



**HAL**  
open science

# Traits morphologiques et écologiques des macrophytes en cours d'eau : Recherche de métriques de diagnostic des perturbations hydromorphologiques et physico-chimiques

S. Lorient, T. Feret, Christian Chauvin

## ► To cite this version:

S. Lorient, T. Feret, Christian Chauvin. Traits morphologiques et écologiques des macrophytes en cours d'eau : Recherche de métriques de diagnostic des perturbations hydromorphologiques et physico-chimiques. [Rapport de recherche] irstea. 2014, pp.66. hal-02601020

**HAL Id: hal-02601020**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02601020>**

Submitted on 16 May 2020

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

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



Année de programmation – Thème XXXX - Action XXXX

# Traits morphologiques et écologiques des macrophytes en cours d'eau

Recherche de métriques de diagnostic des  
perturbations hydromorphologiques et  
physico-chimiques

Rapport intermédiaire

Travaux 2013-2014

Sandrine LORIOT, Thibaut FERET,  
Christian CHAUVIN

Décembre 2014



- **AUTEURS**

**Sandrine LORIOT**, Ingénieur d'étude, [sandrine.loriot@irstea.fr](mailto:sandrine.loriot@irstea.fr)

**Thibaut FERET**, Ingénieur d'étude, [thibaut.feret@irstea.fr](mailto:thibaut.feret@irstea.fr)

**Christian CHAUVIN**, Ingénieur de recherche, [christian.chauvin@irstea.fr](mailto:christian.chauvin@irstea.fr)

**Unité de recherche Ecosystèmes Aquatiques et Changements Globaux – EABX**

**Irstea – Centre de Bordeaux**

- **CORRESPONDANTS**

Onema : **Yorick REYJOL**, chargé de mission, ONEMA, [yorick.reyjol@onema.fr](mailto:yorick.reyjol@onema.fr)

Droits d'usage : **accès libre**

Niveau géographique : **national**

Couverture géographique : **France**

Niveau de lecture : **experts**



Traits morphologiques et écologiques  
des macrophytes en cours d'eau

Recherche de métriques de diagnostic  
des perturbations hydromorphologiques  
et physico-chimiques



**Sandrine LORIOT, Thibaut FERET,  
Christian CHAUVIN**

**EABX – Irstea Centre de Bordeaux**

## ● RESUME

Dans l'objectif à moyen terme de construire un indicateur multimétrique et de disposer d'outils de diagnostic adaptés à chacun des types de pression identifiés dans les approches DCE, les travaux menés en 2013 et 2014 ont porté sur l'exploration des relations entre un ensemble de métriques descriptives de la composition et de la structure des biocénoses et les facteurs environnementaux. Les facteurs testés incluent des paramètres physico-chimiques et des paramètres bruts ou intégrateurs de l'hydrologie et de la morphologie.

L'affinité des taxons vis-à-vis de ces paramètres a été étudiée à travers l'établissement de leur profil écologique respectif. Ces profils écologiques ont permis d'améliorer les connaissances sur les exigences environnementales des taxons. La définition des métriques biologiques s'est également appuyée sur des bases de données internationales décrivant les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles d'espèces végétales.

Les données utilisées sont principalement celles issues des réseaux de surveillance DCE : relevés floristiques et descriptions morphologiques des sites « macrophytes » sur le RCS et le RCO de 2005 à 2011 (bancaisées dans PANDORE-Irstea), données physico-chimiques issues de la surveillance DCE (bases de bassins disponibles dans PANDOR-Irstea), jeu de données géographiques utilisées pour le projet SYRAH, données hydrologiques de la banque HYDRO.

Les approches se sont basées sur un traitement préliminaire des données, le déploiement d'analyses multivariées et de régression PLS.

Le premier résultat de ce travail est un catalogue de profils écologiques multi-traits, pour les facteurs hydromorphologiques et les facteurs physico-chimiques, pour tous les taxons identifiés dans les relevés floristiques du jeu de données. Ces traits ont été utilisés comme base pour la définition d'un premier jeu de plus de 4900 métriques « macrophytes en cours d'eau ». Les tests de la réponse de ces métriques biologiques aux facteurs environnementaux ont permis de mettre en évidence un certain nombre de réponses sur lesquelles sera basée la sélection des métriques pour le développement des indicateurs multimétriques et diagnostiques dans la suite de ce programme de travail.

## ● MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)

macrophytes cours d'eau, métriques environnementales, métriques biologiques, traits écologiques, réponse des communautés

## TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>DEMARCHE</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>DONNEES</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>La base de données « Macrophytes en Cours d'eau » (Pandore- Irstea)</b> .....	<b>12</b>
3.1.1	Bilan sur les données bancarisées depuis 2005 .....	12
3.1.2	Données floristiques.....	15
3.1.3	Données stationnelles .....	17
<b>3.2</b>	<b>Données complémentaires à celles des relevés IBMR</b> .....	<b>22</b>
3.2.1	Données physico-chimiques de la base Castor (Irstea ; SEEE).....	23
3.2.2	Données hydromorphologiques du projet Syrah-CE (Irstea – ONEMA) .....	25
3.2.3	Données de la banque « Hydro » (Eau France) .....	26
3.2.4	Données hydromorphologiques calculées .....	27
3.2.5	Données géographiques (Référentiel National « Stations de Mesure »- Sandre).....	28
<b>3.3</b>	<b>Synthèse sur les données abiotiques collectées et calculées</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>PROFIL ECOLOGIQUE DES TAXONS</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Construction des profils écologiques</b> .....	<b>30</b>
4.1.1	Discrétisation des paramètres hydromorphologiques et physico-chimiques .....	30
4.1.2	Calcul des probabilités de présence .....	31
4.1.3	Représentation graphique des profils écologiques .....	32
<b>4.2</b>	<b>Résultats</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Valorisation des profils écologiques pour le développement de métriques de diagnostic</b> .....	<b>33</b>
4.3.1	Méthodes .....	33
4.3.2	Résultats .....	33
4.3.3	Discussion .....	35
<b>5</b>	<b>RECHERCHE DES METRIQUES DE DIAGNOSTIC</b> .....	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Démarche</b> .....	<b>36</b>
<b>5.2</b>	<b>Détails des métriques</b> .....	<b>36</b>
5.2.1	Métriques portant sur les groupes et sous-groupes fonctionnels .....	36
5.2.2	Métriques portant sur les rangs taxonomiques .....	37
5.2.3	Métriques portant sur les formes de croissance.....	37
5.2.4	Métriques portant sur les traits morphologiques et biologiques .....	38
5.2.5	Métriques portant sur la sensibilité et la tolérance environnementale .....	39
5.2.6	Métriques portant sur des indices de diversité des peuplements .....	40
5.2.7	Indice Biologique Macrophytique en Rivière .....	41
5.2.8	Synthèse sur les métriques et calculs.....	41
<b>5.3</b>	<b>Tests des métriques</b> .....	<b>41</b>

5.3.1	Caractérisation des gradients environnementaux .....	41
5.3.2	La régression <i>Partial Least Square</i> (PLS).....	50
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>54</b>
6.1	Le renforcement du jeu de données « IBMR ».....	54
6.2	La compilation des données environnementales.....	54
6.3	Un atlas des profils écologiques .....	54
6.4	Une base de données sur les traits morphologiques et fonctionnels des macrophytes .....	55
6.5	La construction, le calcul et le test des métriques .....	55
6.6	Pressions environnementales et échelle spatiale .....	55
6.7	Métriques de diagnostic, métriques candidates et indice multimétrique .....	56
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>62</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Démarche pour la construction de métriques candidates et d'un indice multimétrique.....	10
Figure 2: Nombre de relevés IBMR cumulés par Bassin illustré par la période 2007 à 2011. ....	12
Figure 3: Nombre de réplicats « prélèvement macrophytes en cours d'eau » par station (Banque PANDORE au 31/09/2013).....	13
Figure 4: Couverture nationale des données IBMR 2005 à 2011 (en grisé, HER « Alpes Internes »).....	13
Figure 5: Distribution par classe de taille de cours d'eau des stations échantillonnées. ....	14
Figure 6: Distribution des relevés macrophytes par hydroécocorégion (her) et par classe de taille. ....	14
Figure 7: Représentation des groupes taxonomiques dans la base de données Pandore. ....	15
Figure 8: Détails des phanérogames présents dans la base de données.....	16
Figure 10: Occurrence des taxons d'aquaticité 1, 2 et 4 dans la base Pandore. ....	17
Figure 9: Aquaticité des taxons présents (au moins une occurrence) dans Pandore.....	17
Figure 11: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de profondeur. ....	19
Figure 12: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de vitesse. ....	20
Figure 13: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de substrats.....	20
Figure 14: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de lumière.....	21
Figure 15: Carte des correspondances entre stations échantillonnées pour le compartiment « macrophytes en cours d'eau » et disponibilité des données physico-chimiques. ....	24
Figure 16: Carte des correspondances entre les stations IBMR et les données du projet SYRAH-CE.....	25
Figure 17: Carte des correspondances entre point de prélèvement IBMR et données de la banque Hydro.....	27
Figure 18: Représentation du gradient croissant des médianes des valeurs du paramètre « conductivité » associées à la présence de chaque taxon dans la base de données Pandore.....	31
Figure 19 : Profils écologiques de <i>Potamogeton nodosus</i> Poir. Et <i>Lemanea</i> sp. Bory de Saint-Vincent.....	32
Figure 20: Probabilités de présence par groupes taxonomiques suivant les modalités de vitesse.....	34
Figure 21 : Probabilités de présence des groupes taxonomiques suivant les modalités de substrat.....	34
Figure 22: Probabilités de présence des groupes taxonomiques suivant les modalités de lumière. ....	34
Figure 23: Probabilités de présence suivant chacune des 5 modalités de profondeur.....	35
Figure 24: Projection des 14 paramètres hydromorphologiques de l'ACP (n=2881). ....	42
Figure 25: Classification k-means sur les gradients de taille et morpho-dynamique de l'ACP.....	44
Figure 26: Distribution des classes des 2 gradients hydromorphologiques sur l'ensemble des stations disposant de données IBMR.....	44

<b>Figure 27: Distribution de la métrique « Bryophytes » en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 28 : Distribution de la métrique « Phanérogames » en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques. ....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 29 : Distribution de la métrique « IBMR » en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figure 30: Analyse en composante principale sur 9 paramètres physico-chimiques (n=1302).....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 31: Classification k-means des gradients trophique et de minéralisation. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 32: Distribution géographique des classes de gradients trophique et de minéralisation de l'ACP. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 33: Distribution de l'abondance relative des phanérogames selon les 2 gradients physico-chimiques ...</b>	<b>49</b>
<b>Figure 34: Distribution de l'abondance relative des bryophytes selon les 2 gradients physico-chimiques.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 35: Distribution de l'IBMR selon les 2 gradients physico-chimiques .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 36: ACP réalisée sur 25 facteurs abiotiques (axes 1 et 2). ....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 37: Régression PLS de la métrique "IBMR " selon 25 descripteurs (facteurs abiotiques). ....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 38: Régression PLS de la métrique "Phanérogames" selon 25 descripteurs (facteurs abiotiques). ....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 39 : Régression PLS de la métrique "Bryophytes" selon 25 descripteurs (facteurs abiotiques) .....</b>	<b>53</b>

---

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Influence relative des principaux facteurs mésologiques sur la réponse de l'IBMR.....	7
Tableau 2: Exemple de l'impact d'une pression à large échelle sur les biocénoses à l'échelle locale et des données utilisables pour son évaluation.....	11
Tableau 3 : Affinité pour l'eau et valeur d'aquaticité associée. ....	16
Tableau 4 : Paramètres environnementaux décrits lors d'un relevé IBMR. ....	18
Tableau 5: Classe de recouvrement des paramètres stationnels.....	18
Tableau 6: Indices calculés d'après les données stationnelles brutes.....	21
Tableau 7: Valeurs caractéristiques des indices établis pour l'analyse des données stationnelles. ....	22
Tableau 8: Résultats des tests de corrélation de Spearman entre paramètres et indices « substrat ». ....	22
Tableau 9: Valeurs caractéristiques des données physico-chimiques disponibles pour des stations ayant fait l'objet de relevés IBMR.....	25
Tableau 10: Valeurs caractéristiques des données du projet « SYRAH-CE » analysées. ....	26
Tableau 11: Corrélation de Spearman entre les valeurs des paramètres du projet SYRAH-CE sur les stations IBMR (***) p-value<0.001).....	26
Tableau 12: Valeurs caractéristiques des données hydrologiques collectées dans la banque Hydro. ....	27
Tableau 13 : Valeurs caractéristiques des paramètres hydromorphologiques calculés. ....	28
Tableau 14 : Facteurs abiotiques retenus pour l'établissement des profils écologiques (P) et le test des métriques (M).....	29
Tableau 15 : Limites des différentes classes calculées par la classification « k-medoid ». ....	30
Tableau 16 : Limites des modalités utilisées pour la construction des profils écologiques. ....	31
Tableau 17 : Groupes majeurs, formes et sous-formes de croissance (complété d'après Wiegleb, 1991 et S. Birk, comm.pers.).....	38
Tableau 18 : Traits morphologiques et fonctionnels d'après la base de données BioFLor (UFZ). ....	39
Tableau 19 : Indices de diversité calculés (avec S : nombre total de taxons ; P : proportion d'un taxon ; Ab : abondance.).....	40
Tableau 20 : Paramètres de l'Analyse en Composantes Principales sur les paramètres hydromorphologiques. ....	42
Tableau 21 : Contribution normée de chacune des variables à l'axe 1 et 2 de l'ACP.....	43
Tableau 22: Coefficients de corrélation de Pearson entre 3 métriques et chacun des deux gradients hydromorphologiques (***) : p-value<0.01) ....	43
Tableau 23 : Paramètres de l'ACP sur les paramètres physico-chimiques. ....	46
Tableau 24: Contribution normée des paramètres aux deux premiers axes.....	47

**Tableau 25: Coefficients de corrélation de Pearson entre les 3 métriques et les gradients physico-chimiques (\*\*\*) : p-value<0.01) ..... 47**

**Tableau 26 : Paramètres environnementaux pris en compte pour le test des métriques. .... 50**

*L'ensemble des analyses statistiques a été réalisée sous R (R Core Team, 2012).*

## 1 INTRODUCTION

La Directive Cadre sur l'Eau requiert une évaluation et une restauration de la qualité écologique des cours d'eau. L'évaluation de la qualité des milieux aquatiques s'est longtemps basée sur la qualité chimique de l'eau. Elle a progressivement été complétée par une évaluation de la qualité biologique basée sur des Elément de Qualité Biologique (EQB). Les applications antérieures à l'évaluation DCE utilisaient très principalement des indices simples, traduisant une « qualité globale » vue par EQB. Ce diagnostic était toutefois orienté, puisque chaque indice répondait plus ou moins aux différentes « pressions » exercées sur le milieu. Par exemple, l'IBGN répond surtout aux problèmes de matières oxydables et d'oxygénation du milieu, l'IBD réagit principalement à la teneur en nutriments dans l'eau.

