

Fonctionnement écologique des casiers Girardon : Le cas des casiers aquatiques

Rapport final

Action n° 41 du Programme 2010 au titre de l'accord cadre
Agence de l'Eau ZABR

Evelyne FRANQUET et Pierre MARMONIER
En collaboration avec :

Céline BERTRAND, Cécile CLARET, Stéphanie FAYOLLE, Nicolas FLIPO,
Sophie GUILLON, Jules LEGERN, Maxime LOGEZ, Jean-Michel OLIVIER,
Benjamin OURSEL, Hervé PIEGAY, Lucile PRIOUR, Bianca RAPPLE, Michal
TAL, Maxine THOREL, Antonin VIENNEY.

Octobre 2016

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Table des matières

1. Introduction	1
1.1. Les marges construites	1
1.2. Le contexte du plan Rhône	1
1.3. Stratégie de recherche et hypothèses de travail	1
2. Matériels et Méthodes	2
2.1. Présentation et choix des sites d'étude	2
2.2. Etude géomorphologique	4
2.3. Enregistrements en continu	6
2.4. Deux campagnes d'échantillonnage : eaux, sédiments, phytoplancton et zoobenthos ..	7
2.5. Métabolisme et méthodes de quantification	10
3. Les indicateurs de connexion/submersion.....	11
3.1. Echange d'eau en surface	11
3.2. Prise en compte de l'écart thermique entre eau du chenal et eaux des casiers.....	12
3.3. Conclusions pour PDR et Arles	13
4. Caractérisation environnementale des casiers.....	15
4.1. Vitesses et substrats.....	15
4.2. Chimie de l'eau et des sédiments	18
4.3. La transparence	21
4.4. Développement des herbiers	22
5. Phytoplancton	23
5.1. Production phytoplanctonique.....	23
5.2. Structure phytoplanctonique	26
5.3. Relations entre biodiversité phytoplanctonique, variables environnementales et connectivité hydraulique	28
6. Biodégradabilité du sédiment et activités microbiennes.....	30
6.1. Perte au feu et rapport Corg/Ntot	30
6.2. Activités microbiennes	31
6.3. Relations en Corg/Ntot, activités microbiennes et connectivité hydraulique.....	34
7. Invertébrés benthiques	35
7.1. Densité en invertébrés : rôle potentiel dans le réseau trophique	35
7.2. Biodiversités α β γ	37
7.3. Relation entre diversité fonctionnelle des peuplements benthiques, diversité d'habitats et connectivité hydraulique.	42
8. Métabolisme des casiers.....	45
8.1. Profils des concentrations en O ₂ au fond et en surface dans les différents casiers.....	45

8.2. Occurrence des anoxies par casier sur la période estivale	46
8.3. Rythme nycthéral	48
8.4. Relations entre métabolisme et connectivité hydraulique	50
9. Bilan sur la diversité des casiers Girardon, le rôle de la connectivité hydraulique et les usages de ces écosystèmes artificiels.	51
9.1. Au sujet du fonctionnement hydraulique et géomorphologique	51
9.2. Au sujet de la biodiversité (taxonomique et fonctionnelle)	51
9.3. Fonctions écosystémiques remplies par les casiers	55
9.4. Eléments pour propositions de gestions	56
Références citées	59
Annexe 1 : Modèle 2D Casiers d'Arles	61
Annexe 2 : Liste des taxa phytoplanctoniques	68

Table des Figures

Figure 1 : Localisation des casiers échantillonnés A) à Péage de Roussillon (PDR) et B) à Arles (ARL).....3

Figure 2 : Système de fixation des deux sondes HOBO placées (50 cm sous la surface) (surface data logger) et en profondeur (20 cm au-dessus du fond) (bottom data logger).....7

Figure 3 : Exemple d'évolution journalière de la concentration en O₂ dissous (à gauche), et contributions de la respiration et de la production primaire au bilan d'O₂ (à droite).....10

Figure 4 : Hauteur minimale des digues longitudinales en fonction de la distance à la digue transversale amont pour chacun des six casiers choisis à Péage de Roussillon (en bleu). Les données ont été obtenues par LIDAR (thèse Bianca Räßple), la ligne rouge correspond à la ligne d'eau pour un débit de 100 m³/s. Les casiers sont classés en fonction de la hauteur de la digue.....12

Figure 5 : Ecart thermique entre l'eau des casiers C9, C10, C37, C42, C126, C149 et celle du chenal. Les températures sont celles de surface sauf pour le casier C10 (seules les températures de fond sont disponibles sur une période longue). Les températures du chenal ont été fournies par le programme RHONE-ECO, les débits du chenal (RCC) par la CNR. Les cadres, en rouge, matérialisent les périodes de crue.....14

Figure 6 : A) Cercle des corrélations des 38 variables environnementales (précipitations et débit intég. : moyennes des précipitations et des débits calculés sur 1 semaine avant le prélèvement, Prof : profondeur, Temp : température, Trans : transparence, O₂p et O₂ mg : O₂ dissous en % et mg/L, Cond : conductivité, Cla, b, c, ac : Chlorophylle a, b, c, active, Pheo : phéopigments, Perte : perte au feu, MES : matières en suspension, COPmg, COPmgg et COPp : Carbone organique total en mg, en mg/g et %, Nmg, Nmgg, et Np : Azote total particulaire en mg, en mg/g et %, Nmggs et Nps : Azote total des sédiments en mg/g et %, Cmggs et Cps : Carbone organique des sédiments en mg/g et %, C/N rapport entre Corg/Ntot des sédiments, cations : NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, anions : Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, F⁻ et la silice : SiO₂. B) Carte factorielle des échantillons. J : campagne de juin (ARL) ou de juillet (PDR), S : campagne de fin août (ARL) ou début septembre (PDR).....18

Figure 7 : Concentrations moyennes en nitrates (NO₃⁻), phosphates (PO₄³⁻) et silicates (SiO₂) dans les casiers d'Arles (R1, R2, S2, S3, S4 et F1) et de Péage de Roussillon (C9, C10, C126, C42, C37 et C149). J- en juin-juillet et S- en août-septembre.....19

Figure 8 A) : Enregistrements des concentrations en PO₄³⁻ à la station SORA (Arles) (rond gris) et dans les casiers (valeurs ponctuelles en couleur). B) : Enregistrement des concentrations en NO₃⁻ à la station SORA (Arles) (rond gris) et dans les casiers (valeurs ponctuelles en couleur).....20

Figure 9 : Pénétration de la lumière en fonction de la hauteur d'eau totale. La partie claire correspond à la lame d'eau éclairée, la partie sombre correspond à la lame d'eau turbide, plus en profondeur.....21

Figure 10 : Moyenne et écart-type de la concentration en chlorophylle a active pour chacun des 6 casiers de PDR. Les moyennes ont été calculées sur 3 échantillons. J: première campagne (début juillet 2014), S : 2^{ème} campagne (début septembre 2014).....23

Figure 11: Moyenne et écart-type de la concentration en chlorophylle a active pour chacun des 6 casiers d'ARL. Les moyennes ont été calculées sur 3 échantillons pour R1 et F1 et sur 5 pour R2, S2, S3 et S4. J: première campagne (fin juin 2014), S : 2^{ème} campagne (fin août 2014).....24

Figure 12: Moyenne de la concentration en chlorophylle a pour chacun des 6 casiers d'ARL. Les moyennes ont été calculées sur 3 échantillons pour R1 et F1 et sur 5 pour R2, S2, S3 et S4. Les valeurs sont comparées à celles de la station SORA (station de terrain de l'OSR).....24

Figure 13 : Densités cellulaires (cells.L⁻¹) pour chacun des 6 casiers de PDR en juillet et septembre 2014. Les densités moyennes ont été calculées sur 3 L.....25

Figure 14: Densités cellulaires (cells.L-1) pour chacun des 6 casiers d'ARL en juin et août 2014. Les densités moyennes ont été calculées sur 3 L pour R1 et F1 et sur 5 L pour R2, S2, S3 et S4.....	25
Figure 15: Structure du peuplement phytoplanctonique (6 grandes classes taxonomiques). A) : à PDR, les distributions (en %) ont été calculées sur 3 échantillons. B) : à ARL, les distributions (en %) ont été calculées sur 3 échantillons pour R1, F1 et sur 5 échantillons pour R2, S2, S3 et S4.....	26
Figure 16 A) : Carte factorielle des 88 échantillons (en rouge, les casiers du secteur de PDR et en jaune, secteur d'ARL, J : campagne de juin-juillet, s : campagne d'août-septembre 2014. L'AFC a été réalisée sur le tableau phytoplancton croisant 88 échantillons et 126 taxa.....	27
Figure 16 B) : Carte factorielle des 126 taxa (abondance relative > 5%). Les deux premiers axes de l'analyse (F1xF2) représentent 17,4 % de la variabilité totale. L'AFC a été réalisée sur le tableau phytoplancton croisant 88 échantillons et 126 taxa. Pour des questions de lisibilité les noms des taxa ont été reportés dans des cadres à l'extérieur de la carte factorielle.....	28
Figure 17 : Diversités α , β et γ pour les assemblages phytoplanctoniques des casiers de PDR et d'ARL.....	28
Figure 18 : Moyenne de la perte au feu (%). Les moyennes ont été calculées sur 5 valeurs pour R2, S2, S3 et S4 et sur 3 valeurs pour les autres casiers, pour chacune des deux campagnes 1. juin-juillet 2014, 2. août-septembre 2014 pour ARL et PDR.....	30
Figure 19 : Moyenne du rapport C organique/N total. Les moyennes ont été calculées sur 5 valeurs pour R2, S2, S3 et S4 et sur 3 valeurs pour les autres casiers, pour chacune des deux campagnes 1. juin-juillet 2014, 2. août-septembre 2014 (partie grisée). Les casiers du secteur de PDR sont encadrés en vert.....	31
Figure 20 : Activité hydrolytique (moyenne \pm écart-type; n=3 pour PDR et ARL R1, F1 ; n=5 pour ARL S3, S4, R2, S2), aux mois de juin et mois de septembre.....	31
Figure 21 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des absorbances moyennes de l'ensemble des substrats pour chaque casier à chaque date. Coordonnées factorielles moyennes des casiers (\pm écart-type).....	33
Figure 22 : Relations entre l'activité hydrolytique et le ratio C/N (moyenne par casier \pm écart-type ; J=juin, S=septembre).....	34
Figure 23 : Relations entre l'axe F1 de l'ACP réalisée sur les Biolog et la biodégradabilité de la matière organique (C/N) (moyenne par casier \pm écart-type ; J=juin, S=septembre).....	34
Figure 24 A) : Densités des principaux groupes de macroinvertébrés à PDR et ARL. B) : Densités des principaux groupes de macroinvertébrés à PDR et ARL (sans le casier F1).....	37
Figure 25 A) : Evolution de la richesse estimée (S est) en fonction du nombre d'échantillons (samples). B) : Evolution de la richesse estimée (S est) en fonction du nombre d'échantillons (samples).....	39
Figure 26 : A) carte factorielle des 88 échantillons (en rouge, les casiers du secteur de PDR et en jaune, les casiers d'ARL, J : campagne de juin- juillet, s : campagne de août -septembre 2014. B) carte factorielle des 47 taxa d'invertébrés benthiques (présents dans au moins deux relevés). Les deux premiers axes de l'analyse (F1xF2) représentent 40,6 % de la variabilité totale.....	42
Figure 27 A) : Carte factorielle F1xF2 des échantillons issue d'une AFC floue réalisée sur un tableau croisant 88 échantillons et 8 variables bio-écologiques caractérisant les taxons de macroinvertébrés benthiques.....	43
Figure 27 B (ci-contre): Cartes factorielles F1xF2 des 8 variables bio-écologiques issue d'une AFC floue réalisées sur un tableau croisant 88 relevés et 8 variables bio-écologiques. Pour chaque variable bio-écologique, une	

carte factorielle présente les coordonnées factorielles de chaque modalités. La variable alimentation comprend 9 modalités : macroinvertébrés, sédiment, détritus, microinvertébrés, microphytes, animaux morts (deadan), macrophytes, plantes mortes (pldetritus), vertébrés. La variable reproduction comprend 8 modalités : asexuée, œufs libres, œufs fixés (eggcem), ponte fixées (collées), pontes libres, ovoviviparité (ovo), et ponte endophytiques (végétation). La variable Locomotion et relation au substrat comprend 8 modalités : vol, nageur en surface, nageur en pleine eau, rampant, fouisseur (creuseur epi), endobenthique interstitiel (endobent), fixation temporaire (attache temp), fixation permanente (attacher). La variable mode d'alimentation comprend 8 modalités : absorption à travers les téguments (abs), mangeur de sédiments fins (deposit), broyeur, brouteur-racleur, filtreur, algivore ou prédateur succeur (perceur), prédateur, parasites). La variable respiration comprend 5 modalités : tégumentaire (teg), branchie, vésicule hydrostatique (vesicle), plastron, respiration aérienne (spiracle). La variable résistance comprend 5 modalités : aucune (none), œufs (eggs), logettes contre dessiccation (cell), cocons, diapause. La variable microhabitat préférentiel (substrat) comprend 9 modalités : dalles, bloc, pierre, galets (grossier), graviers, sables, limon (boue), macrophytes, microphytes, branches-racines, litière, vase. La variable distribution transversale comprend 7 modalités : chenal, chenaux secondaires et rives (bras-rive), méandre abandonné (mares), marais, eaux temporaires, lacs, habitats souterrains, hors hydrosysteme (out).....44

Figure 28 : Enregistrement des concentrations en oxygène dissous au fond (rouge) et en surface (bleu). A PDR, les enregistrements ont été réalisés du 22/07 au 24/11/2014, à ARL ils ont été réalisés du 17/06 au 28/10/2015. Les graphes sont classés en fonction de leurs profils (des moins oxygénés, en haut au plus oxygénés en bas). A ARL, seuls deux profils ont pu être enregistrés une partie du matériel ayant disparu en cours du suivi.....45

Figure 29 : Distribution des concentrations en oxygène dissous (mg/l) mesurées pendant les périodes estivales. En rouge : les mesures enregistrées au fond, en bleu les mesures enregistrées en surface.....47

Figure 30 : Moyennes horaires des concentrations en oxygène dissous enregistrées en surface. Les moyennes ont été calculées sur 60 jours (entre le 20/07/14 et le 22/9/14) pour les casiers du secteur PDR (C9, C10, C42, C37, C126, C149) et sur 90 jours (entre le 17/06/15 et le 23/09/15) pour les casiers d'ARL (S3 et R1).....48

Figure 31 : Moyennes horaires des concentrations en oxygène dissous enregistrées au fond. Les moyennes ont été calculées sur 60 jours (entre le 20/07/14 et le 22/9/14) pour les casiers du secteur PDR (C9, C10, C42, C37, C126, C149) et sur 90 jours (entre le 17/06/15 et le 23/09/15) pour les casiers d'ARL (S3 et R1).....49

Figure 32 : Teneur en oxygène dissous (en mg/l) au fond, (moyenne des valeurs minimales journalières en bleu et écarts max-min journaliers en orange) en fonction de quatre classes croissant la transparence de l'eau et le niveau de connectivité hydraulique.....50

Figure 33 : Présentations des 3 types de casiers (ensembles fonctionnels) positionnés de haut en bas selon un niveau de connexion hydraulique croissant (flèche bleue).....52

Figure 34 : Récapitulation des différentes interactions conduisant aux différents assemblages fonctionnels en lien avec le temps de résidence (lié à la connectivité hydraulique) et la profondeur des casiers.....55

Table des Tableaux

Tableau 1 : Descriptif des casiers retenus dans le secteur d'ARL. Le niveau d'atterrissement a été obtenu par analyse planimétrique. Les casiers sont classés de l'amont vers l'aval du secteur.....	3
Tableau 2 : Descriptif des casiers retenus dans le secteur de PDR. C : connecté à 100m³/s, NC : non connecté à 100 m³/s, I, II, III, VI : typologie végétation, ΔJ/N : écart journalier de température mesurée entre février et avril 2014. Les casiers sont classés de l'amont vers l'aval du secteur.* casier étudié par (Fruget, Centofanti, Dessaix, & Brana, 2012).....	4
Tableau 3 : Fréquence de connexion et de submersion des casiers pour les secteurs d'ARL et de PDR. Pour ARL, les valeurs ont été obtenues à partir des données de (Nicolas & Pont, 1995), pour PDR, les valeurs ont été obtenues suite à l'estimation des hauteurs de digues longitudinales (mesure LIDAR et contrôle de terrain). Les casiers sont classés dans l'ordre croissant du degré de connectivité hydraulique.....	12
Tableau 4 : Degré de connectivité hydraulique basé sur l'écart thermique de surface (ΔTsurf) entre moyenne journalière des températures des eaux du chenal et de celles des casiers de PDR (C9, C10, C37, C42, C126 et C149). Σ ΔTsurf est la somme des valeurs absolues des écarts thermiques entre chenal et casier. Le nombre de jours d'enregistrement est de 126 (du 22 07 au 24/11/14 sauf pour C10 (72 jours : du 15/09 au 24/11/14)). Les casiers sont classés dans l'ordre croissant de l'écart thermique.....	13
Tableau 5: Vitesse du courant dans les casiers d'ARL. Q : débit pour lequel les valeurs de vitesse ont été obtenues, v moy : vitesse moyenne intégrant l'hétérogénéité spatiale (en 3D), V sdt dev : écart type de la vitesse, Coeff de variation : écart type de la vitesse rapporté à la moyenne, Vmin, et Vmax : vitesses minimale et maximale, % en eau : surface des casiers en eau rapportée à la surface totale du casier. En rouge, les valeurs remarquables.....	15
Tableau 6 : Description qualitative des substrats recensés dans les casiers de PDR pour chacun des 18 points d'échantillonnage (3 points par casier).....	17
Tableau 7 : Description qualitative des substrats recensés dans les casiers à ARL pour chacun des 21 points d'échantillonnage. SF : Sable Fin, MO : Matière Organique.....	17
Tableau 8 : Niveau d'atterrissement et de développement des herbiers pour chacun des casiers des secteurs de PDR et ARL.....	22
Tableau 9 : Récapitulatif des données du secteur de PDR. Les casiers sont classés dans l'ordre croissant du degré de connectivité hydraulique fourni par l'écart thermique entre les eaux du chenal et celles de chacun des casiers. J : juin-juillet et S : août-septembre	29
Tableau 10 : Récapitulatif des données du secteur d'ARL. Les casiers sont classés dans l'ordre croissant du degré de connectivité hydraulique. J : juin-juillet et S : août-septembre.....	29
Tableau 11 : Densités des invertébrés benthiques des casiers de PDR (C9, C10, C37, C42, C126, C149). Le calcul a été réalisé sur l'ensemble des deux campagnes d'échantillonnage.....	36
Tableau 12 : Densités des invertébrés benthiques des casiers d'ARL (F1, R1, R2, S2, S3, S4). La surface échantillonnée varie en fonction du nombre d'échantillons réalisés (6 ou 10, en fonction de la surface du casier). Le calcul a été réalisé sur l'ensemble des deux campagnes d'échantillonnage.....	36
Tableau 13 : Récapitulatif des taxa d'invertébrés benthiques caractéristiques de chacun des deux secteurs (PDR et ARL).....	38
Tableau 14 A) : Nombre de taxa d'invertébrés benthiques identifiés à PDR (6 échantillons par casiers). B) : Nombre de taxa d'invertébrés benthiques identifiés à ARL (6 échantillons pour les casiers R1 et F1 et 10 pour R2, S2, S3 et S4).....	39

Tableau 15 : Comparaison inter-casiers de la composition taxonomique en invertébrés benthiques (en présence-absence) à PDR. Les deux premières colonnes indiquent le couple (A-B) de casiers considérés. L'indice de Sorensen indique la similarité entre ces deux entités (Plus la valeur est proche de 1 et plus les casiers ont la même composition faunistique). Les couples de casiers sont classés par ordre décroissant de l'indice de Sorensen.....40

Tableau 16 : Tableau 16 : Comparaison inter-casiers de la composition taxonomique en invertébrés benthiques (en présence-absence) à ARL. Les deux premières colonnes indiquent le couple (A-B) de casiers considérés. L'indice de Sorensen indique la similarité entre ces deux entités (Plus la valeur est proche de 1 et plus les casiers ont la même composition faunistique). Les couples de casiers sont classés par ordre décroissant de l'indice de Sorensen.....41

Tableau 17 : Intensité du métabolisme : production primaire (GPP), respiration (ER) et métabolisme net(NEP) calculés en surface et au fond des casiers du secteur de PDR.....51

1. Introduction

1.1. Les marges construites

A partir du milieu du XIX^{ème} siècle, les berges de nombreux fleuves européens ou nord-américains ont été aménagées pour favoriser la navigation fluviale. Ces marges construites, appelées « dike field », (ou « groyne field », sur le Danube (Savic et al 2013), l'Elbe (Eick & Thiel (2013) ou l'Oder (Szlauer-Lukaszewska et al. 2014)), sont similaires aux aménagements Girardon réalisés au cours du XIX^{ème} siècle sur le fleuve Rhône. Ces derniers regroupent un ensemble de structures variées (épi, digue, casier). Leur principale fonction était de définir et de figer un chenal de navigation, latéralement et verticalement, en limitant l'érosion des marges et en favorisant la sédimentation en leur sein. Au fil du temps, ces aménagements ont induit de fortes modifications des caractéristiques hydrauliques, écologiques et fonctionnelles du fleuve : un exhaussement des marges et une réduction de la largeur du lit du fleuve, un rehaussement de la ligne d'eau lors des crues, une réduction des habitats de rives et une déconnexion accrue de la plaine alluviale. Une grande majorité de ces marges construites sont actuellement atterries (80 à 90%) (Thèse de B. Räßple) et colonisées par une ripisylve vieillissante. Au contraire, les systèmes encore en eau (de 10 à 20%) constituent des éléments originaux du paysage fluvial dont le mode de fonctionnement et la contribution à la dynamique globale du fleuve restent peu étudiés (voir Franquet *et al.* 1995, Franquet 1996, 1999, Fruget *et al.* 2012, Nicolas 1996, Nicolas & Pont 1995, 1997).

Face aux questionnements actuels sur le devenir de ces casiers (Plan de Remobilisation des Marges Alluviales, Plan Rhône), il nous est apparu essentiel de développer des recherches sur ces marges construites du fleuve, avec pour objectifs de :

- (1) décrire les conditions environnementales qui règnent dans ces casiers encore en eau,
- (2) comprendre leurs différents modes de fonctionnement, en précisant les facteurs de contrôle,
- (3) établir une typologie de ces systèmes et les trajets évolutifs (successions écologiques) qui les relient.

L'ensemble de ces travaux, financés dans le cadre de l'Action n°41 de l'Accord-Cadre ZABR-Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée, nous a permis de formuler des conclusions en terme d'options de gestion de ces casiers.

1.2. Le contexte du plan Rhône

Dans le cadre du plan Rhône, il est proposé une réactivation de l'érosion des marges par un démantèlement d'une partie des aménagements Girardon. Hormis les enjeux et les contraintes locaux (zones à risque pour les riverains, ou risque de relargage de polluants), les enjeux écologiques d'un tel démantèlement sont à clarifier. Si dans les secteurs, où il est prévu une restauration/réhabilitation des îles, il semble nécessaire de supprimer les casiers pour redonner un hydrodynamisme significatif aux bras restaurés et reconnectés au fleuve, les avis semblent plus partagés dans le cas des secteurs où les îles ne seront pas restaurées.

1.3. Stratégie de recherche et hypothèses de travail

Il existe actuellement des casiers diversement connectés avec le fleuve : ouverture en amont et en aval, ouverture seulement en amont ou seulement en aval, casier fermé par une digue continue l'isolant du chenal pendant toute la période de basses eaux. Il existe donc un gradient de

connectivité hydraulique permettant d'étudier les effets des échanges sur les compartiments sédimentaires et biologiques des casiers (Nicolas & Pont 1995) et par là même, d'estimer la contribution des casiers au potentiel écologique du fleuve (processus biogéochimiques d'autoépuration, zone de forte biodiversité, hébergement de proies pour les poissons).

Ce programme a donc été centré sur les liens entre les fonctionnements hydrologique, géomorphologique et écologique des casiers Girardon, en comparant des unités connectées ou non avec le chenal actif du Rhône, de manière à évaluer les fonctions écosystémiques de ces milieux artificiels. Cette approche pluridisciplinaire originale a clairement pour but de mettre en liaison le fonctionnement et la variabilité de la connectivité entre les casiers Girardon et le chenal du Rhône pour envisager des moyens de gestions durables de ces marges construites.

Compte-tenu de l'importance des flux de matière et des échanges faunistiques et floristiques dans le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes aquatiques courants, nous faisons l'hypothèse que (1) les casiers peuvent jouer un rôle important dans la productivité du fleuve (en terme de production primaire et secondaire) et que (2) la structuration de la biodiversité est contrôlée par la connectivité entre le casier et le chenal actif (Amoros & Bornette 2002, Paillex et al. 2007, 2009, 2013).

2. Matériels et Méthodes

2.1. Présentation et choix des sites d'étude

La présente étude concerne deux secteurs du Rhône ; le secteur de Péage de Roussillon (PDR), en débit réservé et le secteur d'Arles (ARL), en débit total, à l'aval du dernier barrage hydro-électrique (barrage de Vallabrègues).

Six casiers ont été retenus sur le secteur de PDR : C9, C10, C37, C42, C126 et C149, ils sont situés sur le Rhône court-circuité et répartis dans différents trains¹ (Figure 1A). Six autres casiers ont été sélectionnés sur le secteur d'ARL: R1, F1, R2, S2, S3 et S4 (Figure 1B).

Les casiers ont été choisis de façon à limiter les effets d'éventuels facteurs confondants. Les casiers en aval du seuil de Perrault (PDR), ceux recevant un affluent ou une lône, ou encore ceux devant subir des travaux de démantèlement ont été éliminés de l'étude a priori.

Pour le secteur d'ARL les casiers étant peu nombreux, le choix restreint s'est fait à partir des données issues de (Franquet, 1996; Nicolas, 1996) (Tableau 1).

¹ Train de casiers : série de casiers consécutifs et jointifs de l'amont vers l'aval

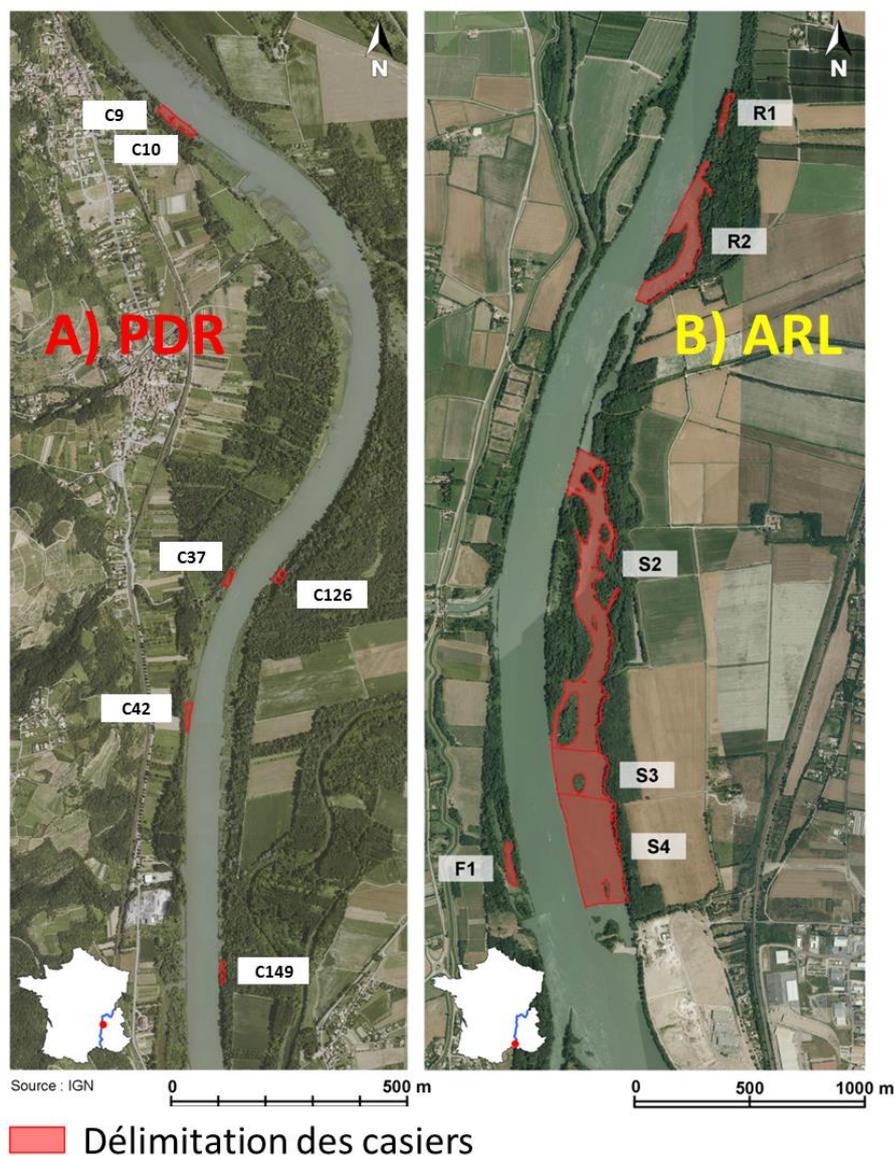


Figure 1 : Localisation des casiers échantillonnés A) à Péage de Roussillon (PDR) et B) à Arles (ARL).

Tableau 1 : Descriptif des casiers retenus sur le secteur d'ARL. Le niveau d'atterrissement a été obtenu par analyse planimétrique. Les casiers sont classés de l'amont vers l'aval du secteur.

Casiers	Train	Rive (droite/gauche)	Concavité	X	Y	Atterrissement (%)
R1	1	gauche	concave	N43°44'49,1"	E4°37'30,5"	70
R2	1	gauche	concave	N43°44'19,8"	E4°37'14,3"	40
S2	1	gauche	convexe	N43°43'42"	E4°37'1,8"	45
S3	1	gauche	convexe	N43°42'58,7"	E4°36'55,3"	36
S4	1	gauche	convexe	N43°42'40,3"	E4°37'1,5"	10
F1	2	droite	concave	N43°42'41,6"	E4°36'42,2"	85

Pour le secteur de PDR, le nombre de casiers en eau étant élevé, le choix des casiers à échantillonner s'est fait à partir d'une étude géomorphologique préliminaire (photographie, cartes anciennes,

Lidar) issue du travail de thèse de Bianca RÄPPLÉ (financement OHM vallée du Rhône & Labex DRIIHM, encadrement H. Piegay & E. Franquet), suivi d'une analyse des températures (10 thermomètres installés de février à avril 2014) et d'une analyse du monitoring des herbiers réalisé en 2004 par la réserve de la Platière (B. Pont com. pers) (Tableau 2).

Tableau 2 : Descriptif des casiers retenus dans le secteur de PDR. C : connecté à 100m³/s, NC : non connecté à 100 m³/s, I, II, III, VI : typologie végétation, ΔJ/N : écart journalier de température mesurée entre Février et Avril 2014. Les casiers sont classés de l'amont vers l'aval du secteur.* casier étudié par (Fruget et al., 2012).

