiques qui a lieu dans le milieu naturel mais elle est rapide, et contrairement à cette dernière, possède une bonne reproductibilité.

**Rapport DCO / DBO<sub>5</sub> comme indice de biodégradabilité.** La plupart des matières organiques ne deviennent polluantes que lorsqu'elles se retrouvent en excès dans le milieu. On distingue : (i) les matières organiques biodégradables qui se décomposent dans le milieu naturel, et (ii) les matières organiques non biodégradables (hydrocarbures).

**MES - Matières En Suspension.** La pollution d'une eau peut être associée à la présence d'objets flottants, de matières grossières et de particules en suspension. En fonction de la taille de ces particules, on distingue généralement : (i) les matières grossières (décantables ou flottables), et (ii) les matières en suspension (de nature organique ou minérale) qui sont des matières insolubles, fines. Leur principal effet est de troubler l'eau, diminuant ainsi le rayonnement lumineux indispensable pour une bonne croissance des végétaux au fond des cours d'eau : c'est la turbidité

**MO – Matière Organique.** La matière carbonée produite par des êtres vivants.

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - ion ammonium**

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - nitrate**

**O<sub>2</sub> dissous - Oxygène dissous.** Une mesure directe de la teneur en oxygène dissous dans un échantillon prélevé donne une indication sur la santé du cours d'eau à un instant et un endroit donné.

## Bibliographie

- Allan, J. D., and M. M. Castillo. 2007. *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. Dordrecht, Springer.
- Bacchi, M. 2000. Structure et dynamique des peuplements macrobenthiques en Loire : impact des facteurs hydrologiques et sédimentaires. Sciences de la Terre, Environnement aquatique thesis, Université F. Rabelais, Tours.
- Baldy, V., M. Trémolières, M. Andrieu, and J. Belliard. 2007. Changes in phosphorus content of two aquatic macrophytes according to water velocity, trophic status and time period in hardwater streams. *Hydrobiologia* 575:343-351.
- Bärlocher, F., S. Seena, K. P. Wilson, and D. D. Williams. 2008. Raised water temperature lowers diversity of hyporheic aquatic hyphomycetes. *Freshwater Biology* 53:368-379.
- Boisneau, C., F. Moatar, M. Bodin, and P. Boisneau. 2008. Does global warming impact on migration patterns and recruitment of Allis shad (*Alosa alosa* L.) young of the year in the Loire River, France? *Hydrobiologia* 602:179-186.
- Carpenter, S. R., and D. M. Lodge. 1986. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany* 26:341-370.
- Cummins, K. W. 1973. Trophic relations of aquatic insects. *Annual Review of Entomology* 18:183-206.
- Dandelot, S., R. Matheron, J. Le Petit, R. Verlaque, and A. Cazaubon. 2005. Variations temporelles des paramètres physicochimiques et microbiologiques de trois écosystèmes aquatiques (Sud-Est de la France) envahis par des *Ludwigia*. *Comptes rendus Biologies* 338:991-999.
- Dangles, O., and B. Malmqvist. 2004. Species richness-decomposition relationships depend on species dominance. *Ecology Letters* 7:395-402.
- Daufresne, M., M. C. Roger, H. Capra, and N. Lamouroux. 2003. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River : effects of climatic factors. *Global Change Biology* 10:124-140.
- Elwood, J. W., J. D. Newbold, A. F. Trimble, and R. W. Stark. 1981. The limiting role of phosphorus in a woodlandstream ecosystem: effect of P enrichment on leaf decomposition and primary producers. *Ecology* 62:146-158.
- Estrella, N., T. H. Sparks, and A. Menzel. 2007. Trends in temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology* 13:1737-1747.