Pour l'évaluation de la qualité écologique des cours d'eau par les macrophytes, l'indice actuellement utilisé est l'Indice Biologique Macrophytique en Rivière ou IBMR (Haury *et al.*, 2006). Il a été normalisé sous la référence NF T90-395 (AFNOR, 2003). L'IBMR est un indice monométrique biocénotique floristique. Prenant en compte plus de 200 taxons, il intègre des données qualitatives (cotes spécifiques de niveau de trophie, coefficient de sténoécie informant sur l'amplitude écologique des espèces) pondérées par des coefficients d'abondance.

L'indice est calculé d'après la formule suivante (Haury *et al.*, 2006) :

$$IBMR = \frac{\sum_{i=1}^n CS_i \times K_i \times E_i}{\sum_{i=1}^n K_i \times E_i}$$

Avec :

- i : taxons contributifs dans le relevé ;
- CS<sub>i</sub> : cote spécifique qui traduit la valeur bioindicatrice du taxon i (de 0 : hypereutrophe-dystrophe à 20 : ultraoligotrophe);
- K<sub>i</sub> : coefficient d'abondance du taxon i (5 classes de recouvrement) ;
- E<sub>i</sub> : valence de sténo-euryécie du taxon i (de 1 pour une espèce peu exigeante en termes de conditions environnementales à 3 pour une espèce inféodée à un niveau trophique donné).

L'IBMR ainsi développé reflète le niveau trophique global. Tous les paramètres environnementaux impactant la productivité du milieu conditionnent donc cet indicateur, même s'il montre une sensibilité particulière à la concentration en nutriments. L'échelle de l'indice de 0 à 20 représente une échelle de niveau trophique absolue. Le **Tableau 1** donne quelques orientations qualitatives de la réponse attendue de l'IBMR.

Métrique	Influence
Charge en nutriments	++++
Eclairement	++
Température	++
Pollution organique	++++
Hydrologie	+
Type de substrat	++
Mobilité du substrat	+++
Diversité des habitats	++

**Tableau 1 : Influence relative des principaux facteurs mésologiques sur la réponse de l'IBMR.**

Les critères de compatibilité des méthodes aux prescriptions de la DCE obligent désormais à une redéfinition de certains indicateurs, ce qui a motivé les programmes menés depuis 2004 pour adapter ou créer de nouveaux indicateurs « DCE-compatibles ». Cette compatibilité fait partie du processus d'intercalibration européenne, elle est donc rendue obligatoire. Il est entre autre demandé que les méthodes répondent à l'ensemble des pressions anthropiques identifiées dans les documents techniques d'application de la DCE (European Commission, 2005), avec toutefois des « spécialisations » possibles de différents EQB, ce qui justifie d'ailleurs leur utilisation complémentaire dans le diagnostic et l'évaluation.

De plus, l'analyse détaillée des causes de non atteinte du bon état est indispensable à la gestion, de même que le suivi précis de l'effet des mesures mises en place pour y revenir. Les méthodes doivent donc aussi pouvoir être utilisées dans cet objectif. L'approche indicielle doit rendre compte de plusieurs catégories de pressions : pollution organique, eutrophisation, stress acide, stress thermique, stress toxique, dégradation de la morphologie du cours d'eau, stress hydrologique, dégradation générale. Le développement d'indices multimétriques doit ainsi permettre une évaluation plus intégrée de l'évaluation de l'état écologique des masses d'eau. Une métrique est une partie mesurable d'un système biologique qui peut varier le long d'un gradient de pression anthropique (Karr & Chu, 1999). Un indice multimétrique est ainsi basé sur plusieurs caractéristiques taxonomiques ou fonctionnelles et doit permettre de rendre compte de différentes pressions (CEN, 2011)

Hering *et al.* (2006) propose une méthodologie compatible avec les préconisations de la DCE pour le développement d'indices multimétriques en distinguant les métriques basées sur la composition et l'abondance, la richesse et la diversité, la sensibilité et la tolérance environnementale, les traits fonctionnels. La procédure de sélection des métriques qu'ils proposent passe par une réponse significative des métriques aux pressions avec une discrimination significative entre « stations impactées » et « stations moins impactées », une non-redondance entre métriques et une stabilité suffisante dans les sites les « moins impactés ». Mondy *et al.* (2012) ont suivi cette démarche pour la construction de l'indice multimétrique macroinvertébrés I2M2. La réponse de 2525 métriques biologiques aux pressions ont été analysées en utilisant des données de pressions hydromorphologiques (taux d'urbanisation, état de la ripisylve, etc.) à large échelle (Bassin versant) et physico-chimique locale (nitrates, matière organique, etc.) tel que requis par la DCE. En France, de nombreux travaux sont maintenant orientés vers la mise au point d'indicateurs multimétriques. Les recherches pour le développement de l'indice multimétriques IPR+ pour le compartiment poissons en rivière ont débutées en 2008 et sont en cours de finalisation (Pont *et al.*, 2013).

S'agissant des « macrophytes en cours d'eau », il est attendu que soient tout particulièrement développées des métriques de diagnostic portant sur la nature et l'intensité des altérations hydromorphologiques. L'hydromorphologie d'un milieu aquatique comprend ses caractéristiques hydrologiques (état quantitatif et dynamique des débits, connexion aux eaux souterraines), morphologiques (variation de la profondeur et de la largeur de la rivière, caractéristiques du substrat du lit, structure et état de la zone riparienne) ainsi que sa continuité (migration des organismes aquatiques et transport de sédiments). De nombreuses publications scientifiques décrivent en effet l'influence de l'hydromorphologie sur la structuration des communautés de macrophytes dans les cours d'eau. Ainsi Riis *et al.* (2003 ; 2008), Mebane *et al.* (2013) décrivent l'influence du débit moyen et de la fréquence des crues. O'Hare *et al.* (2011) et Grunell (2013) étudient l'influence de la puissance hydraulique et de la nature du substrat sur les formes de croissance des macrophytes. Franklin *et al.* (2008) effectuent une synthèse des principaux facteurs et processus contrôlant les communautés de macrophyte dans les cours d'eau de plaine en milieu tempéré. Il identifie notamment la vitesse, le débit, la lumière et le substrat parmi les facteurs les plus influant.

Suivant la procédure décrite par Hering *et al.* (2006), des indices multimétriques « macrophytes en cours d'eau » ont été développés en Europe. Au Royaume-Uni, le « River LEAFACS » est construit par assemblage de 5 métriques (WFD – UKTAG, 2008) DCE compatibles pour répondre à des altérations de type enrichissement nutritif, altérations des débits et modifications de la morphologie des cours d'eau. Au Portugal, Aguiar *et al.*, (2009) ont caractérisé 32 métriques candidates sensibles à des perturbations d'origines anthropiques dont une sélection a été intégrée en un indice multimétrique, le Riparian Vegetation Index (RVI).

Concernant le développement d'un indice multimétrique à partir des données IBMR, Villeneuve *et al.* (2011) ont testé, sur un jeu de données 2008 – 2009, la réponse de l'IBMR à des pressions physico-chimiques et hydromorphologiques à large échelle et à l'échelle du tronçon (Données du projet Syrah-CE ; Chandesris *et al.*, 2008). Ces analyses ont montré que l'ensemble des pressions testées expliquent seulement 9% de la variabilité de l'IBMR (contre 44% pour l'I2M2 avec 1228 sites; 45% pour l'IBD avec 960 sites ; 29% pour l'IBGN avec 1228 sites et 9% pour l'IPR avec 560 sites). Marzin *et al.* (2012) ont testé sur un jeu de données IBMR 2005 – 2008 la réponse de 18 métriques dérivées des métriques utilisées pour calculer la note IBMR. Cette étude a montré que les métriques macrophytes présentent une réponse plus faible et moins sensible que les autres éléments biologiques à une dégradation générale (site multi-impacté). Les auteurs indiquent que ceci est dû à la réponse respectivement positive ou négative des métriques macrophytes aux pressions. Les résultats montrent que les métriques macrophytes répondent bien à une pression de type dégradation de la qualité de l'eau et qu'elles répondent mieux à une dégradation hydrologique qu'à une dégradation morphologique. Les métriques

macrophytes en cours d'eau ne semblent pas, d'après ces analyses exploratoires, répondre de façon sensible à des dégradations globales (Marzin *et al.*, 2012) et à large échelle (Villeneuve *et al.*, 2011).

La démarche suivie pour le développement de métriques de diagnostic « macrophytes en cours d'eau » est une analyse à petite échelle de la réponse des métriques partant du principe que les pressions à large échelle entraînent des modifications des processus hydrologiques et physico-chimiques ainsi que des modifications de la structure des cours d'eau qui se mesurent à l'échelle de la station par des modifications des facteurs abiotiques soutenant la biologie.

Les relevés IBMR prévoyant un relevé des taxons et des conditions environnementales stationnelles par faciès d'écoulement, les données permettant de rendre compte des relations entre données biologiques et données abiotiques à l'échelle du point de prélèvement sont donc disponibles. Les données physico-chimiques locales sont quant à elles disponibles via les suivis réalisés dans le réseau des stations DCE. Enfin, des données hydromorphologiques élémentaires sont disponibles dans des bases de données nationales (Banque Hydro ; CARHYCE ; données du projet SYRAH-CE).

## 2 DEMARCHE

Un préalable à la conduite des analyses pour le développement de métriques de diagnostic et la construction d'un indice multimétrique macrophytes en cours d'eau a été de bancariser la totalité des données disponibles à la date de démarrage de ce travail. (dernières données 2010 et totalité des données 2011) afin de renforcer le jeu de données, tant en nombre de données qu'en couverture du territoire national, type de cours d'eau et conditions stationnelles. Les données physico-chimiques et hydromorphologiques ont été collectées dans les bases de données nationales. Le rattachement géographique de ces données avec les données biologiques et stationnelles issues des relevés IBMR a été réalisé.

Une sélection des paramètres soutenant la biologie a été effectuée parmi les données abiotiques disponibles. L'affinité des taxons vis-à-vis de ces paramètres a été étudiée à travers l'établissement de leur profil écologique respectif. Ces profils écologiques ont permis d'améliorer les connaissances sur les exigences environnementales des taxons. Ils ont également été un outil d'aide à la définition des métriques biologiques. En effet, les profils écologiques présentent les affinités des taxons par classe de valeurs des paramètres et fournissent ainsi des données pour la construction d'indice de sensibilité environnementale. Les profils écologiques ont également permis de mettre en évidence l'affinité de groupes de taxons vis-à-vis de certaines conditions environnementales. La définition des métriques biologiques s'est également appuyée sur des bases de données internationales décrivant les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles d'espèces végétales.

Le résultat de ce travail est une première liste de métriques « macrophytes en cours d'eau » et des premiers tests de la réponse des métriques biologiques aux conditions environnementales. La figure 1 résume la démarche suivie. Le tableau 2 présente un exemple de l'impact d'une pression à large échelle sur les biocénoses à l'échelle de la station.

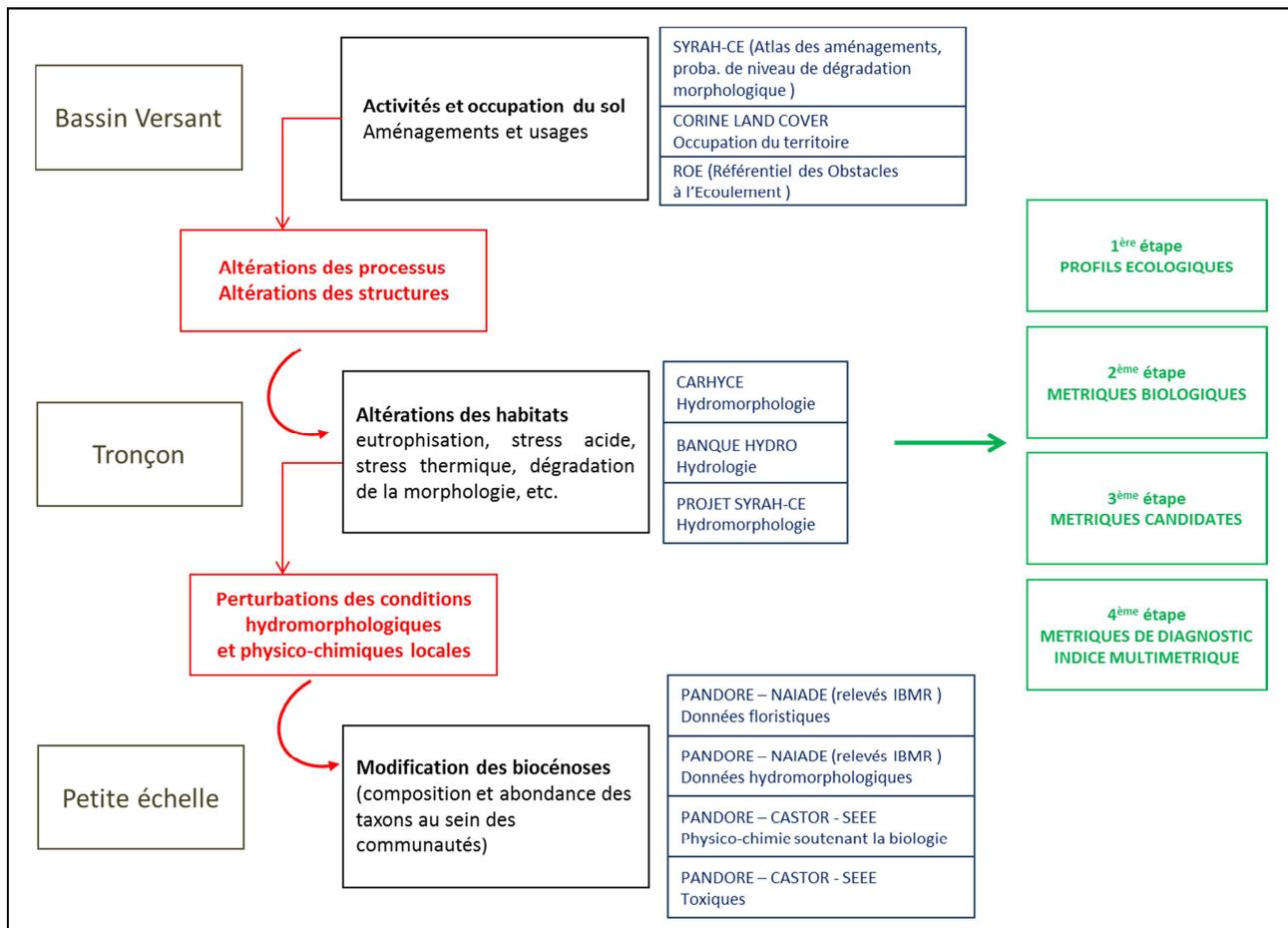


Figure 1 : Démarche pour la construction de métriques candidates et d'un indice multimétrique.