Casier	Train	rive (droite gauche)	concavité rive	latitude 45° N	Longitude 4° E	% atterrissement	herbier type 2004	Thermomètre	Temp surf max
C9	29	droite	concave			64	I	Oui	>25, faible Δ JN
C10	29	droite	concave	21,731	45,588	93	VI	Oui	>25, fort Δ JN
C126*	34	gauche	convexe	20,711	45,909	19	Pas de données	Oui	>25, faible Δ JN
C37	351	droite	concave	20,666	45,713	87	II	Oui	>25, fort Δ JN
C42	351	droite	concave	20,394	45,614	55	III	Oui	>25, fort Δ JN
C149	37	gauche	convexe	19,87	45,726	76	Pas de données	Oui	>25, fort Δ JN

2.2. Etude géomorphologique

Nous avons utilisé un modèle numérique afin de pouvoir caractériser la distribution des vitesses, des hauteurs d'eau, et de la surface en eau dans les Casiers Girardon dans le secteur d'Arles pour 4 débits différents : étiage (430 m³/s), module (1400 m³/s), crue annuelle (3150 m³/s), crue décennale (7793 m³/s). Le modèle utilisé est TELEMAT-2D, qui est un modèle open source développé par EDF-R&D (Lang et al. 2014). Il s'agit d'un modèle d'hydrodynamique bidimensionnelle qui résout les équations de Barré de Saint-Venant (1871) par la méthode des éléments finis. En tout point du maillage de calcul, le modèle donne la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la colonne d'eau.

Construction du MNT

La première étape consiste à construire un modèle numérique de terrain (MNT) du secteur étudié visant à représenter le plus fidèlement possible la réalité des écoulements. Nous n'avons pas eu accès aux données brutes mais aux données exploitées par G. Raccasi pour la réalisation d'un MNT dans le cadre de sa thèse (Raccasi, 2008). Ces données ont été actualisées suite à des campagnes de mesures réalisées en 2012 par le CEREGE dans le cadre d'un projet financé par l'OHM-VR. La topographie du lit majeur est, quant à elle, issue du MNT de la BDT Rhône extrait avec une maille carrée de 2 mètres. Le MNT final est donc composé des points de bathymétrie interpolés par G. Raccasi dans le chenal et les Casiers Girardon, et des points du MNT de la BDT Rhône dans le lit majeur.

Maillage de calcul

Le choix de la taille de la maille a été réalisé suivant deux critères : la taille des phénomènes que l'on souhaite observer (champs de vitesses, courants secondaires,...) mais aussi la qualité de la représentation des digues des casiers Girardon après l'interpolation de l'information d'altitude sur le maillage de calcul. C'est ce dernier critère qui fut prépondérant dans notre choix car c'est de lui dont dépend toute la qualité des résultats de notre étude. Bien entendu, plus la densité de la maille est fine, plus il y a de nœuds de calcul et donc plus les calculs sont longs. La taille de maille a ainsi été définie de 2 mètres dans les casiers Girardon afin de représenter au mieux les digues, 5 mètres dans le chenal principal là où la quasi-totalité des écoulements sont concentrés et de 20 mètres dans le lit majeur car nous ne cherchons pas à obtenir d'information sur les écoulements en dehors du lit mineur. Le maillage final est composé de 743 458 nœuds. Le maillage de calcul a été réalisé à l'aide de Bluekenue, un logiciel de pré-post traitement pour les calculs hydrauliques.

Les conditions aux limites

Dans un second temps, il a fallu fixer les conditions aux limites du modèle correspondant aux quatre débits que nous avons souhaité modéliser. Les conditions aux limites du modèle sont de deux types. A l'amont (Beaucaire), le débit est imposé à l'aide d'un hydrogramme afin d'atteindre un régime permanent, alors que la hauteur ainsi que la vitesse sont libres. A l'aval (Arles et Fourques), la hauteur est imposée tandis que le débit et la vitesse sont libres. Ainsi, nous disposons de courbes de tarage fournies par la CNR pour chacune des limites du modèle permettant de déterminer les cotes de chaque débit. Nous disposons aussi de séries temporelles de débits journaliers (2000 – 2012) à Beaucaire et Arles permettant de déterminer le partage des débits entre le Petit Rhône et le Grand Rhône. Toute la difficulté est de référencer les cotes dans le Petit Rhône (PR) et le Grand Rhône (GR) qui permettront un partage des débits correct. Il est communément admis dans la littérature que le partage des débits entre GR/PR est de 90/10%. Cependant, ce partage varie en fonction du débit dans le Rhône total. Ainsi, Pont (1992) fait varier le pourcentage de débit dans le GR entre 80 et 90% et les mesures de la CNR (2007) font varier celui du PR entre 10 et 15%. Une série temporelle des débits journaliers à Beaucaire et Arles entre 2000 et 2012 permet de se rendre compte que, dans la réalité, ce partage varie beaucoup plus. Les lignes d'eau qui sont à notre disposition ont été mesurées pour un certain partage des débits. Il est donc nécessaire de s'approcher au mieux de ce partage pour que les lignes d'eau soient comparables à celles mesurées. Enfin, des lignes d'eau mesurées sur le Rhône total aval et sur le Grand Rhône nous ont permis de caler le modèle. Ces lignes d'eau sont issues de l'Etude Globale Rhône (2000).

Loi de frottement

Plusieurs lois de frottement peuvent être utilisées par Telemac. Dans cette étude, le frottement a été défini en indiquant un coefficient de Strickler qui varie dans l'espace. Ce coefficient a été ajusté afin de procéder au calage. Une analyse de la sensibilité du coefficient de Strickler sur la ligne d'eau et les vitesses dans les casiers a été réalisée. Des calculs ont été effectués en modifiant le coefficient de Strickler dans les casiers pour le débit d'étiage et la crue décennale. Pour chacun de ces débits, le coefficient de Strickler a été augmenté de 5 points lors d'un premier calcul puis diminué de 5 points lors d'un second. Le coefficient de frottement des casiers est alors passé respectivement de 10 à 15 puis de 10 à 5. Dans un premier temps, les lignes d'eau obtenues ont été comparées. Pour le débit d'étiage, la variation du coefficient de Strickler dans les casiers n'impacte pas la ligne d'eau

du chenal principal. Dans le cas du débit représentatif de la crue décennale, la ligne d'eau du chenal est impactée par le changement de valeur du coefficient de frottement. La variation du coefficient de Strickler entraîne une variation de la cote de la ligne d'eau d'environ 4% pour un fond plus rugueux ($K_{str} = 5$) et d'environ -2% pour un fond plus lisse ($K_{str} = 15$). Ces variations n'affectent que le chenal en amont de la diffluence (Pk 279) car les casiers sont tous situés à l'amont de cette dernière.

Les vitesses sont également affectées par la variation de coefficient de frottement et de façon moindre pour le débit d'étiage. En effet, la vitesse moyenne dans tous les casiers était initialement de 0,002 m/s et elle passe à 0,006 m/s et 0,008 m/s respectivement pour un coefficient de Strickler égal à 5 et 10. Cette augmentation n'est cependant pas très significative puisque l'on parle ici de vitesses extrêmement faibles de l'ordre de plusieurs millimètres par seconde. En revanche, tous comme les lignes d'eau, les vitesses d'écoulement calculées pour la crue décennale semblent bien plus sensibles à la variation du coefficient de frottement. La vitesse moyenne dans tous les casiers était initialement ($K_{str} = 10$) de 0,493 m/s. Elle diminue de près de 43% pour un coefficient de Strickler plus rugueux de 5 points, et elle augmente d'environ 25% pour un coefficient de Strickler plus lisse de 5 points.

Calage du modèle

Le calage du modèle consiste, dans un premier temps, à fixer des cotes à l'aval du modèle à partir des lignes d'eau mesurées. Dans un second temps, des coefficients de Strickler sont répartis dans l'espace, puis un premier calcul est alors lancé et la ligne d'eau obtenue est comparée à une ligne d'eau mesurée pour un débit équivalent. Ensuite, le coefficient de Strickler est ajusté afin de faire correspondre au mieux les lignes d'eau calculées par le modèle et les lignes d'eau mesurées sur le terrain. Un calage est effectué pour les faibles débits et un autre pour les plus forts débits.

Problèmes rencontrés lors du calage :

Nous avons rencontrés plusieurs problèmes pour fixer les conditions aux limites aval :

- Les lignes d'eau dont nous disposons pour réaliser cette étude présentent une certaine incohérence avec les courbes de tarage. En effet, en reportant la cote à Arles de la ligne d'eau de 430 m³/s sur la courbe de tarage, on obtient un débit à Arles supérieur de 609 m³/s. Cette différence peut être expliquée par les incertitudes de mesures liées à l'influence du marnage pour les débits d'étiage du Rhône mais aussi la fluctuation du débit lors de l'acquisition de la ligne d'eau.
- Nous ne disposons pas de lignes d'eau mesurées pour le Petit Rhône.
- Enfin, comme énoncé ci-dessus, il existe de multiples scénarii de partage des débits entre le Grand Rhône et le Petit Rhône. Or, nous ne connaissons pas le partage correspondant aux lignes d'eau mesurées.

Cependant, le partage correspondant au débit calculé à l'aide des courbes de tarage et le partage calculé par le modèle sont relativement proches pour chacun des débits simulés.

2.3. Enregistrements en continu

La température et la concentration en oxygène dissous ont été enregistrées en continu au centre de chacun des casiers, en surface et au fond. Ces enregistrements ont été réalisés en 2014 sur les casiers de PDR et en 2015 sur les casiers d'ARL. Les enregistrements ont été réalisés toutes les

heures à l'aide de deux sondes HOBO, fixées le long d'un câble inox lesté par un corps mort et repérable en surface par une bouée (Figure 2). Sur le site d'ARL le système a été légèrement modifié ; le câble reliant la bouée au poids mort a été allongé afin de permettre à la bouée de suivre les variations de hauteur d'eau journalières dues au marnage.



Figure 2 : Système de fixation des deux sondes HOBO placées (50 cm sous la surface) (surface data logger) et en profondeur (20 cm au-dessus du fond) (bottom data logger).

2.4. Deux campagnes d'échantillonnage : eaux, sédiments, phytoplancton et zoobenthos.

Les échantillons d'eau, de sédiments, de flore et de faune ont été prélevés ponctuellement lors de deux campagnes réalisées en début et fin d'été 2014. Les campagnes de début d'été ont été réalisées du 18 au 20 juin dans le secteur d'ARL et du 30 juin au 1 juillet dans le secteur de PDR. Les campagnes de fin d'été ont été réalisées du 27 août au 4 septembre à ARL et du 15 au 16 septembre à PDR.

Au total 44 points ont été échantillonnés par campagne, 5 points ont été répartis aléatoirement dans chacun des casiers les plus grands (R2, S2, S3, S4) et 3 dans les casiers plus petits (R1, F1, C9, C10, C126, C149, C37, C42). Sur chacun des points, les métriques suivantes ont été acquises :

- Paramètres physiques : transparence, profondeur, substrat (qualitatif)
- Paramètres physico-chimiques : température, conductivité, O₂ dissous, cations dissous (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), anions dissous (F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻), silice dissoute, formes de carbone dissous (organique et inorganique)
- Eléments particuliers : MES, carbone organique particulaire, azote total, chlorophylle-a,
- Sédiments : C/N, activité microbienne, MO (perte au feu)
- Phytoplancton et Benthos (richesse, densité, structure fonctionnelle des assemblages)

2.4.1. Chimie de l'eau

Pour chacun des 44 points échantillonnés et pour chacune des deux campagnes, des prélèvements d'eau ont été effectués à l'aide d'une bouteille Niskin horizontale de 2L. L'eau ainsi prélevée a été stockée dans 2 flacons HDPE 1L et placés au frais jusqu'à leur filtration directement sur le terrain. Les prélèvements ont été effectués à la profondeur correspondant à 1,5 fois la distance de Secchi² et au maximum à 1 mètre au-dessus du fond. La transparence, la profondeur maximale, la conductivité, l'oxygène dissous et la température ont été mesurées *in-situ*.

² La distance de Secchi représente la profondeur pour laquelle il est impossible de discerner de disque de Secchi dans l'eau.

Eléments dissous

Le 1^{er} flacon d'eau a été filtré sur 3 filtres en fibres de verre 25 mm (Whatman GFF, 0.7 µm) préalablement calcinés 4h à 450°C et pré-pesés dans des papiers aluminium numérotés. Une partie de l'eau ainsi filtrée a été stockée dans un flacon HDPE 150 mL et conservé au congélateur (-18°C) jusqu'à analyse des **anions et cations dissous** (Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻) et de la silice dissoute (SiO₂) au laboratoire par chromatographie ionique (METROHM, 930 Compact IC Flex et 863 Compact Autosampler).

L'autre partie de l'eau filtrée a été conservée au frais (+ 4°C) dans un flacon en verre 24 mL (Wheaton équipé d'un septum en téflon) et conditionnée avec 40 µL d'azoture de sodium (NaN₃, 1M) pour l'analyse des formes de carbones dissous (organique, inorganique et total) à l'aide d'un TOC-mètre (SHIMADZU, Laboratoire PROTEE, Université de Toulon).

Eléments particuliers

Après séchage et pesée des filtres GFF 25 mm, les **MES** ont été quantifiées au laboratoire. Ces filtres ont ensuite été placés 4h aux vapeurs d'HCl concentré afin d'éliminer le carbone inorganique. Les teneurs en **carbone organique particulaire**, et en **N total particulaire** ont ensuite été mesurées sur les filtres à l'aide d'un analyseur élémentaire (ThermoScientifique, FlashEA 1112).

Le second flacon HDPE a été utilisé pour le dosage des chlorophylles a, b, c, a-active et phéopigments (voir partie 2.4.3).

2.4.2. Chimie des sédiments

Pour chacun des 44 points d'échantillonnage, du sédiment a été prélevé à l'aide d'une benne Ekman. Les sédiments ont été stockés dans des flacons HDPE 150 mL et placés au frais pendant 24h. Une fois le temps écoulé, le surnageant a été pipeté et les flacons ont été placés au congélateur (- 18°C). Les sédiments ont ensuite été lyophilisés et tamisés à 2 mm.

La quantité de matière organique (MO) a ensuite été obtenue par perte au feu après calcination à 550 °C pendant 4 h (méthode par différence de masse).

Une partie des sédiments lyophilisés et tamisés à 2 mm a été broyée au broyeur à billes. Une quantité connue d'échantillon ainsi préparé a été analysée par analyseur élémentaire (partie 2.4.1) afin de quantifier les teneurs de C-total et N-total. Une seconde série de mesures a été réalisée sur l'échantillon broyé après attaque à l'acide sulfurique afin de quantifier la teneur en carbone organique particulaire avec le même appareil.

2.4.3. Etude du Phytoplancton

Technique de prélèvement

Pour chacun des 44 points échantillonnés et pour chacune des deux campagnes, des prélèvements d'eau ont été effectués à l'aide d'une bouteille Niskin. Les prélèvements ont été effectués dans la zone euphotique, à la profondeur correspondant à 1,5 fois la distance de Secchi, mesurée au préalable. Dans les cas où cette distance est égale à la profondeur maximale du casier, les

prélèvements ont été effectués à un mètre au-dessus du fond, afin de limiter la remise en suspension des sédiments.

Les prélèvements d'eau destinés aux études qualitatives et quantitatives (comptage), ont été réalisés selon le protocole standardisé d'échantillonnage du phytoplancton en plan d'eau applicable aux réseaux de mesure DCE (Laplace-Treytore et al., 2009).

Dosage de la chlorophylle a (biomasse algale)

Les concentrations en **Chlorophylle a active**, **Chlorophylle a, b et c** et en **Phéopigments** ont été mesurées par spectrométrie selon la norme NF T90-117 (Décembre 1999).

Identification du phytoplancton

Les échantillons d'eau, fixés au formol, ont été homogénéisés pour remettre en suspension les particules. Un sous-échantillon est prélevé et placé dans une cuve à sédimentation de 25 mL. Chaque sous-échantillon est fermé à l'aide d'un couvercle pour éviter toute évaporation. La durée de sédimentation est de 12h minimum.

L'identification et le dénombrement des cellules phytoplanctoniques ont été effectués au microscope inversé (Olympus), selon la norme NF EN 15204 (01/12/2006). La densité est exprimée en « nombre de cellules par unité de volume » (litre).

2.3.4. Etude des activités microbiennes

Les activités potentielles des assemblages microbiens ou biofilms ont été mesurées à l'aide de 2 méthodes :

- l'activité hydrolytique basée sur l'hydrolyse de la fluorescéine diacétate (FDA) par les hydrolases (lipases, protéases, estérases, ...);
- les microplaques BIOLOG EcoPlate™ (Biolog Inc., Hayward, CA), qui permettent de caractériser les communautés microbiennes des sédiments en fonction de leurs capacités à utiliser 31 substrats carbonés différents appartenant à 6 groupes (acides carboxyliques, carbohydrates, acides aminés, amines, phénols et polymères). Cette méthode permet de déterminer l'activité métabolique hétérotrophe des assemblages microbiens et de définir des « profils physiologiques » caractéristiques de chaque habitat.

2.3.5. Etude du zoobenthos

Les invertébrés benthiques ont été échantillonnés à la benne Ekman pour chacun des 44 points et chacune des deux campagnes. Les échantillons ont été ensuite rincés sur un tamis de 500 µm de vide de maille puis fixés à l'éthanol à 96 % et conservés à + 4°C. Le tri et l'identification ont été réalisés à la loupe binoculaire ou au microscope (pour les Ostracodes et Cladocères). Les invertébrés ont été déterminés au niveau le plus fin permis par Tachet *et al.* 2000. Les traits bio-écologiques associés à chaque taxon sont issus de cette même référence.

2.5. Métabolisme et méthodes de quantification

Le métabolisme d'un écosystème est déterminé par les réactions de production et de consommation de matière organique. On distingue ainsi la production primaire (GPP, Gross Primary Production), conversion autotrophe du carbone inorganique en carbone organique, et la respiration (ER, Ecosystem Respiration), oxydation de C organique en C inorganique, par les voies autotrophe ou hétérotrophe. La NEP (Net Ecosystem Production), différence entre GPP et ER, représente la balance globale entre tous les processus d'anabolisme et de catabolisme.

Plusieurs méthodes ont été utilisées depuis le XIX^{ème} siècle pour quantifier le métabolisme des écosystèmes aquatiques (Staehr et al., 2010), avec des échelles spatiales et temporelles variables, et chacune avec des limites. Les premières mesures directes étaient réalisées dans des chambres d'incubation, à la lumière ou dans l'obscurité. Les méthodes basées sur la variation journalière des teneurs en O₂ ou CO₂ dissous (Odum, 1956) ont ensuite vraiment donné accès au métabolisme *in situ*. Plus récemment, ces méthodes se sont élargies au suivi de la variation des isotopes ¹⁸O/¹⁶O dans O₂. Récemment, des approches couplant les chroniques d'oxygène dissous et des approches stochastiques ont été proposées (Cremona, Laas, Noges, & Noges, 2014), qui considèrent plus spécifiquement les incertitudes sur le métabolisme.

La méthode utilisée ici est celle des courbes journalières en O₂, décrite dans (Needoba, Peterson, & Johnson, 2012) et (Escoffier, 2014; Escoffier et al., 2016), et illustrée en Figure 3, et qui repose sur le suivi temporel des concentrations en oxygène dissous. Cette méthode présente l'avantage de fournir un suivi quasi continu du métabolisme, et donc d'en étudier la variabilité à l'échelle saisonnière.

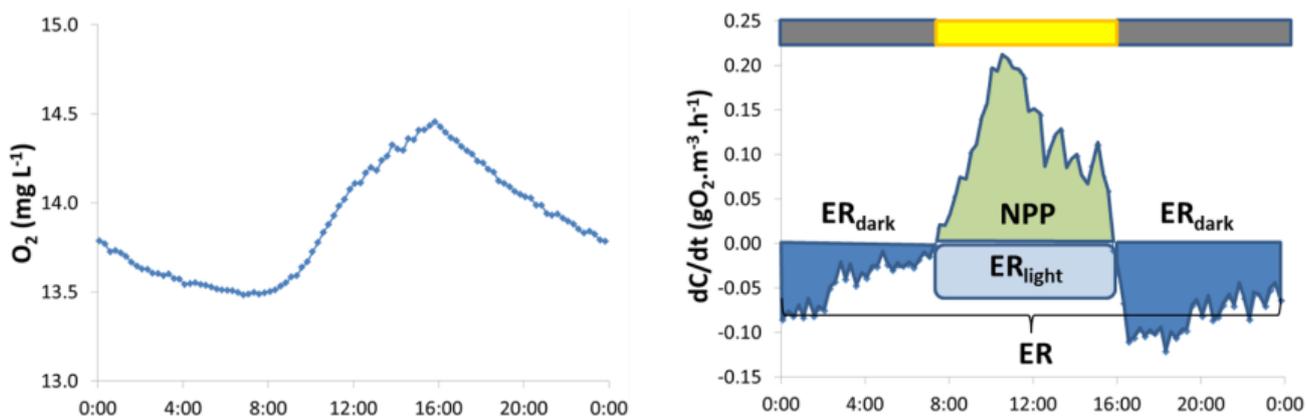


Figure 3 : Exemple d'évolution journalière de la concentration en O₂ dissous (à gauche), et contributions de la respiration et de la production primaire au bilan d'O₂ (à droite).

3. Les indicateurs de connexion/submersion

3.1. Echange d'eau en surface

Le premier indicateur est relatif à la hauteur de digue. Connexion et submersion représentent deux états des digues longitudinales submersibles délimitant les casiers Girardon et les séparant du chenal principal. Un casier est connecté lorsque l'eau circule (entre ou sort) entre le casier et le chenal en un ou quelques points de passage. Ceci est induit par une hauteur de digue irrégulière, les points bas représentant des points d'entrée ou de sortie d'eau préférentiels. Un casier est dit submergé lorsque toutes les digues le délimitant sont recouvertes d'eau, il est alors difficile de visualiser un casier submergé, si ce n'est par la végétation arborescente et arborée qui colonise les digues.

3.1.1. Démarche

Pour le secteur d'ARL, la connectivité hydraulique a été obtenue par l'évaluation des fréquences de connexion et de submersion, à partir de Nicolas & Pont (1995). Plus précisément, cela a consisté en des relevés de terrain visant à définir, au cours de trois années (1992-1994), les valeurs de débit seuil entraînant une connexion ou une submersion des différents casiers. Les probabilités d'atteindre ces débits seuil de submersion et de connexion ont été calculées pour une période de référence de 30 ans.

Pour le secteur de PDR, la connectivité hydraulique peut être évaluée par la hauteur des digues. Plus précisément, des enregistrements lidar ont permis de vectoriser les lignes de crêtes des digues longitudinales. Tous les 4 m, la hauteur minimale de la digue longitudinale est mesurée en relatif par rapport à la ligne d'eau du chenal pour un débit de 100m³/s. Ainsi il est possible de définir la hauteur minimale de la digue (min des hauteurs min) et d'estimer la fréquence des débits du Rhône permettant un dépassement de cette valeur. Ce qui correspond à la fréquence de connexion.

3.1.2. Hauteur de digues à Péage de Roussillon

La figure 4 montre que les casiers C126 et C149 présentent une passe assez large pour un débit de 100 m³/s, puisque la hauteur de la digue longitudinale est inférieure à la ligne d'eau. Il faut noter que cette passe est en amont pour C149 et en aval pour C126. Viennent ensuite C42 et C9 avec des digues de hauteur assez similaire à la valeur de la ligne d'eau à 100 m³/s et enfin les casiers avec les digues les plus hautes C10 et C37.

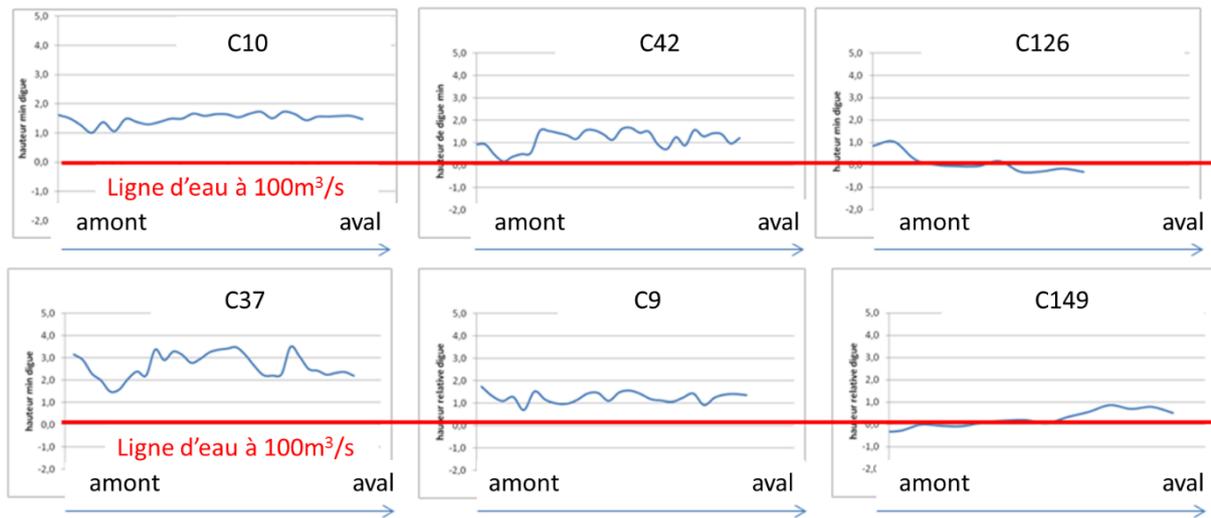


Figure 4 : Hauteur minimale des digues longitudinales en fonction de la distance à la digue transversale amont pour chacun des six casiers choisis à Péage de Roussillon (en bleu). Les données ont été obtenues par LIDAR (thèse Bianca Räßple), la ligne rouge correspond à la ligne d'eau pour un débit de 100 m³/s. Les casiers sont classés en fonction de la hauteur de la digue.

3.1.3. Fréquence de submersion et de connexion à ARL et PDR

Il est donc possible d'obtenir un classement des casiers selon leur degré de connectivité hydraulique (Tableau 3). A Arles, 2 lots de casiers existent ; les plus isolés (R1 et F1) et les fortement connectés (S3, S4, S2 et R2). A PDR, 3 groupes de casiers peuvent être identifiés ; 1 isolé (C37), 3 en situation intermédiaire (C10, C9 et C42) et 2 fortement connectés (C149 et C126).

Tableau 3 : Fréquence de connexion et de submersion des casiers pour les secteurs d'ARL et de PDR. Pour ARL, les valeurs ont été obtenues à partir des données de (Nicolas & Pont, 1995) ; pour PDR, les valeurs ont été obtenues suite à l'estimation des hauteurs de digues longitudinales (mesure LIDAR et contrôle de terrain). Les casiers sont classés dans l'ordre croissant du degré de connectivité hydraulique.

Casiers	% Connexion	% Submersion	Casier	Connexion à 100 m ³ /s	% Connexion
R1	10%	10%	C37	NC	30%
F1	25%	10%	C10	NC	44%
S3	100%, 1 passe	32%	C42	NC	46%
S4	100%, 1 passe	32%	C9	NC	48%
S2	100%, 2 passes amont et aval	22%	C149	C	100%
R2	100%, 2 passes amont et aval	32%	C126	C	100%

3.2. Prise en compte de l'écart thermique entre eau du chenal et eaux des casiers.

Le calcul de l'écart de températures enregistrées en continu toutes les heures entre les eaux de surface du chenal et celle de chacun des casiers peut être un bon indicateur des échanges

hydrauliques. La figure 5 montre très nettement un lien entre les augmentations de débit et la réduction de l'écart thermique. D'autres éléments tels que les précipitations ou le vent peuvent homogénéiser les températures, néanmoins cela est un fait généralisé sur l'ensemble d'un secteur et ne modifie pas le classement des casiers.

Ainsi en calculant la somme des valeurs absolues des écarts thermiques entre casiers et chenal rapportée au nombre de jours d'enregistrement, un gradient de connectivité hydraulique légèrement modifié est obtenu (Tableau 4) : Le casier C9 apparaît plus connecté et donc plus proche du C126. Ceci peut s'expliquer par le fait que ce second indicateur prend en compte la porosité des digues ; les digues d'enrochement sont plus ou moins colmatées en fonction de leur exposition au courant. Ainsi une digue faiblement colmatée sera dite poreuse et pourra laisser passer de faible flux d'eau au travers des interstices existants entre les blocs rocheux.

Tableau 4 : Degré de connectivité hydraulique basé sur l'écart thermique de surface (ΔT_{surf}) entre moyenne journalière des températures des eaux du chenal et de celles des casiers de PDR (C9, C10, C37, C42, C126 et C149). $\Sigma |\Delta T_{surf}|$ est la somme des valeurs absolues des écarts thermiques entre chenal et casier. Le nombre de jours d'enregistrement est de 126 (du 22/07 au 24/11/14 sauf pour C10 (72 jours : du 15/09 au 24/11/14)). Les casiers sont classés dans l'ordre croissant de l'écart thermique.

Casiers	$\Sigma \Delta T_{surf} $ en °C	$\Sigma \Delta T_{surf} /\text{nbre de valeurs en } ^\circ\text{C}$
C37	242,6	1,93
C10	232,8	1,88
C42	183,9	1,46
C149	151,9	1,21
C9	143,9	1,14
C126	120,6	0,96

3.3. Conclusions pour PDR et Arles

Pour chacun des secteurs, un gradient de connectivité hydraulique (hauteur de digue plus porosité) peut donc être établi.

- Pour le secteur d'Arles : R1 < F1 < S3 et S4 < R2 et S2
- Pour le secteur de PDR : la prise en compte de l'écart thermique modifie un peu l'ordre établi initialement (en prenant uniquement en compte la hauteur des digues), il intègre en particulier la porosité de la digue : C37 < C10 < C42 < C149 < C9 < C126

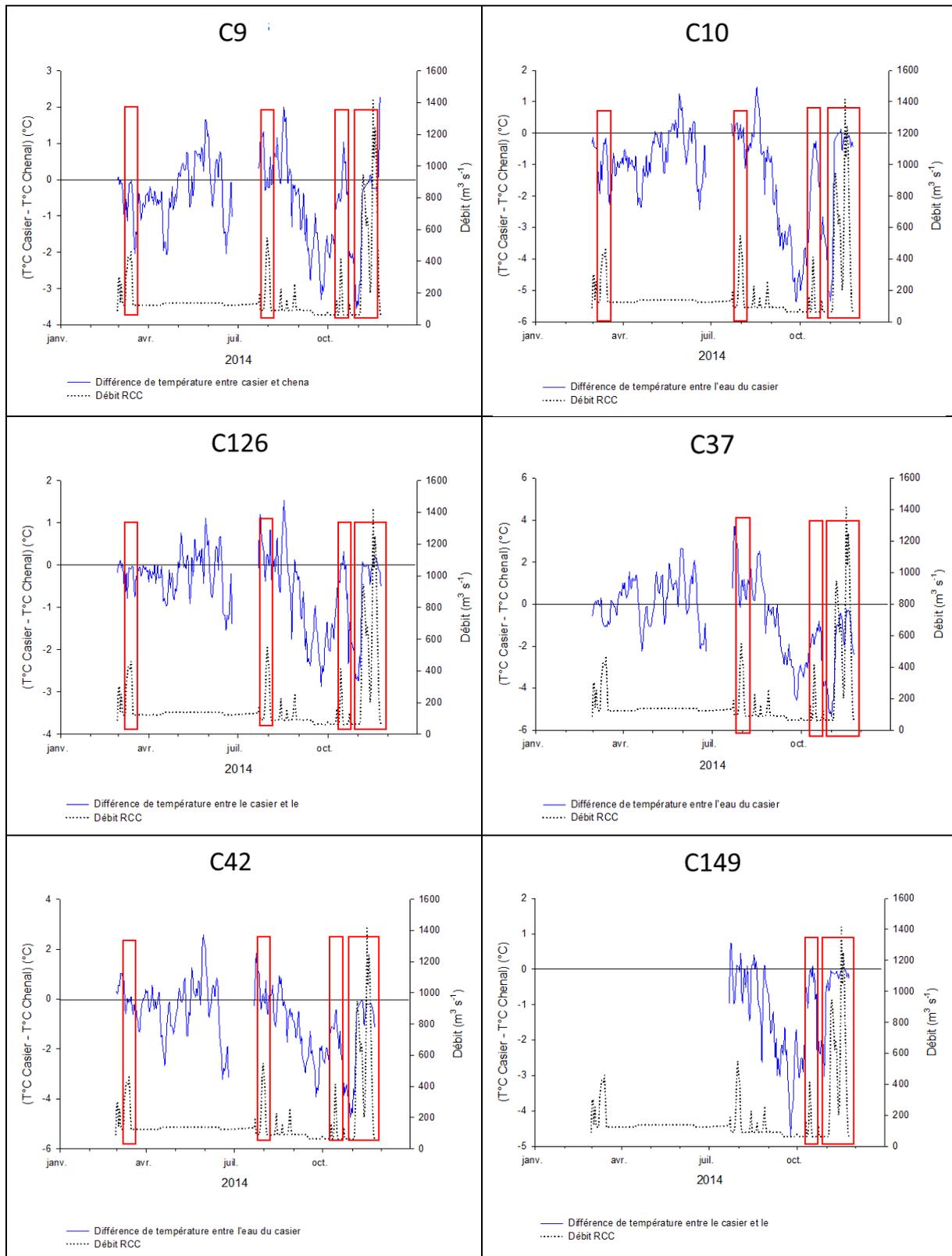


Figure 5: Ecart thermique entre l'eau des casiers C9, C10, C37, C42, C126, C149 et celle du chenal. Les températures sont celles de surface sauf pour le casier C10 (seules les températures de fond sont disponibles sur une période longue). Les températures du chenal ont été fournies par le programme RHONE-ECO, les débits du chenal (RCC) par la CNR. Les cadres, en rouge, matérialisent les périodes de crue.