- Field, J. I., and J. Webster. 1983. Anaerobic survival of aquatic fungi Transactions of the British Mycological Society 81:365-369.
- Giller, P. S., and B. Malmqvist. 2006, The biology of streams and rivers: Biology of habitats series, Oxford University Press.
- Gonçalves, J. F., M. A. S. Graça, and M. Callisto. 2007. Litter decomposition in a Cerrado savannah stream is retarded by leaf toughness, low dissolved nutrients and a low density of shredders. Freshwater Biology 52:1440-1451.
- Hieber, M., and O. M. Gessner. 2002. Contribution of stream detritivores, fungi, and bacteria to leaf breakdown based on biomass estimates. Ecology 83:1026-1038.
- Jonsson, M., B. Malmqvist, and P.-O. Hoffsten. 2001. Leaf litter breakdown rates in boreal streams: does shredder species richness matter? Freshwater Biology 46:161-171.
- Lambert, E., A. Dutartre, J. Coudreuse, and J. Hauray. 2010. Relationships between the biomass production of invasive *Ludwigia* species and physical properties of habitats in France. Hydrobiologia 656:173-186.
- McArthur, J. V., and J. R. Barnes. 1988. Community dynamics of leaf litter breakdown in a Utah alpine stream. Journal of North American Benthological Society 7:37-43.
- McDowell, W. H., and S. G. Fisher. 1976. Autumnal processing of dissolved organic matter in small woodland stream ecosystem. Ecology 57:561-569.
- Moatar, F., and J. Gailhard. 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. Comptes Rendus Geosciences 338:319-328.
- Naeem, S., L. J. Thompson, S. P. Lawler, J. H. Lawton, and R. M. Woodfin. 1994. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. Nature 368:734-737.
- Petchey, O. L., A. L. Downing, G. G. Mittelbach, L. Persson, C. F. Steiner, P. H. Warren, and G. Woodward. 2004. Species loss and the structure and functioning of multitrophic aquatic systems. Oikos 104:467-478.
- Rodrigues, S. 2004. Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviaux en Loire moyenne (France), Université de Tours, Tours.
- Royer, T. V., and G. W. Minshall. 1997. Rapid breakdown of allochthonous and autochthonous plant material in a eutrophic river. Hydrobiologia 344:81-86.
- Tachet, H., P. Richoux, M. Bournaud, and P. Usseglio-Polatera. 2000, Invertébrés d'eau douce: systématique, biologie, écologie. Paris, CNRS Editions.

- Tank, J. L., and J. R. Webster. 1998. Interaction of substrate and nutrient availability on wood biofilm processes in streams. *Ecology* 79:2168-2179.
- Tank, J. L., J. R. Webster, and E. F. Benfield. 1993. Microbial respiration on decaying leaves and sticks in a southern Appalachian stream. *Journal of the North American Benthological Society* 12:394-405.
- Thompson, R. M., and C. R. Townsend. 2003. Impacts on stream food webs of native and exotic forest: an international comparison. *Ecology* 84:145-161.
- Vannote, R. L., G. W. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell, and C. E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci./J. can. sci. halieut. aquat.* 37:130-137.
- Wallace, J. B., and J. R. Webster. 1996. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annual Review of Entomology* 41:115-139.
- Webster, J. R., and E. F. Benfield. 1986. Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17:567-594.

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristique des capteurs de la sonde MS5 .....	8
Tableau 2 : Contenu des analyses physico-chimiques.....	9
Tableau 3 : Méthodes et limites de quantification des paramètres chimiques mesurés (source : Laboratoire de Touraine).....	10
Tableau 4 : Stade de développement et les différents organes reproducteurs des <i>L. grandiflora</i> observés .....	13
Tableau 5 : Poids sec à l'air et à l'étude, en fonction de leur densité, des feuilles et tiges déposées <i>in situ</i> le 20 ou 26 octobre 2009 .....	14
Tableau 6 : Récapitulatif de l'expérimentation .....	16
Tableau 7 Durée et vitesse moyenne d'évolution des paramètres lors des phases de connexions hivernales unimodales .....	27
Tableau 8 : Moyennes estimées des taux de décomposition et résultats des tests de Tukey (X forte densité initiale ; A : faible densité initiale ; 1 mm : panier à petite maille ; 10 mm : grande maille) .....	52
Tableau 9 : Indice de Persistance au cours du temps .....	62