Echelle spatiale	Large échelle	Echelle intermédiaire		Petite échelle			
	Bassin Versant	Tronçon hydrographique		Station			
Modèle Pression /Impact	Causes de la pression	Pressions à l'échelle du tronçon		Pressions à l'échelle de la station		Impacts sur les communautés	
	Activités Occupation du sol Aménagements Usages	Altération des processus physico-chimiques	Altérations de l'hydromorphologie	Modifications des conditions physico-chimiques locales	Modifications de l'hydromorphologie locale	Traits fonctionnels	Groupes taxonomiques
Exemple	<i>Présence d'un ouvrage/seuil</i>	<i>Hausse de la température</i>	<i>Baisse de la vitesse du courant Augmentation de la profondeur</i>	<i>Augmentation de la température</i>	<i>Diminution de la vitesse du courant Augmentation de la profondeur</i>	<i>Taxons préférant les sédiments fins Taxons préférant les courants lents</i>	<i>Prépondérance des hydrophytes à feuilles flottantes Nymphaeid</i>
BASE DE DONNEES	<i>ROE, CLC, Syrah</i>	<i>Pandore (CASTOR)</i>	<i>SYRAH-CE CARHYCE BANQUE HYDRO</i>	<i>PANDORE (CASTOR)</i>	<i>PANDORE (relevé IBMR hydromorphologie)</i>	<i>PANDORE (relevé IBMR flore)</i>	

**Tableau 2: Exemple de l'impact d'une pression à large échelle sur les biocénoses à l'échelle locale et des données utilisables pour son évaluation.**

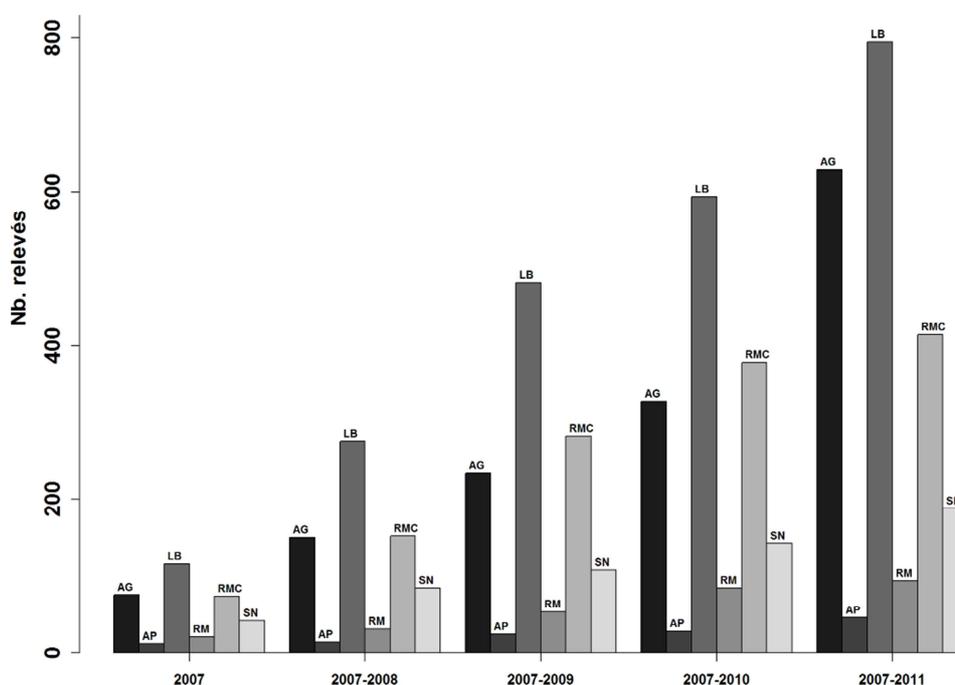
### 3 DONNEES

#### 3.1 La base de données « Macrophytes en Cours d'eau » (Pandore- Irstea)

##### 3.1.1 Bilan sur les données bancarisées depuis 2005

Les données disponibles dans la base Pandore "Macrophytes en cours d'eau" d'Irstea sont celles collectées de 2005 à 2011 par les Bassins et transmises à Irstea pour le développement de méthodes. Du fait des nécessaires étapes de transmissions-validations des relevés depuis les opérateurs (bureaux d'étude, laboratoire d'hydrobiologie des DREAL) via les Agence de l'Eau jusqu'à Irstea, un délai d'un an et demi est constaté entre la collecte des données sur le terrain et leur bancarisation dans la base Pandore Irstea (Chandesris *et al.*, 2009). Ainsi, les données 2012 n'ont pas pu être utilisées pour ces analyses (disponibles dans la base de données Pandore mi-2014 au plus tôt).

Après complément de la base avec les données collectées par relance auprès des Agences de l'Eau, ce sont de l'ordre de 1200 opérations de contrôle qui ont pu être rendues disponibles (campagnes 2009, 2010 et 2011 complètes). La quantité de données « macrophytes en cours d'eau » bancarisée a ainsi augmenté de 37% avec notamment un volume important en provenance des Bassins Adour-Garonne et Loire-Bretagne (**Figure 2**) sur des secteurs où les données faisaient jusqu'alors défaut.



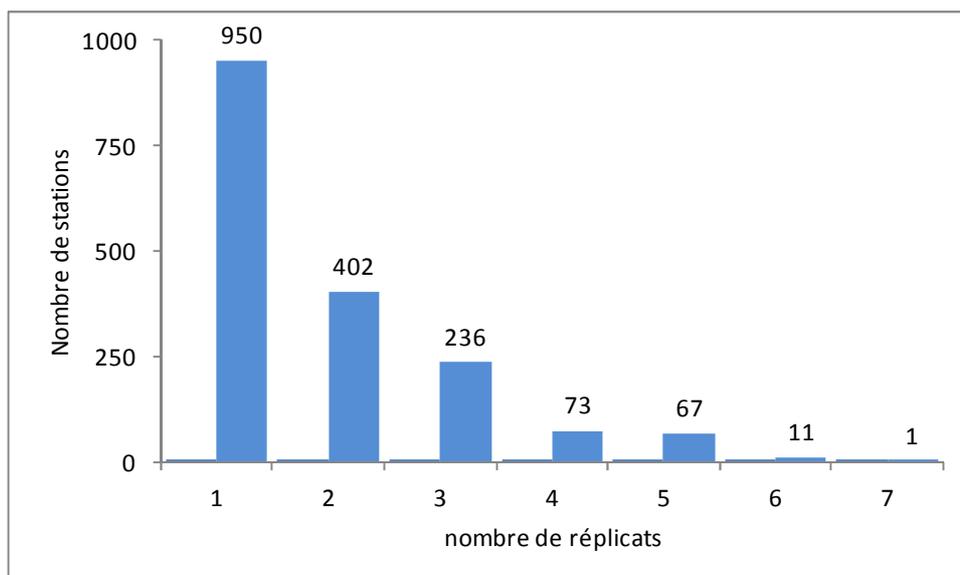
**Figure 2: Nombre de relevés IBMR cumulés par Bassin illustré par la période 2007 à 2011.**

Au 1<sup>er</sup> juillet 2013, les relevés bancarisés pour la période 2005 - 2011 représentent :

- 3162 opérations de contrôles ;
- sur 1740 stations ;
- dont 331 stations (84%) sur les 394 stations du réseau de référence ;
- 1183 stations (75%) sur les 1571 stations du réseau de surveillance.

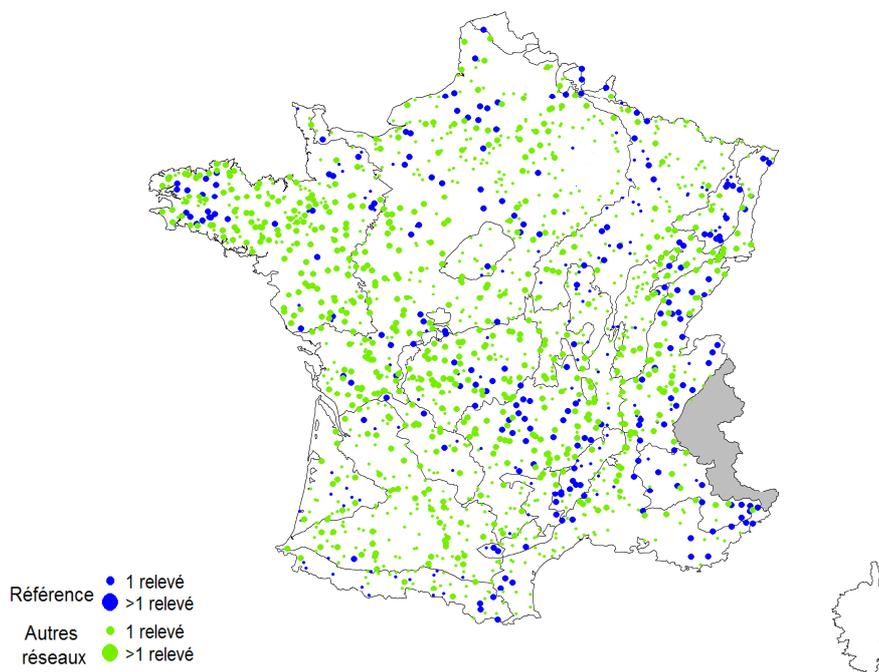
Si l'ensemble du réseau DCE est désormais correctement couvert, il existe une hétérogénéité concernant le nombre de répliqués par station (**Figure 3**) avec :

- 55% des stations (950) prélevées une seule fois ;
- 45% des stations (740) prélevées au moins deux fois ;
- 22% des stations (340) prélevées au moins trois fois.



**Figure 3: Nombre de répliqués « prélèvement macrophytes en cours d'eau » par station (Banque PANDORE au 31/09/2013).**

Concernant la couverture du territoire national, les nouvelles données bancarisées conduisent à une répartition plus homogène des données (Figure 4). Si l'HER Alpes Internes est exclue pour les macrophytes en cours d'eau, l'absence de données jusqu'à 2011 inclus sur le territoire Corse est à noter. Les premiers relevés IBMR ont été réalisés en Corse en 2012 et seront donc disponibles en 2014.



**Figure 4: Couverture nationale des données IBMR 2005 à 2011 (en gris, HER « Alpes Internes »).**

Si l'on considère la disponibilité des données IBMR en fonction des Types Nationaux de cours d'eau, et tel que signalé précédemment (Chauvin *et al.*, 2013), 64 types nationaux de cours d'eau ne sont pas inclus dans les sites de référence. Les petits (P) et les très petits (TP) cours d'eau sont davantage représentés (5 à 20 sites par types) que les cours d'eau moyens (M) et les grands (G) cours d'eau (2 à 7 sites par types). Malgré la bancarisation d'un

important volume de données, la représentation des types nationaux de cours d'eau demeure hétérogène avec une nette prédominance des petits cours d'eau (Figure 5 & Figure 6).

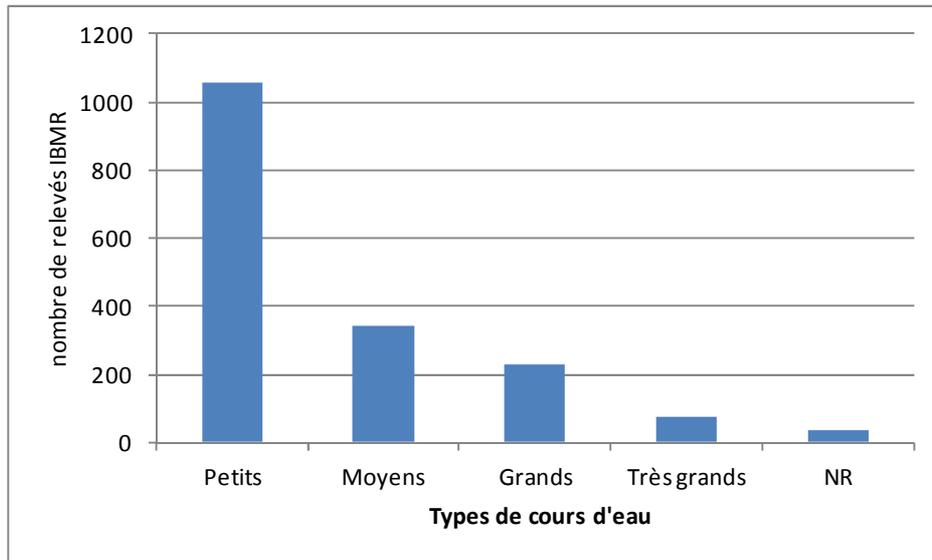


Figure 5: Distribution par classe de taille de cours d'eau des stations échantillonnées. (NR : Non Renseigné)