4. Caractérisation environnementale des casiers

4.1. Vitesses et substrats

Sur le secteur de PDR, pour un débit réservé de 100 m³/s, les vitesses de courant sont quasiment nulles.

Contrairement à PDR, les vitesses dans les casiers d'Arles ne sont pas négligeables. La carte des vitesses (en annexe) ainsi que le tableau 5 montrent que pour un débit de 1400 m³/s (soit une valeur proche du module), elles varient de 0 m/s dans les casiers R1 à 1,1 m/s dans S3. Lorsque le débit s'élève, les vitesses maximales augmentent ; ainsi il est estimé une vitesse de 1,7 m/s dans le casier R1 pour une crue décennale (7793 m³/s).

Tableau 5: Vitesse du courant dans les casiers d'ARL. Q : débit pour lequel les valeurs de vitesse ont été obtenues, v moy : vitesse moyenne intégrant l'hétérogénéité spatiale et de profondeur, V sdt dev : écart type de la vitesse, Coeff de variation : écart type de la vitesse rapporté à la moyenne, Vmin, et Vmax : vitesses minimale et maximale, % en eau : surface des casiers en eau rapportée à la surface totale du casier. En rouge, les valeurs remarquables.

Q (m ³ /s)	casiers	v moy (m/s)	V sdt dev	V Coeff de variation (%)	V Min (m/s)	VMax (m/s)	surface en eau (m ²)	% en eau
430	R1	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	63	1%
	R2	0,003	0,005	152,56	0,000	0,046	85965	38%
	S2	0,003	0,012	467,24	0,000	0,159	140872	33%
	S3	0,000	0,000	220,14	0,000	0,004	52023	83%
	S4	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	118815	84%
	F1	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	9723	24%
1400	R1	0,000	0,000	0,00	0,050	0,175	63	1%
	R2	0,078	0,057	72,98	0,000	0,477	101032	45%
	S2	0,043	0,055	126,99	0,000	0,487	187600	44%
	S3	0,002	0,016	833,09	0,000	1,105	55003	88%
	S4	0,001	0,007	660,71	0,000	0,680	122702	87%
	F1	0,001	0,005	543,94	0,000	0,111	12090	30%
3150	R1	0,067	0,102	151,21	0,000	0,595	4692	6%
	R2	0,242	0,119	49,12	0,000	0,852	115821	51%
	S2	0,173	0,126	73,16	0,000	0,929	273408	65%
	S3	0,089	0,130	145,32	0,000	1,478	60641	97%
	S4	0,114	0,078	68,88	0,000	1,306	129594	92%
	F1	0,013	0,027	211,29	0,000	0,156	20022	50%
7793	R1	0,398	0,162	40,64	0,015	1,745	73645	97%
	R2	0,412	0,290	70,47	0,000	1,682	184423	81%
	S2	0,421	0,168	39,91	0,003	1,362	416185	99%
	S3	0,427	0,162	37,94	0,003	1,220	62323	100%
	S4	0,568	0,173	30,48	0,025	1,506	140976	100%
	F1	0,460	0,156	33,89	0,052	0,695	40411	100%

Par ailleurs, l'écart-type (sdt dev) indique une variabilité spatiale notable. Rapportée à la vitesse moyenne, cette variabilité est maximale pour le débit d'étiage dans les casiers connectés par deux passes (R2 et S2), elle est maximale pour le module dans les casiers S3, S4 et F1 et enfin pour une crue annuelle dans le casier le plus isolé (R1).

Pour un débit plus élevé (7793m³/s), on constate que l'espace occupé par les casiers à tendance à s'homogénéiser, l'hétérogénéité des vitesses étant beaucoup plus faible.

De façon plus détaillée l'annexe 1, montre qu'à l'étiage, ce secteur présente une hétérogénéité préexistante due à la morphologie même si les vitesses sont uniformes. Les cartes des hauteurs d'eau permettent d'observer la morphologie héritée de la mise en place des casiers Girardon. Des fosses sont présentes à l'aval des digues transversales dans les casiers S3 et S4. De plus, la morphologie d'anastomose est visible grâce à la présence de chenaux secondaires qui sont d'autant plus marqués dans les casiers R2 et S2. Ces observations sont confirmées par l'analyse des cartes de la distribution des vitesses. Les communications entre les casiers et le chenal principal sont quasi inexistantes mise à part une légère circulation dans les casiers R2 et S2. Les vitesses y sont très faibles voire nulles (vitesse moyenne dans la totalité des casiers de 0,0015 m/s). **Au module**, la connexion entre ces deux casiers et le chenal principal devient plus importante et ces casiers commencent à fonctionner comme des bras secondaires. Une entrée d'eau se crée à l'amont tandis que l'eau sort à l'aval. Les vitesses s'accroissent avec des vitesses maximum de 0,6 m/s dans ces deux casiers (vitesse moyenne dans la totalité des casiers de 0,03 m/s). **Lors de la crue annuelle**, les connexions inter-casiers entraînent la formation d'un chenal sur la quasi-totalité du linéaire des casiers. Ceci est illustré dans les casiers S3 et S4 qui développent un chenal dans le prolongement du chenal de S2 où les vitesses sont supérieures au reste du casier. Ces écoulements se dirigent à l'aval du casier S4 pour être restitués au chenal principal du Rhône. Dans ce système, les vitesses deviennent de plus en plus hétérogènes. La vitesse moyenne dans la totalité des casiers passe à 0,15 m/s et la vitesse maximum est d'environ 1,6 m/s au niveau des passages inter-casiers (S3 et S4). **Lors de la crue décennale**, les digues sont submergées et les écoulements au niveau des digues sont parallèles aux écoulements du chenal principal. La vitesse moyenne dans les casiers atteint 0,5 m/s avec une vitesse maximale proche de 1,8 m/s. La distribution des vitesses montre une mosaïque des champs de vitesses. L'hétérogénéité des vitesses montre alors le réel rôle de ces chenaux secondaires lors des crues.

Dans l'ensemble des casiers la vitesse moyenne et la hauteur d'eau moyenne augmentent avec le débit (Tableau 5). Mais chaque casier possède un comportement qui lui est propre en fonction de sa morphologie et de ses connexions avec le chenal principal et il ne semble pas exister de tendance amont-aval. La corrélation entre toutes les vitesses et hauteurs d'eau par casier et par débit (Annexe 1) confirme qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les deux variables et que la réponse à une augmentation du débit est complexe.

La surface en eau par casier en fonction du débit a été aussi étudiée (Tableau 5). Cela montre que de manière générale la surface en eau augmente avec le débit. Là encore, les casiers ont des comportements différents. Certains comme les casiers S3 et S4 ne présentent pas

d'augmentation significative de la surface en eau avec le débit. De plus, tous les casiers tendent à être submergés lors de la crue décennale (entre 97 et 100% de la surface totale est en eau) sauf le casier R2 qui compte seulement 80% de sa surface totale en eau.

La granulométrie des dépôts sédimentaires dépend en partie de la vitesse qui peut être atteinte dans les casiers ; plus les vitesses sont élevées et plus les dépôts pourront être grossiers. Le tableau ci-dessous récapitule le type de substrat (qualité) rencontré sur chacun des points d'échantillonnage. Pour le secteur de PDR, les casiers C9, C10 et C37 semblent assez homogènes avec des substrats sableux à limono-sableux. A l'opposé, les casiers C42, C149 et a un degré moindre C126 ont des substrats plus hétérogènes et de taille de grain plus élevée (Tableau 6). Pour le secteur d'Arles, les casiers R1, S3 et S4 sont très homogènes avec des substrats vaseux pour le premier et plutôt sableux pour les seconds. Les casiers les plus hétérogènes en termes de substrats sont aussi ceux qui le sont en termes de vitesse de courant à savoir R2 et S2, les casiers qui se comportent comme des bras secondaires avec une connexion amont et une connexion aval (Tableau 7).

Tableau 6 : Description qualitative des substrats recensés dans les casiers de PDR pour chacun des 18 points d'échantillonnage (3 points par casier).

Casier/point échantillonnage	substrat	Casier/point échantillonnage	substrat
C9.1	sableux	C37.1	limono-sableux
C9.2	sableux	C37.2	limono-sableux
C9.3	sableux	C37.3	limono-sableux
C10.1	sableux	C42.1	cailloux
C10.2	sableux	C42.2	sablo-limoneux
C10.3	sableux	C42.3	cailloux
C126.1	sableux - MO	C149.1	limono-sableux
C126.2	sableux - MO	C149.2	limono-sableux
C126.3	sableux - cailloux - MO	C149.3	sableux cailloux -

Tableau 7 : Description qualitative des substrats recensés dans les casiers à ARL pour chacun des 21 points d'échantillonnage. SF : Sable Fin, MO : Matière Organique.

Casier/point échantillonnage	substrat	Casier/point échantillonnage	substrat
R1.1	vase + MO	F1.1	sablo-limoneux +débris vég
R1.2	vase + MO	F1.2	sablo-limoneux
R1.3	vase + MO	F1.3	vase
R2.1	sable + graviers	S3.1	sablo-limoneux
R2.2	SF + MO + graviers	S3.2	sablo-limoneux
R2.3	SF + MO + graviers	S3.3	sablo-limoneux
R2.4	sable + graviers	S3.4	sablo-limoneux
R2.5	sable + graviers	S3.5	sablo-limoneux
S2.1	cailloux	S4.1	sableux
S2.2	sableux + cailloux	S4.2	sablo-limoneux
S2.3	limono-sableux + cailloux + débris orga	S4.3	
S2.4	limon + débris orga	S4.4	sablo-limoneux
S2.5	limon + débris orga	S4.5	sablo-limoneux

4.2. Chimie de l'eau et des sédiments

L'analyse en composante principale (Figure 6A & B) croisant 88 relevés et 38 variables environnementales montre des effets « casiers » et « secteur » forts comparativement à l'effet date. Les figure 6 A et B montrent que l'axe 1 oppose le casier C37 de PDR, avec une forte production (valeurs élevées de Chlorophylle a, b, c, phéopigment, N tot part, C org part, perte au feu, Corg des sed, N tot des sédiments), aux casiers d'Arles (sauf, F1 et R1) avec des valeurs élevées de C/N, des concentrations en composés azotés dissous, de SO4 et de profondeur. L'axe 2 oppose les casiers avec une bonne oxygénation et une transparence forte (autres casiers de PDR) aux casiers F1 et R1 du secteur d'ARL.

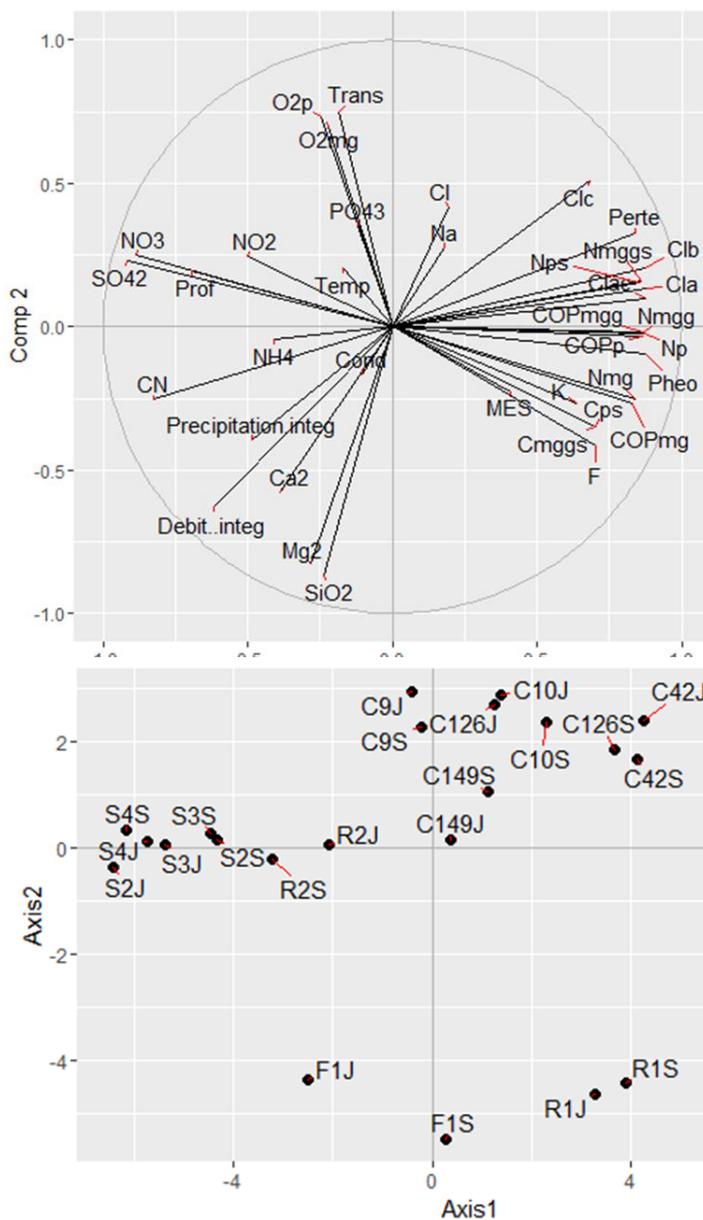


Figure 6 :

A) Cercle des corrélations des 38 variables environnementales (précipitations et débit intég. : moyennes des précipitations et des débits calculés sur 1 semaine avant le prélèvement, Prof : profondeur, Temp : température, Trans : transparence, O2p et O2 mg : O2 dissous en % et mg/L, Cond : conductivité, Cla, b, c, ac : Chlorophylle a, b, c, active, Pheo : phéopigments, Perte : perte au feu, MES : matières en suspension, COPmg, COPmgg et COPp : Carbone organique total en mg, en mg/g et %, Nmg, Nmgg, et Np : Azote total particulaire en mg, en mg/g et %, Nmggs et Nps : Azote total des sédiments en mg/g et %, Cmggs et Cps : Carbone organique des sédiments en mg/g et %, C/N rapport entre Corg/Ntot des sédiments, cations : NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , anions : Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , F^- et la silice : SiO_2 .

B) Carte factorielle des échantillons. J : campagne de juin (ARL) ou de juillet (PDR), S : campagne de fin août (ARL) ou début septembre (PDR).

Les nutriments

En ce qui concerne les nutriments nécessaires au développement des producteurs primaires, une analyse plus en détail, suppose de distinguer les deux secteurs (Figure 7).

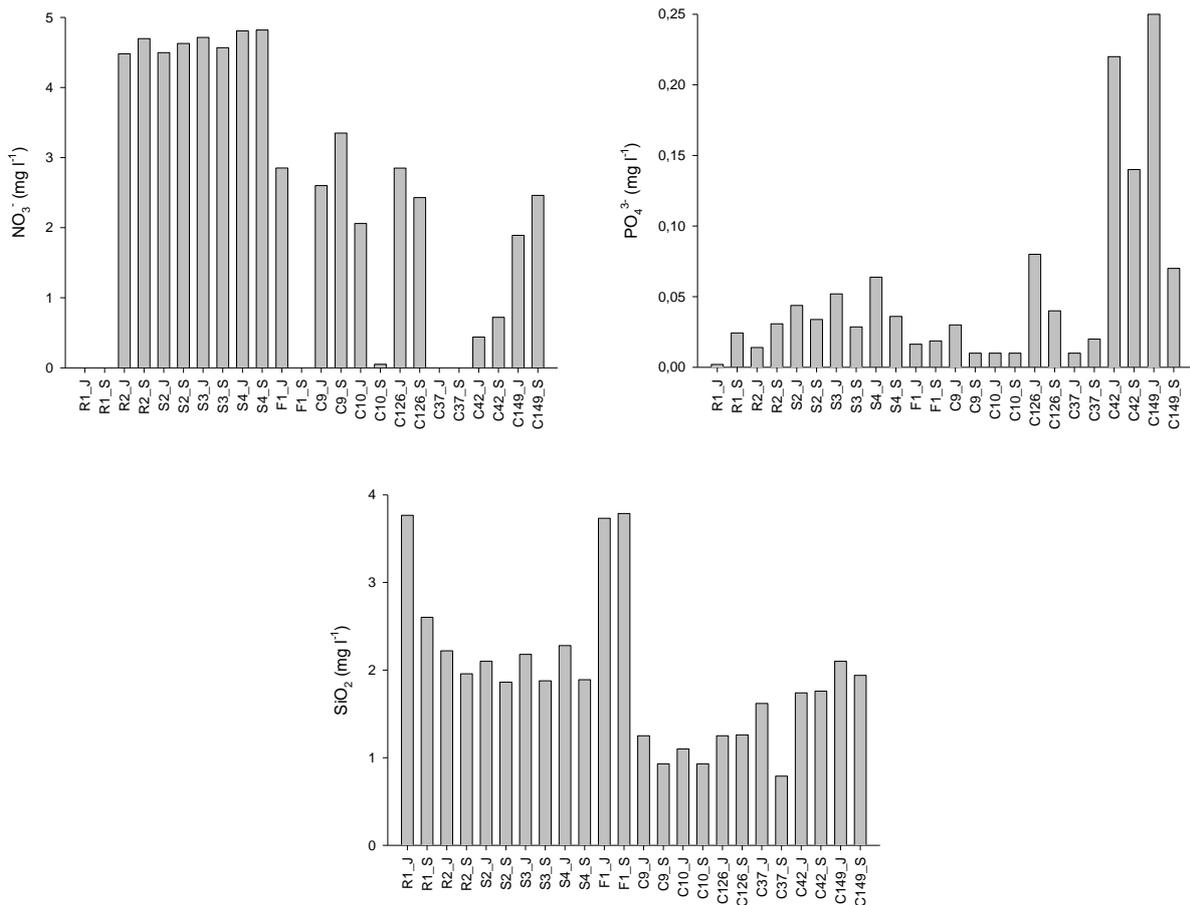


Figure 7 : Concentrations moyennes en nitrates (NO₃⁻), phosphates (PO₄³⁻) et silicates (SiO₂) dans les casiers d’Arles (R1, R2, S2, S3, S4 et F1) et de Péage de Roussillon (C9, C10, C126, C42, C37 et C149). J- en juin-juillet et S- en août-septembre.

Dans le secteur de PDR, les concentrations en P-PO₄³⁻ permettent de distinguer trois groupes de casiers, ceux dont les teneurs sont les plus faibles (entre 10 et 30 µg/l) : C10, C37 et C9, ceux qui, à l’opposé, ont les teneurs les plus fortes (entre 70 et 250 µg/l) : C42 et C149 et enfin le C126 en position intermédiaire avec des teneurs entre 40 et 80 µg/l. Les concentrations en N-NO₃, permettent de discriminer à nouveau trois groupes : le C37 avec des concentrations en nitrates en dessous du seuil de détection (<0,001mg.L⁻¹), puis les C10 et C42 avec des teneurs relativement faibles et C9, C126 et C149 avec des concentrations plus élevées comprises entre 2 et 3,5 mg/l.

Dans le secteur d'Arles, les concentrations en $P-PO_4^{3-}$ permettent de distinguer deux groupes de casiers, ceux dont les teneurs sont les plus faibles (entre 2 et 30 $\mu\text{g/l}$) : R1, F1 et R2 et ceux dont les teneurs sont les plus fortes (entre 29 et 64 $\mu\text{g/l}$ pour S2, S3 et S4). Les concentrations en $N-NO_3$, quant à elles, sont remarquablement homogènes autour de 5mg/l sauf pour les casiers R1 et F1 (uniquement en septembre) sans nitrate détectable.

La comparaison avec les données de la station SORA à Arles (10 km en aval) montre (Figure 8A) que les concentrations en PO_4^{3-} sont nettement inférieures à celles enregistrées dans le chenal. La Figure 8B montre que les teneurs en nitrates sont du même niveau sauf pour les casiers les plus isolés F1 et R1.

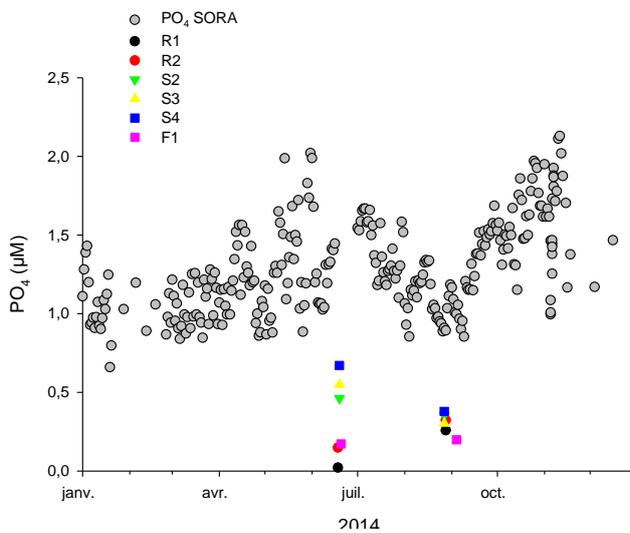


Figure 8A : Enregistrements des concentrations en PO_4^{3-} à la station SORA (Arles) (rond gris) et dans les casiers (valeurs ponctuelles en couleur)

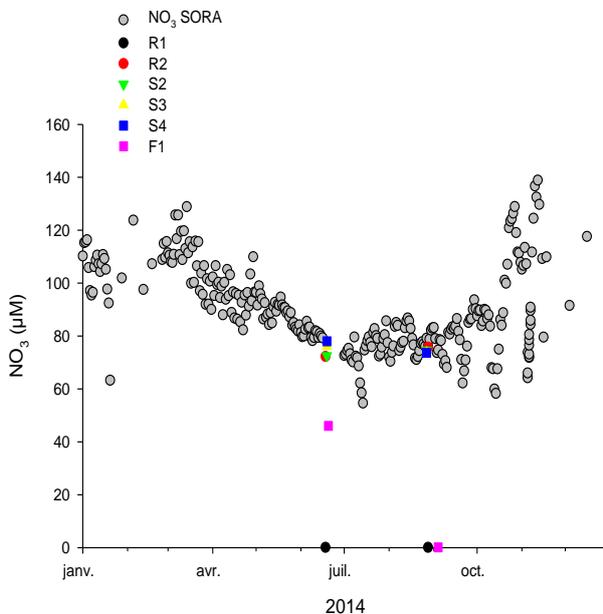


Figure 8B : Enregistrement des concentrations en NO_3^- à la station SORA (Arles) (rond gris) et dans les casiers (valeurs ponctuelles en couleur)

Même s'il est assez difficile d'interpréter ces résultats en ce qui concerne la qualité d'eau (jeu de données trop réduit), il apparaît que ces concentrations en nutriments sont la résultante de deux processus en équilibre : l'assimilation par les producteurs primaires et les apports en provenance du bassin-versant et du chenal principal. A noter que dans les casiers les plus

isolés, cet équilibre conduit à une élimination des nitrates et à un basculement en dénitrification (valeurs en dessous du seuil de détection).

→ En conclusion, il apparaît que les casiers peuvent jouer un rôle épuratif, avec dénitrification enregistrée en C37, R1 (en juillet et septembre), F1 et C10 (en septembre uniquement).

4.3. La transparence

En interaction avec les concentrations en nutriments (NO_3 , NH_4 , PO_4), la transparence (Figure 9) joue un rôle primordial sur la photosynthèse. Si la lumière pénètre jusqu'au fond du casier, des herbiers à macrophytes pourront s'enraciner et produire de l'oxygène plus ou moins en profondeur dans le casier. Si la transparence est plus réduite (par la présence de particules minérales ou de phytoplancton en suspension), alors les herbiers seront cantonnés dans les zones les moins profondes. A noter que contrairement au phytoplancton qui augmente la turbidité de l'eau, les macrophytes ont tendance à la limiter en réduisant la remise en suspension des sédiments fins (voir Figure en bilan partie 9).

La lumière pénètre faiblement dans les casiers d'Arles (sauf F1 qui a une très faible profondeur totale). Au contraire la lumière pénètre relativement bien dans les casiers de PDR, avec seulement deux casiers pour lesquels la lumière n'atteint pas le fond (C126 et C37).

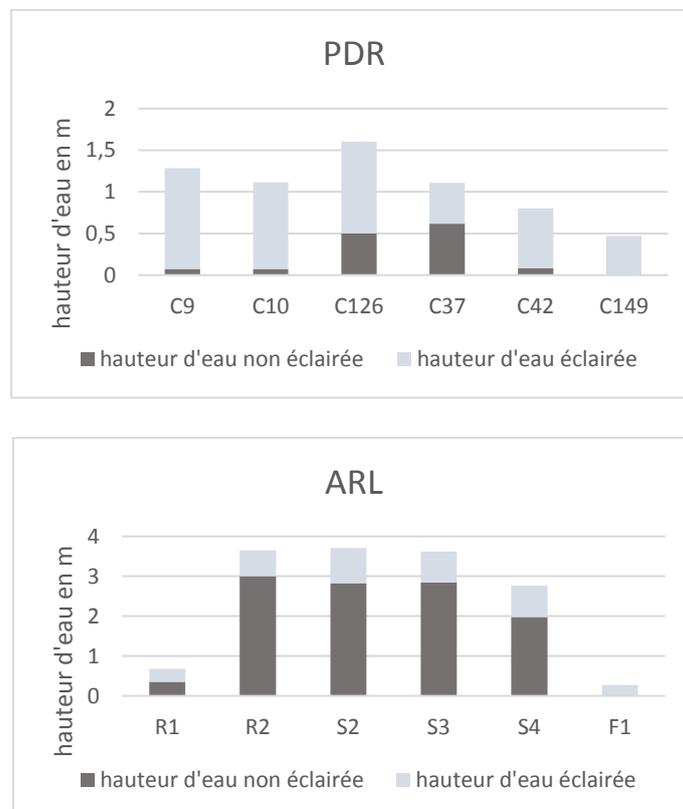


Figure 9 : Pénétration de la lumière en fonction de la hauteur d'eau totale à PDR (en haut) et ARL (en bas). La partie claire correspond à la lame d'eau éclairée, la partie sombre correspond à la lame d'eau turbide, située plus en profondeur.

Dans le secteur de PDR, la transparence varie dans l'espace et le temps. Elle a tendance à diminuer au cours de l'été, plus particulièrement pour C10. Ainsi, 4 casiers (C149, C9, C10 et C42) ont un fond éclairé en juin alors que seul C149 (avec la plus faible profondeur max) reste très transparent en septembre, avec une pénétration de la lumière sur 85 % de la hauteur d'eau. Les casiers C37 et C126 sont les plus turbides avec une pénétration de la lumière variant respectivement de 40 à 37% et de 88 à 48%.

Dans le Secteur d'ARL la transparence est faible. F1 est le seul casier à être éclairé jusqu'au fond, du fait de sa très faible profondeur. Les autres casiers ont une pénétration de la lumière qui ne dépasse jamais 65% de la hauteur d'eau.

Dans ces deux secteurs la transparence n'est donc pas en relation directe avec la connectivité hydraulique, elle dépend non seulement des particules apportées par le chenal, mais aussi de la production phytoplanctonique qui a tendance à augmenter la quantité de particules en suspension dans l'eau.

L'éclairage du fond est à mettre en lien avec le développement d'herbiers à macrophytes enracinés sur le fond des casiers.

4.4. Développement des herbiers

Le tableau 8 montre que les herbiers sont bien développés à PDR sauf pour C37 et C126. A l'opposé, sur le secteur d'ARL, seuls les casiers les plus isolés (F1 et R1) et les moins profonds sont bien pourvus en herbiers.

Tableau 8 : Niveau d'atterrissement et de développement des herbiers pour chacun des casiers des secteurs de PDR et ARL.

Casiers PDR	% Atterrissement	Herbiers	Casiers ARL	% Atterrissement	Herbiers
C9	64	Moyen	R1	70	Fort
C10	93	Moyen	R2	40	Faible
C126	19	Faible	S4	10	Faible
C37	87	Faible	S2	45	Faible
C42	55	Fort	S3	36	Faible
C149	76	Fort	F1	85	Fort

→ En conclusion, les herbiers se développent abondamment dans les casiers dont les fonds sont éclairés (sauf pour R1 où les herbiers présents sont constitués de Jussie, qui prend racine sur les berges). A noter que le besoin de lumière dépend aussi de l'espèce macrophytique en question. L'éclairage au fond dépend, quant à lui, de la profondeur du casier (histoire, rive de sédimentation ou d'érosion), du développement du phytoplancton

et de la quantité de particules minérales en suspension, ces deux derniers éléments pourront être mis en relation avec la connectivité (voir schéma récapitulatif du chapitre 9 p.55).

5. Phytoplancton

5.1. Production phytoplanctonique

Chlorophylle a

Dans le secteur de PDR, les concentrations en chlorophylle a active (Figure 10) varient entre 0,7 $\mu\text{g/l}$ et 24 $\mu\text{g/l}$. Les valeurs maximales sont enregistrées dans le casier C37 ; le casier hydrologiquement le plus isolé du secteur présente le plus fort niveau de biomasse. Les niveaux de concentrations en chlorophylle a active dans ce casier indiquent des conditions d'eutrophie (OCDE 1982). Sur l'ensemble du secteur les concentrations en chlorophylle a active ont tendance à augmenter au cours de l'été (entre juin (j) et septembre (s)).