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation générale du site d'étude. Source : SIEL, Bréhémont-Rupuanne, le lit de la Loire en 1999, Lo186, DIREN).....	7
Figure 2 : Localisation des stations étudiées (4 fosses temporaires ou permanentes) sur le bras secondaire du site de Bréhémont. Source : SIEL, Bréhémont-Rupuanne, le lit de la Loire en 1999, Lo186, DIREN.....	7
Figure 3 : Sonde multiparamètres MS5 et ses consommables.....	8
Figure 4 : Prélèvement d'eau (13 juillet 2009) juste au dessus de la litière .....	10
Figure 5 : Boîtes de récolte de la matière organique : (a) boîtes posées sur le fond, mises en place le 9 juin, juste avant leurs récoltes, et (b) mise en place de nouvelles boîtes (6 juillet 2009).....	12
Figure 6 : Chronologie de la récolte de la matière organique (MO) en 2009.....	13
Figure 7 : Relations entre poids de matière sèche à l'air et poids de matière sèche à l'étuve des tiges et des feuilles de <i>L. grandiflora</i> récoltées en novembre 2008, N=20 .....	14
Figure 8 : Paniers petite maille (diamètre 1mm) et grande maille (diamètre 10 mm) disposés sur une ligne (a) ; Mise en place d'une ligne 20 octobre 2009 (b) .....	15
Figure 9 : Chronologie de la récolte des paniers sur la dégradation de la matière organique en période de végétation .....	16
Figure 10 : Débits journaliers moyens de 2009 et 2010, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne .....	20
Figure 11 : Synthèse des conditions physicochimiques présentes dans l'annexe en période de déconnexion.....	23
Figure 12 : Température de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci .....	23
Figure 13 : pH de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci.....	24
Figure 14 : Conductivité de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci .....	24
Figure 15 : Dioxygène dissous l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) au cours de la période de déconnexion de celle-ci .....	25
Figure 16 : Dioxygène dissous, phéopigments et chlorophylle a au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) durant la période de déconnexion.....	25
Figure 17 : Dioxygène dissous, ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) et phosphore total au sein de l'annexe (fosse 3 et 4) durant la période de déconnexion .....	26

Figure 18 : Évolution du débit de la Loire ainsi que de la conductivité et du pourcentage de saturation en oxygène, à 10cm au-dessus du substrat (fond), dans la fosse 3 (Q horaire LOIRE, source : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne) .....	27
Figure 19 : Évolution du débit de la Loire et de la température de l'eau, du pH, de la conductivité et de LDO lors des 4 premières séquences de connexion déconnexion de la fosse (mesures à 10 cm au dessus du fond) .....	28
Figure 20 : Évolution des différents paramètres, température de l'eau, pH, conductivité et di oxygène lors d'une séquence de connexion entre la fosse et la Loire, illustration sur la séquence 2. ....	29
Figure 21 : Température de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci .....	30
Figure 22 : pH de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci.....	30
Figure 23 : Conductivité de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci .....	31
Figure 24 : Dioxygène dissous de l'eau dans la Loire et au sein de l'annexe (fosse 3) au cours des périodes de connexion/déconnexion de celle-ci .....	31
Figure 25 : Dioxygène dissous, phéopigments et chlorophylle a au sein de l'annexe (fosse 3) durant des périodes de connexion/déconnexion .....	32
Figure 26 : Dioxygène dissous, ammonium et phosphore total au sein de l'annexe (fosse 3) durant des périodes de connexion/déconnexion .....	32
Figure 27 : Dioxygène dissous, DBO <sub>5</sub> , DCO et COT au sein de l'annexe (fosse 3) durant des périodes de connexion/déconnexion .....	33
Figure 28 : Évolution du débit de la Loire ainsi que de la conductivité et du pourcentage de saturation en oxygène, au dessus du substrat (fond), dans la fosse 3 (Q horaire LOIRE, source : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne).....	33
Figure 29 : Débits journaliers moyens de 2009, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne ....	34
Figure 30 : Hauteur d'eau lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boites de récolte de la matière organique pour les trois classes de recouvrements arborés étudiées.....	34
Figure 31 : Profondeur de vase lors dépôt des boites de récolte de la matière organique pour les trois classes de recouvrements arborés étudiées .....	35
Figure 32 : Nombre de placettes étudiées contenant <i>L. grandiflora</i> lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boites de récoltes de la matière organique (maximum 9 boites)...	36
Figure 33 : Recouvrements de <i>L. grandiflora</i> lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boites de récoltes de la matière organique (sans prise en compte des valeurs nulles) ...	36