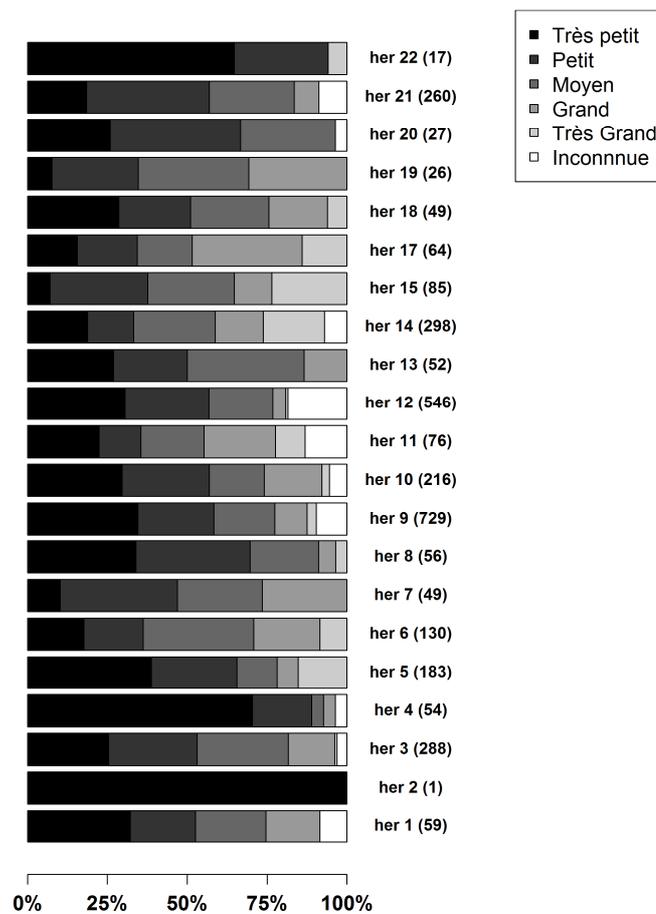


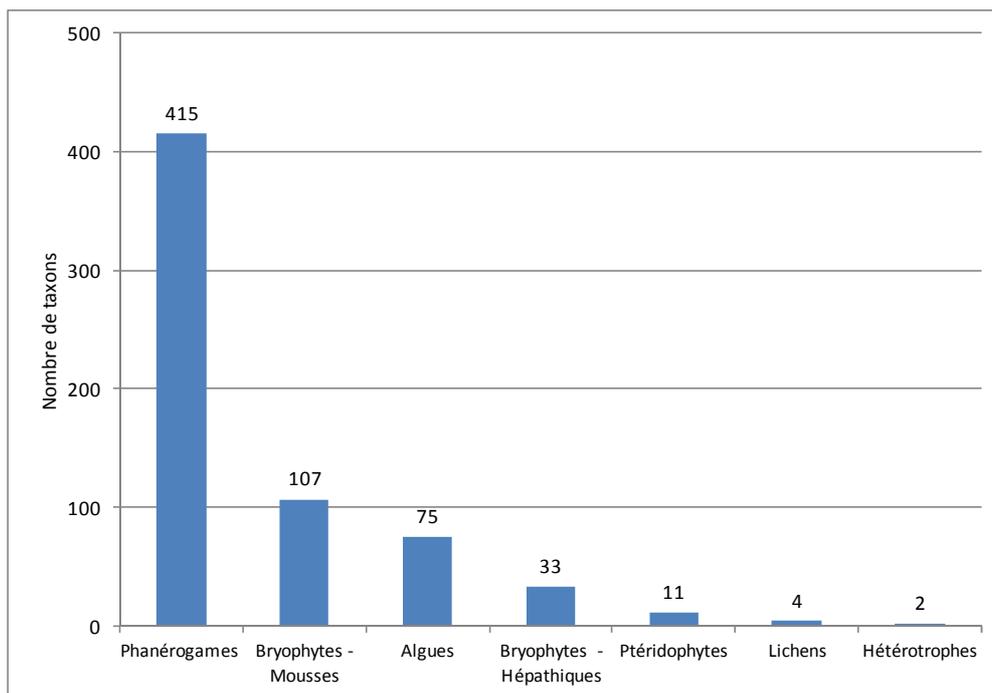
Figure 6: Distribution des relevés macrophytes par hydroécocorégion (her) et par classe de taille.

### 3.1.2 Données floristiques

#### 3.1.2.1 Etat des lieux

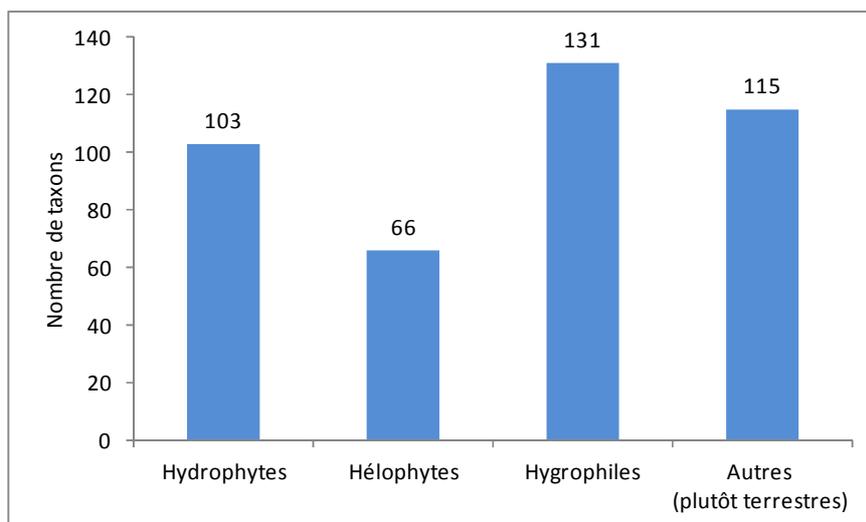
La base Pandore contient des données sur 647 taxons. Elles sont distribuées de la façon suivante (Figure 7):

- 64,1% de données sur les Phanérogames ;
- 21,6% sur les Bryophytes dont 16,5% sur les mousses et 5,1% sur les hépathiques ;
- 11,6 % sur les Algues ;
- 1,7% sur les Ptéridophytes ;
- moins de 1% sur les lichens et les hétérotrophes.



**Figure 7: Représentation des groupes taxonomiques dans la base de données Pandore.**

Parmi les données relatives aux Phanérogames, près d'un tiers (31,7%) sont des taxons hygrophiles. Ce sont des végétaux qui se développent dans des milieux où l'humidité édaphique est importante, mais pas nécessairement dans des conditions aquatiques. Ces espèces ne correspondent donc pas aux critères retenus pour identifier les « macrophytes », au sens défini pour les méthodes de bioindication portant sur cet élément biologique (CEN, 2004). Plus encore, parmi les Phanérogames, plus d'un quart (27,7%) sont des plantes qualifiées de « autres – plutôt terrestres » n'ayant pas d'affinité avec l'eau. Il s'agit de taxons communs ou rudéraux de la flore métropolitaine, se développant spontanément dans les friches, les décombres, le long des chemins comme par exemple *Convolvulus arvensis*, le Liseron des champs ou *Rubus fruticosus*, la ronce commune. La présence occasionnelle de ces taxons dans les relevés IBMR peut toutefois s'expliquer par les conditions hydrologiques parfois en limite des recommandations d'application du protocole (ligne d'eau significativement plus haute que celle du débit d'étiage). De même, certains cours d'eau ont un débit très variable, qui permet la colonisation du chenal par des espèces non aquatiques tolérantes à l'immersion temporaire. Rappelons que le protocole normalisé de relevé IBMR prévoit de prendre également en compte toutes les espèces herbacées visibles à l'œil nu et ayant contact avec l'eau au moment du relevé, qui doit être réalisé dans des conditions d'étiage. Dans l'optique d'identifier les relations entre les macrophytes et les conditions environnementales aquatiques, seules les espèces directement inféodées au milieu aquatique lui-même (le chenal dans le cas des cours d'eau) sont prises en considération.



**Figure 8 : Détails des phanérogames présents dans la base de données.**

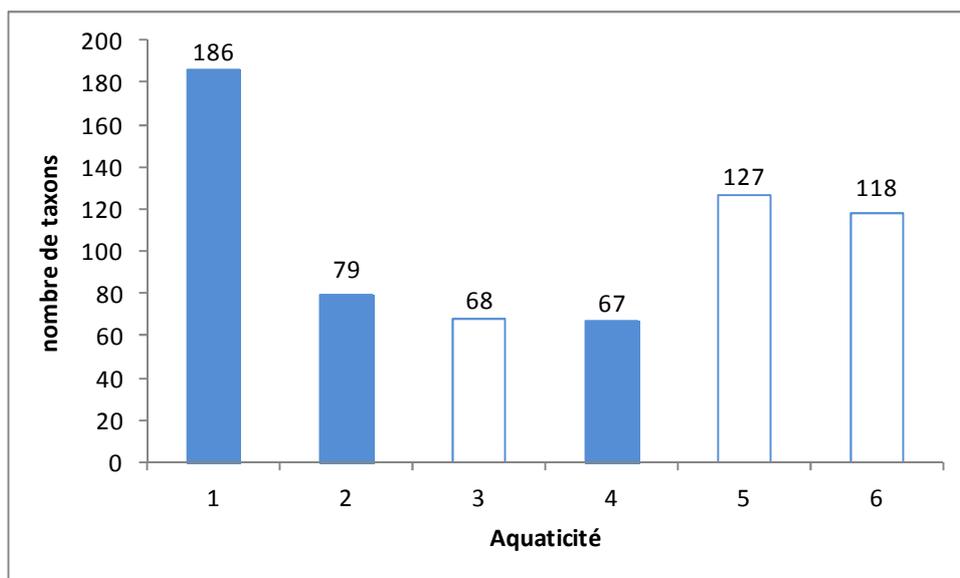
### 3.1.2.2 Pré-traitement des données floristiques

En premier lieu, une sélection a été effectuée sur la base de l'aquaticité de chaque taxon renseigné, afin de sélectionner ceux directement liés au chenal en eau. L'aquaticité (Tableau 3) est un attribut caractérisant l'affinité pour l'eau de chaque taxon. Développé pour la gestion des taxons regroupés dans la base de données commune des exercices d'intercalibration européenne, ce paramètre a été implémenté dans la base de données Pandore. Il est décrit par une valeur de 1 à 8 (Chauvin in Birk *et al.*, 2007). Les taxons d'aquaticité 1, 2 et 4 ont été retenus pour les analyses focalisant sur les macrophytes aquatiques, comme cela avait été fait dans les exercices d'intercalibration (Birk *et al.* 2007). Seuls sont donc conservés les taxons aquatiques ou hydrophytes (algues, bryophytes aquatiques, hydrophytes vasculaires), les végétaux amphibies ou amphiphytes qui se différencient des formes aquatiques et des accommodats terrestres selon la profondeur de l'eau, et les hélophytes, végétaux se développant " les pieds dans l'eau ".

Aquaticité	Affinité pour l'eau
1	Taxons exclusivement ou principalement aquatiques en conditions normales d'étiage
2	Taxons aquatiques présentant communément une forme terrestre et une forme aquatique, ou ou régulièrement amphibie
3	Bryophytes et lichens supra-aquatiques. Peuvent être immergés une partie de l'année
4	Hélophytes ou amphiphytes, normalement rencontrés le pied dans l'eau
5	Taxons hygrophiles, susceptibles d'être rencontrés le pied dans l'eau
6	Taxons herbacés rivulaires, forestiers, prairiaux ou rudéraux, accidentellement en position aquatique
7	Arbustes et arbres de la ripisylve (ligneux), pouvant être temporairement inondés
8	Taxons des eaux saumâtres et marais salants

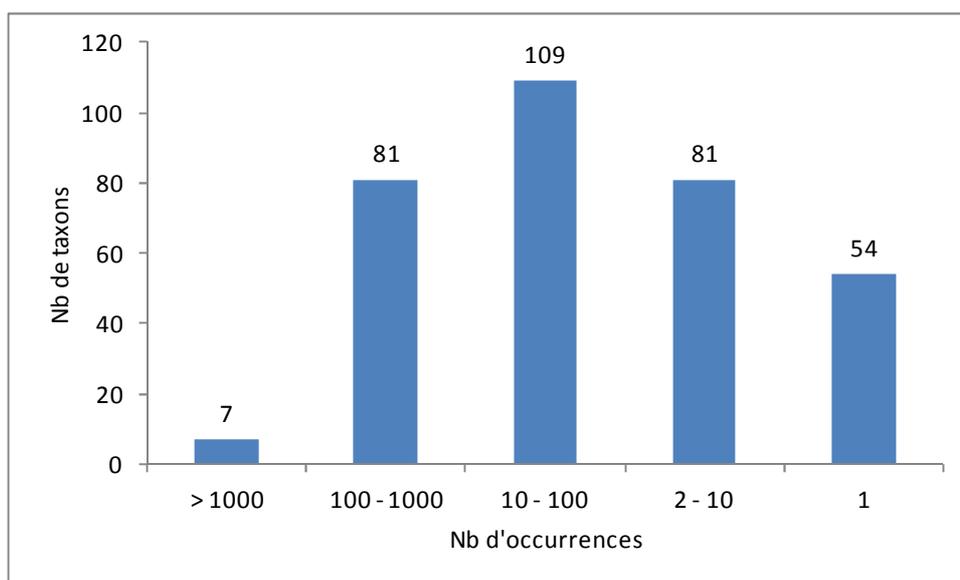
**Tableau 3 : Affinité pour l'eau et valeur d'aquaticité associée.**

Sur les 647 taxons ayant au moins une occurrence dans la base Pandore, 332 taxons présentent les conditions recherchées d'aquaticité avec 188 taxons d'aquaticité (1), 79 taxons d'aquaticité (2) et 68 taxons d'aquaticité (4) (Figure 9).



**Figure 9: Aquaticité des taxons présents (au moins une occurrence) dans Pandore.**

L'analyse de l'occurrence des 332 taxons d'aquaticité 1, 2 ou 4 dans la base Pandore (Figure 10) montre que 54 taxons n'apparaissent que dans un seul relevé et 135 taxons dans moins de 10 relevés. Seuls 88 taxons apparaissent dans plus de 100 relevés et 7 taxons (*Fontinalis antipyretica*, *Phalaris arundinacea*, *Leptodictyum riparium*, *Platyhypnidium riparoides*, *Vaucheria* sp., *Cladophora* sp., *Melosira* sp.) dans plus de 1000 opérations de contrôle.



**Figure 10: Occurrence des taxons d'aquaticité 1, 2 et 4 dans la base Pandore.**

Cet état des lieux doit alerter sur le fait que pour les taxons qui présentent de très faibles occurrences dans la base Pandore, le profil écologique établi ne présente pas une robustesse satisfaisante. Ces valeurs devront être confortées lors de l'acquisition de nouvelles données.

### 3.1.3 Données stationnelles

#### 3.1.3.1 Etat des lieux des données stationnelles

Rappelons que le protocole IBMR prévoit, sur chaque station, un relevé distinct sur deux « unités de relevé » (UR), qui regroupent respectivement les faciès les plus rapides de la station (UR 1) et les plus lents de la station

(UR 2). Sur chacune de ces deux unités de relevé, une description des conditions environnementales est réalisée conjointement au relevé floristique. La largeur du lit en 'eau doit être renseignée ainsi que la profondeur, la vitesse, la lumière et le type de substrat décrits (Tableau 4). Pour chaque paramètre, le recouvrement de chacune des modalités (Tableau 5) est exprimé selon 6 classes, de 0 à 5.