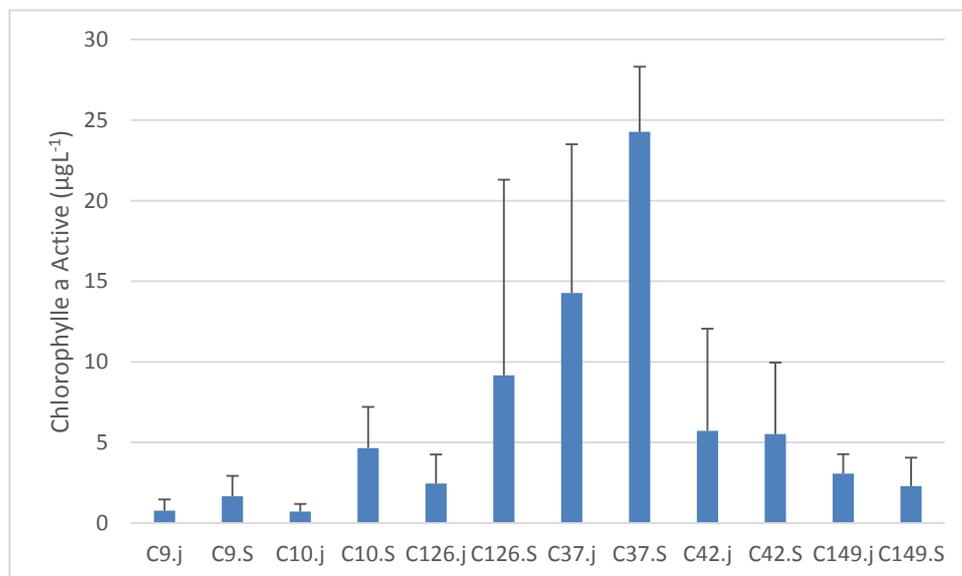


Figure 10 : Moyennes et écart-types de la concentration en chlorophylle a active pour chacun des 6 casiers de PDR. Les moyennes ont été calculées sur 3 échantillons. J: première campagne (début juillet 2014), S : 2^{ème} campagne (début septembre 2014)

Dans le secteur d'ARL, les concentrations en chlorophylle a active (Figure 11) sont nettement inférieures à celles enregistrées dans le secteur de PDR (sauf dans le casier R1). Elles varient entre 0,13 $\mu\text{g/l}$ et 9 $\mu\text{g/l}$, cette valeur maximale est obtenue, comme précédemment dans le casier le plus isolé (R1). Au regard des concentrations maximales en chlorophylle, le casier R1 présente des conditions de mésotrophie alors que les autres casiers du secteur d'Arles apparaissent comme des milieux oligotrophes (OCDE 1982).

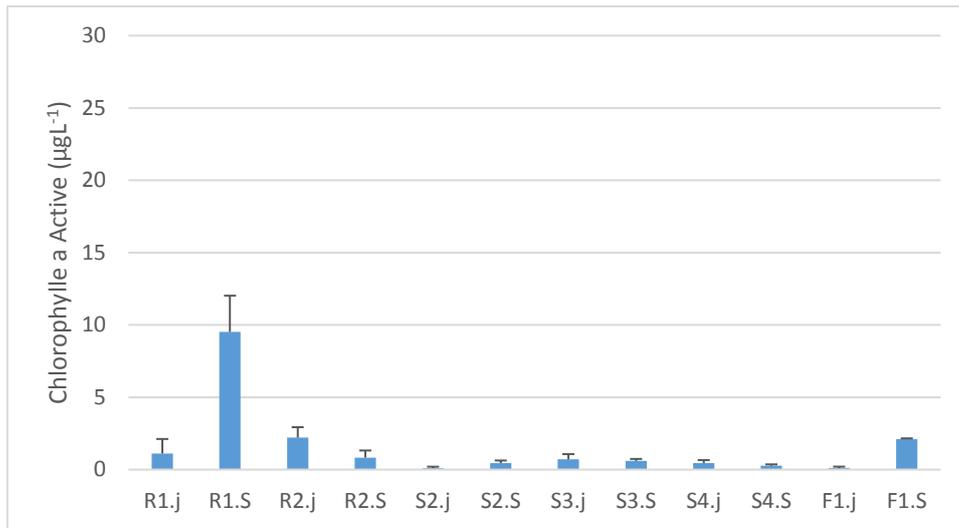


Figure 11: Moyennes et écart-types de la concentration en chlorophylle a active pour chacun des 6 casiers d'ARL. Les moyennes ont été calculées sur 3 échantillons pour R1 et F1 et sur 5 pour R2, S2, S3 et S4. J: première campagne (fin juin 2014), S : 2^{ème} campagne (fin août 2014)

En ce qui concerne la chlorophylle a (active ou non), la comparaison des résultats obtenus avec les valeurs mesurées dans le chenal à Arles (station SORA), il apparaît que les concentrations en chlorophylle a sont supérieures dans les casiers. Ceux-ci représentent des milieux avec un potentiel productif plus conséquent d'autant plus marqué dans les casiers les plus isolés (Figure 12).

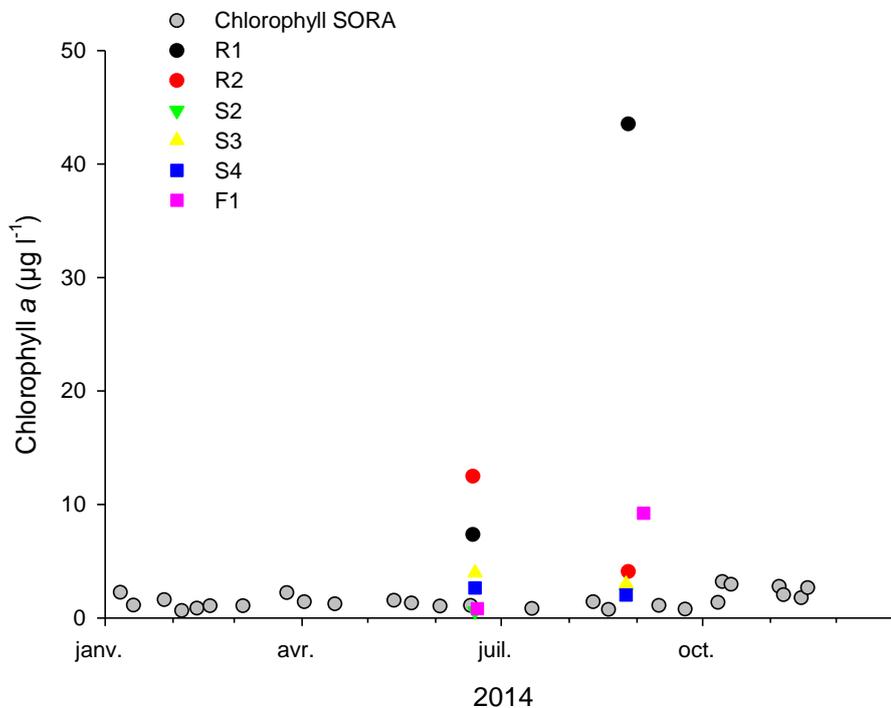


Figure 12: Moyennes de la concentration en chlorophylle a pour chacun des 6 casiers de ARL. Les moyennes ont été calculées sur 3 échantillons pour R1 et F1 et sur 5 pour R2, S2, S3 et S4. Les valeurs sont comparées à celles de la station SORA (station de terrain de l'OSR).

Densité cellulaire

L'évaluation des densités cellulaires corrobore les résultats précédents, à savoir que les densités atteignent des maxima dans les casiers les plus isolés C37 à PDR et R1 à ARL (Figures 13 et 14). Hormis le cas des casiers isolés, les densités cellulaires sont globalement du même ordre de grandeur à ARL et à PDR. A noter que contrairement aux concentrations en chlorophylle a active, les densités cellulaires ont tendance à diminuer au cours de l'été. Cette différence de comportement des deux métriques est due au phénomène d'acclimatation du phytoplancton : en septembre la lumière étant moins forte, les cellules sont plus chargées en chlorophylle a active.

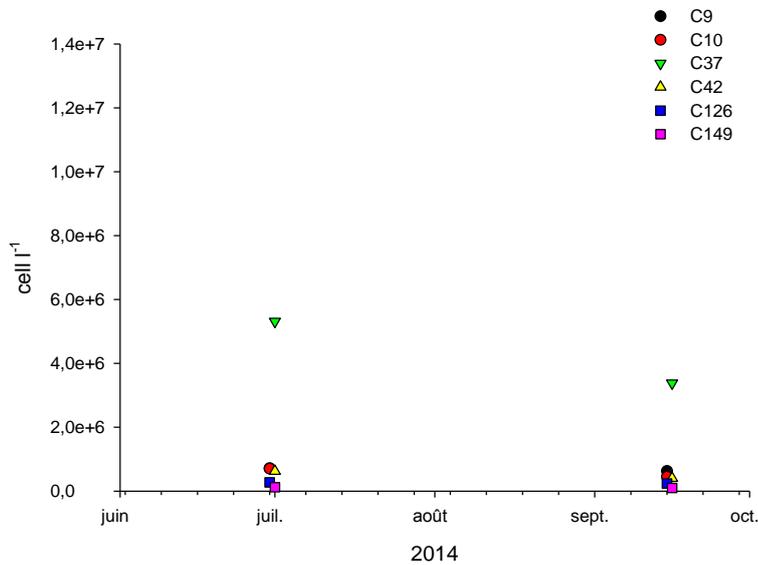


Figure 13 : Densités cellulaires (cells.L⁻¹) pour chacun des 6 casiers de PDR en juillet et septembre 2014. Les densités moyennes ont été calculées sur 3 L.

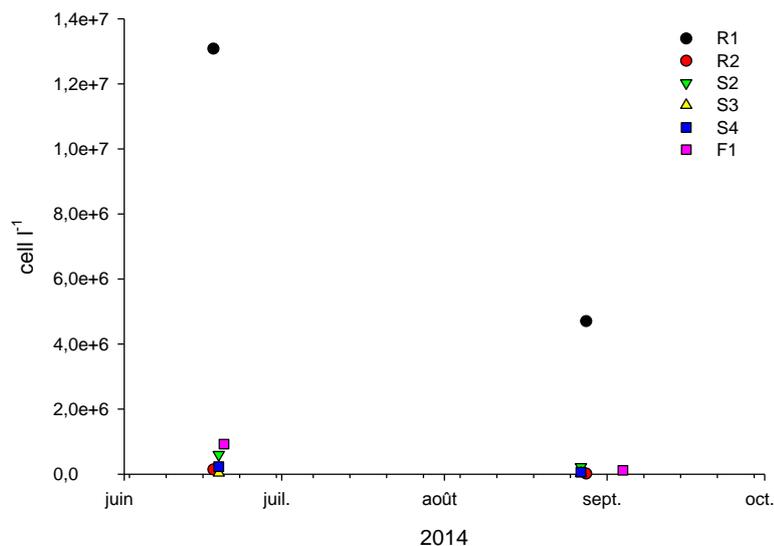


Figure 14: Densités cellulaires (cells.L⁻¹) pour chacun des 6 casiers d'ARL en juin et août 2014. Les densités moyennes ont été calculées sur 3 L pour R1 et F1 et sur 5 L pour R2, S2, S3 et S4.

5.2. Structure phytoplanctonique

Quel que soit le secteur (Figures 15 A et B), la même tendance est observée : les casiers les plus isolés (R1 et C37) sont caractérisés par la dominance d'une classe taxonomique, respectivement les Dinoflagellés à PDR et les Cyanobactéries à ARL. Chacun de ces deux groupes sont représentés par une seule espèce : à PDR, il s'agit de *Ceratium hirundella*, Dinophyte fréquemment observé dans les lacs et réservoirs tempérés. Plus abondant en été (stratification), sous faibles concentrations de sels nutritifs, cette espèce est capable de réaliser des migrations verticales, ce qui peut lui conférer des avantages par rapport aux autres espèces, notamment pour l'accès aux ressources trophiques. A ARL, c'est la cyanobactérie *Planktothrix agardhii*, espèce potentiellement toxique (PSP Saxitoxine, toxine paralysante pour l'homme) qui est supra-dominante. Il s'agit d'une espèce commune, très polluo-tolérante et euryhaline, elle possède une forte capacité de stockage du phosphore. De plus, il est souvent constaté une faible diversité en présence de cette espèce car elle génère des conditions limitantes pour les autres espèces, en particulier, une forte turbidité. La structure phytoplanctonique apparaît plus hétérogène dans les autres casiers. De plus des différences de communautés sont observées entre les casiers mais aussi entre les 2 sites étudiés. La classe des Chrysophyceae est plus représentée dans les casiers du site PDR contrairement au genre des Euglènes, qui sont plus abondants dans les casiers du site ARL

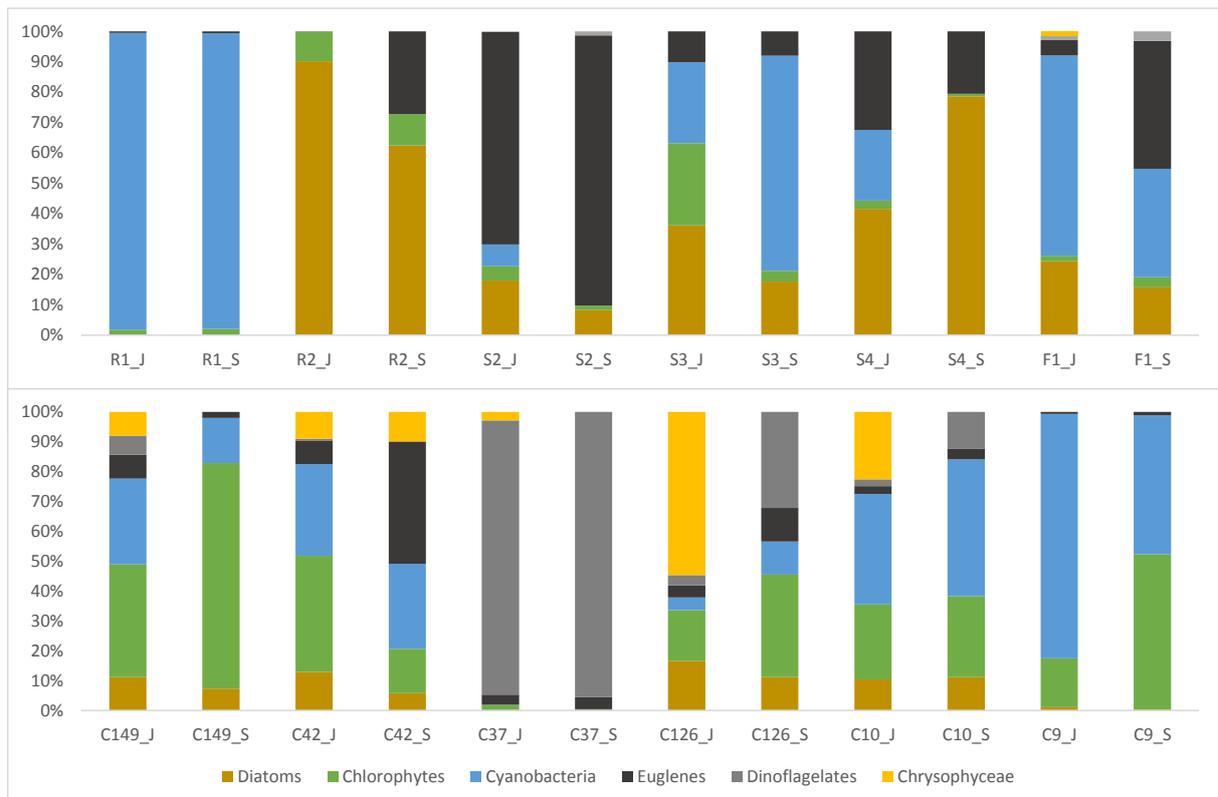


Figure 15: Structure du peuplement phytoplanctonique (6 grandes classes taxonomiques). A) : à PDR, les distributions (en %) ont été calculées sur 3 échantillons. B) : à ARL, les distributions (en %) ont été calculées sur 3 échantillons pour R1, F1 et sur 5 échantillons pour R2, S2, S3 et S4.

Les cartes factorielles issues d'une AFC (Analyse Factorielle des Correspondances) (Figures 16 A et B) réalisée sur un tableau croisant les 88 échantillons et 126 taxa représentant plus de 5% des effectifs totaux d'au moins un échantillon, met en évidence, sur l'axe 1, une singularité des casiers 37 et R1, casiers isolés respectivement sur PDR et ARL. Ces deux casiers sont caractérisés respectivement pour PDR et ARL par des taxa de grande taille, avec de grandes formes unicellulaires mobiles (*Ceratium hirundinella* appartenant aux Dinophytes, *Euglena agilis*, *E. anabaena*, *E. limnophila*, *E. oblonga* appartenant aux Euglénophytes) et des formes pluricellulaires de grande taille coloniale ou filamenteuses (*Pediastrum clathratum*, *Actinastrum hantzschii* appartenant aux Chlorophytes, *Plankthotrix agardhii*, *Microscystis sp.* appartenant aux Cyanobactéries). Ces taxa indiquent des conditions d'enrichissement du milieu. Pour les autres casiers, cette AFC montre une variabilité inter-casier et inter-date plus forte à PDR qu'à ARL. Sur l'axe 1, on note l'opposition entre les casiers d'ARL, avec un cortège diversifié de taxa unicellulaires, composé de nombreux taxa de diatomées et d'Euglénophytes, et ceux de PDR, marqués davantage par des taxa de Chlorophytes unicellulaires et pluricellulaires (coloniales et filamenteuses). Sur l'axe 2, on trouve la contribution des casiers 42 et 149, casiers colonisés par des herbiers de macrophytes, et qui abritent des taxa épiphytiques (*Spirogyra varians*, *Spirogyra sp.*, *Ulothrix sp.*, *Cocconeis pediculus*).

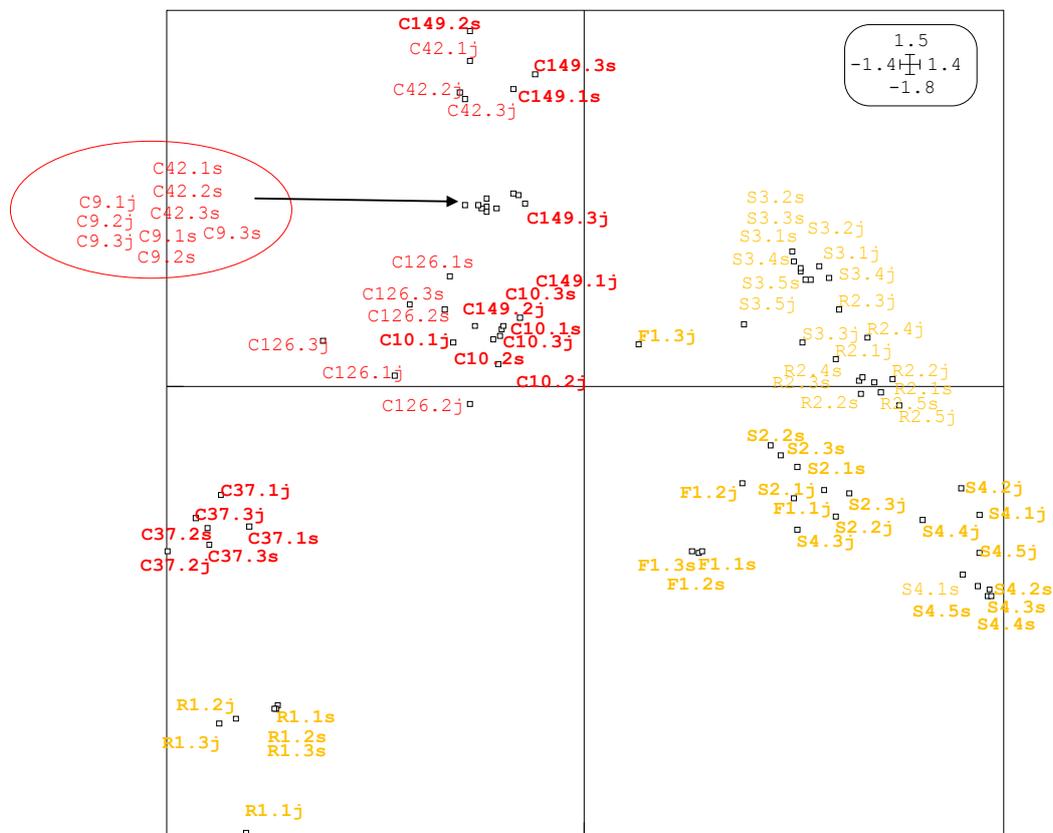


Figure 16 A. Carte factorielle des 88 échantillons (en rouge, les casiers du secteur de PDR et en jaune, secteur d'ARL, J : campagne de juin-juillet, s : campagne d'août-septembre 2014). L'AFC a été réalisée sur le tableau phytoplancton croisant 88 échantillons et 126 taxa.

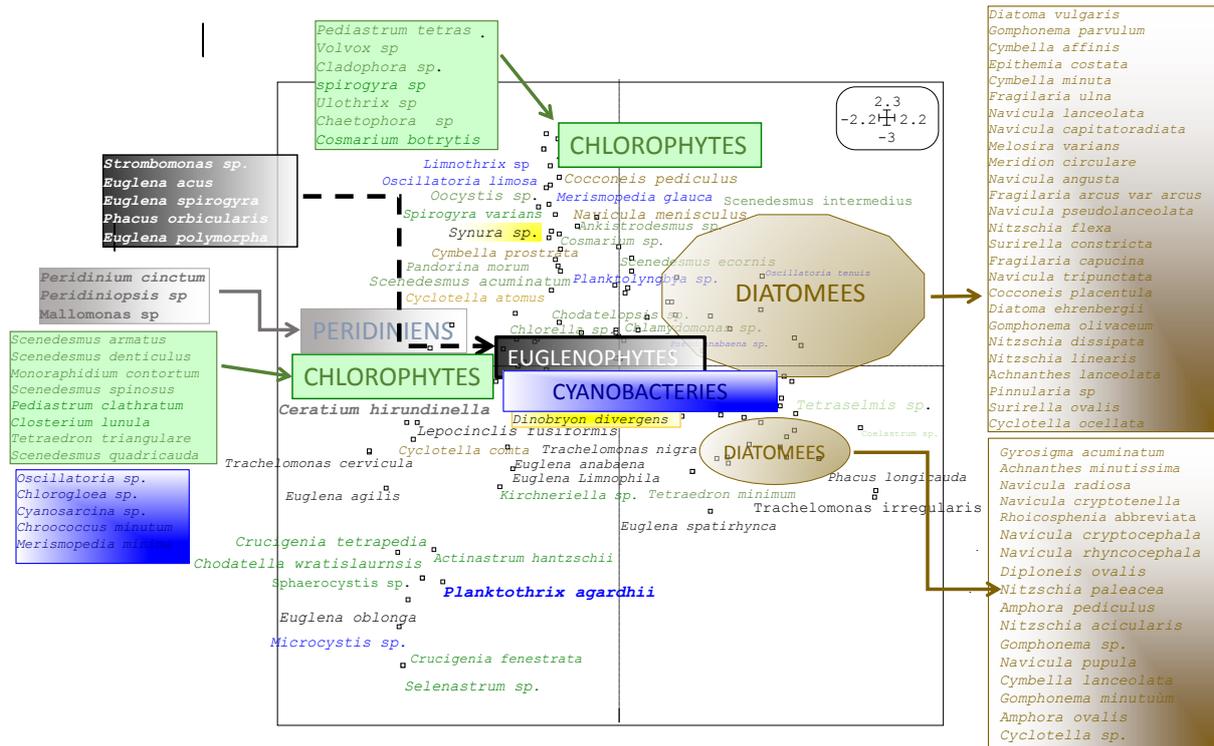


Figure 16 B. Carte factorielle des 126 taxa (abondance relative > 5%). Les deux premiers axes de l'analyse (F1xF2) représentent 17,4 % de la variabilité totale. L'AFC a été réalisée sur le tableau phytoplancton croisant 88 échantillons et 126 taxa. Pour des questions de lisibilité les noms des taxa ont été reportés dans des cadres à l'extérieur de la carte factorielle. La liste totale des espèces phytoplanctoniques recensées est en Annexe 2.

5.3. Relations entre biodiversité phytoplanctonique, variables environnementales et connectivité hydraulique

Le calcul de la diversité α^3 (Figure 17) pour chaque casier des 2 secteurs PDR et ARL montre une forte variabilité du nombre d'espèces avec des valeurs comprises entre 13 (casiers 9, PDR et S3, ARL) et 42 (casier 126, PDR).

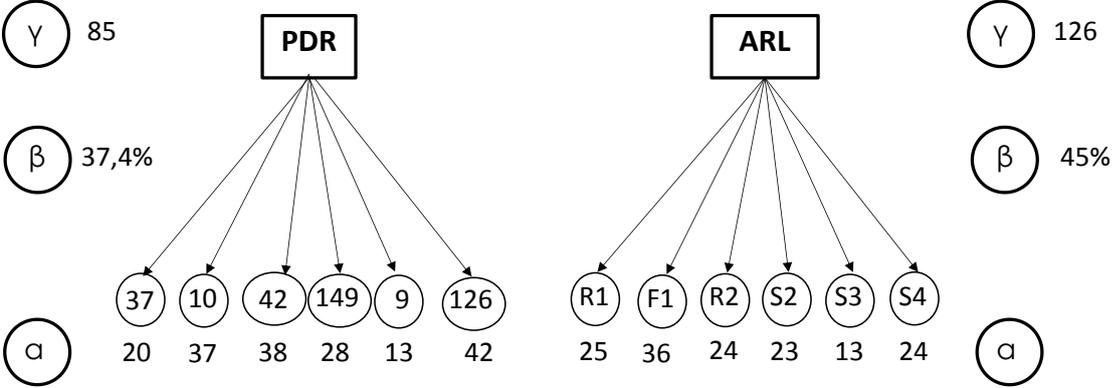


Figure 17 : Diversités α , β et γ pour les assemblages phytoplanctoniques des casiers de PDR et d'ARL.

³ La diversité α est le nombre d'espèces recensées dans chaque casier.

Cette hétérogénéité des valeurs ne semblent répondre que partiellement au gradient de connectivité préalablement établi (cf chapitre 3, p.13). Ces résultats, et en particulier la richesse plus élevée du casier 126, pourraient s'expliquer par l'effet de certaines contraintes abiotiques ou par une dynamique rapide de remplacement des espèces phytoplanctoniques (turn-over phytoplanctonique) à cette période de l'année. De plus, la faible profondeur de certains casiers couplée à leur transparence semble favoriser le développement des herbiers inhibant le développement des cellules phytoplanctoniques par la production de métabolites secondaires ou par la concurrence pour la lumière.

L'indice de diversité β^4 , quant à lui, confirme les résultats de l'AFC (Figures 16 A et B), les casiers présentent des assemblages phytoplanctoniques variés qui correspondent à des fonctionnements différents.

Ce turn-over induit finalement une diversité γ^5 assez élevées à l'échelle du secteur.

Tableau 9 : Récapitulatif des données du secteur de PDR. Les casiers sont classés dans l'ordre croissant du degré de connectivité hydraulique fourni par l'écart thermique entre les eaux du chenal et celles de chacun des casiers. J : juin-juillet et S : août-septembre

Casier	NO3	PO4	Prof. Max (m)	Herbier	Zsecchi / Transp J	Zsecchi / Transp S	Nbre cell/L (10 ³) J	Nbre cell /L (10 ³) S	Diversité Phyto
37	0	-	1.4	0	0.50 44%	0.48 45%	5300	3400	Dinoflagellés
10	+/-	-	2.3	+/-	1.70 96%	0.62 88%	700	450	Divers
42	+	+++	1.2	+++	0.80 93%	0.60 87%	600	400	Divers
149	++	+++	0.7	+++	0.4 100%	0.50 100%	120	100	Chloro
9	++	-	1.8	+	1.40 98%	1.05 91%	700	630	Cyano J, chloro S
126	++	+	2.2	-	1.1 68%	1.05 59%	270	240	Divers

Tableau 10 : Récapitulatif des données du secteur d'ARL. Les casiers sont classés dans l'ordre croissant du degré de connectivité hydraulique. J : juin-juillet et S : août-septembre.

Casier	NO3	PO4	Prof. Max (m)	Herbie r	Zsecchi / Transp J	Zsecchi / Transp S	Nbre cell/L (10 ³) J	Nbre cell (10 ³) S	Diversité Phyto
R1	0	0/+	3,0	++	0.15 31%	0.50 65%	13000	4700	Cyanobactéries
F1	+/-	+	1,5	++	0.17 100%	0.40 100%	920	120	Divers
S3	+	++	8,8	-	0.90 41%	0.66 22%	30	40	Divers
S4	+	++	9,4	-	0.70 46%	0.80 30%	265	100	Chloro
R2	+	+	5,3	-	0.70 24%	0.60 20%	170	300	Cyano J, chloro S
S2	+	++	8,9	-	1.0 46%	0.80 30%	600	220	Divers

→ En conclusions : Ces résultats mettent en exergue la production phytoplanctonique plus forte des casiers les plus isolés s'illustrant par l'épuisement des composés nutritifs (NO3 et PO4), en particulier dans le casier C37 (Tableau 9) et dans le casier R1 (Tableau 10). Cela conduit à la dominance d'un groupe d'algues voire même d'une seule espèce. L'isolement

⁴ L'indice de diversité β représente le taux de remplacement des espèces (en %) d'un casier à l'autre

⁵ L'indice de diversité γ représente le nombre de d'espèces recensées à l'échelle du secteur.

d'un casier peut alors se définir par un mode de fonctionnement autarcique d'une espèce phytoplanctonique compétitrice au détriment des autres groupes.

De plus, la connexion hydraulique influence nettement le nombre de cellules phytoplanctoniques. En effet, les casiers connectés de façon permanente (C126 et C149) présentent les plus faibles densités cellulaires, contrairement au plus isolés qui présentent, quant à eux, les plus fortes densités cellulaires (R1 et C37).

6. Biodégradabilité du sédiment et activités microbiennes

6.1. Perte au feu et rapport Corg/Ntot

La quantité de MO contenue dans les sédiments des casiers des secteurs d'ARL et de PDR (Figure 18) varie entre 1,5% et 6%. La variabilité inter secteur est la plus forte, avec des teneurs en MO les plus élevées pour le secteur de PDR (casiers C10, C37 et C42).

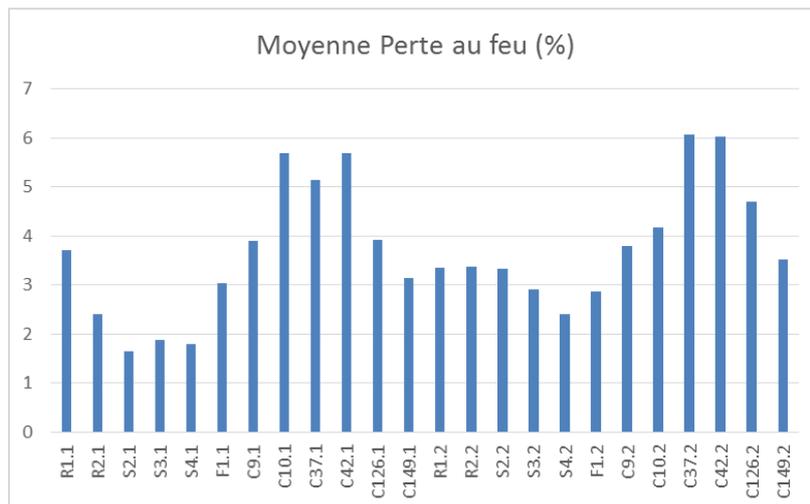


Figure 18 : moyenne de la perte au feu (%). Les moyennes ont été calculées sur 5 valeurs pour R2, S2, S3 et S4 et sur 3 valeurs pour les autres casiers, pour chacune des deux campagnes 1. Juin-juillet 2014, 2. Août-septembre 2014 pour ARL et PDR.

Les rapports Corg/Ntot sont compris entre 11,5 et 17 (Figure 19). Certains casiers ont des sédiments ayant un C/N plus faible (traduisant une matière organique plus fraîche et biodégradable) : dans le secteur d'ARL les casiers R1 et F1 aux deux saisons auxquels il faut ajouter R2 et S2 en septembre ; dans le secteur de PDR, C37 aux deux saisons et C42 en juillet. Ce sont les casiers les moins bien connectés au chenal où peut s'accumuler de la matière organique détritique.