Figure 34 : Hauteur par rapport à la ligne d'eau de <i>L. grandiflora</i> lors du dépôt (a) et du retrait (b) des boîtes de récolte de la matière organique (sans prise en compte des valeurs nulles). La Ligne d'eau coupe l'axe des ordonnées à zéro.....	37
Figure 35 : Domaine de vitalité pour les trois conditions d'ombrage arboré.....	38
Figure 36 : Débits journaliers moyens de 2009 et 2010, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne .....	51
Figure 37 : Taux de décomposition des feuilles et tiges de <i>L. grandiflora</i> au cours du temps (jours) en fonction de la densité des celles-ci (respectivement A=2,9g et 2g et X=5,8g et 4g à l'air) et du diamètre des mailles des paniers (1=1 mm et 10= 10 mm), n=64 .....	52
Figure 38 : Évolution au cours du temps du pourcentage d'AFDM des feuilles et tiges de <i>L. grandiflora</i> en fonction de la densité initiale de celles-ci (respectivement A=2,9g et 2g et X=5,8g et 4g à l'air) et du diamètre des mailles des paniers (1=1 mm et 10= 10 mm), n=18.....	53
Figure 39 : Évolution au cours du temps des teneurs du rapport carbone sur azote (C/N) de <i>L. grandiflora</i> en fonction de la densité initiale (A=2,9g et 2g et X=5,8g et 4g à l'air), n=18 .....	54
Figure 40 : Répartition du nombre d'individus par poids sec final de <i>L. grandiflora</i> des oligochètes, diptères et autres macroinvertébrés présents dans les paniers de feuilles et tiges de <i>L. grandiflora</i> (les étiquettes donnent les moyennes du nombre d'individus, n=40) .....	55
Figure 41 : Nombre de taxon (S) et indice de Shannon (H') pour les quatre modalités (diamètre de maille x densité initiale), moyenne $\pm$ ES, n=40 .....	55
Figure 42 : Nombre de taxon (S), indice de Shannon (H') et nombre d'individus en fonction du nombre de jour d'immersion des feuilles et tiges de <i>L. grandiflora</i> , toutes modalités confondues, moy $\pm$ ES, n=36 .....	56
Figure 43 : Débits journaliers moyens de 2009, à la station de Langeais (K6830020) et dates des relevés de terrain. Données : DIREN Centre/Bassin Loire-Bretagne ....	58
Figure 44 : Poids sec des feuilles de <i>L. grandiflora</i> restants après 28 jours d'immersion dans l'eau (1mm : panier à petites mailles ; 10 mm : panier à grandes mailles ; Minuscules et majuscules : comparaison respectivement entre petites mailles et grandes mailles par les tests de Kruskal-Wallis avec correction Bonferroni ; * différence significative entre grandes et petites mailles pour le mois).....	59
Figure 45 : Évolution des teneurs en AFDM des feuilles de <i>L. grandiflora</i> avant (initial) et après immersion (PM : 1mm et GM : 10 mm) dans l'eau (* : différence significative, Mann-Whitney) .....	59

Figure 46 : Distribution des macroinvertébrés, récoltés après 28 jours d’immersion, répartis entre quatre groupes fonctionnels de mode d’alimentation (Nb moyen d’ind/g sec de feuilles restantes) .....61

Figure 47 : Richesse taxonomique et indices de Shannon et Equitabilité (moy±ES n=11 en juillet et n=16 ensuite) 1 mm\* : différence significative au cours du temps pour les petites maille (1 mm) ; \* : différence significative entre les deux diamètres de mailles .....62

## Annexes

Communications réalisées au cours de ce projet :

- 1- Bruxelles devant la commission EPL : Espèces végétales invasives et production de matière organique dans des annexes de l'hydrosystème Loire
- 2- ECOVEG 6 à Rouen : présentation orale
- 3- Ecologie 2010 : poster
- 4- Ecologie 2010 : présentation orale
- 5- Paris Cemagref-Onema : poster en tant qu'invité
- 6- Bruxelles devant la commission EPL, rendu RDI : Espèces végétales invasives et production de matière organique au sein d'une annexe hydraulique