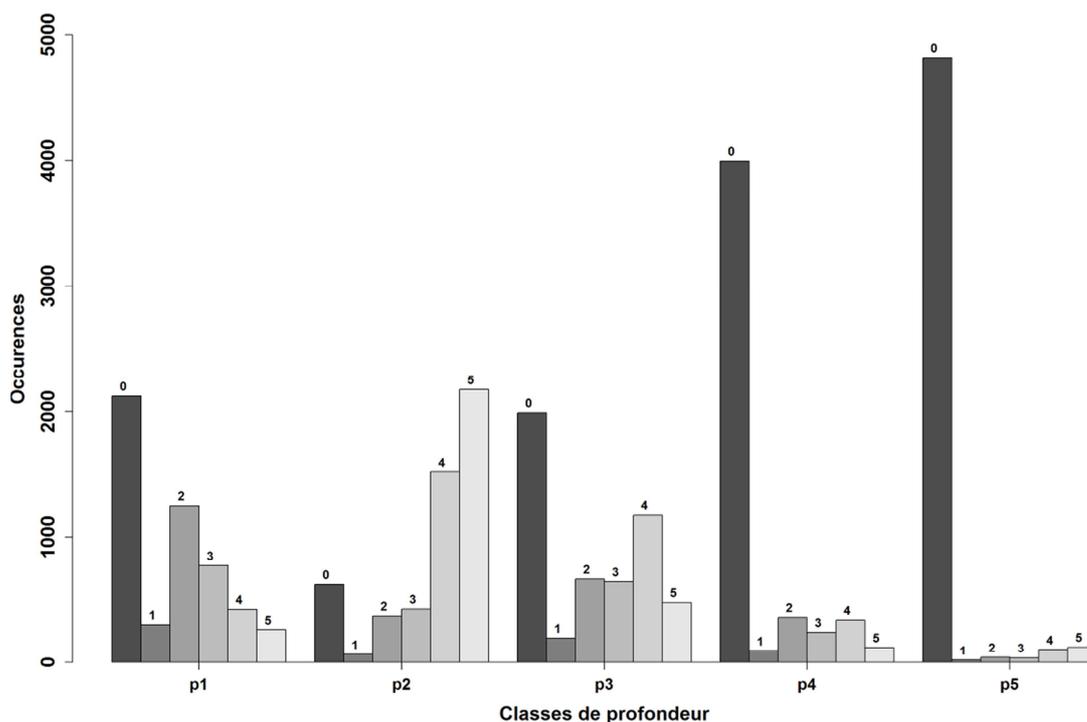
Paramètre	Modalité	Abréviation
Profondeur	< 0.1 m	P1
	[0.1 m – 0.5 m [	P2
	[0.5 m – 1 m [	P3
	[1 m – 2 m [	P4
	≥ 2 m	P5
Vitesse	< 0.05 m.s <sup>-1</sup>	V1
	[0.05 m.s <sup>-1</sup> – 0.2 m.s <sup>-1</sup> [	V2
	[0.2 m.s <sup>-1</sup> – 0.5 m.s <sup>-1</sup> [	V3
	[0.5 m.s <sup>-1</sup> – 1 m.s <sup>-1</sup> [	V4
	≥ 1 m.s <sup>-1</sup>	V5
Lumière	très ombragé	L1
	ombragé	L2
	peu ombragé	L3
	éclairé	L4
	très éclairé	L5
Substrat	terre – Marne - Tourbe	TMT
	vase - Limon	VL
	sable – Gravier	SG
	cailloux – Pierre	CP
	blocs – Dalles	BD
	artificiel	Art
	débris organiques	Dorg
	racine - branchage	Rbr

**Tableau 4 : Paramètres environnementaux décrits lors d'un relevé IBMR.**

Classes	Recouvrement
0	x = absent
1	x < 1%
2	1 ≤ x < 10%
3	10 ≤ x < 25 %
4	25 ≤ x < 75%
5	x ≥ 75%

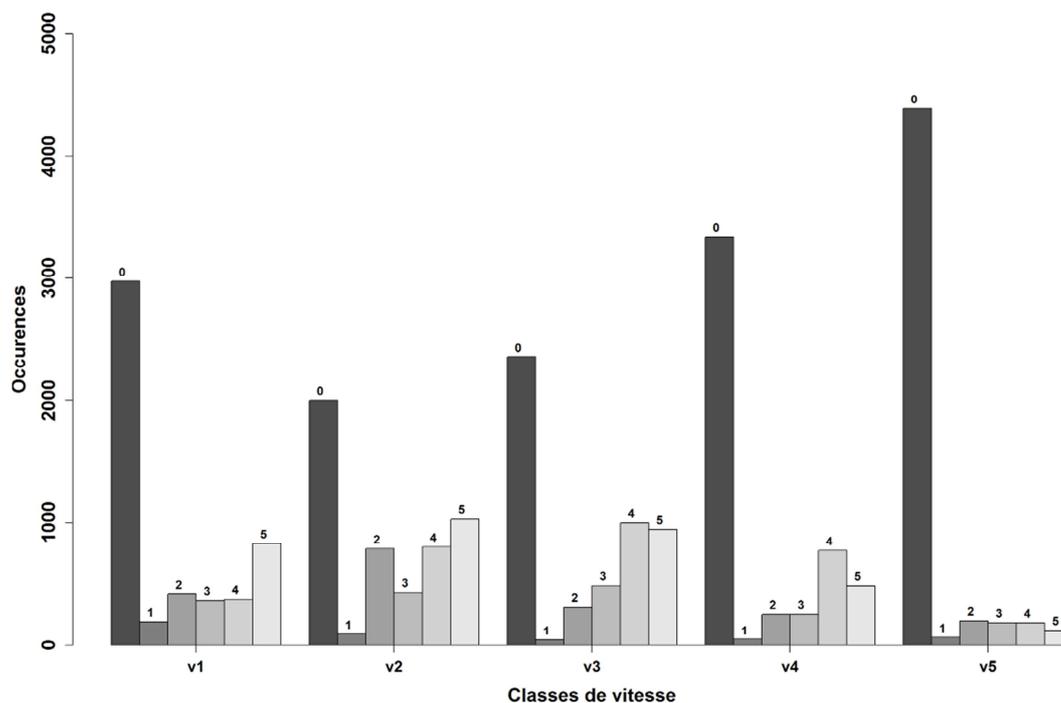
**Tableau 5: Classe de recouvrement des paramètres stationnels.**

Une analyse préliminaire des données a été effectuée afin d'étudier la représentation des modalités de chaque paramètre dans le jeu de données. La Figure 11 montre que les profondeurs P4 et P5 (≥1m) sont peu représentées. Ceci peut s'expliquer par la prépondérance des cours d'eau « très petit » (28%), « petits » (25%) et « moyens » (21%) dans le jeu de données (Figure 6 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).



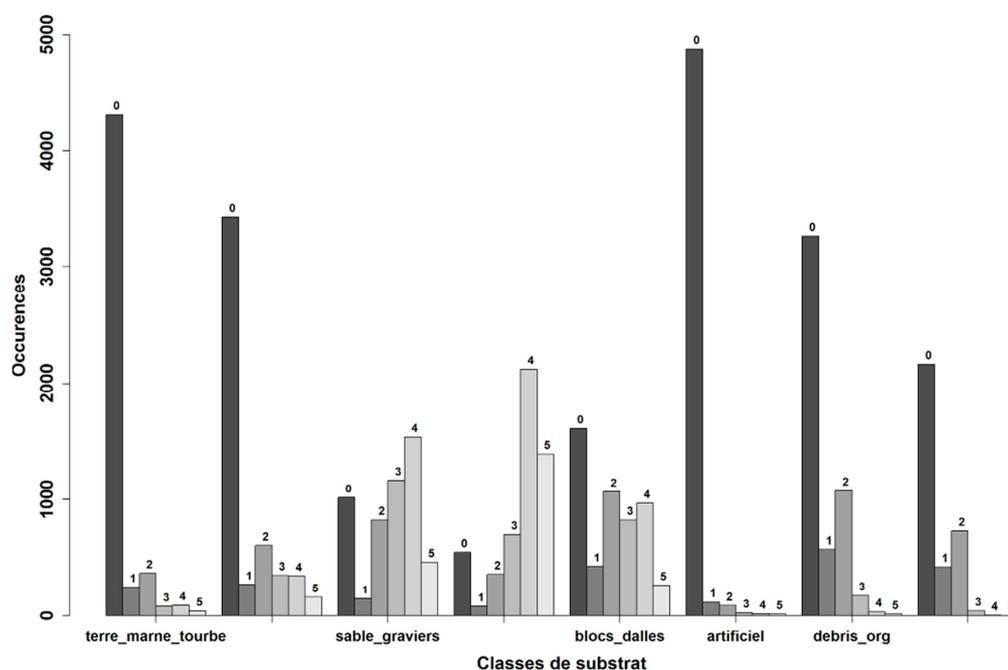
**Figure 11: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de profondeur.**

Concernant la vitesse (Figure 12), les modalités les plus fréquemment relevées sont V2 et V3 correspondant à des vitesses comprises entre 0.05 et 0.5 m.s<sup>-1</sup>. Les vitesses V1 ( $\leq 0.05$  m.s<sup>-1</sup>) correspondent à des situations d'eau stagnante. Les vitesses V4 et V5 ( $\geq 0.5$  m.s<sup>-1</sup>) correspondent à des courants rapides à très rapides. La modalité V5 ( $\geq 1$  m.s<sup>-1</sup>), correspondant à des situations de « rapide », est relevée dans moins de 20 % des relevés. En effet, dans la grande majorité des types de cours d'eau faisant l'objet de relevés « macrophytes », les faciès de cours d'eau à forte énergie sont peu représentés. Outre le fait que ces cours d'eau sont minoritaires à l'échelle du territoire national (zones de montagne), ils sont généralement exclus du suivi « macrophytes » car les peuplements végétaux qui s'y développent sont souvent très limités par ces conditions morphodynamiques sévères, voire absents, et ne peuvent donc pas être utilisés pour une évaluation d'état écologique. C'est ce qui explique par exemple que les macrophytes n'ont pas été intégrés dans la surveillance pour les cours d'eau de l'HER 2 - Alpes Internes (Chauvin, 2008).



**Figure 12: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de vitesse.**

La Figure 13 montre, qu'avec une occurrence de plus de 75% dans les relevés, ce sont les substrats de type « sable\_graviers », « cailloux\_pierre » et « bloc\_dalles » qui sont les plus fréquemment observés. Les substrats « terre-marne-tourbe », « vase-limons », « artificiel » ou « débris\_organiques » le sont plus ponctuellement.



**Figure 13: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de substrats.**

Pour la lumière (Figure 14), les classes extrêmes « très ombragé » et « très éclairé », sont les moins représentées (situations extrêmes, généralement très petits cours d'eau en sous-bois dense pour la première, et cours d'eau moyens ou grands sans végétation de bordure pour la seconde).

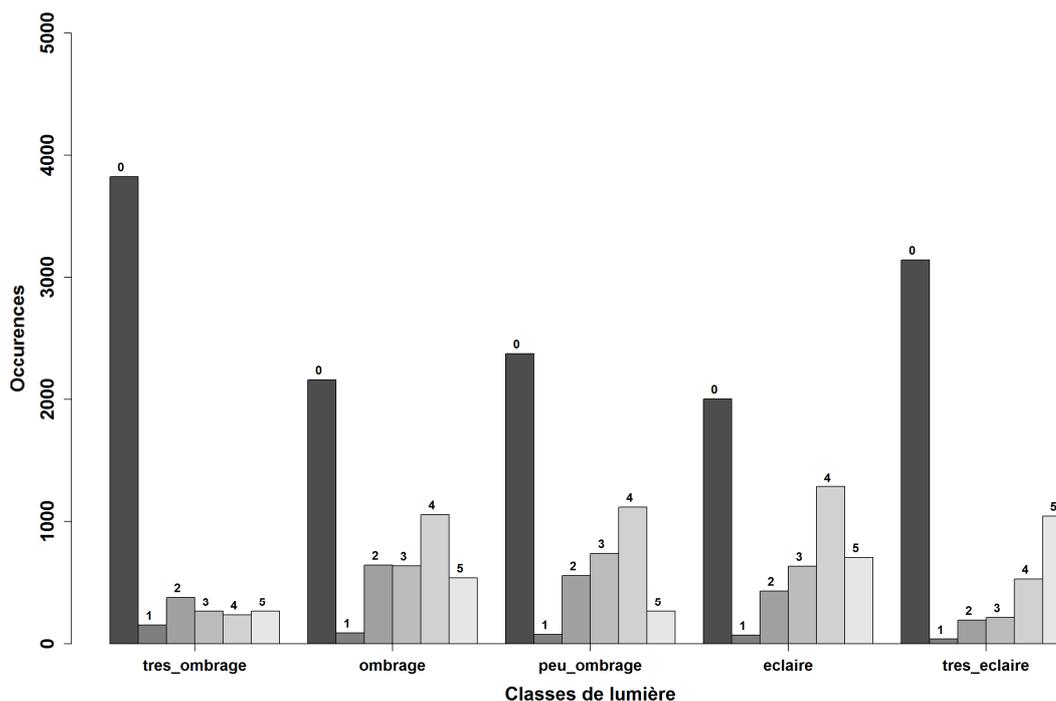


Figure 14: Occurrence des classes de recouvrement de chacune des modalités de lumière.

### 3.1.3.2 Pré-traitement des données stationnelles

Afin de pouvoir utiliser les données stationnelles présentées à l'état brut sous forme de classe de valeurs associée à une classe de recouvrement, des indices ont été établis de façon à obtenir pour chaque relevé et pour chaque unité de relevé, une valeur quantitative agrégée rendant compte des conditions hydromorphologiques observées. Ces indices ont été calculés comme la moyenne de la valeur médiane respective des classes de valeur pondérée par leur classe de recouvrement. Pour la vitesse, les valeurs médianes des classes sont (0,025), (0,125), (0,35), (0,75), (1) et pour la profondeur : (0,05), (0,3), (0,75), (1,5), (2).