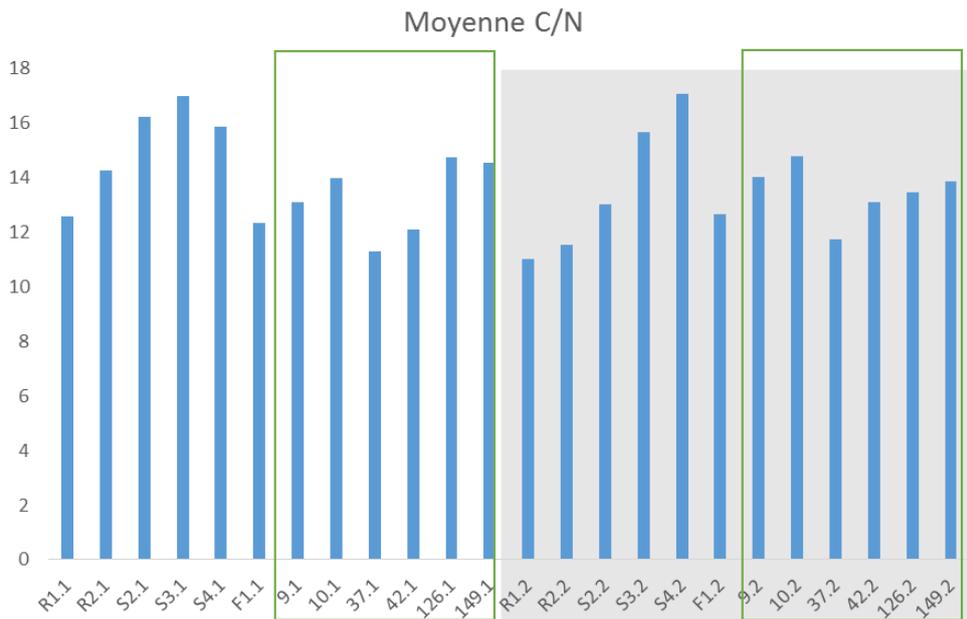


Figure 19 : Moyenne du rapport C organique/N total. Les moyennes ont été calculées sur 5 valeurs pour R2, S2, S3 et S4 et sur 3 valeurs pour les autres casiers, pour chacune des deux campagnes 1. Juin juillet 2014, 2. Août-septembre 2014 (partie grisée). Les casiers du secteur de PDR sont encadrés en vert.

6.2. Activités microbiennes

Si l'on considère l'activité hydrolytique globale (mesurées à l'aide du FDA, Figure 20), celle-ci est plus élevée en juin dans les casiers de PDR (globalement plus riches de matière organique) que dans ceux d'ARL. Dans les 2 secteurs, cette activité est plus élevée dans les casiers les moins connectés : C37 et C42 à PDR, R1 et F1 pour ARL. En septembre, l'activité hydrolytique diminue dans les casiers de PDR mais augmente dans les casiers R2 et S2 d'ARL (là où le C/N diminuait). Il semble donc que l'activité hydrolytique des sédiments soit contrôlée à la fois par la quantité de matière organique disponible (perte au feu) et sa qualité (C/N).

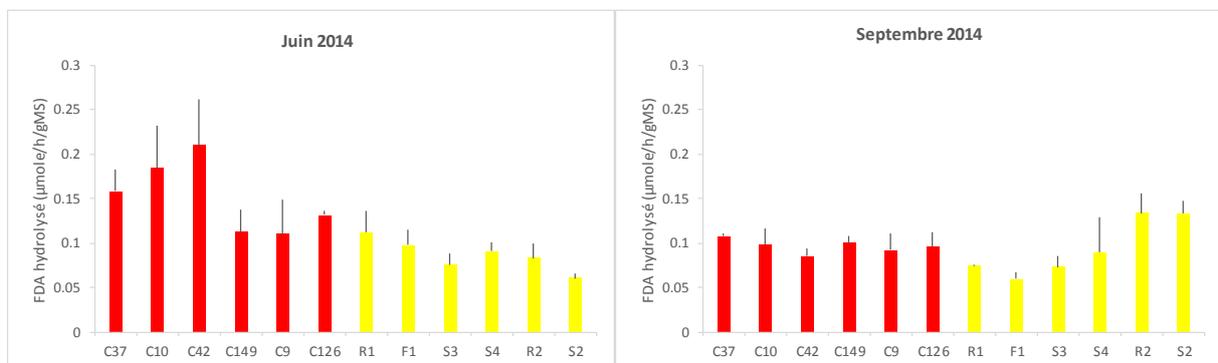


Figure 20 : Activité hydrolytique (moyenne ± erreur-standard ; n=3 pour PDR et ARL R1, F1 ; n=5 pour ARL S3, S4, R2, S2), aux mois de juin et septembre.

Si l'on considère l'ensemble des activités microbiennes aérobies synthétisées par une ACP (Figure 21), en juin, les casiers des secteurs de PDR et d'ARL sont clairement séparés sur l'axe F1. Les biofilms de ces 2 secteurs présentent des profils physiologiques différents. Dans le secteur de PDR, les biofilms ont la capacité à utiliser plus de substrats caractérisant à la fois une matière organique labile (acides carboxyliques, amines, acides aminés) mais également des substrats récalcitrants à la dégradation par les microorganismes (les phénols). Dans le secteur d'ARL, les biofilms utilisent principalement 2 types de substrats : les carbohydrates, substrats facilement dégradables et les polymères, substrats complexes traduisant une stabilité du système. La composition des biofilms (algues vs bactéries) pourrait expliquer les différences entre les secteurs. Les bactéries sont potentiellement capables d'oxyder un grand nombre de substrats organiques dont les acides carboxyliques et les polymères. En conditions de faible luminosité, les algues sont capables d'utiliser différentes sources de carbone (en particulier, les carbohydrates complexes) via un métabolisme hétérotrophe (Tuchman et al, 2006). Dans les casiers de PDR, caractérisés par une faible profondeur permettant la pénétration de la lumière jusqu'au fond et donc l'activité autotrophe des algues, l'activité redox est principalement liée aux bactéries, qui sont capables d'utiliser plus de substrats. Dans les casiers d'ARL, plus profonds et moins transparents (excepté le casier F1), l'oxydation des substrats résultent de l'activité bactérienne mais également du métabolisme hétérotrophe des algues.

En septembre, les casiers des secteurs de PDR et d'ARL sont peu séparés sur l'axe F2, mais les profils physiologiques des communautés microbiennes sont similaires à ceux observés en juin. Dans les 2 secteurs, les casiers les plus isolés (C37 à PDR ; R1 à ARL), présentent une moindre capacité à utiliser les carbohydrates (C37) et les polymères (C37 et R1). Ces casiers sont clairement individualisés probablement parce que les biofilms oxydent peu de substrats et plus lentement. Ceci pourrait s'expliquer par un très faible renouvellement de l'eau et des sédiments qui maintient des assemblages microbiens plus matures, moins diversifiés et actifs.

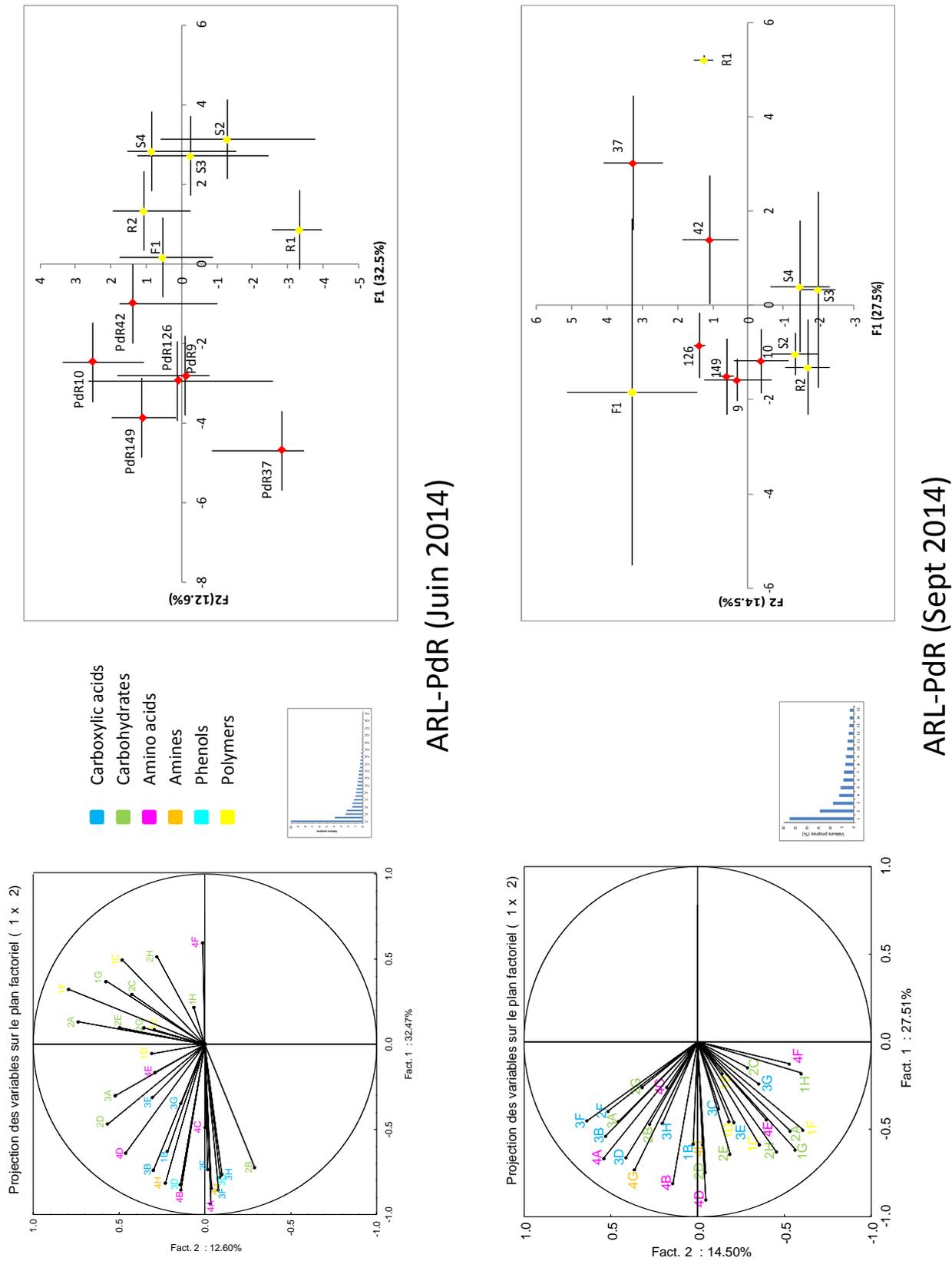


Figure 21 : Analyse en Composantes Principales (ACP) des absorbances moyennes de l'ensemble des substrats pour chaque casier à chaque date. Coordonnées factorielles moyennes des casiers (± écart-type)

6.3. Relations en Corg/Ntot, activités microbiennes et connectivité hydraulique

Il existe une légère relation entre l'activité hydrolytique et la qualité de la matière organique dans les casiers du secteur de PDR : les activités hydrolytiques les plus fortes sont mesurées dans les casiers les plus isolés où les sédiments ont les valeurs de C/N les plus faibles (C37, C10, C42 en juillet). Au contraire, les activités hydrolytiques les plus faibles ont été enregistrées dans les casiers les plus connectés (C126 et C149 en juillet). Cette relation est moins nette en septembre. A l'opposé, dans le secteur d'ARL la relation entre C/N et activité hydrolytique est peu marquée en juillet, mais s'affirme en septembre : les casiers R2 et S2 où le C/N avait diminué sont ceux où les valeurs d'activité hydrolytique sont les plus fortes (Figure 22).

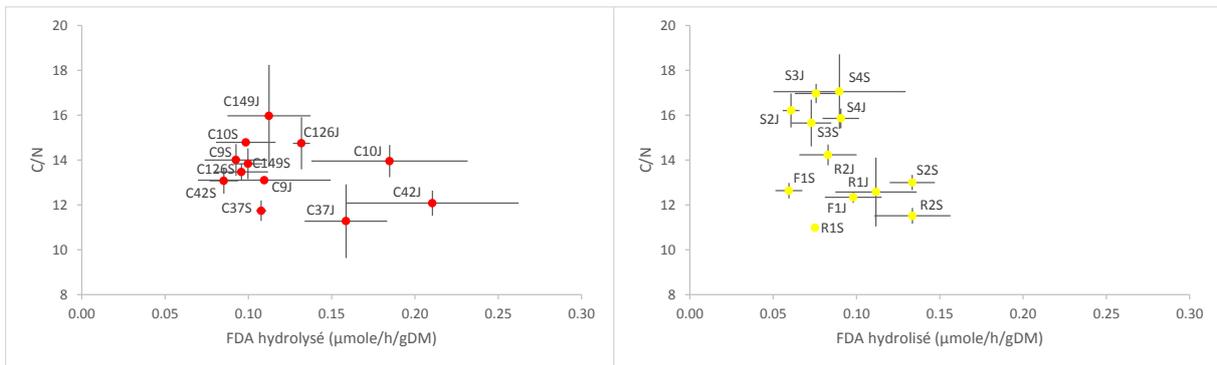


Figure 22 : Relations entre l'activité hydrolytique et le ratio C/N (moyenne par casier ± écart-type ; J=juin, S=septembre)

Si l'on considère maintenant la totalité des activités microbiennes mesurées (Figure 23), un lien clair apparaît entre qualité de la matière organique et caractéristique fonctionnelle des biofilms (position sur l'axe F1 de l'ACP). Ainsi sur le secteur PDR les casiers les plus isolés ont des sédiments à C/N faibles et des coordonnées sur l'axe F1 très positives (C37 et C42) alors que les casiers les plus connectés ont les valeurs de C/N plus fortes et des coordonnées sur F1 négatives, du moins en juillet (C149 et C126). Des observations similaires peuvent être faites dans le secteur d'ARL (même si l'axe F1 est inversé par rapport à PDR) : les casiers les plus isolés (R1 et F1) ont des sédiments à C/N les plus faibles et des coordonnées négatives sur F1, alors que les casiers les plus connectés (S2, S3, S4) ont des C/N plus forts et des coordonnées sur F1 positives.

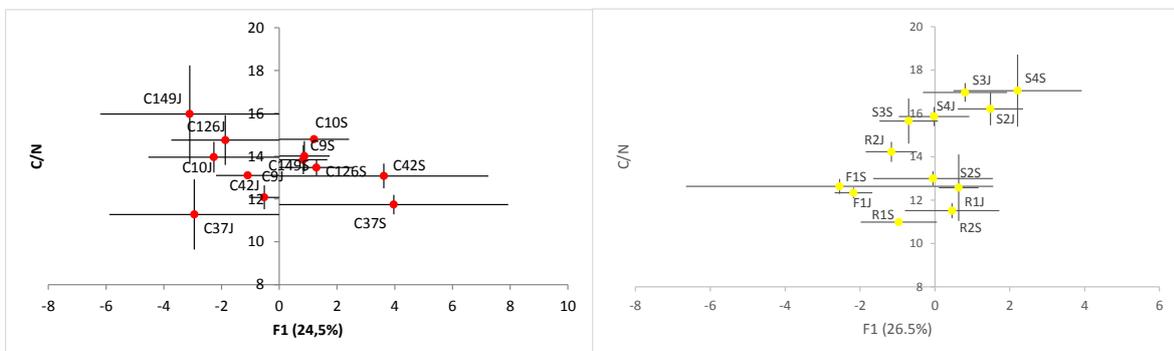


Figure 23 : Relations entre l'axe F1 de l'ACP réalisée sur les Biolog et la biodégradabilité de la matière organique (C/N) (moyenne par casier ± écart-type ; J=juin, S=septembre).

→ On peut donc conclure que dans les deux secteurs, les casiers parmi les plus isolés (C37, C42 dans le secteur de PDR et R1 et F1 dans le secteur de ARL) sont caractérisés par de la matière organique facilement biodégradable (faibles valeurs de C/N), probablement liée à une production phytoplanctonique intense se déposant au fond des casiers à la mort des cellules. A l'inverse, dans les casiers les plus connectés (C126, C149, S3 et S4), la matière organique semble plus récalcitrante (plus 'ancienne') sans doute allochtone (transportée par le chenal du fleuve). Les variations saisonnières du C/N observées dans les casiers R2 et S2 ne semblent pas modifier le profil d'activité des biofilms.

Ces résultats soulignent donc bien que les algues et les macrophytes contribuent fortement au pool de matière organique dissoute autochtone dans les milieux aquatiques (Bertilsson & Jones, 2003). L'importance relative de ces deux sources varie, en particulier, en fonction de la taille des systèmes. Dans les systèmes les plus grands, les apports algaux prédominent par rapport aux systèmes de petites tailles où les macrophytes peuvent être les contributeurs majeurs de DOM (Matière Organique Dissoute). La DOM libérée par les algues est un substrat facilement dégradé par les bactéries (e.g Nalewajko *et al.*, 1980). Ces différences expliquent sans doute que le lien entre qualité de la matière organique (ici le C/N) et les activités microbiennes ne soit pas stable au fil des saisons et entre les deux secteurs d'étude.

7. Invertébrés benthiques

7.1. Densité en invertébrés : rôle potentiel dans le réseau trophique

Un total de 45387 individus invertébrés benthiques a été échantillonné dans 88 bennes Eckman. Cet ensemble d'individus comprend à la fois des macroinvertébrés et des microcrustacés répartis en 61 taxa, 5 taxa pour les microcrustacés et 56 pour les macroinvertébrés.

Les tableaux 11 et 12 montrent que hormis deux situations (C149 et F1), les densités en invertébrés sont comprises entre 8000 et 15000 individus par m². Les maxima sont atteints dans le casier C149 (à PDR) avec 36 548 ind/m², et dans le casier F1 (à ARL) avec plus de 130 000 ind/m². Ces deux casiers présentent des conditions particulières ; le casier C149 étant très riche en herbier, la surface échantillonnée a pu être biaisée. Le casier F1, quant à lui, était en situation d'assèchement en juin 2014 ; les trois points échantillonnés correspondent en fait à trois dépressions résiduelles. De ce fait, un effet de concentration a pu se mettre en place.

A PDR, les microcrustacés ont des densités généralement supérieures à celles des macroinvertébrés. On observe l'inverse à ARL.

Tableau 11 : Densités des invertébrés benthiques des casiers de PDR (C9, C10, C37, C42, C126, C149). Le calcul a été réalisé sur l'ensemble des deux campagnes d'échantillonnage.

	C9	C10	C37	C42	C126	C149
Masse de sédiments (g)	649	435	2907	1187	1924	2269
Nombre d'ind. Tot.	1215	1914	2109	1189	2192	4934
nb ind/g de sed.	1,87	4,40	0,73	1,00	1,14	2,17
Surface ech	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135
Densité totale (nbre d'ind/m ²)	9000	14178	15622	8807	16237	36548
Densité en Microcrustacés (nbre d'ind/m ²)	5526	9622	7496	5904	7000	21741
Densité en Macroinvertébrés (nbre d'ind/m ²)	3474	4556	8126	2904	9237	14807

Tableau 12 : Densités des invertébrés benthiques des casiers de ARL (F1, R1, R2, S2, S3, S4). La surface échantillonnée varie en fonction du nombre d'échantillons réalisés (6 ou 10, en fonction de la surface du casier). Le calcul a été réalisé sur l'ensemble des deux campagnes d'échantillonnage.

	F1	R1	R2	S2	S3	S4
Masse de sédiments(g)	4255	3240	2586	3410	2258	3180
Nombre d'ind. Tot.	18019	2065	2925	3593	2440	2772
nb ind/g de sed.	4,23	0,64	1,13	1,05	1,08	0,87
Surface ech	0,135	0,135	0,225	0,225	0,225	0,225
Densité totale (nbre d'ind/m ²)	133474	15296	13000	15969	10844	12320
Densité en Microcrustacés (nbre d'ind/m ²)	7637	8622	4138	4413	4542	4369
Densité en Macroinvertébrés (nbre d'ind/m ²)	125837	6674	8862	11556	6302	7951

Les groupes faunistiques avec les densités les plus élevées sont les microcrustacés pour PDR et les Diptères ou les Oligochètes pour ARL (Figure 24 A et B). Il faut noter la quantité élevée de mollusques gastéropodes dans les casiers où les herbiers sont fortement développés, à PDR (C149 et C42).

Ces résultats soulignent l'importance de la connectivité sur la productivité secondaire des casiers. Cette relation est particulièrement nette dans le secteur de PDR où les casiers les plus densément peuplés sont les plus connectés au chenal (C126 et C149) alors que les moins peuplés sont plus isolés (C37 et C42). Cette relation est beaucoup moins nette dans le secteur d'ARL. Ces résultats soulignent aussi que les casiers Girardon peuvent constituer une source non négligeable de proies pour certains prédateurs comme les poissons, dont les juvéniles pourront s'alimenter sur les larves de Diptères par exemple.

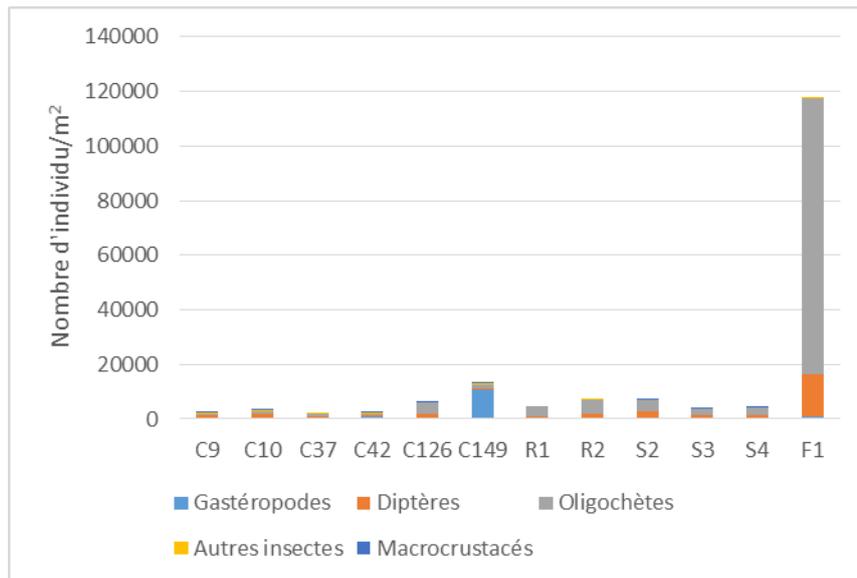


Figure 24 A : Densités des principaux groupes de macroinvertébrés à PDR et ARL

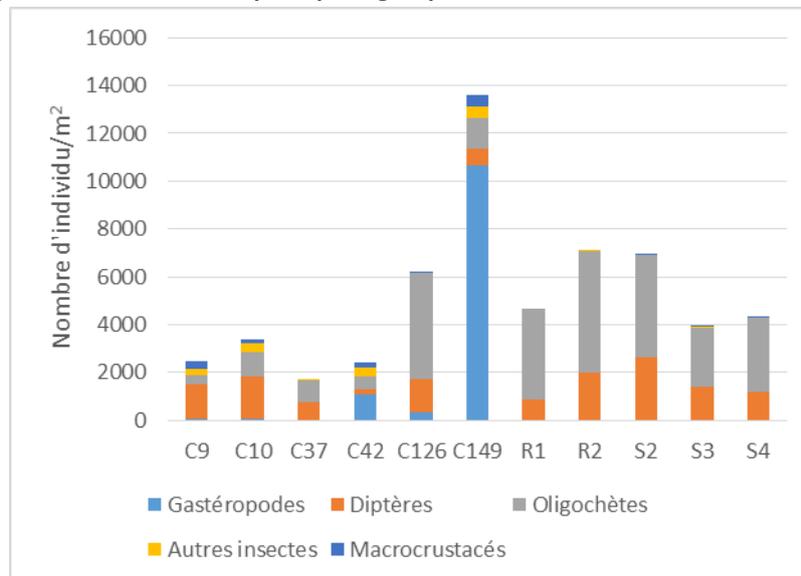


Figure 24 B : Densités des principaux groupes de macroinvertébrés à PDR et ARL (sans le casier F1)

7.2. Biodiversités α β γ

Diversité γ

La diversité γ représente le nombre de taxa recensés à l'échelle du secteur. Pour le secteur d'ARL, la diversité γ est de 34 taxa pour un total de 31814 individus, elle est de 54 taxa à PDR pour un total de 13573 individus. 27 taxa sont uniquement présents à PDR et 7 sont uniquement présents à ARL, enfin 27 sont communs aux deux secteurs (Tableau 13).

Tableau 13 : Récapitulatif des taxa d'invertébrés benthiques caractéristiques de chacun des deux secteurs (PDR et ARL)

Taxa uniquement présents à PDR	Taxa uniquement présents à ARL	Taxas communs aux deux secteurs
<i>Hydra</i>	<i>Echinogammarus</i>	<i>Hydroptilidae</i>
<i>Helobdella</i>	<i>Jaera</i>	<i>Menetus</i>
Planorbidae juv.	<i>Ephemera</i>	<i>Polycheta</i>
<i>Valvata</i>	<i>Gomphidae</i>	<i>Gyraulus</i>
<i>Bithynia</i>	<i>Ischnura</i>	<i>Chelicorophium</i>
<i>Ancylidae</i>	<i>Esolus</i>	Micronectinae
<i>Orconectes limosus</i>	Corixinae	<i>Hemimysis</i>
<i>Atyaephyra desmarestii</i>		<i>Hydracaria</i>
<i>Gammarus sp</i>		<i>Calanoidae</i>
<i>Gammarus roeseli</i>		<i>Orthoclaudiinae</i>
<i>Dikerogammarus villosus</i>		<i>Ceratopogonidae</i>
<i>Crangonyx</i>		<i>Corbicula</i>
<i>Asellus</i>		<i>Radix</i>
<i>Baetidae</i>		<i>Tanypodinae</i>
<i>Caenidae</i>		<i>Potamopyrgus</i>
<i>Anisoptera juv.</i>		Chironomus gr. Thummi
<i>Coenagrion</i>		<i>Tanytarsini</i>
<i>Plathycnemididae</i>		<i>Sphaeridae</i>
<i>Zygoptera juv.</i>		Potamopyrgus juv.
<i>Laccophilus</i>		Chironomini
<i>Haliphus larve</i>		<i>Harpacticidae</i>
<i>Haliphus adulte</i>		<i>Physa</i>
<i>Ecnomus</i>		<i>Oligocheta</i>
<i>Trichoptera juv.</i>		<i>Nematoda</i>
<i>Culicidae</i>		<i>Cyclopidae</i>
<i>Tipulidae</i>		<i>Ostracoda</i>
<i>Chaoboridae</i>		<i>Cladocera</i>

Diversité α en invertébrés benthiques

La diversité α représente la richesse taxonomique à l'échelle des casiers (Tableaux 14 A et B). Elle varie fortement d'un casier à l'autre aussi bien pour le secteur de PDR (de 15 à 39 taxa) que pour celui d'ARL (de 11 à 22 taxa). Cependant, ces valeurs ne sont pas toutes relatives au même nombre d'échantillons (10 pour les casiers R2, S2, S3 et S4, et 6 pour les autres) et doivent être discutées en conséquence. Le calcul de la richesse estimée obtenue par exemple pour 12 échantillons (Figures 25 A et B) confirme les tendances précédentes. Pour PDR, le plateau est obtenu à partir de 6 échantillons confirmant la robustesse de ces résultats. Pour

Arles, le biais est un peu plus important, en particulier pour le casier F1. Ce dernier est caractérisé par une forte variabilité expliquée par l'assèchement quasi-total de ce casier en juin ne permettant l'échantillonnage qu'en 3 flaques résiduelles concentrant les organismes vivants.

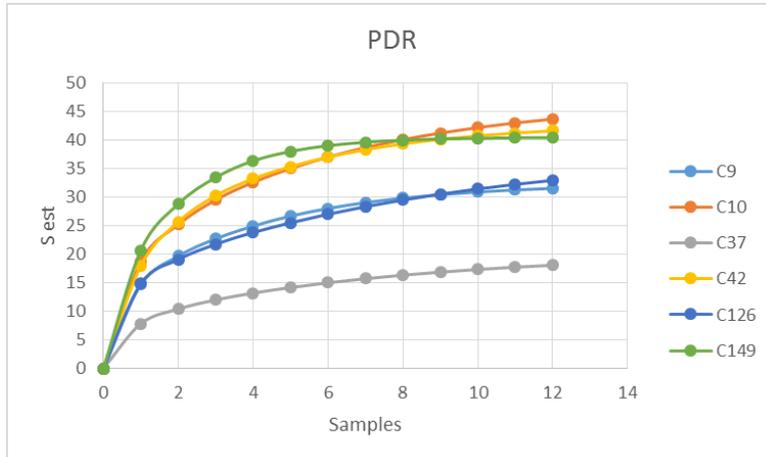


Tableau 14 A : Nombre de taxa d'invertébrés benthiques identifiés à PDR (6 échantillons par casiers)

Casiers	diversité α
C37	15
C126	27
C9	28
C10	37
C42	37
C149	39

Figure 25 A : Evolution de la richesse estimée (S est) des invertébrés benthiques échantillonnés à PDR en fonction du nombre d'échantillons (samples).

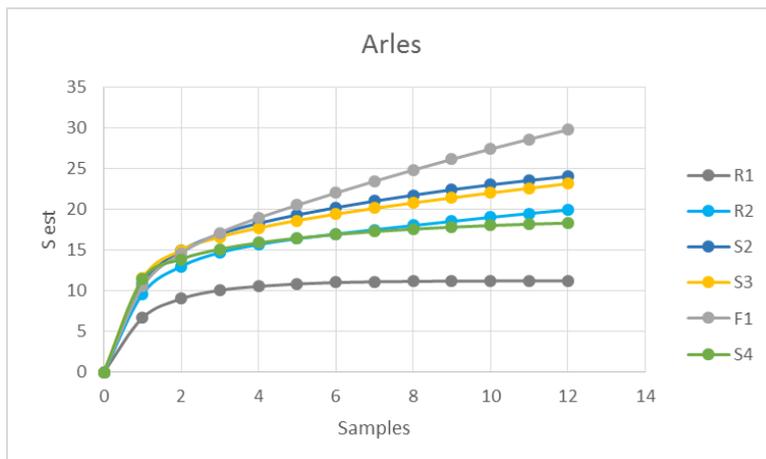


Tableau 14 B : Nombre de taxa d'invertébrés benthiques identifiés à ARL (6 échantillons pour les casiers R1 et F1 et 10 pour R2, S2, S3 et S4)

Casiers	diversité α
R1	11
S4	18
R2	19
S3	19
S2	21
F1	22

Figure 25 B : Evolution de la richesse estimée (S est) des invertébrés benthiques échantillonnés à ARL en fonction du nombre d'échantillons (samples).

Le décompte des taxa et l'estimation de la richesse pour 12 échantillons par casier vont dans le même sens. A PDR, 3 groupes de casiers existent : un groupe caractérisé par une forte richesse (C42, C149 et C10), un groupe en situation intermédiaire (C9 et C126) et enfin le casier C37 avec la plus faible diversité α . A Arles, il existe une plus forte homogénéité, seul R1 se distingue avec une très faible diversité α .