Pour la lumière, des valeurs quantitatives ont été arbitrairement fixées pour décrire les différentes conditions qualitatives : de (0,2 – très ombragé) en passant par (0,4), (0,6), (0,8) jusque (1 – très éclairé). L'indice de luminosité (LumMoy) a été calculé à partir de la moyenne des recouvrements des modalités pondérée par des coefficients entre (0,2) et (1). Pour le substrat, l'indice « Bed Calibre Index » ou BedCal a été calculé (O'Hare *et al.*, 2011) en pondérant par des coefficients compris entre (-8) et (+9) par granulométrie décroissante les recouvrements exprimés en pourcentage de chacun des substrats. En complément du BedCal, trois autres indices portant sur les recouvrements en substrats fins, substrats grossiers et substrats organiques (SubFin, SubGro et SubOrg) ont été calculés (Tableau 6).

Indice	Formule	Commentaire d'interprétation
Vitesse	$V_{moy} = v1 \times 0.025 + v2 \times 0.125 + v3 \times 0.35 + v4 \times 0.75 + v5 \times 1$	Indice compris entre 0,025 et 1 du moins au plus rapide
Profondeur	$P_{moy} = p1 \times 0.05 + p2 \times 0.3 + p3 \times 0.75 + p4 \times 1.5 + p5 \times 2$	Indice compris entre 0,05 et 1 du moins au plus profond
Lumière	$L_{moy} = L1 \times 0.2 + L2 \times 0.4 + L3 \times 0.6 + L4 \times 0.8 + L5 \times 1$	Indice compris entre 0,2 et 1 du plus ombragé au plus éclairé
BedCal	$BedCal = -8 \times BD - 7 \times CP - 2.5 \times SG + 1.5 \times VL + 9 \times TMT$	Indice compris entre -8 et 9 des substrats gros à fins
SubFin	$SubFin = VL + TMT$	Indice de recouvrement des substrats fins (en %)
SubGros	$SubGros = BD + CP$	Indice de recouvrement des substrats grossiers (en %)
SubOrg	$SubOrg = Dorg + RBr$	Indice de recouvrement des substrats organiques (en %)

Tableau 6: Indices calculés d'après les données stationnelles brutes.

Le Tableau 7 présente les valeurs caractéristiques (Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale ; Med : valeur médiane ; Moy : moyenne ; sd : écart-type ; Nb : nombre de données) des différents indices établis pour l'analyse des données stationnelles. L'examen de ces valeurs montrent que SubFin et SubOrg ont une médiane à 0 ce qui signifie que dans plus de 50% des relevés, ces indices ont une valeur nulle et que des substrats fins et organiques n'ont pas été observés.

	Min	Max	Med	Moy	sd	Nb
Vmoy	0.025	1.000	0.238	0.314	0.256	5148
Pmoy	0.050	2.000	0.385	0.492	0.361	5159
LumMoy	0.200	1.000	0.650	0.659	0.199	5160
BedCal	-8.000	9.000	-5.313	-4.644	2.279	5158
SubFin	0.000	100.000	0.000	11.015	17.482	5073
SubGros	0.000	100.000	54.545	54.955	25.374	5103
SubOrg	0.000	55.556	0.000	9.440	11.425	3344
largeur	0.100	440.000	8.000	15.276	25.818	5126

**Tableau 7: Valeurs caractéristiques des indices établis pour l'analyse des données stationnelles.**

Afin de vérifier la validité des indices substrats, des tests statistiques de corrélation de Spearman ont été réalisés. Deux indices sont corrélés lorsque le coefficient de corrélation est supérieur en valeur absolue à 0.8 et que la valeur de robustesse du test ou  $p$ -value est inférieure à 0,01. Les résultats (Tableau 8) montrent que les corrélations attendues pour valider les indices sont vérifiées avec une corrélation significative entre l'indice BedCal et les indices SubFin et SubGros : plus le substrat est fin et plus le BedCal est faible et, inversement, plus le substrat est grossier et plus le BedCal est élevé. Le BedCal est donc un bon indicateur de la nature du substrat observé dans les stations.

Para1	Para2	Spearman	p-value
BedCal	SubFin	0.80	<<0.01
BedCal	SubGros	-0.90	<<0.01

**Tableau 8: Résultats des tests de corrélation de Spearman entre paramètres et indices « substrat ».**

### 3.2 Données complémentaires à celles des relevés IBMR

Les données abiotiques complémentaires à celles des données stationnelles collectées lors des relevés IBMR, issues de plusieurs bases de données à échelle nationale, ont été utilisées :

- Données physico-chimiques : tables Castor de la base de données PANDORE d'Irstea et base de données du Système d'Evaluation de l'Etat des Eaux (SEEE – ONEMA). Ces deux bases sont en principe corrélées, mais des différences parfois significatives ont conduit à croiser les deux ;
- Données hydrologiques de la Banque Hydro, Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie, disponible via l'interface web [hydro.eaufrance.fr](http://hydro.eaufrance.fr). Accès aux débits caractéristiques et à l'historiques des stations de mesure limnimétrique. Données du projet « Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau » ou SYRAH-CE (Irstea – ONEMA ; Chandesris *et al.*, 2009 ; Valette *et al.*, 2010) ayant pour objectif de recueillir des données sur les aménagements et usages (pressions) impactant potentiellement le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau et résultant en un atlas ou ensemble de cartes de description des aménagements et des usages et une évaluation des probabilités de dégradation des cours d'eau pouvant en résulter.

A partir des données hydrologiques et hydromorphologiques collectées dans les différentes bases de données, d'autres paramètres ont également été calculés.

Les données de base la nationale CarHyCE (Caractérisation de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau - ONEMA) ont été collectées. Le volume des données requiert un important pré-traitement avant d'être utilisé pour le développement de métriques « macrophytes en cours d'eau ». C'est un travail qui est en cours et qui sera complété par des collaborations avec les équipes ayant déjà travaillé sur cette base de données pour développer des indices intégrés rendant compte des conditions hydromorphologiques.

Une exploitation ultérieure du Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (R.O.E) constitué par l'ONEMA (Léonard *et al.*, 2013) est également programmé. Le R.O.E stocke des données géographiques de localisation des ouvrages de types barrage, seuil en rivière, digue longitudinale, obstacle induit par un pont, épis en rivière ou encore grille de pisciculture.

Enfin, le Référentiel « Stations de Mesure » du Sandre a été utilisé pour collecter les données géographiques (coordonnées et altitude) sur les stations.

### 3.2.1 Données physico-chimiques de la base Castor (Irstea ; SEEE)

Dans le cadre de suivis hebdomadaires, mensuels ou annuels au sein du réseau de stations de mesure DCE, des données physico-chimiques soutenant la biologie sont collectées ainsi que des données relatives aux toxiques (Bougon *et al.*, 2011).

Dans cette première phase du travail, les toxiques n'ont pas été intégrés. En effet, étant donné le grand nombre de paramètres suivis, un test préalable de la réponse des indicateurs Macrophytes aux toxiques par grandes catégories (micropolluants minéraux ; micropolluants organiques : HAP, PCB, pesticides, etc.) paraît nécessaire avant d'engager des analyses plus fines par familles chimiques. La réponse graduée aux toxiques n'étant pas a priori la plus pertinente à attendre des indicateurs macrophytes qui ont été développés (orientation principalement « niveau trophique »), l'exploration du lien toxiques / peuplements macrophytiques n'est pas considérée actuellement comme prioritaire.

Pour les paramètres physico-chimiques soutenant la biologie, des travaux préalables (Chauvin *et al.*, 2013) ont permis de réaliser une première sélection de paramètres pour lesquels les données sont suffisantes et pertinentes pour soutenir les données « macrophytes en cours d'eau » :

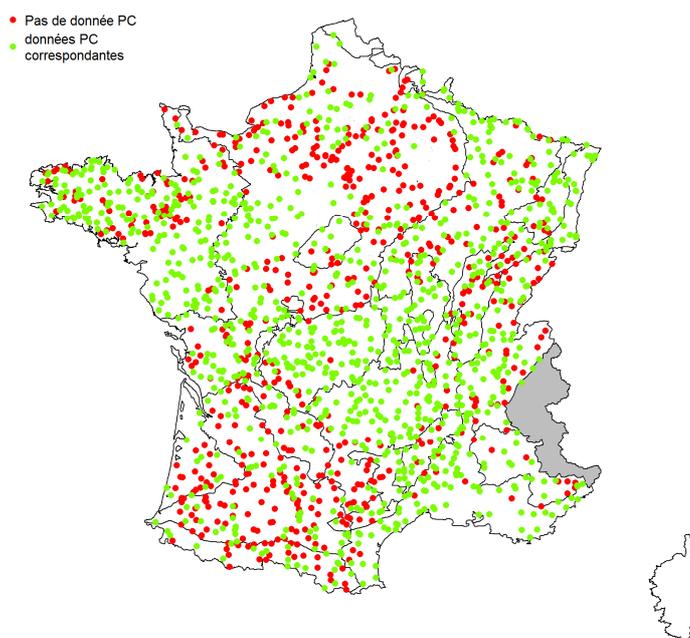
- Minéralisation : conductivité, pH, hydrogénocarbonates ( $\text{HCO}_3$ ), calcium, titre alcalimétrique complet (TAC), magnésium, dureté ;
- Niveau trophique : Demande Biologique en Oxygène à 5 jours (DBO5), carbone organique (Corg), ammonium ( $\text{NH}_4$ ), orthophosphates ( $\text{PO}_4$ ), matières en suspension (MES), nitrates ( $\text{NO}_3$ ) ; Phosphore total (Pt) ;
- Température de l'eau (Temp).

Les données physico-chimiques propres à ces paramètres ont été collectées dans la base de données Castor d'Irstea pour la période 2004 à 2009 et dans le SEEE pour l'année 2010. Les données 2011, en cours de validation avant intégration au SEEE, n'étaient pas disponibles. Sur le jeu de données physico-chimiques ainsi constitué, seules les données collectées pendant la période de développement de la végétation (de mai à octobre inclus) ont été conservées dans l'analyse. Ce choix a été fait sur l'hypothèse que le développement des peuplements végétaux aquatiques est principalement conditionné par les facteurs environnementaux du début de saison végétative, qui permettent aux peuplements de s'établir et de développer. Afin de focaliser au mieux sur la compréhension de la réponse de ces biocénoses, ce sont donc les conditions physico-chimiques de cette période qui ont été caractérisées pour l'analyse.

De plus, les données en dessous des seuils de « limite de quantification » ont été exclues. Ce choix introduit un biais (amplification du poids des plus fortes valeurs), mais la qualité des données sur les valeurs faibles était trop hétérogène pour permettre d'appliquer une règle suffisamment fiable (comme celle du 1/3 de la LQ qui est généralement utilisée pour quantifier ces faibles valeurs dans les analyses numériques).

Le jeu de données physico-chimiques pour la période 2004 - 2010 porte sur 10946 valeurs physico-chimiques réparties sur 4544 stations. Une recherche de correspondance entre stations disposant de données IBMR et de données physico-chimiques a été effectuée : 45% des 3162 relevés IBMR ont des mesures physico-chimiques correspondantes (Figure 15 & Tableau 9). L'accès aux données de 2011 via le SEEE devrait permettre de disposer de données sur l'ensemble des paramètres pour plus de 60% des opérations de contrôle IBMR et des données sur les paramètres élémentaires (pH, Conductivité, et température) sur plus de 75% des données. Pour chaque paramètre et pour chaque station, une valeur médiane annuelle a été calculée.

Certains paramètres physico-chimiques pouvant être redondants, des tests de corrélations de Spearman ont été effectués. Comme attendu, le calcium, la dureté, les hydrogénocarbonates et le TAC sont des paramètres très corrélés (Annexe 1) ; seules les données calcium ont été conservées dans la suite des analyses. De même les valeurs de phosphore total et des orthophosphates sont corrélées. Seules les données sur les orthophosphates ont été utilisées, prenant en considération leur impact *a priori* plus direct sur le développement des végétaux (formes de phosphore biodisponible).



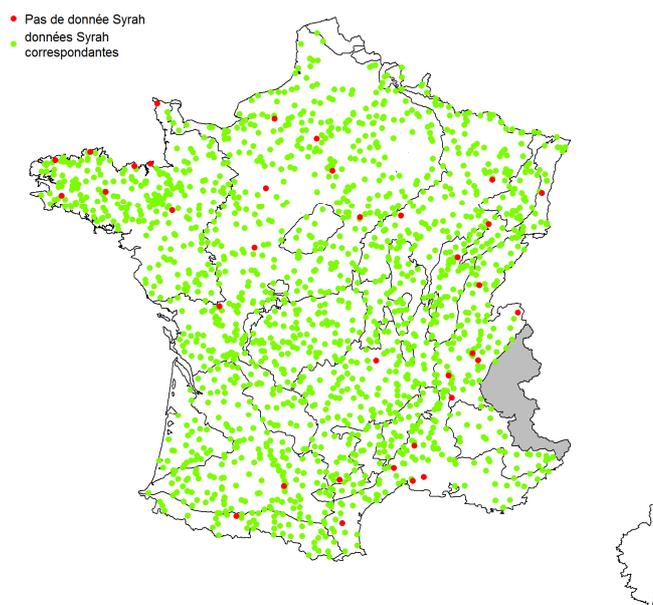
**Figure 15: Carte des correspondances entre stations échantillonnées pour le compartiment « macrophytes en cours d'eau » et disponibilité des données physico-chimiques.**

	Min	Max	Med	Moy	sd	Nb
Calcium	0.700	470.000	40.000	51.354	43.172	1689
C org	0.300	16.000	3.000	3.440	2.012	1825
DBO5	0.500	11.000	1.450	1.708	0.903	1693
Dureté	0.200	123.000	13.800	16.062	12.090	1557
HCO3	3.400	457.000	107.000	140.896	109.830	1507
Mg	0.150	81.500	5.200	6.752	6.217	1688
MES	1.000	965.000	6.700	10.044	25.749	1808
NO3	0.100	81.000	8.200	13.220	12.492	1830
NH4	0.010	4.650	0.070	0.106	0.184	1527
pH	4.275	9.050	7.790	7.703	0.433	1843
PO4	0.010	6.680	0.100	0.157	0.290	1640
Ptot	0.005	515.015	0.060	0.389	12.504	1696
Temp	5.355	22.900	14.800	14.537	2.775	1843
TAC	0.050	7.500	2.040	2.442	1.760	1434
Cond	14.000	3845.000	322.500	365.321	293.291	1843

**Tableau 9: Valeurs caractéristiques des données physico-chimiques disponibles pour des stations ayant fait l'objet de relevés IBMR.**

### 3.2.2 Données hydromorphologiques du projet Syrah-CE (Irstea – ONEMA)

Les données du projet SYRAH-CE sont disponibles sous forme de couches géographiques ArcGis. Le réseau hydrographique français est y représenté par tronçons auxquels sont attribués des mesures de paramètres hydrologiques et hydromorphologiques. Les données ont été compilées par jointure spatiale avec les points de prélèvement IBMR avec la nécessité de quelques vérifications orthographiques et géographiques. Des données du projet SYRAH-CE ont ainsi pu être rattachées à 1699 des 1740 stations ayant fait l'objet d'un relevé IBMR (Figure 16). Le Tableau 10 présente les valeurs caractéristiques des données du projet « SYRAH-CE » collectées.



**Figure 16: Carte des correspondances entre les stations IBMR et les données du projet SYRAH-CE.**

Paramètres	Min	Max	Médiane	Moyenne	sd	Nb
superficie du BV amont (en km <sup>2</sup> )	0.265	108758.00	191.78	1797.03	7098.66	1698
pente du lit mineur (en %)	0.004	19.32	0.22	0.63	1.45	1678
pente de la vallée (en %)	0.023	19.01	0.57	1.14	1.76	1699
largeur de plein bord (en m)	1.500	422.00	9.50	20.88	34.79	1692
largeur de fond de vallée (en m)	25.427	19647.00	337.26	957.13	1888.63	1699
rang de Strahler	1.000	8.00	3.00	3.24	1.41	1699

**Tableau 10: Valeurs caractéristiques des données du projet « SYRAH-CE » analysées.**

Des tests de corrélation de Spearman ont été effectués afin de retirer du jeu de données les paramètres redondants (Tableau 11). Parmi les paramètres testés, la surface du bassin versant, la largeur de plein bord et le rang de Strahler ont des coefficients de Spearman supérieurs à 0,8 signifiant de forte colinéarité entre eux. Les couples « pente du lit mineur / pente du fond de vallée » et « surface du bassin versant / pente du lit mineur » ont également des coefficients élevés (respectivement 0,71 et 0,69). Le paramètre « pente du fond de vallée » a été retiré du jeu de données.

	Larg_fdv	Pente_lit	Pente_val	Surf_BV	largeur_PB
Larg_fdv	-	-	-	-	-
Pente_lit	-0.62 ***	-	-	-	-
Pente_val	-0.47 ***	0.71 ***	-	-	-
Surf_BV	0.51 ***	-0.69 ***	-0.35 ***	-	-
largeur_PB	0.4 ***	-0.49 ***	-0.13 ***	0.83 ***	-
Rang de Strahler	0.413***	-0.53***	-0.14***	0.85***	0.94***

**Tableau 11: Corrélation de Spearman entre les valeurs des paramètres du projet SYRAH-CE sur les stations IBMR (\*\*\*) p-value<0.001).**

### 3.2.3 Données de la banque « Hydro » (Eau France)

Les données de la banque Hydro collectées portent sur certains valeurs caractéristiques du régime des cours d'eau (Riffard *et al.*, 2012) :

- Le QMNA<sub>5</sub> (Q5MOY\_MN) : le QMNA est le débit (Q) mensuel moyen (M) minimal (N) de chaque année civile (A). Il se calcule, par définition, à partir d'un mois calendaire. Le QMNA<sub>5</sub> (5 ans) est le « débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée ». Bien que moins représentatif hydrologiquement qu'une moyenne ajustée à une période réelle (VCN<sub>30</sub>, par exemple), il est largement utilisé dans la caractérisation des valeurs d'étiage (y compris dans les applications réglementaires).;
- Le module (QAMOY\_MN) : débit moyen interannuel calculé à partir de chaque année hydrologique sur l'ensemble de la période d'observation de la station. Ce débit donne une indication sur le volume annuel écoulé et donc sur la production du bassin-versant..

Les données sont disponibles par tronçon hydrographique de la base de données IGN du réseau français *Carthage*. Elles ont pu être compilées avec les données du projet SYRAH-CE à l'aide de l'identifiant *Carthage*. Ceci a permis de faire le lien entre données de la banque Hydro et 1626 stations des 1740 ayant fait l'objet d'un relevé IBMR (Tableau 12 & Figure 17).

Afin de vérifier la validité de la compilation des données issues de la banque Hydro et celles issues du projet SYRAH-CE, un test de corrélation a été réalisé entre les données de surface du bassin versant (données du projet SYRAH-CE) et la donnée QAMOY\_MN (données de la banque Hydro). Le coefficient de corrélation de 0.84 ( $p < 0.01$ ) indique une bonne corrélation des données issues des deux banques et donc une bonne compilation de celles-ci.

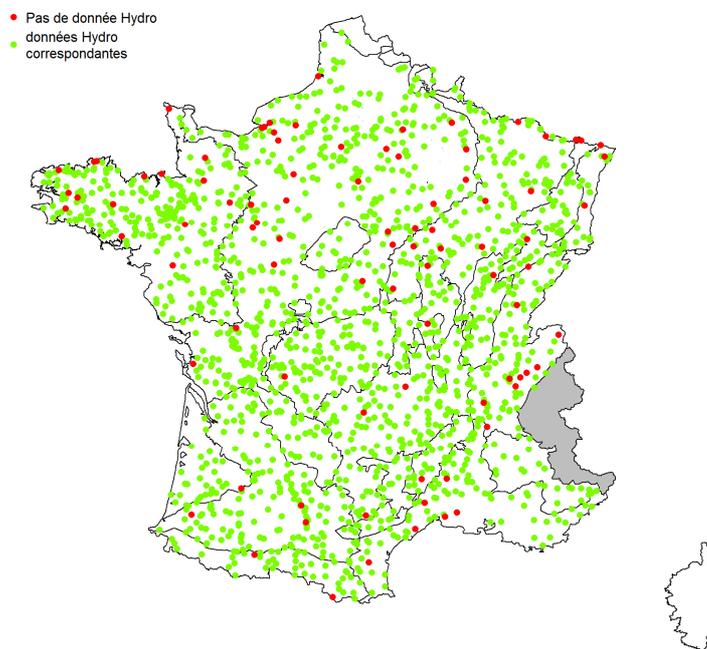


Figure 17: Carte des correspondances entre point de prélèvement IBMR et données de la banque Hydro.

	Min	Max	Mediane	Moyenne	sd	Nb
QAMOY_MN	0	1558.457	2.062	25.903	115.754	1626
Q5MOY_MN	0	492.426	0.212	6.247	35.084	1626

Tableau 12: Valeurs caractéristiques des données hydrologiques collectées dans la banque Hydro.

### 3.2.4 Données hydromorphologiques calculées

Un indice permettant de décrire la variabilité du régime des cours d'eau au cours d'une année a été construit. Il s'inspire des données des indices décrits dans la littérature scientifique sur les relations entre débits et peuplements de macrophytes (Riis *et al.*, 2008 ; Mebane *et al.*, 2013 ). Nommé QAQ5, il correspond au ratio entre le débit d'étiage Q5MOY\_MN et le module QAMOY\_MN. Ce nouvel indice doit permettre de mesurer la stabilité hydrologique annuelle et ainsi rendre compte des fluctuations de débits auxquelles peuvent être soumis les macrophytes.

$$QAQ5 = \frac{Q5MOY\_MN}{QAMOY\_MN}$$

Un indice SSP<sub>étiage</sub>, dérivé de l'indice SSP « Specific Stream Power » ou Energie Potentielle Spécifique (Brookes, 1988; Malavoi *et al.*, 2010; O'Hare *et al.*, 2011) a été construit. Dans la littérature, l'Energie Potentielle Spécifique ou SSP, qui rend compte des forces exercées par le cours d'eau sur le fond et les berges par unité de largeur, est calculée à partir du débit de crue et de la largeur de plein bord pour estimer la capacité de restauration ou d'évolution du cours d'eau. L'indice SSP<sub>étiage</sub> est calculé selon la même formule dans les conditions d'étiage (respectivement Q5MOY\_MN et largeur du relevé IBMR) pour rendre compte des forces exercées par le cours d'eau sur le fond et les berges pendant la période de végétation.

L'indice SSP<sub>étiage</sub> est calculé d'après la formule:

$$SSP_{\text{étiage}} = \frac{\rho \times g \times Q5MOY\_MN \times S}{\text{largeur}}$$

Avec :

- SSP<sub>étiage</sub> (en W.m<sup>-1</sup>) l'énergie potentielle spécifique d'étiage ;
- Q5MOY\_MN (en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), le débit d'étiage issu de la banque Hydro ;
- S (en m.m<sup>-1</sup>), la pente du lit mineur extraite des données du projet SYRAH-CE (en faisant l'approximation que la pente du lit mineur et la pente de la ligne d'eau sont équivalentes) ;
- la largeur (en m) du cours d'eau relevée lors de l'opération de contrôle IBMR (réalisée à l'étiage) ;
- ρ, la densité de l'eau (1000 kg.m<sup>-3</sup>) ;
- g l'accélération due à la gravité (9.81 m.s<sup>-2</sup>).

Le Tableau 13 présente les valeurs caractéristiques des indices calculés.

	Min	Max	Mediane	Moyenne	sd	Nb
QAQ5	0	0.671	0.104	0.139	0.112	2982
SSP <sub>étiage</sub>	0	104.55	0.688	2.319	4.645	2931

**Tableau 13 : Valeurs caractéristiques des paramètres hydromorphologiques calculés.**

### 3.2.5 Données géographiques (Référentiel National « Stations de Mesure »- Sandre)

Les données sur l'altitude des stations ont également été collectées pour être utilisées comme un des éléments du profil écologique des taxons. Les coordonnées géographiques (Lambert II étendu) des stations ont été collectées afin d'établir, pour chaque taxon, une carte de répartition accompagnant leur profil écologique.

### 3.3 Synthèse sur les données abiotiques collectées et calculées

Le Tableau 14 présente une synthèse des données collectées ou calculées pour la conduite des analyses devant conduire à l'établissement du profil écologique des taxons et au développement de métriques de diagnostic.

Echelle	Source	Nature des données	Paramètres	Abréviations	Analyses
Petite échelle (station)	Pandore	Données hydromorphologiques des relevées IBMR ou calculées	Profondeur	Pmoy	P
			Vitesse d'écoulement	Vmoy	
			Lumière	LumMoy	
			% recouvrement substrats grossiers	SubGro	
			% recouvrement substrats fins	SubFin	
			% de recouvrement substrat organiques	SubOrg	
			Bed Calibre Index	BedCal	
		Largeur	Largeur	M	
	Castor SEEE	Données physico-chimiques	Ammonium	NH <sub>4</sub>	P
			Conductivité	Conductivité	
			Calcium	Calcium	
			Carbone organique	Carbone org.	
			DBO5	DBO5	
Magnésium			Mg		
Matières en suspension			MES		
Nitrates			NO <sub>3</sub>		
Orthophosphates			PO <sub>4</sub>		
pH			pH		
	Température	Température			
Sandre	Référentiel Station de Mesure	Altitude	Altitude	P	
		Coordonnées géographiques	Coord.		
Large échelle (tronçons et bassin versant)	Projet SYRAH-CE	Données hydromorphologiques	Superficie du bassin versant amont	Surf_BV	M
			Largeur de plein bord	Largeur_PB	
			Pente du lit mineur	Pente_lit	
			Rang de Strahler	Rang de Strahler	
	Banque Hydro	Données hydrologiques	Module	QAMOY_MN	M
			Débit d'étiage	Q5MOY_MN	
	Projet SYRAH-CE Banque Hydro Pandore	Données hydrobiologiques calculées	Stabilité hydrologique	QAQ5	P et M
Energie Potentielle Spécifique à l'étiage			SSP étiage	M	

**Tableau 14 : Facteurs abiotiques retenus pour l'établissement des profils écologiques (P) et le test des métriques (M).**

## 4 PROFIL ECOLOGIQUE DES TAXONS

### 4.1 Construction des profils écologiques

#### 4.1.1 Discrétisation des paramètres hydromorphologiques et physico-chimiques

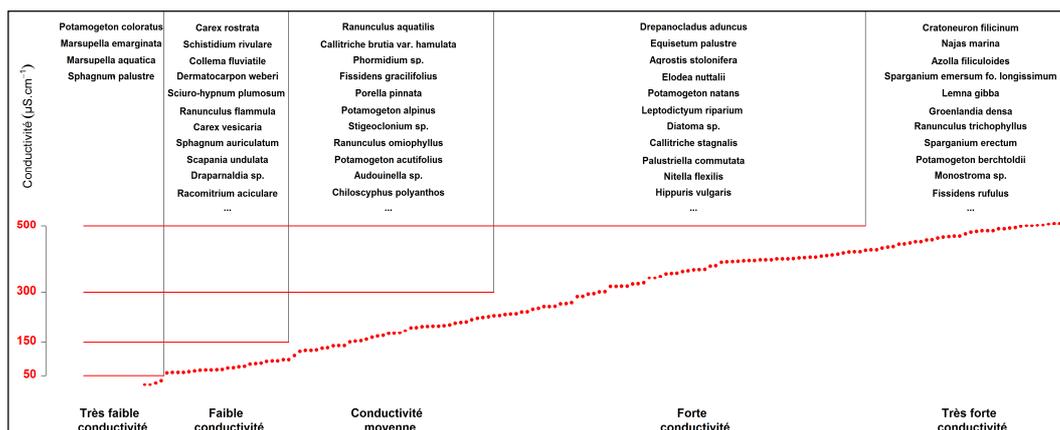
Pour l'établissement des profils écologiques, 21 paramètres abiotiques ont été retenus : 10 pour l'hydromorphologie et 11 pour la physico-chimie (Tableau 15). Les données relatives à ces paramètres ont été discrétisées c'est-à-dire que des classes ont été définies.

Pour définir les valeurs limites de chaque classe, la littérature scientifique n'apportant que peu de données à ce sujet, un traitement statistique validé par expertise écologique a été mené. Pour discrétiser les données, une classification *k-medoid* (Reynolds *et al.*, 1992) a été réalisée. Cette méthode permet de diviser le jeu de données en *k* classes, ici 5, et de déterminer les limites des classes (Tableau 15). Chaque valeur d'observation est rattachée au groupe ayant le représentant central (médoïde) le plus proche. Cet algorithme a l'avantage d'être plus robuste vis-à-vis des données extrêmes (*outliers*) que celui, plus courant, des *k-means* (Forgy, 1965 ; Hartigan *et al.*, 1979).