Diversité β

A PDR, l'indice de Sorensen (Tableau 15) varie entre 0,481 et 0,842. Sur 15 comparaisons, 4 donnent des indices de similarité supérieurs à 75%, ce qui marque une variabilité faunistique

inter-casiers notable. Sur les 54 taxa répertoriés sur ce secteur, seuls 12 sont communs à tous les casiers. A noter que le casier le plus singulier est le casier C37 qui se démarque par une faune très pauvre et par le taxon des Chaoboridés, taxon présent uniquement dans ce casier. Mis à part les Chaoboridés, sur les 13 taxa présents dans un seul casier, 5 sont caractéristiques du casier C10 (*Atyaephyra desmaresti*, *Gammarus roeseli*, *Dikerogammarus villosus*, Chelicorophium et Tipulidae), 3 du C149 (Crangonyx, Anisoptera juv. et *Haliphus* adulte), 2 de C42 (Menetus et Hydroptilidae), 1 du C126 (Polycheta), 1 du C9 (Trichoptera juv.). Les taxa présents dans 2 casiers permettent d'associer fortement C149 et C42 d'une part, C9 et C10, d'autre part. Tous les casiers contribuent donc à la biodiversité du secteur, et trois (C149, C10 et C42) contribuent à 85% de cette biodiversité.

Tableau 15 : Comparaison inter-casiers de la composition taxonomique des invertébrés benthiques (en présence-absence) à PDR. Les deux premières colonnes indiquent le couple (A-B) de casiers considérés. L'indice de Sorensen indique la similarité entre ces deux entités (Plus la valeur est proche de 1 et plus les casiers ont la même composition faunistique). Les couples de casiers sont classés par ordre décroissant de l'indice de Sorensen.

Casier A	Casier B	Nbre de taxa Casier A	Nbre de taxa Casier B	Nbre de taxa commun à A et B	Indice de Sorensen
C149	C37	39	15	13	0,481
C10	C37	37	15	13	0,5
C37	C42	15	37	13	0,5
C37	C9	15	28	13	0,605
C149	C9	39	28	22	0,657
C126	C37	27	15	14	0,667
C10	C149	37	39	27	0,711
C10	C126	37	27	23	0,719
C126	C42	27	37	23	0,719
C126	C149	27	39	24	0,727
C42	C9	37	28	24	0,738
C10	C42	37	37	28	0,757
C126	C9	27	28	21	0,764
C10	C9	37	28	27	0,831
C149	C42	39	37	32	0,842

A ARL, l'indice de Sorensen (Tableau 16) varie entre 0,55 et 0,865. Sur 15 comparaisons, 6 produisent des indices de similarité supérieurs à 75%, ce qui marque une variabilité faunistique inter-casiers moins importante qu'à PDR. Sur les 34 taxa répertoriés sur ce secteur 10 sont communs à tous les casiers. A noter que les deux casiers les plus isolés (R1 et F1) sont ceux qui présentent le plus de différences faunistiques par rapport aux autres. Ces deux casiers n'ont pas pour autant des faunes identiques. Le casier F1 se démarque par une faune originale, avec 8 des 11 taxa présents dans un seul casier.

Le casier R1, au contraire, se démarque par une faune très pauvre et l'absence de taxa caractéristique. Les trois autres taxa présents dans un seul casier, sont apportés par S2 (Hemimysis et Hydroptilidae) et R2 (Gomphidae). Finalement, tous les casiers ne contribuent pas à la biodiversité du secteur (R1, S3 et S4 n'ayant aucun taxa propre), deux casiers procurent 85 % des taxa (F1 et R2 ou S2).

Tableau 16 : Comparaison inter-casiers de la composition taxonomique en invertébrés benthiques (en présence-absence) à ARL. Les deux premières colonnes indiquent le couple (A-B) de casiers considérés. L'indice de Sorensen indique la similarité entre ces deux entités (Plus la valeur est proche de 1 et plus les casiers ont la même composition faunistique). Les couples de casiers sont classés par ordre décroissant de l'indice de Sorensen.

Casier A	Casier B	Nbre de taxa Casier A	Nbre de taxa Casier B	Nbre de taxa commun à A et B	Indice de Sorensen
F1	S4	22	18	11	0,55
F1	R2	22	19	12	0,585
F1	S2	22	21	13	0,605
F1	R1	22	11	10	0,606
R1	S2	11	21	10	0,625
F1	S3	22	19	13	0,634
R1	S3	11	19	10	0,667
R1	S4	11	18	10	0,69
R1	R2	11	19	11	0,733
R2	S2	19	21	16	0,8
S2	S4	21	18	16	0,821
R2	S3	19	19	16	0,842
S2	S3	21	19	17	0,85
R2	S4	19	18	16	0,865
S3	S4	19	18	16	0,865

Les cartes factorielles issues d'une Analyse factorielle des Correspondances (AFC) (Figures 26 A et B) réalisée sur un tableau croisant les 88 échantillons et 47 taxa présents dans au moins deux échantillons, met en évidence une variabilité inter-casier plus forte à PDR qu'à ARL.

d'ARL, d'autre part. Cette opposition s'explique principalement par les variables liées aux modes de locomotion, d'alimentation, de reproduction et de respiration. Les taxa des casiers C42 et C149 sont particulièrement inféodés aux herbiers de par leur mode de vie. A l'opposé les taxa des casiers d'ARL sont plutôt endobenthiques et consomment des sédiments. Sur l'axe 2, on retrouve la contribution du casier C37 qui se caractérise par le mode de respiration typique des Diptères Chaoboridés. A noter que les taxa des casiers C126 et C9 du secteur de PDR, plus connecté avec le chenal, sont plus similaires aux casiers d'Arles.

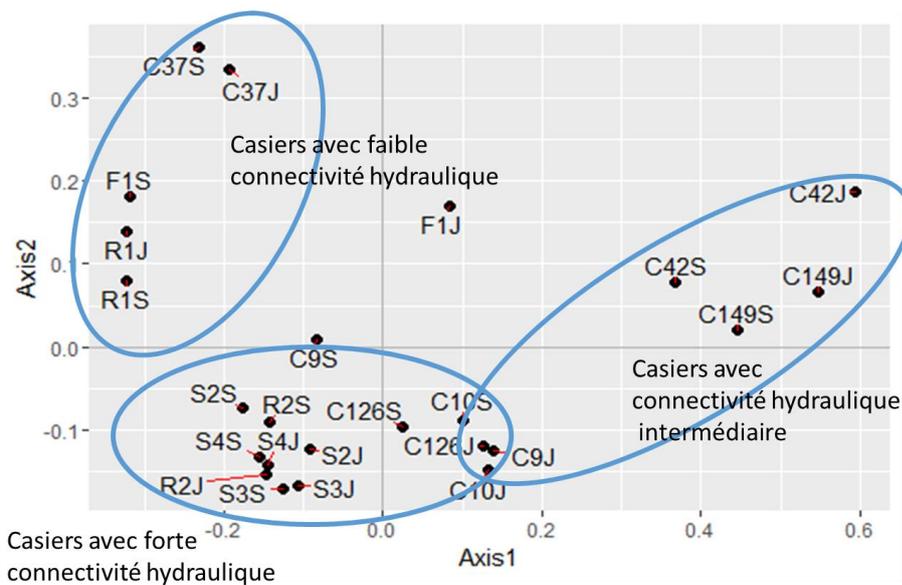
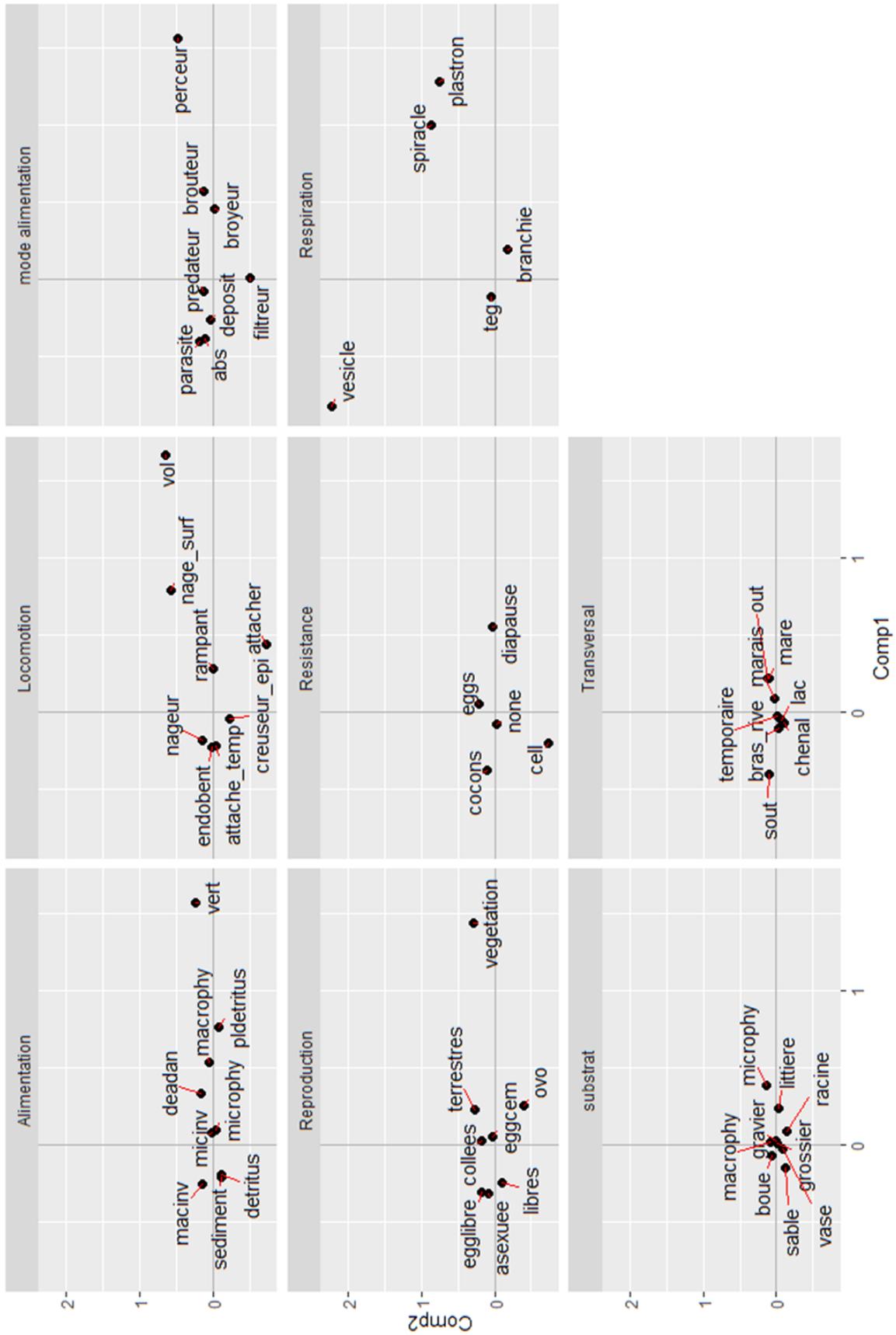


Figure 27 A : Carte factorielle F1x2 des échantillons issue d'une AFC floue réalisée sur un tableau croisant 88 échantillons et 8 variables bio-écologiques caractérisant les taxons de macroinvertébrés benthiques.

→ Que l'on prenne en compte les taxa eux-mêmes ou leurs traits bio-écologiques, il existe un lien fort entre les groupes de casiers obtenus par AFC et le niveau de connectivité hydraulique de chacun des casiers défini au chapitre 3 p. 13.

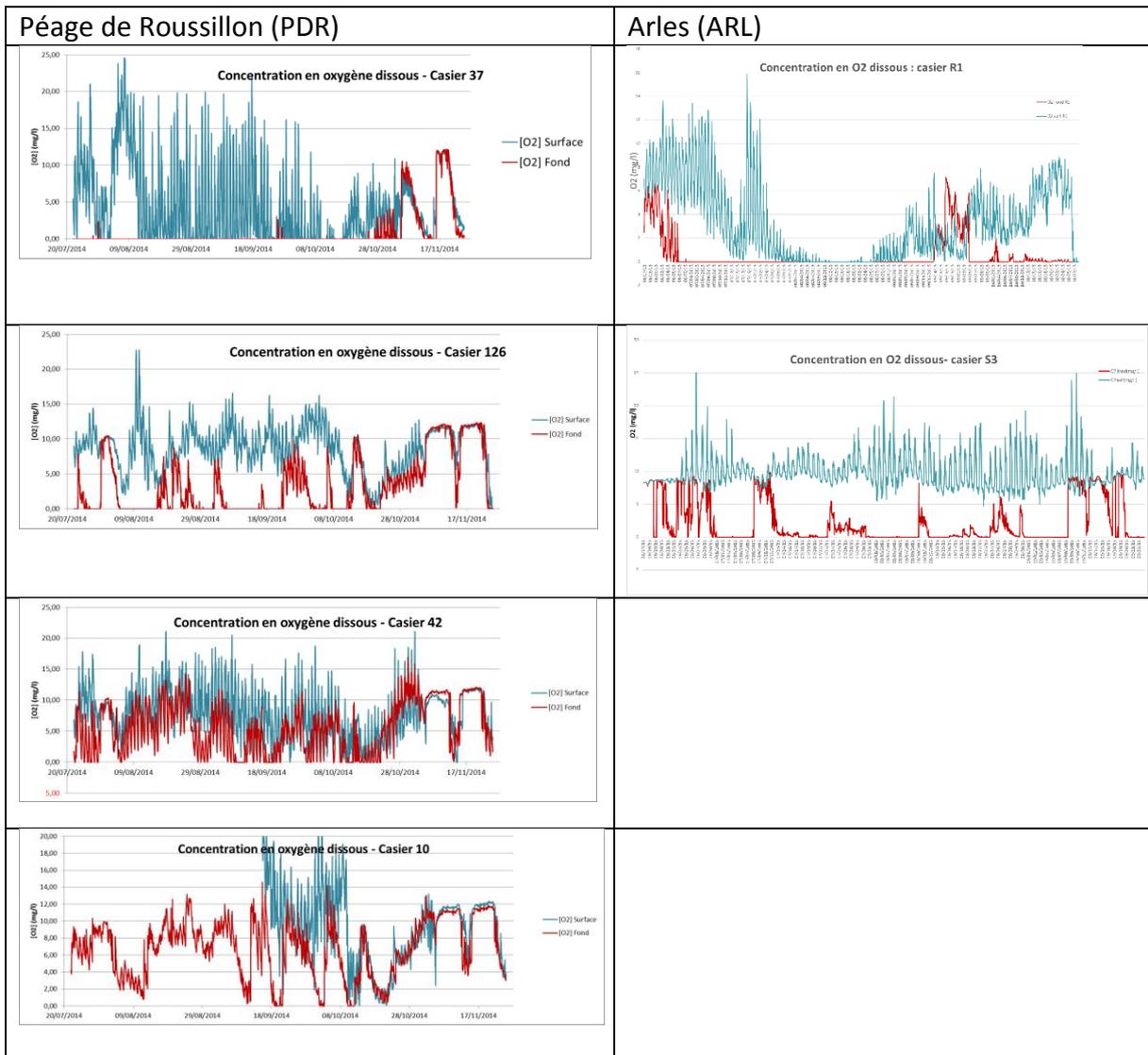
Figure 27 B (ci-contre): Cartes factorielles F1x2 des 8 variables bio-écologiques issue d'une AFC floue réalisées sur un tableau croisant 88 relevés et 8 variables bio-écologiques. Pour chaque variable bio-écologique, une carte factorielle présente les coordonnées factorielles de chaque modalités. La variable alimentation comprend 9 modalités : macroinvertébrés, sédiment, détritus, microinvertébrés, microphytes, animaux morts (deadan), macrophytes, plantes mortes (pldetritus), vertébrés. La variable reproduction comprend 8 modalités : asexuée, œufs libres, œufs fixés (eggcem), ponte fixées (collées), pontes libres, ovoviviparité (ovo), et ponte endophytiques (végétation). La variable Locomotion et relation au substrat comprend 8 modalités : vol, nageur en surface, nageur en pleine eau, rampant, fouisseur (creuseur epi), endobenthique interstitiel (endobent), fixation temporaire (attache temp), fixation permanente (attacher). La variable mode d'alimentation comprend 8 modalités : absorption à travers les téguments (abs), mangeur de sédiments fins (deposit), broyeur, brouteur-racleur, filtreur, algivore ou prédateur succeur (perceur), prédateur, parasites). La variable respiration comprend 5 modalités : tégumentaire (teg), branchie, vésicule hydrostatique (vesicle), plastron, respiration aérienne (spiracle). La variable résistance comprend 5 modalités : aucune (none), œufs (eggs), logettes contre dessiccation (cell), cocons, diapause. La variable microhabitat préférentiel (substrat) comprend 9 modalités : dalles, bloc, pierre, galets (grossier), graviers, sables, limon (boue), macrophytes, microphytes, branches-racines, litière, vase. La variable distribution transversale comprend 7 modalités : chenal, chenaux secondaires et rives (bras-rive), méandre abandonné (mares), marais, eaux temporaires, lacs, habitats souterrains, hors hydrosystème (out).



8. Métabolisme des casiers

8.1. Profils des concentrations en O₂ au fond et en surface dans les différents casiers

Les profils enregistrés montrent une forte variabilité inter-casiers (Figure 28) : certains montrent de longues périodes anoxiques au fond et jusqu'en surface (C37 à PDR et R1 à ARL), d'autres présentent des anoxies plus courtes au fond et très peu marquées en surface (C126, C42 et C10) voire sans anoxie en surface (S3), d'autres enfin sont rarement anoxiques au fond et jamais en surface (C149 et C9), même si on y mesure de fortes fluctuations entre le jour et la nuit en fin d'été et en automne, lorsque les débits du Rhône sont stables.



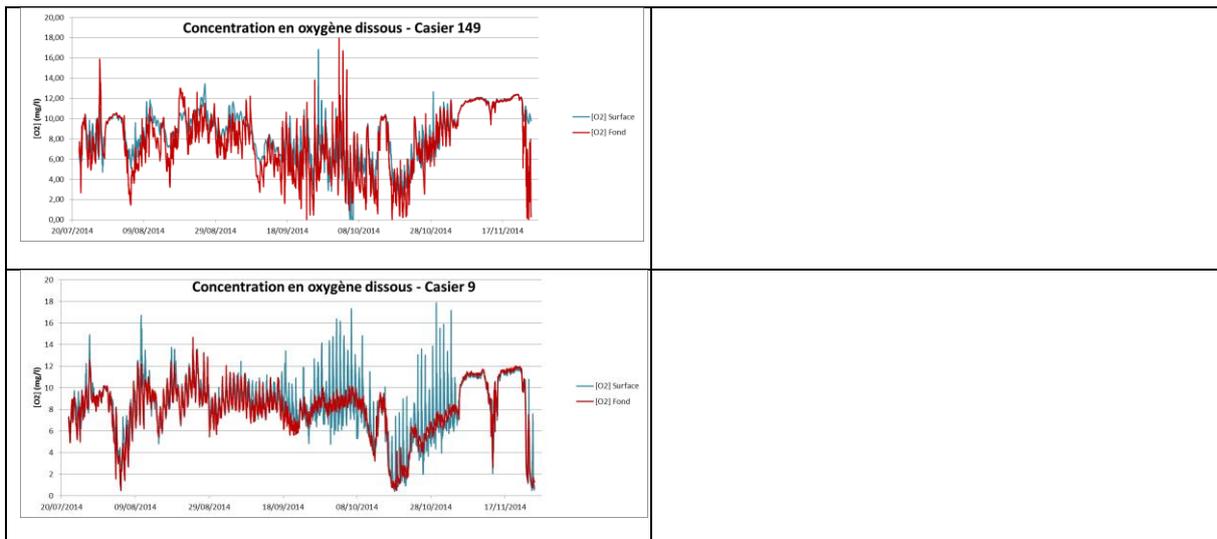
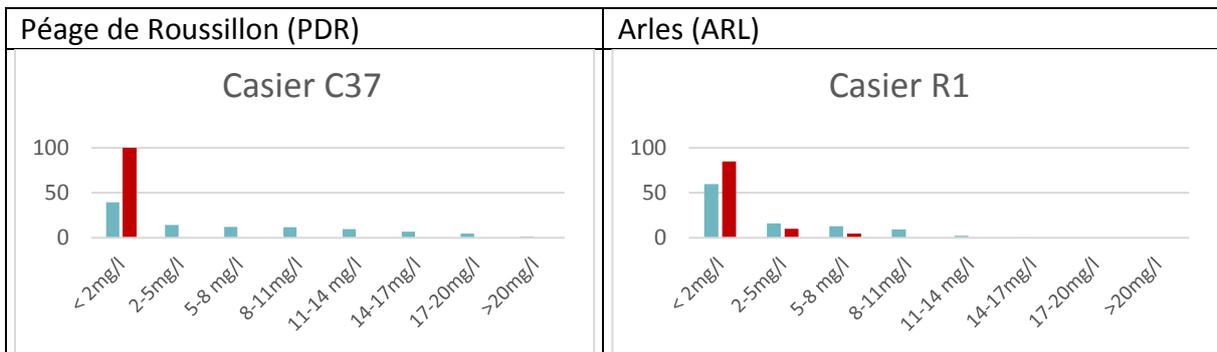


Figure 28 : Enregistrement des concentrations en oxygène dissous au fond (rouge) et en surface (bleu). A PDR, les enregistrements ont été réalisés du 22/07 au 24/11/2014, à ARL ils ont été réalisés du 17/06 au 28/10/2015. Les graphes sont classés en fonction de leurs profils (des moins oxygénés, en haut au plus oxygénés en bas). A ARL, seuls deux profils ont pu être enregistrés une partie du matériel ayant disparu en cours du suivi.

8.2. Occurrence des anoxies par casier sur la période estivale

Ces patterns d'oxygénation peuvent être synthétisés en classant les casiers selon la fréquence des hypoxies (entre 0 et 2 mg/l, Figure 29) enregistrées en surface ou au fond. Ainsi, les casiers C37 et R1 sont caractérisés par des hypoxies fréquentes (aussi bien au fond qu'en surface). Les casiers C126 et S3 montre des anoxies fréquentes au fond, qui disparaissent en surface. Les casiers C42 et C37 présentent des fréquences d'hypoxie encore nettes en profondeur, alors que les casiers C149 et C9 n'en présentent plus.



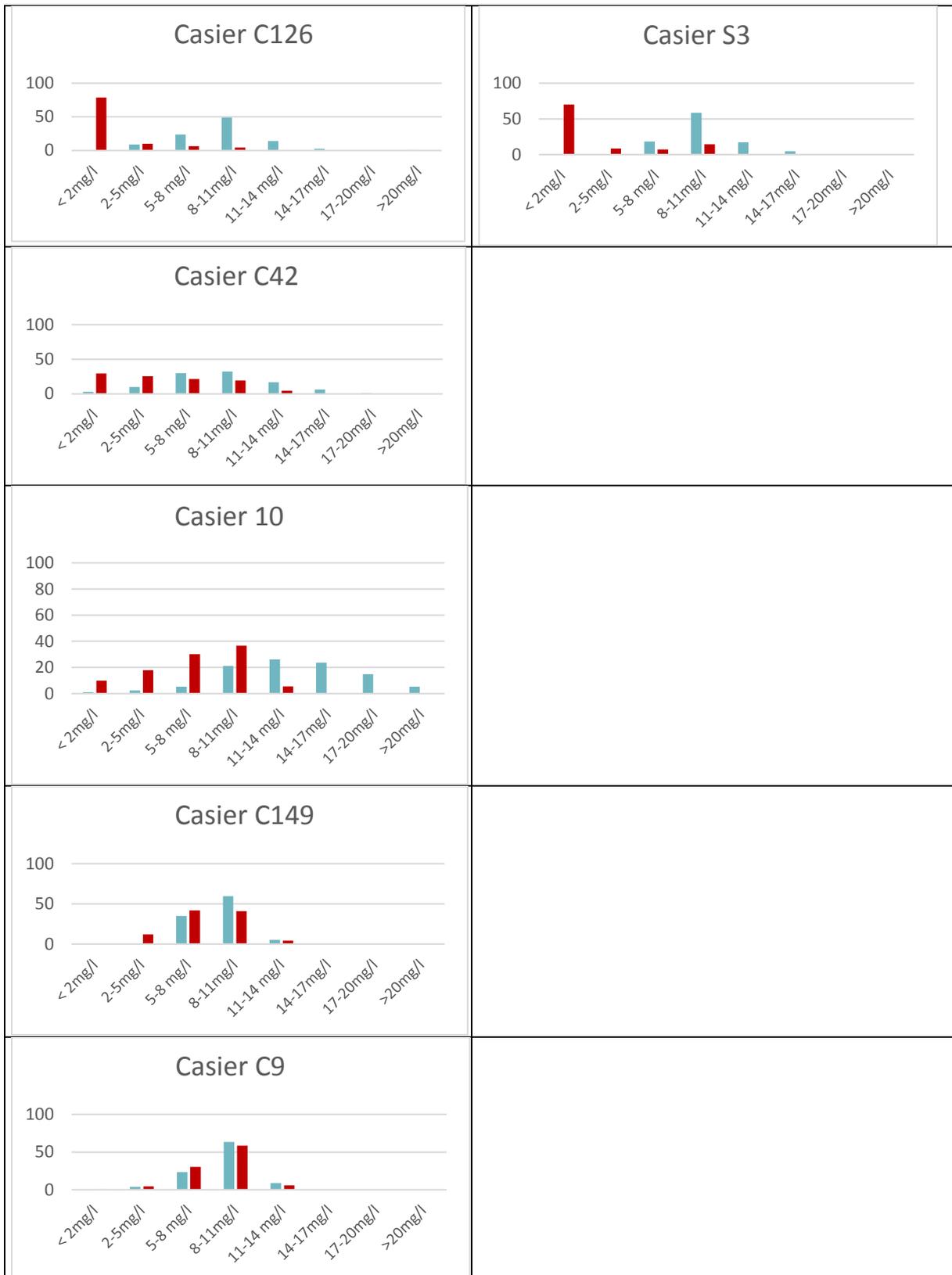


Figure 29 : Distribution des concentrations en Oxygène dissous (mg/l), mesurées pendant les périodes estivales. En rouge : les mesures enregistrées au fond, en bleu les mesures enregistrées en surface.

8.3. Rythme nycthéral

Le rythme nycthéral des concentrations en O₂ dissous dans l'eau dépend fortement de l'abondance des producteurs primaires pratiquant la photosynthèse en phase éclairée (donc le jour). En présence de producteurs primaires (algues ou herbiers de macrophytes), les concentrations en O₂ sont maximales en début d'après-midi et minimales en fin de nuit.

En surface, il existe une dynamique nycthérale marquée dans les casiers isolés ou faiblement connectés (C10, C37, S3 par exemple) alors que cette cyclicité est faible dans les casiers les plus connectés (C9, C149 ; Figure 30).

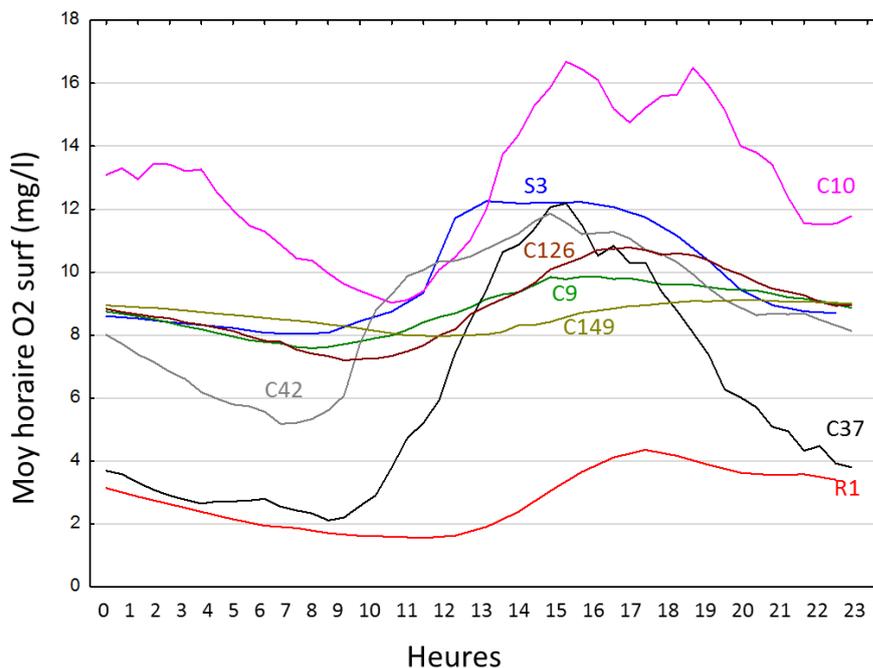


Figure 30: moyennes horaires des concentrations en oxygène dissous enregistrées en surface. Les moyennes ont été calculées sur 60 jours (entre le 20/07/14 et le 22/9/14) pour les casiers du secteur PDR (C9, C10, C42, C37, C126, C149) et sur 90 jours (entre le 17/06/15 et le 23/09/15) pour les casiers d'ARL (S3 et R1).

Lorsque l'on considère les concentrations en oxygène au fond, à l'interface avec les sédiments, une cyclicité journalière perdure dans certains casiers (C42, C10, C149 ou C9 par exemple). Cette dynamique de l'oxygène dissous semble aussi être expliquée par la présence des producteurs primaires et en particulier celle des herbiers enracinés au fond. Ces derniers contribuent à oxygéner le fond en journée dans ces casiers à eau relativement claire (Figure 31).

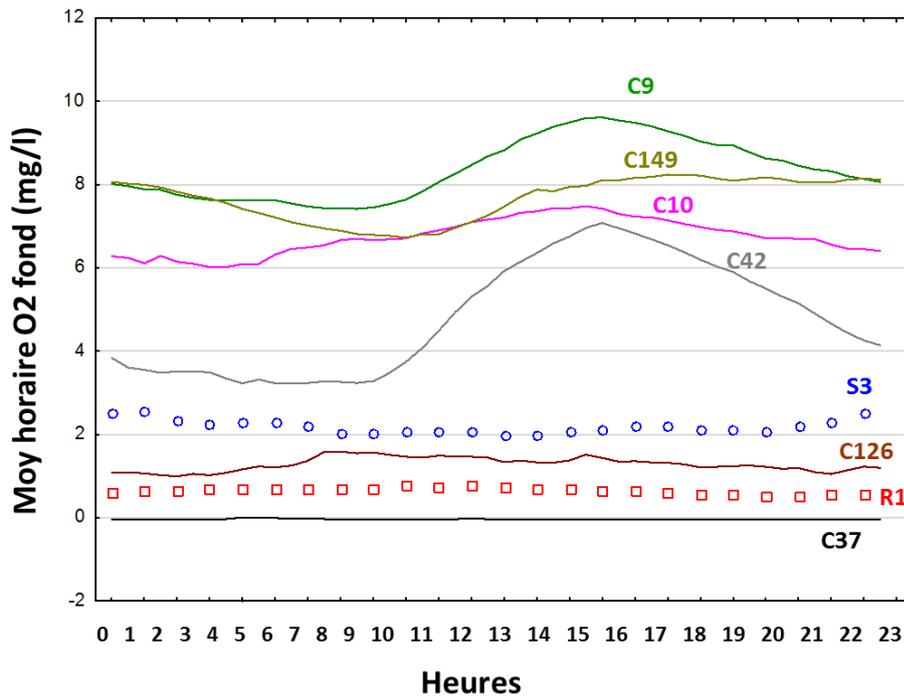


Figure 31: moyennes horaires des concentrations en oxygène dissous enregistrées au fond. Les moyennes ont été calculées sur 60 jours (entre le 20/07/14 et le 22/9/14) pour les casiers du secteur PDR (C9, C10, C42, C37, C126, C149) et sur 90 jours (entre le 17/06/15 et le 23/09/15) pour les casiers d'ARL (S3 et R1).

Il ne semble pas exister de lien simple et de causalité unique entre les teneurs en O₂ enregistrées au fond des casiers et la connectivité hydraulique des casiers avec le chenal (Figure 32). Deux facteurs semblent interagir : (1) la pénétration de la lumière jusqu'au fond du casier permettant le développement d'herbiers (si la qualité du substrat autorise l'enracinement) et (2) la connectivité avec le chenal qui autorise les apports d'eau plus oxygénée que celle du casier lui-même. Ainsi, les casiers dont les fonds sont les plus oxygénés présentent à la fois une transparence suffisante au développement des herbiers et une connectivité favorisant secondairement les concentrations en O₂ par renouvellement de l'eau. Il faut noter que pour certains casiers de PDR (C9 et C10), la porosité à travers la digue longitudinale peut jouer un rôle essentiel.

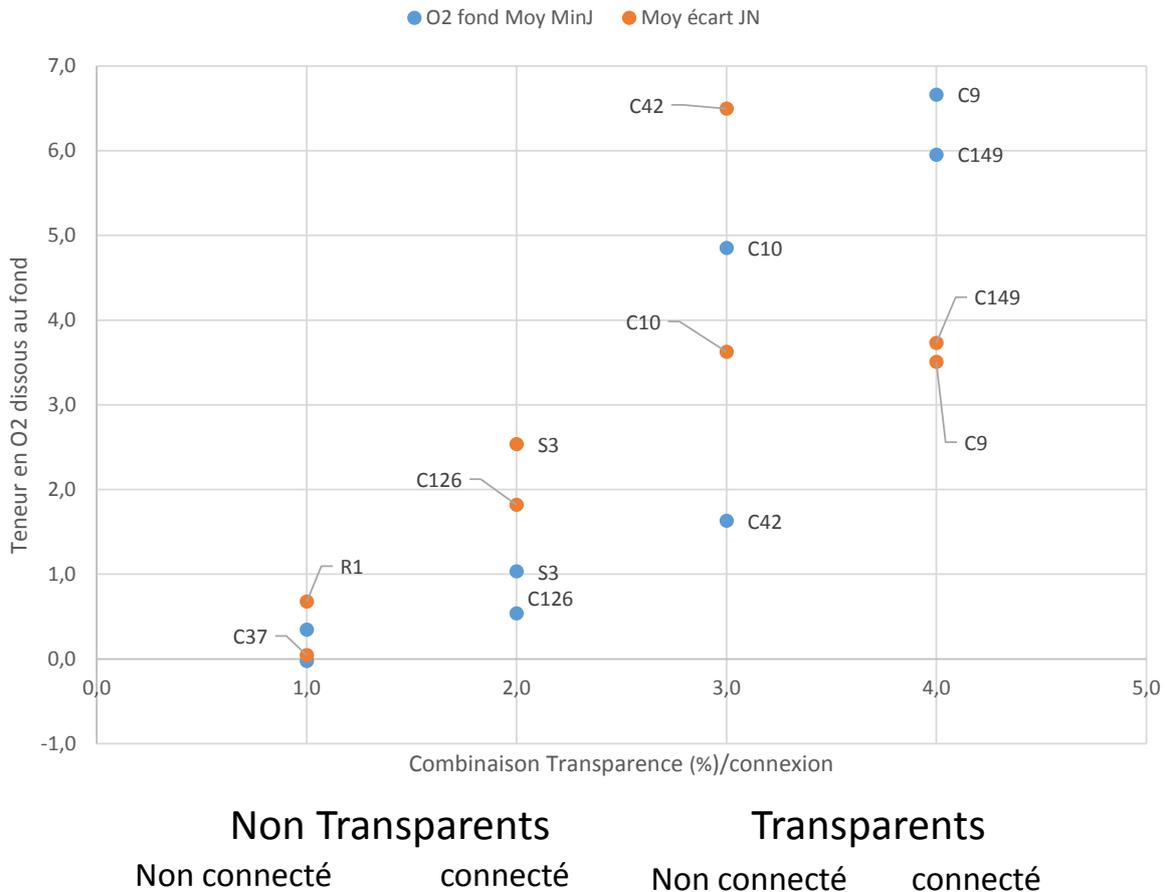


Figure 32: Teneur en oxygène dissous (en mg/l) au fond, (moyennes des valeurs minimales journalières en bleu et écarts max-min journaliers en orange) en fonction de quatre classes croisant la transparence de l'eau et le niveau de connectivité hydraulique.

8.4. Relations entre métabolisme et connectivité hydraulique

Le tableau 17 récapitule les estimations (obtenues par modélisation de la production primaire brute (GPP), de la respiration (ER) et de la production primaire nette (NEP). Il montre qu'en surface la production primaire est très bien corrélée avec la quantité de chlorophylle a active. Ces résultats valident le modèle puisque la chlorophylle a active est la principale responsable de la photosynthèse (Figure 11 p.23). De même les casiers qui présentent les plus faibles valeurs de respiration sont ceux qui ont les activités hydrolytiques les plus faibles (Figure 20 p.30).

L'ordre de grandeur du métabolisme est similaire aux valeurs déterminées à partir de données d'oxygène ou bien de modélisation numérique dans la rivière Grand Morin en aval de la Seine (Flipo et al., 2007), ainsi que dans la Seine (Vilmin, Flipo, Escoffier, Rocher, & Groleau, 2016).

→ La production nette est majoritairement positive pour les casiers (Tableau 17), indiquant une consommation nette de CO₂. La production nette est plus faible dans le fond du casier qu'en surface, en lien avec une intensité lumineuse atténuée en profondeur. Les casiers

peuvent donc fonctionner comme des puits de carbone, particulièrement les plus isolés.

Tableau 17 : Intensité du métabolisme (production primaire (GPP), respiration (ER) et métabolisme net (NEP) calculée en surface et au fond des casiers du secteur de PDR

Casier	Surface (mmol O ₂ /m ² /jour)			Fond (mmol O ₂ /m ² /jour)		
	GPP	ER	NEP	GPP	ER	NEP
37	385	-215	170	??	0	??
10	415	-201	214	??	-25	-??
42	323	-172	151	180	-109	70
9	165	-92	73	98	-63	35
149	48	-26	23	73	-38	36
126	340	-182	158	??	-24	??

9. Bilan sur la diversité des casiers Girardon, le rôle de la connectivité hydraulique et les usages de ces écosystèmes artificiels.

9.1. Au sujet du fonctionnement hydraulique et géomorphologique

Les casiers conservant une surface en eau présentent une gamme de formes et de niveaux de connectivité hydraulique variés. Les casiers les plus isolés sont caractérisés par des temps de résidence de l'eau assez long ; les apports d'eau ne pouvant se faire que par les précipitations, par les crues ou éventuellement par des apports du sous-écoulement, l'eau de ces casiers est rarement renouvelée. A l'opposé, les casiers les plus connectés ont un temps de résidence de l'eau court, avec un renouvellement fréquent de la masse d'eau.

La diversité des formes (pente de la rive, profondeur) est en partie historique : un casier construit en rive de sédimentation (convexe) aura dès le départ une berge moins pentue qu'un casier installé en rive d'érosion (concave). Cette morphologie des casiers évoluera, au cours du temps, en fonction des processus autochtones liés au fonctionnement de chaque casier. Pour les mêmes conditions de temps de résidence de l'eau, un casier très productif aura tendance à se combler plus rapidement qu'un casier moins productif.

9.2. Au sujet de la biodiversité (taxonomique et fonctionnelle)

Cette étude a montré que les casiers Girardon du Rhône contribuent à la biodiversité de l'hydrosystème dans son ensemble. Ils présentent des richesses taxonomiques variables ; les casiers pauvres sont caractérisés par une ou deux espèces supra dominantes, les autres par un nombre de taxa pouvant atteindre des valeurs de richesse α comprises entre 13 et 38 espèces phytoplanctoniques et entre 11 et 39 taxa pour les invertébrés benthiques.

Pour le secteur d'Arles, ces chiffres peuvent être directement comparés avec les valeurs obtenues dans la Lône Pilet (lône non restaurée) lors d'une étude réalisée en 2012 (rapport de stage de L. Priour comparant casiers et Lône du secteur d'Arles). Les valeurs enregistrées montrent que la richesse taxonomique de la lône est de 26 taxa pour 6 bennes Ekman réalisées, ce qui est assez similaire aux valeurs enregistrées dans les casiers S2 et S3. En

revanche, si l'on prend en compte l'ensemble des casiers du secteur, dans toute leur diversité, alors la richesse taxonomique est plus élevée pour l'ensemble des casiers Girardon d'Arles que pour une zone humide naturelle du type de la lône de Pilet.

Pour le secteur de PDR, la comparaison est plus difficile car les méthodes d'échantillonnage et le niveau d'indentification des taxa sont le plus souvent différents entre les études dédiées aux casiers et celles concernant les annexes fluviales naturelles ou autres zones humides.

La diversité β (déterminant le turn-over spécifique inter-casier) montre que les compartiments phytoplanctonique ou zoobenthique présentent des contenus spécifiques ou taxonomiques variés d'un casier à l'autre. L'hétérogénéité entre les casiers est donc écologiquement essentielle, elle contribue à la diversité γ à l'échelle du secteur.

Ces assemblages floristiques et faunistiques variés ne sont pas redondants en termes fonctionnels. L'étude des traits biologiques ou groupes fonctionnels montre qu'une typologie basée sur les fonctions des organismes peut être réalisée :

Trois ensembles fonctionnels (au sens d'Amoros et al, 1982) peuvent être décrits (Figure 33), grâce à l'étude des traits bio-écologiques des macroinvertébrés benthiques et du phytoplancton, et à l'étude d'indicateurs directement liés aux processus écologiques, tels que le métabolisme des casiers, la production primaire ou encore la qualité de la matière organique disponible et les activités bactériennes des sédiments.

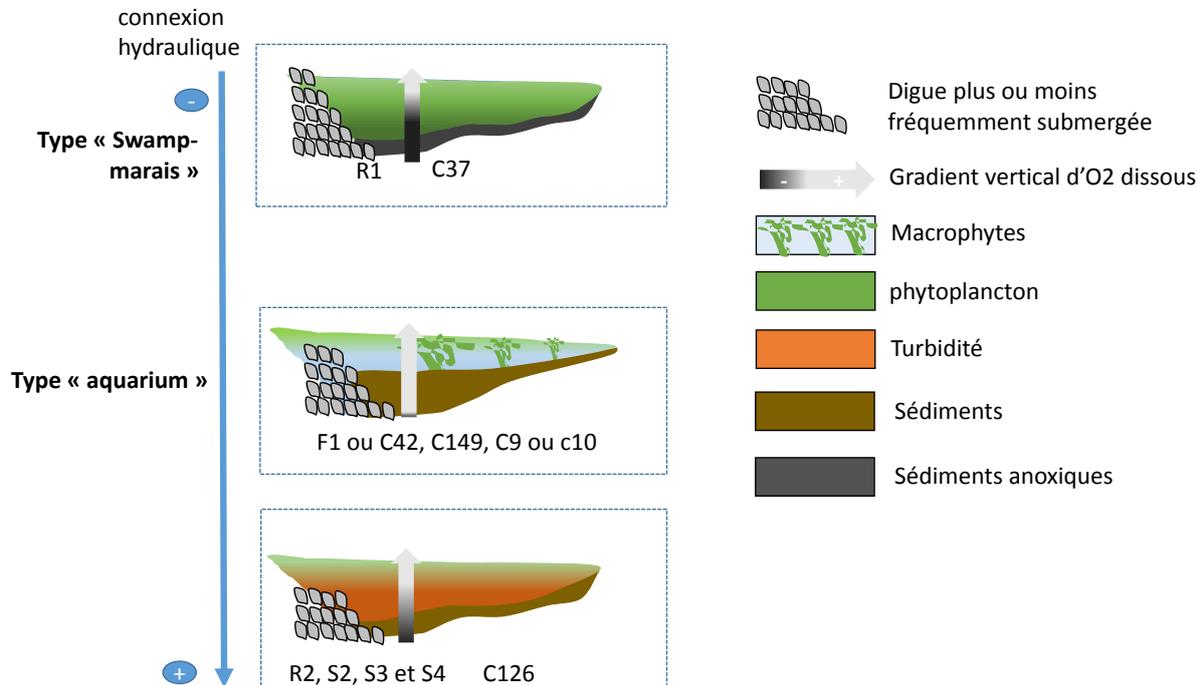


Figure 33 : Présentations des 3 types de casiers (ensembles fonctionnels) positionnés de haut en bas selon un niveau de connexion hydraulique croissant (flèche bleue).

→ **Description synthétique des 3 ensembles fonctionnels :**

Type « backwater, anse de rivière » : ces casiers sont très connectés au chenal du cours d'eau, ils sont souvent profonds et cette profondeur ne permet pas une décantation totale des particules en suspension. L'eau est donc très peu transparente et interdit ou limite l'enracinement et le développement des herbiers de macrophytes. On retrouve ces caractéristiques dans les casiers d'ARL (R2, S2, S3 et S4) auxquels on peut joindre le casier C126 de PDR. Ces casiers se caractérisent par une bonne oxygénation de surface et inversement, par une anoxie au fond, la production primaire est souvent limitée à la surface. Les invertébrés benthiques présents sont majoritairement fousseurs (endobenthiques) et présentent un mode d'alimentation lié aux sédiments fins et aux détritiques. Le phytoplancton est caractérisé par la présence de diatomées, marqueur d'une plus forte turbulence.

Type « swamp-marais » : ces casiers sont très isolés/ très peu connectés au chenal principal. Cet isolement autorise une croissance très forte des organismes phytoplanctoniques. Les densités microalgales limitent donc l'éclairement au sein et au fond de la masse d'eau et inhibent la croissance des macrophytes. On trouve ici les casiers C37 de PDR et R1 d'ARL. Les conditions d'oxygénation sont très contraignantes, avec une anoxie permanente au fond et des fortes variations nyctémérales en surface. La production primaire est extrêmement forte en surface, le phytoplancton est caractérisé par des taxa de grande taille, avec de grandes formes unicellulaires mobiles et des formes pluricellulaires coloniales ou filamenteuses, elles aussi de grande taille. Ces taxa indiquent (tout comme les teneurs en chlorophylle a active) des conditions eutrophes (C37) à mésotrophes (R1). Les concentrations en nutriments (PO_4 et NO_3) sont faibles et sont à corrélérer à leur consommation rapide par les organismes. La quantité de MO, sa qualité et les activités hydrolytiques des sédiments sont élevées, contribuant aux anoxies à l'interface eau-sédiment et conduisant à des processus de dénitrification. Le peuplement de macroinvertébrés est adapté à ces contraintes (respiration associée à des procédés de stockage de l' O_2 , soit sous forme de vésicule hydrostatique soit sous formes liées à un pigment respiratoire).

Type « Aquarium » : cet ensemble fonctionnel se caractérise par un degré de connectivité intermédiaire (ouverture de petite taille ou porosité de la digue). On trouve dans cet ensemble des casiers assez différents mais montrant tous un développement (plus ou moins important) d'herbiers à macrophytes enracinés. La présence de ces herbiers est liée à la pénétration de la lumière jusqu'au fond du casier. Cette transparence plus ou moins générale de la masse d'eau influence l'équilibre entre phytoplancton et macrophytes. Le type « aquarium » recouvre donc une certaine diversité de fonctionnement liée, entre autre, à la profondeur d'eau et la pénétration de la lumière. Dans les casiers les plus profonds, on trouve à la fois du phytoplancton et des macrophytes en quantité modérée (C9 et C10 par exemple) car le développement des macrophytes est ralenti et la compétition avec le phytoplancton limitée dans le temps. Dans d'autres, au contraire, la faible profondeur autorise un fort développement des herbiers de macrophytes (F1, C149 par exemple) et une compétition plus marquée avec le phytoplancton. La présence d'herbiers dans ces casiers à plus faible

profondeur explique la présence d'algues épiphytiques dans les assemblages phytoplanctoniques et d'espèces zoobenthiques dont la reproduction (pontes endophytiques) ou l'alimentation (brouleurs, racleurs) nécessitent la présence de macrophytes (C149, C42 par exemple). Les conditions d'oxygénation dans ce type de casiers sont généralement bonnes en surface comme au fond, de nuit comme de jour, mais peuvent aussi suivre de fortes variations nycthémérales, particulièrement au fond (marque de l'activité photosynthétique des herbiers). La matière organique des sédiments est en quantité et qualité assez moyenne, support d'activités microbiennes aérobies intermédiaires ou faibles (à l'exception du C42 où les intenses activités microbiennes induisent des anoxies du fond). Les macroinvertébrés de ces casiers se caractérisent par des densités moyennes à fortes, mais avec des richesses taxonomiques importantes (C10, C149 par exemple) et la présence de taxa plus exigeants que dans les autres casiers, comme les Trichoptères du genre *Ecnomus* ou les Ephéméroptères des genres *Caenis* et *Baetidae*.

→ Relation entre connectivité hydraulique et typologie fonctionnelle

Comme cela a été dit précédemment, la définition des ensembles fonctionnels est liée au niveau d'eutrophisation, et plus précisément à l'équilibre entre herbiers à macrophytes et phytoplancton (Figure 34). Cet équilibre dépend de la turbidité de l'eau et de la capacité des herbiers à pouvoir s'enraciner sur le fond des casiers. Cette relation dépend donc des interactions entre le temps de résidence (lié au niveau de connectivité hydraulique), la vitesse de sédimentation des particules, et la profondeur du casier.

Moins le temps de décantation (profondeur faible) est long et moins le phytoplancton a le temps de se développer avant l'installation des herbiers. A l'inverse si le temps de décantation est plus long les conditions peuvent devenir favorables au phytoplancton, qui pourra être plus difficilement inhibé par le développement des herbiers. La connectivité hydraulique influence le temps de résidence ; plus le temps de résidence de l'eau entre deux incursions est long, plus les conditions hydrauliques sont stables et permettent les interactions entre phytoplancton et herbiers (modèle des lacs peu profonds, Scheffer et al. 1993). A l'inverse un temps de résidence de l'eau entre deux incursions court, réduit le temps de décantation et ainsi la durée de colonisation des producteurs primaires.

Finalement, il apparaît que le type « Aquarium » peut être obtenu si la profondeur des casiers est faible (le temps de résidence peut alors être court) ou si la profondeur est un peu plus forte et que le temps de résidence est un peu plus long. Un niveau de connexion intermédiaire semble donc être favorable au type « Aquarium », le temps de résidence est, dans ce cas, suffisamment long pour permettre la décantation et suffisamment court pour éviter une dérive vers un système à phytoplancton dominant.

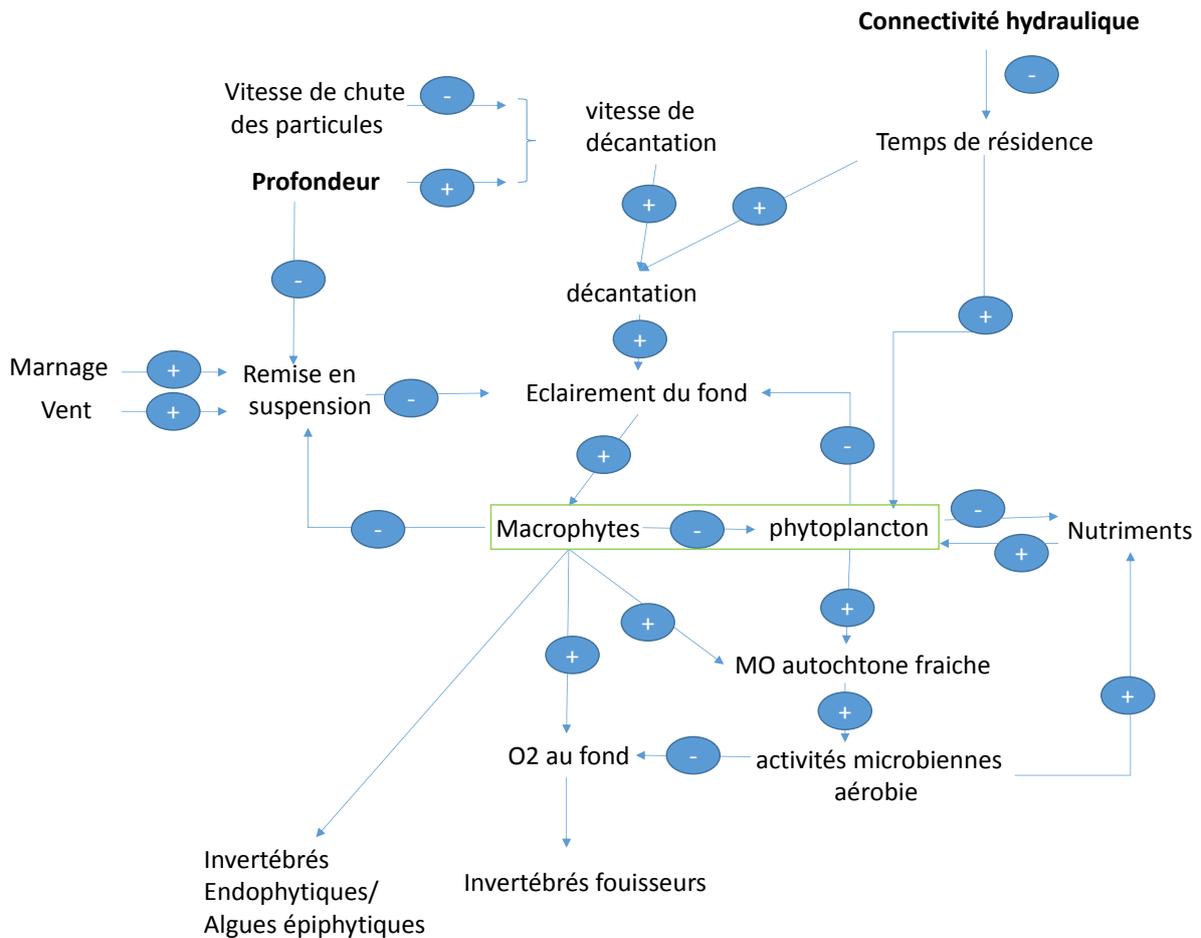


Figure 34 : Récapitulation des différentes interactions conduisant à l'équilibre phytoplancton-herbiers à macrophytes et aux différents assemblages fonctionnels en lien avec le temps de résidence (lié à la connectivité hydraulique) et la profondeur des casiers.

9.3. Fonctions écosystémiques remplies par les casiers

Zone d'alimentation pour les poissons

Pour conclure sur le fonctionnement des casiers Girardon, nos résultats montrent que ces écosystèmes aquatiques jouent un rôle important dans le fonctionnement du fleuve pris dans son ensemble. Ainsi, les casiers présentant des densités d'invertébrés benthiques fortes (particulièrement dans le type « Aquarium » jusqu'à 10 ou 15 000 ind/m²) peuvent constituer un stock de biomasse et représenter un site d'alimentation pour les poissons. Ces densités de d'invertébrés benthiques sont comparables à celles enregistrées dans des annexes naturelles, telle que la lône Pilet à Fourques. Ces marges artificielles peuvent donc constituer des éléments « clé » dans le réseau trophique fluvial.

Autoépuration et puit de carbone

La comparaison des concentrations en NO₃⁻ et PO₄³⁻ enregistrées dans les casiers d'Arles et dans le chenal principal, montre que les teneurs en nutriments dans les casiers, sont inférieures ou égales à celles du chenal. Par leur production primaire autochtone, les casiers

Girardon contribueraient donc comme de nombreuses zones humides à l'autoépuration des eaux en transformant une partie des nutriments en biomasse tout en fixant du CO₂ par photosynthèse. Certains casiers participent aussi à l'abattement des flux de nitrate lorsque leurs sédiments anoxiques basculent en dénitrification et induisent une disparition de l'azote du système. Là encore ces marges artificielles présentent des processus assez similaires aux annexes fluviales naturelles et peuvent partiellement compenser leur dégradation.

9.4. Éléments pour propositions de gestions

A l'échelle d'un secteur du fleuve pris dans son ensemble, il semble pertinent de **conserver la large diversité des casiers encore en eau car ils contribuent à la diversité taxonomique et fonctionnelle du système fluvial**. Il conviendrait donc de gérer ces systèmes de manière à assurer la durabilité du type « Aquarium », correspondant à un niveau de connexion intermédiaire, et présentant les plus fortes densités et la plus forte richesse taxonomique en invertébrés. Cependant, même si son esthétique charme les riverains, ce type « Aquarium n'intègre pas toute la gamme des taxa pouvant contribuer à la biodiversité globale d'un secteur. La conservation des casiers les plus isolés peut donc être pertinente et favorable à d'autres groupes d'organismes non étudiés dans ce programme, tels que les amphibiens, par exemple. La reproduction de ces vertébrés nécessite des plans d'eau stagnants dépourvus de prédateurs (comme les poissons). Les casiers Girardon isolés, avec leur forte productivité et les anoxies nocturnes mortelles pour une partie de la faune piscicole, constituent peut-être des milieux favorables aux Amphibiens. Néanmoins, il faudrait associer à cette conservation plusieurs actions de gestion : une surveillance régulière en période estivale des peuplements phytoplanctoniques qui contiennent pour certains d'entre eux des espèces proliférantes potentiellement toxiques ainsi qu'un suivi voire une gestion de l'atterrissement du milieu.

La connectivité dans un paysage fluvial ne concerne pas seulement les relations hydrologiques entre le chenal et les zones humides. Une connectivité inter-zones humides doit être considérée et étudiée. Ainsi, dans les cas où une série de casiers voisins ne seraient pas démantelés (train de casiers), plutôt que de reconnecter ces casiers au chenal principal, il pourrait être envisagé de **reconnecter les casiers les uns aux autres**. Une telle gestion pourrait créer un écoulement parallèle au chenal principal, du type bras secondaire artificiel. Si les hauteurs de digue le permettent, un gradient de décantation pourrait alors se mettre en place de l'amont vers l'aval. Il s'agirait donc de créer, dans les secteurs où la pente est suffisante :

- i) une connexion hydraulique permanente ou semi-permanente entre un casier situé en tête de train (juste en aval du premier casier qui est souvent le plus atterri) et le chenal principal du fleuve qui sera source d'eau de surface pour l'ensemble des casiers,
- ii) des connexions inter-casier (sur les digues transversales), de taille réduite, permettant un écoulement d'eau décantée d'un casier à l'autre, établissant ainsi un gradient de transparence et de conditions favorables au développement de macrophytes,

iii) une connexion hydraulique à l'aval du train de casiers, entre le dernier et le chenal du fleuve, permettrait une sortie d'eau permanente et une ouverture praticable pour les espèces de poissons nécessitant des eaux stagnantes et des herbiers de macrophytes pour leur nutrition ou leur reproduction.

Enfin, la connectivité en paysage fluvial intègre d'autres flux hydriques que ceux visibles en surface, les échanges interstitiels peuvent avoir un rôle dans la gestion des casiers Girardon. Ainsi, les **flux d'eau provenant de la nappe souterraine** sont connus pour limiter la prolifération des macrophytes et du phytoplancton (apports d'eau pauvre en phosphore et froide en été). Le rétablissement de tels échanges verticaux nécessite de bien connaître la dynamique de la nappe. Il n'apparaît pas évident que celle-ci ait une puissance suffisante pour alimenter des systèmes superficiels parfois perchés comme les casiers Girardon dans les secteurs médian et aval du Rhône. Toutefois, l'alimentation des casiers par des **infiltrations d'eau à travers la digue** est peut-être une solution pertinente. Le cas des casiers C9 et (peut-être) C10 est en cela très intéressante : le renouvellement de l'eau du casier par de l'eau du chenal filtrée par la digue et débarrassée de ses matières en suspension, conduit au maintien de la transparence de l'eau, au développement des herbiers de macrophytes et à la diversité globale du système.

Quel que soit le mode de gestion choisi, le maintien en place des casiers Girardon encore en eau (même si ceux-ci ne représentent que 10 à 20% des casiers) ne contribuera pas à augmenter le flux de sédiment dans le chenal du Rhône, ni à élargir le chenal et maintenir les hauteurs d'eau en période de crue. Toutefois, ils contribueront à d'autres services écosystémiques, en termes d'approvisionnement et de production de ressources (habitats, production primaire et secondaire), de régulation de certains flux (puits de CO₂, dénitrification) et de services culturels (esthétique de certains casiers, pêche sportive). Il convient donc de considérer leur réouverture ou leur destruction avec circonspection.

Références citées

- Amoros C, Coulet M, Pautou G (1982) Les « ensembles fonctionnels » : des entités écologiques qui traduisent l'évolution de l'hydrosystème en intégrant la géomorphologie et l'anthropisation (exemple du Haut-Rhône français). *Persee, Revue de géographie de Lyon* 57:49-62
- Amoros C, Bornette G (2002) Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology* 47:761-776 doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00905.x
- Bertilsson S & Jones Jr JB (2003). Supply of DOM to aquatic systems In: *Aquatic Ecosystems: Interactivity of Dissolved Organic Matter*, Eds Findlay and Sinsabaugh, Pages 3-24.
- Cremona F, Laas A, Noges P, & Noges T (2014). High-frequency data within a modeling framework: On the benefit of assessing uncertainties of lake metabolism. *Ecological Modelling*, 294, 27-35. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.09.013
- Eick D, Thiel R (2013) Key environmental variables affecting the ichthyofaunal composition of groyne fields in the middle Elbe River, Germany. *Limnologica* 43:297-307 doi:10.1016/j.limno.2013.01.001
- Escoffier N (2014). Apports de la Biogéochimie Haute Fréquence pour l'étude de la qualité de l'eau et la quantification du fonctionnement trophique de la Seine. (PhD PhD), Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France.
- Escoffier N, Bensoussan N, Vilmin L, Flipo N, Rocher V, David A, . . . Groleau A (2016). Estimating ecosystem metabolism from continuous multi-sensor measurements in the Seine River. *Environ Sci Pollut Res.* doi:DOI 10.1007/s11356-016-7096-0
- Flipo N, Rabouille C, Poulin M, Even S, Tusseau-Vuillemin M-H, & Lalande M (2007). Primary production in headwater streams of the Seine basin: The Grand Morin river case study. *Science of the Total Environment*, 375(1-3), 98-109. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.015
- Franquet E (1996). Occupation d'un espace fluvial par les Diptères chironomidés à l'aval du Rhône : répartition des espèces selon la nature du substrat et les conditions de débit. Lyon1, Lyon.
- Franquet E (1999) Chironomid assemblage of a Lower-Rhone dike field: relationships between substratum and biodiversity. *Hydrobiologia* 397:121-131
- Franquet E, Cellot B, Pont D, Bournaud M (1995) Environmental and Macroinvertebrate Dynamics in the Lower Rhone River and a Lateral Dike Field - a Study Matching 2 Functioning Descriptors. *Hydrobiologia* 308:207-217
- Fruget J F, Centofanti M, Dessaix J, & Brana JY (2012). Etude Rhône Phase 4. Lot 3c. Rôle des zones annexes refuges sur le RCC de Péage-de-Roussillon. Suivi 2009-2011. Lyon.
- Lang P, Desombre J, Ata R, Goeury C & Hervouet JM (2014). 2D hydrodynamics TELEMAC-2D Software release 7.0. User manual. EDF-R&D. 130 p.
- Nalewajko C, Lee K, & Fay P (1980). Significance of Algal Extracellular Products to Bacteria in Lakes and in Cultures. *Microbial Ecology*, 6: 199-207
- Needoba J A, Peterson T D & Johnson K S (2012). Method for the Quantification of Aquatic Primary Production and Net Ecosystem Metabolism Using In Situ Dissolved Oxygen Sensors. In S. M. Tiquia-Arashiro (Ed.), *Molecular Biological Technologies for Ocean Sensing* (pp. 73-101). New York: Springer.
- Nicolas Y (1996). Le peuplement piscicole du Bas-Rhône : occupation d'un espace fluvial aménagé et typologie des sites de nursery et de refuge. Université Claude Bernard, Lyon.
- Nicolas Y, & Pont D (1995). Importances d'annexes latérales artificielles pour le recrutement en juvénile de poisson dans un fleuve aménagé: le Bas-Rhône. *Bulletin français de pêche et de pisciculture*, 337-338-339, 249-257.

- Nicolas Y, Pont D (1997) Hydrosedimentary classification of natural and engineered backwaters of a large river, the lower Rhone: Possible applications for the maintenance of high fish biodiversity. *Regulated Rivers-Research & Management* 13:417-431
- Odum H T (1956). Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1(2), 102-117.
- Paillex A, Castella E, Carron G (2007) Aquatic macroinvertebrate response along a gradient of lateral connectivity in river floodplain channels. *Journal of the North American Benthological Society* 26:779-796 doi:10.1899/06-12.1
- Paillex A, Doledec S, Castella E, Merigoux S (2009) Large river floodplain restoration: predicting species richness and trait responses to the restoration of hydrological connectivity. *Journal of Applied Ecology* 46:250-258 doi:10.1111/j.1365-2664.2008.01593.x
- Paillex A, Doledec S, Castella E, Merigoux S, Aldridge DC (2013) Functional diversity in a large river floodplain: anticipating the response of native and alien macroinvertebrates to the restoration of hydrological connectivity. *Journal of Applied Ecology* 50:97-106 doi:10.1111/1365-2664.12018
- Raccasi G (2008). Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, recherche en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues. Thèse de doctorat. Aix-Marseille Université. 334 p.
- Savic R, Ondrasek G, Bezdan A, Letic L, Nikolic V (2013) Fluvial deposition in groyne fields of the middle course of the Danube river. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette* 20:979-983
- Scheffer M, Hosper S, Meijer SH, Moss B (1993) Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends Ecol Evol* 8 : 275-279
- SOGREAH (2000) Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide. 1ère étape, Diagnostic de l'état actuel. Analyse par aménagement. Institut interdépartementale des bassins Rhône-Saône. Valence. 85 p.
- Staehr P A, Bade D, Van de Bogert M C, Koch G R, Williamson C, Hanson P, . . . Kratz T (2010) Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. *Limnology and Oceanography-Methods*, 8, 628-644. doi:10.4319/lom.2010.8.628
- Cremona, F., Laas, A., Noges, P., & Noges, T. (2014). High-frequency data within a modeling framework: On the benefit of assessing uncertainties of lake metabolism. *Ecological Modelling*, 294, 27-35. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.09.013
- Szlauer-Lukaszewska A (2015) Substrate type as a factor affecting the ostracod assemblages in groyne fields of the Oder River (Poland). *North-Western Journal of Zoology* 11:274-287
- Tachet H, Richoux P, Bournaud M, Usseglio-Polatera P (2000) Invertébrés d'eau douce : systématique, biologie, écologie. CNRS edition
- Tuchman NC, Schollett MA, Rier ST & Geddes P (2006) Differential heterotrophic utilization of organic compounds by diatoms. *Hydrobiologia*, 561: 167-177
- Vilmin L, Flipo N, Escoffier N, Rocher V, & Groleau A (2016) Carbon fate in a large temperate human-impacted river system: Focus on benthic dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1-19. doi:10.1002/2015GB005271

Annexe 1 : Modèle 2D Casiers d'Arles

Figure 1 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 430 m³ /s (TELEMAC 2D)

Figure 2 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 1400 m³ /s (TELEMAC 2D)

Figure 3 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 3150 m³ /s (TELEMAC 2D)

Figure 4 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 7793 m³ /s (TELEMAC 2D)

Figure 5. Les distributions des vitesses par casier en fonction du débit

Figure 6. Les distributions des profondeurs par casier en fonction du débit

Figure 7. Fraction de la surface en eau rapportée à cette fraction à l'étiage par casier en fonction du débit.

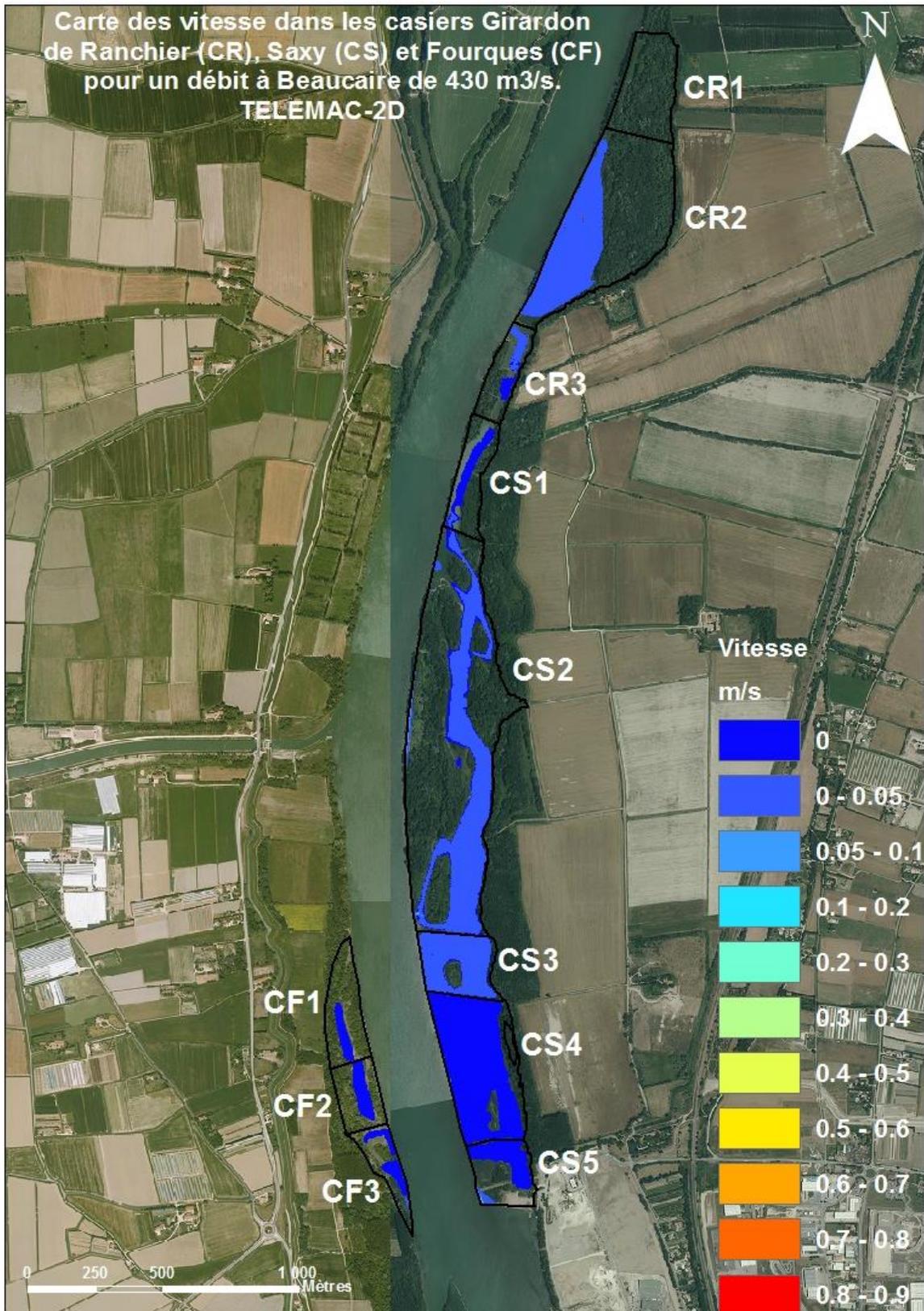


Figure 1 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 430 m³ /s (TELEMAC 2D)

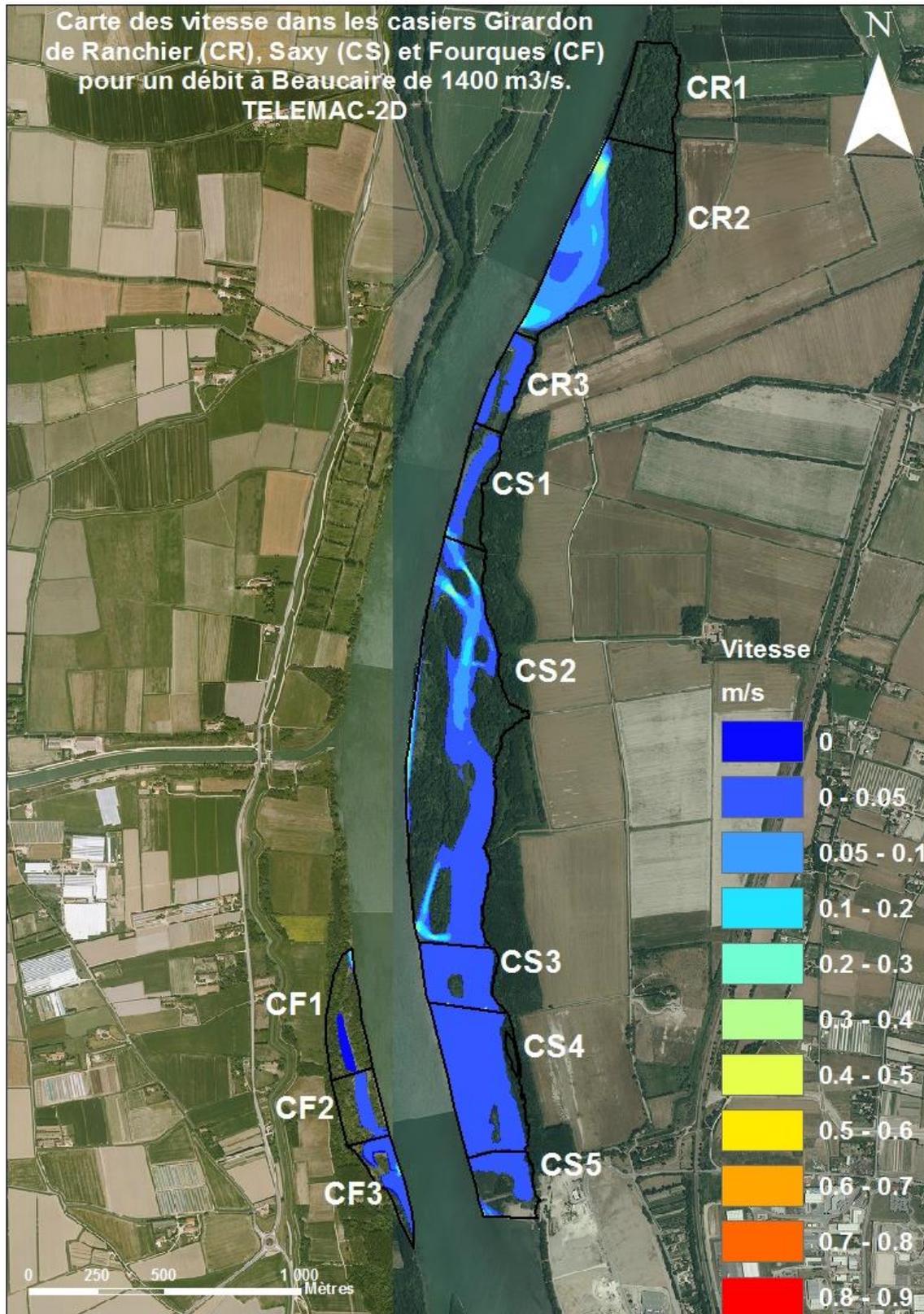


Figure 2 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 1400 m³ /s (TELEMAC 2D)

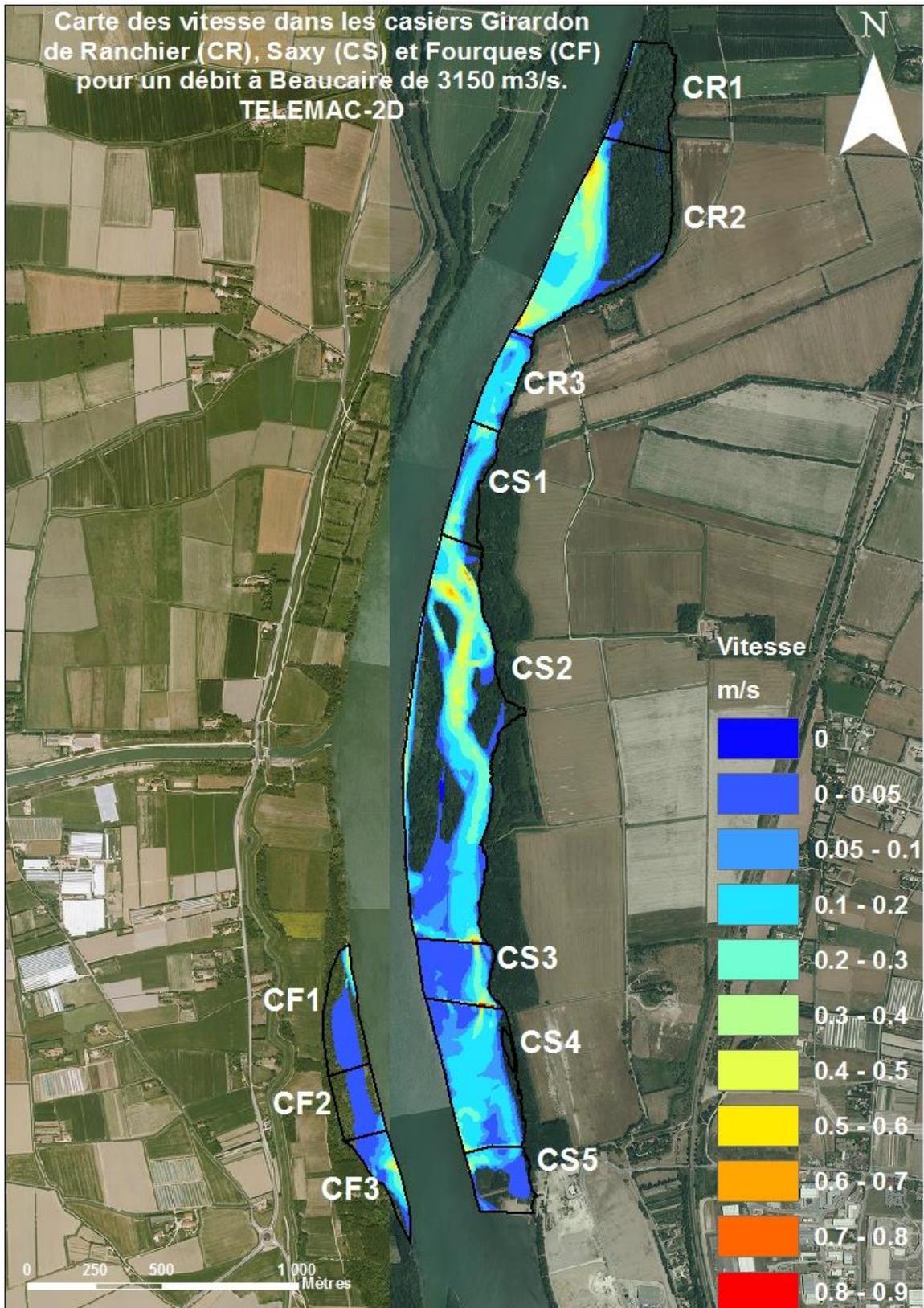


Figure 3 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 3150 m³ /s (TELEMAC 2D)

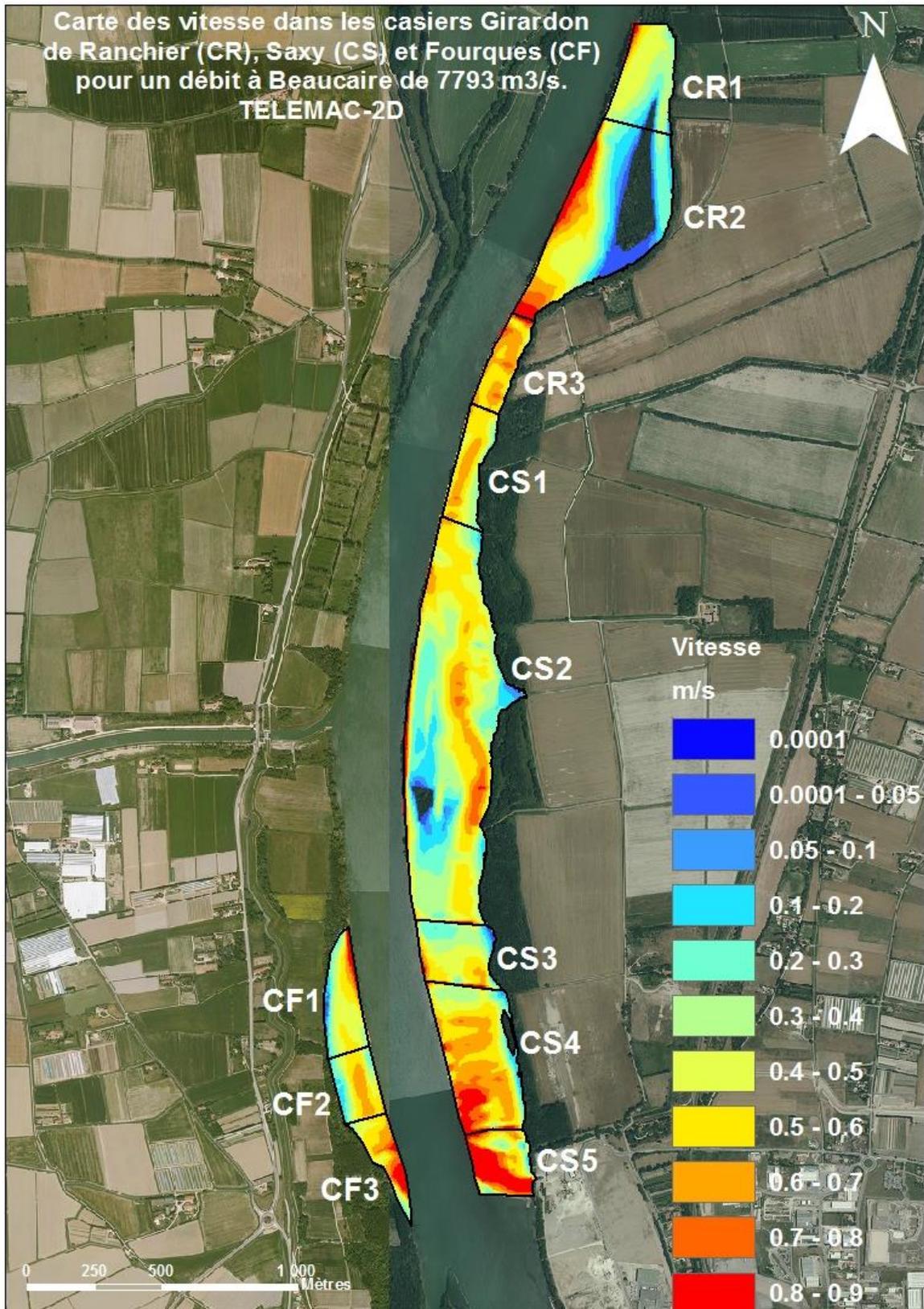


Figure 4 : Carte des vitesses dans les casiers Girardon du secteur d'ARL pour un débit à Beaucaire de 7793 m³ /s (TELEMAC 2D)

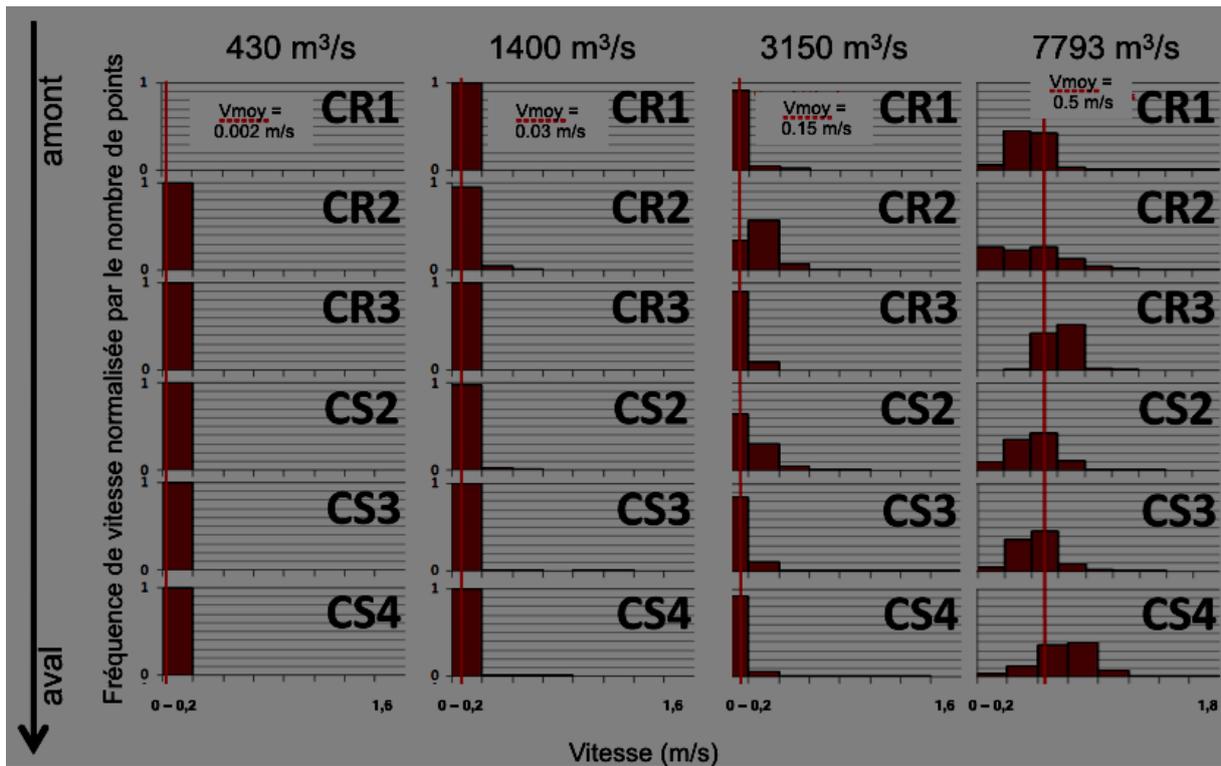


Figure 5. Les distributions des vitesses par casier en fonction du débit

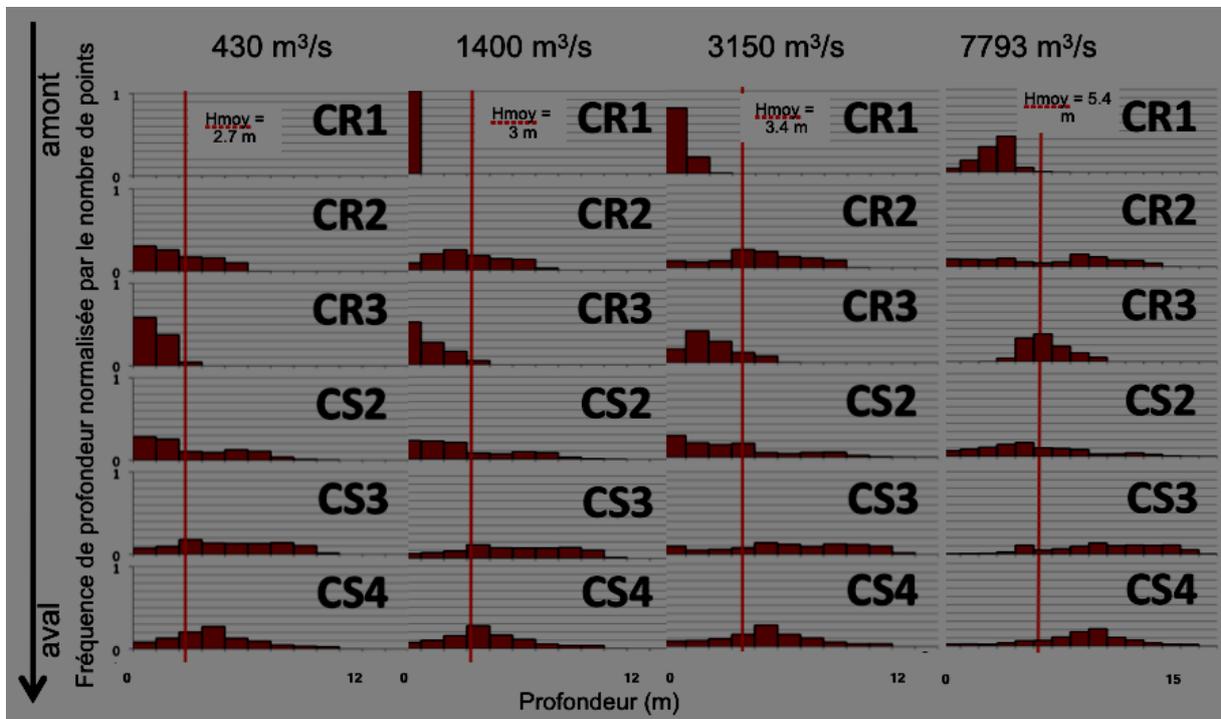


Figure 6. Les distributions des profondeurs par casier en fonction du débit

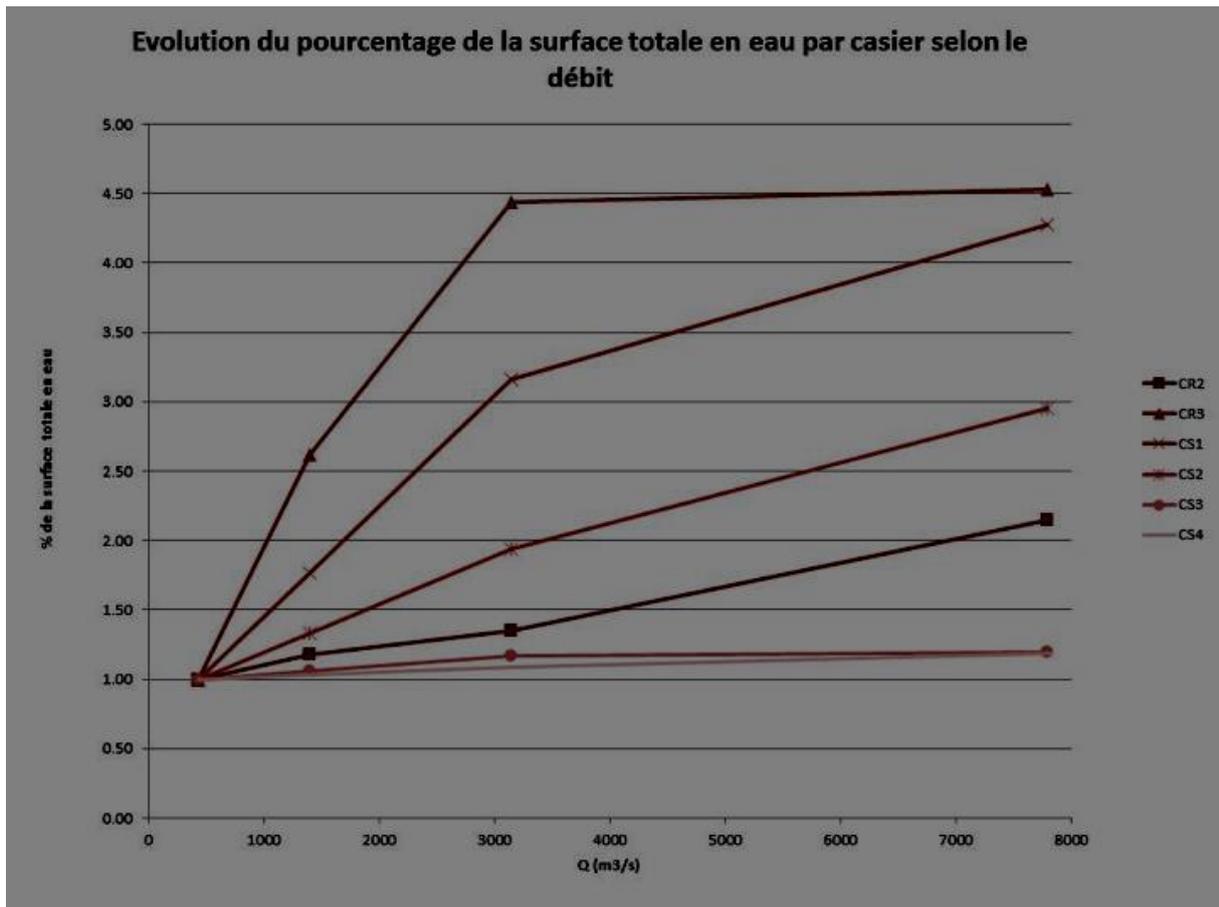


Figure 7. Fraction de la surface en eau rapportée à cette fraction à l'étiage par casier en fonction du débit.

Annexe 2 : Liste des taxa phytoplanctoniques

DIATOMEES

Achnantheidium minutissima
Achnanthes lanceolata
Amphora pediculus
Amphora ovalis
Cocconeis pediculus
C. placentula
Cyclotella atomus
Cymbella affinis
Cymbella lanceolata
Cymbella minuta
Cymbella prostrata
Cyclotella sp.
Cyclotella comta
Cyclotella ocellata
Diatoma ehrenbergii
Diatoma vulgare
Diploneis ovalis
Epithemia costata
Eunotia sp
Fragilaria capucina
Fragilaria arcus var arcus
Fragilaria ulna
Gomphonema minutum
Gomphonema olivaceum
Gomphonema parvulum
Gyrosigma acuminatum
Gomphonema sp.
Melosira varians
Meridion circulare
Navicula angusta
Navicula cryptcephala
Navicula cryptotenella
Navicula capitatoradiata
Navicula lanceolata
Navicula menisculus
Navicula pupula
Navicula radiosa
Navicula rhyncocephala

Navicula pseudolanceolata
Navicula tripunctata
Navicula sp.
Nitzschia acicularis
Nitzschia flexa
Nitzschia dissipata
Nitzschia linearis
Nitzschia paleacea
Nitzschia sp.
Pinnularia sp.
Rhoicosphenia abbreviata
Surirella constricta
Surirella ovalis

CHLOROPHYTES

Actinastrum hantzschii
Ankistrodesmus sp.
Chaetophora sp.
Chlamydomonas sp.
Chlorella sp.
Chodatellopsis sp.
Cladophora sp.
Closterium sp.
Closterium lunula
Coelastrum sp.
Cosmarium sp.
Cosmarium botrytis
Crucigenia tetrapedia
Crucigenia fenestrata
Elakatothrix sp.
Gonium sp.
Kirchneriella sp.
Monoraphidium contortum
Oocystis sp.
Pandorina morum
Pediastrum tetras
Pediastrum clathratum
Scenedesmus acuminatum
Scenedesmus armatus
Scenedesmus denticulus
Scenedesmus quadricauda

Scenedesmus ecornis
Scenedesmus intermedius
Scenedesmus spinosus
Selenastrum sp.
Spirogyra sp.
Spirogyra varians
Tetraedron minimum
Tetraedron triangulare
Tetraselmis sp.
Ulothrix sp.
Volvox sp.

CYANOBACTERIES

Anabaena sp.
Cyanosarcina sp.
Chroococcus minutum
Chlorogloea sp.
Limonthrix sp
Merismopedia minima
Merismopedia glauca
Microcystis sp.
Oscillatoria limosa
Oscillatoria tenuis
Oscillatoria sp.
Planktolyngbya sp.
Planktothrix agardhii
Pseudoanabaena sp.

CRYPTOPHYTES

Cryptomonas sp.

EUGLENOPHYTES

Euglena acus
Euglena agilis
Euglena anabaena
Euglena Limnophila
Euglena oblonga
Euglena polymorpha
Euglena spirogyra
Lepocinclis fusiformis
Phacus orbicularis

Strombomonas sp.

Trachelomonas cervicula

Trachelomonas nigra

DINOFLAGELLES-PERIDINIENS

Ceratium hirundinella

Peridiniopsis sp.

Peridinium cinctum

CHRYSOPHYTES

Dinobryon divergens

Mallomonas sp

Synura sp.