Type	Paramètres	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Hydromorphologie	Altitude	13	48	125	311
	Pmoy	0.4	0.6	1.1	1.7
	Vmoy	0.1	0.25	0.44	0.65
	LumMoy	0.3	0.5	0.7	1
	BedCal	-6.454	-5.3285	-3.63463	-0.54369
	QAQ5	0.2	0.4	0.9	2.2
	Surf_BV	36.5	135.9	445.1	1952.2
	SubFin	1	3.2	10.5	46.5
	SubGros	1.7	4	8.7	21.6
	SubOrg	0.07	0.12	0.22	0.39
Physico-chimie	Calcium	9.8	23.4	49.7	86.4
	Corg	1.7	2.7	3.8	5.9
	Conductivité	114.5	219	374.5	579.5
	DBO5	1.1	1.7	2.4	3.6
	Mg	2.9	5.1	8.5	16.1
	MES	5.2	8.8	14.3	27
	NH4	0.09	0.22	0.67	2.37
	NO3	3.2	6.6	12.4	23.2
	PO4	0.1	0.2	0.5	1.1
	pH	7.2	7.5	7.8	8
	Température	11.9	14.2	16.1	18.1

**Tableau 15 : Limites des différentes classes calculées par la classification « k-medoid ».**

La validation et l'ajustement des limites des classes se sont appuyées, pour chaque paramètre, sur une représentation graphique du gradient croissant des médianes associées à la présence de chaque taxon dans la base de données Pandore (Figure 18: exemple de la conductivité). L'analyse des inflexions de la courbe complétée par une analyse des exigences écologiques des taxons a permis de valider ou ajuster les limites calculées par la classification *k-medoid*. Le Tableau 16 présente les limites des classes validées pour l'établissement des profils écologiques.



**Figure 18: Représentation du gradient croissant des médianes des valeurs du paramètre « conductivité » associées à la présence de chaque taxon dans la base de données Pandore.**

Type	Paramètre	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Hydromorphologie	Altitude	150	300	600	1000
	BedCal	-7	-6	-3.5	-1.5
	LumMoy	0.4	0.53	0.66	0.8
	Pmoy	0.2	0.4	0.6	1
	QAQ5	0.07	0.12	0.22	0.39
	Rang	1	2	3	5
	SubFin	0	10	25	75
	SubGros	0	10	25	75
	SubOrg	0	10	25	75
	Vmoy	0.1	0.25	0.4	0.5
Physico-chimie	Calcium	10	25	50	85
	Conductivité	50	150	300	500
	Corg	1	3	5	7
	DBO5	1	2	3	5
	MES	5	7	14	28
	Mg	2	4	8	12
	NH4	0.05	0.07	0.1	0.15
	NO3	3	6	12	24
	pH	7.2	7.5	7.8	8
	PO4	0.025	0.05	0.1	0.2
Température	12.5	14	15.5	17	

**Tableau 16 : Limites des modalités utilisées pour la construction des profils écologiques.**

#### 4.1.2 Calcul des probabilités de présence

Pour chaque taxon et pour chaque paramètre, l'affinité à chacune des modalités a été définie. Cette affinité, appelée probabilité de présence, a été établie en tenant compte à la fois des occurrences et de l'abondance du taxon dans chacune des modalités :

$$P_{i,j} = \frac{N_{i,j} \times A_{i,j}}{N_j \times S_j} \quad \text{avec} \quad S_j = \sum_{i=1}^5 \frac{N_{i,j} \times A_{i,j}}{N_j}$$

- Avec -  $P_{i,j}$  : probabilité de présence du taxon j dans la modalité i ;  
 -  $A_{i,j}$  : abondance cumulée du taxon j dans la modalité i (en %) ;  
 -  $N_{i,j}$  : nombre d'occurrences du taxon j dans la modalité i ;  
 -  $N_j$  : nombre d'occurrences du taxon j.

Le profil écologique d'un taxon est alors défini comme la probabilité de présence de celui-ci dans chacune des modalités de chaque paramètre.

### 4.1.3 Représentation graphique des profils écologiques

Les « diagrammes radars » ont été retenus pour représenter graphiquement le profil écologique des taxons. Les cinq cercles de rayons croissants représentent chacun une des modalités du paramètre. Les probabilités de présence sont représentées sous forme de point de taille croissante et allant du bleu au rouge selon que la probabilité de présence est faible ou élevée. Les modalités pour lesquelles la probabilité de présence d'un taxon est maximale sont jointes par une ligne pointillée.

## 4.2 Résultats

Le profil écologique des 332 taxons est présenté dans un document séparé : « Atlas des profils écologiques des macrophytes en cours d'eau ». Pour chaque taxon, l'Atlas comprend :

- Une carte de répartition géographique du taxon suivant les occurrences de la base de données Pandore (relevé IBMR) avec la précision de son abondance exprimée en pourcentage de recouvrement ;
- Un tableau présentant les probabilités de présence (%) du taxon pour chaque paramètre et pour chaque modalité. Les occurrences relatives sont présentées ainsi que le nombre total d'occurrence dans la base Pandore ;
- Les probabilités de présence en fonction des modalités pour les paramètres hydromorphologiques et physico-chimiques.

A titre d'illustration, les exemples d'un phanérogame, *Potamogeton nodosus* Poir., et d'une algue, *Lemanea* sp. Bory de Saint Vincent sont présentés (Figure 19).

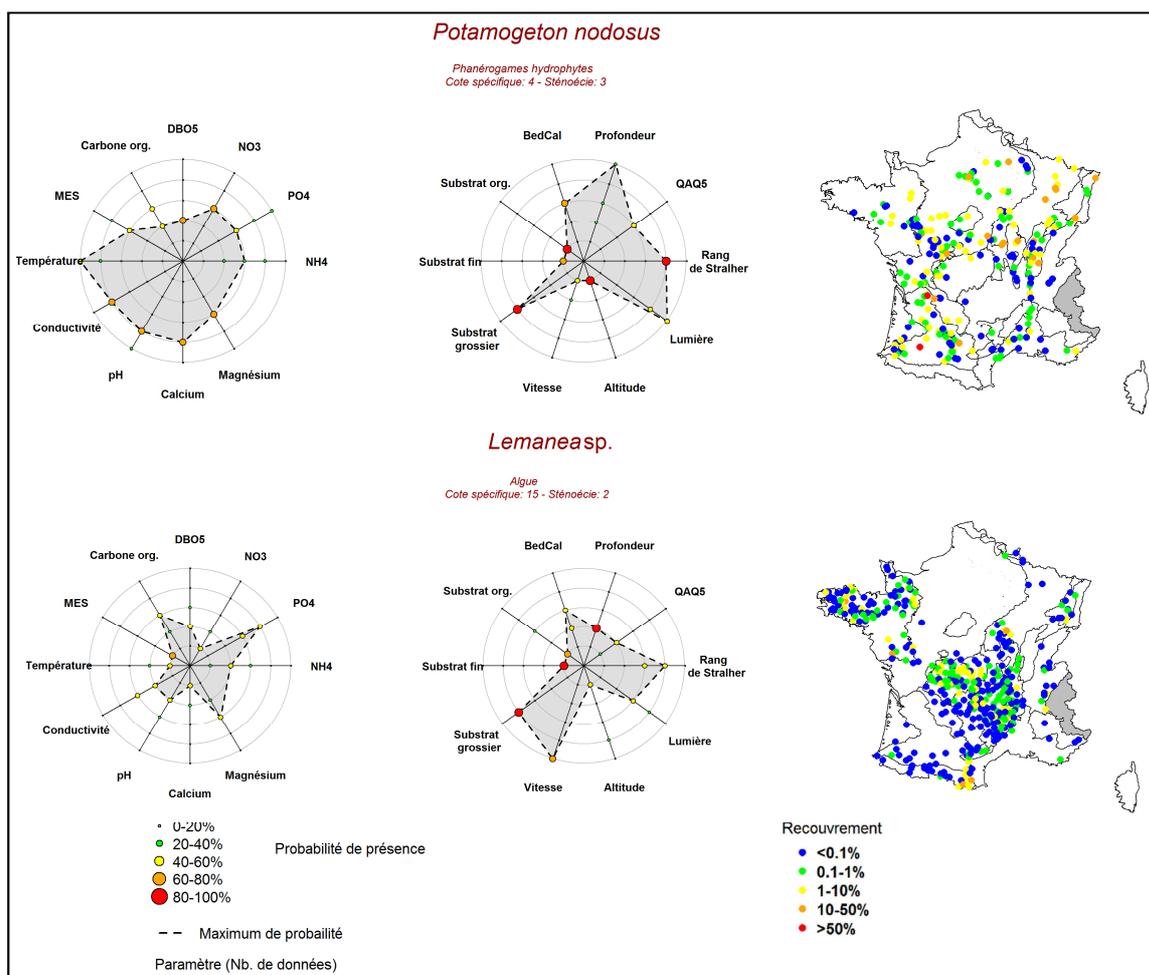


Figure 19 : Profils écologiques de *Potamogeton nodosus* Poir. et *Lemanea* sp. Bory de Saint-Vincent

#### 4.3 Valorisation des profils écologiques pour le développement de métriques de diagnostic

La valorisation des profils écologiques pour le développement de métriques de diagnostic repose sur deux types d'analyses. L'analyse des profils écologiques permet tout d'abord la mise en évidence de métriques basées sur l'affinité de certains groupes taxonomiques ou fonctionnels avec certaines modalités de conditions environnementales.

L'examen des profils écologiques permet également, par avis d'expert ainsi que par des analyses statistiques, de mettre en évidence les paramètres abiotiques sur lesquels il pourrait être pertinent de construire des indices d'affinité tels que ceux définis au Royaume-Uni : l'indice multimétrique LEAFPACS (WFD – UKTAG, 2008) comprend deux indices rendant compte de l'affinité du peuplement macrophytique pour l'enrichissement nutritif et l'hydraulicité. Le River Macrophyte Nutrient Index – RMNI » est une note de 0 à 10 associée à chaque taxon qui rend compte de son affinité pour l'enrichissement nutritif. Les notes élevées sont attribuées aux taxons qui dominent lorsque le milieu est enrichi. L'indice RMNI global observé est calculé d'après la formule suivante :

$$RMNI = \frac{\sum_{j=1}^n (C_j \times R_j)}{\sum_{j=1}^n C_j}$$

Avec :

J : un taxon ; R<sub>j</sub> : la note RMNI du taxon j ; C<sub>j</sub> : le recouvrement du taxon j.

Construit suivant le même principe mathématique, le « River Macrophyte Hydraulic Index - RMHI » est une note comprise entre 0 et 10 qui est attribuée aux taxons en fonction de leur affinité avec le morphodynamisme des cours d'eau (Willby *et al*, 2013) et plus précisément la vitesse d'écoulement. Les notes élevées correspondent à des taxons qui dominent lorsque le morphodynamisme est faible. Le RMHI global observé permet de rendre compte de l'affinité des taxons observés dans une station vis-à-vis de son morphodynamisme.

Ces approches font l'objet de la suite du programme de travaux actuellement engagés par l'équipe d'Irstea Bordeaux. La bancarisation des données 2012 devraient renforcer le jeu de données et permettre d'établir les profils écologiques des taxons sur davantage de données. Quelques-uns des premiers résultats obtenus par les analyses des profils écologiques en fonction des groupes taxonomiques et fonctionnels sont présentés ci-après.

##### 4.3.1 Méthodes

Dans l'objectif d'appréhender les différences d'affinité environnementale entre groupes taxonomiques ou groupes fonctionnels, la distribution des probabilités de présence des taxons appartenant à ces groupes a été analysée. Les distributions sont représentées par des boîtes à moustache ou « boxplot ». La significativité des différences de moyenne a été analysée par un test de *pairwise* (Adler J., 2011) avec ajustement de *Bonferroni*. Ce test consiste à effectuer un test *t* de comparaison de moyenne entre les groupes pris deux à deux.

##### 4.3.2 Résultats

Les figures 19 à 21 présentent la distribution des probabilités de présence par groupes taxonomiques en fonction des 5 modalités de vitesse, lumière et type de substrat. Pour la vitesse, les analyses montrent que, pour les très fortes vitesses, les Bryophytes ont des probabilités de présence significativement plus élevées que celles des Algues, des Phanérogames ou de l'ensemble des taxons (Figure 20). Les Phanérogames ont des probabilités de présence plus importantes dans les vitesses faibles à très faibles. Pour les types de substrat, les Bryophytes se distinguent des autres groupes taxonomiques par des probabilités de présence plus importantes dans les substrats très grossiers et grossiers (Figure 21). Les Phanérogames ont des probabilités de présence plus grandes dans les stations à substrats fins voire très fins. Pour la lumière, les Bryophytes ont des plus fortes probabilités de présence en conditions de très faible à faible lumière et inversement pour les Phanérogames et les Algues qui semblent davantage liés aux luminosités plus importantes (Figure 22).

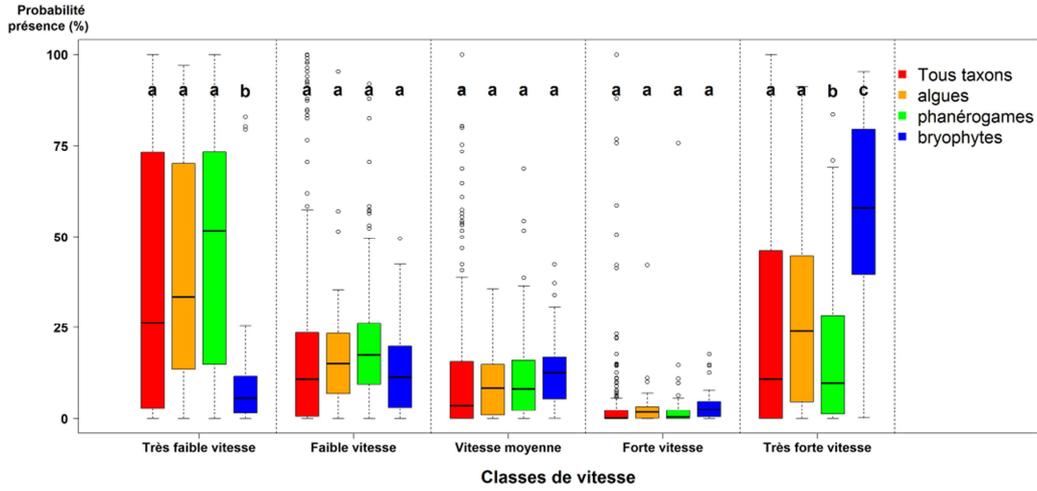


Figure 20: Probabilités de présence par groupes taxonomiques suivant les modalités de vitesse.

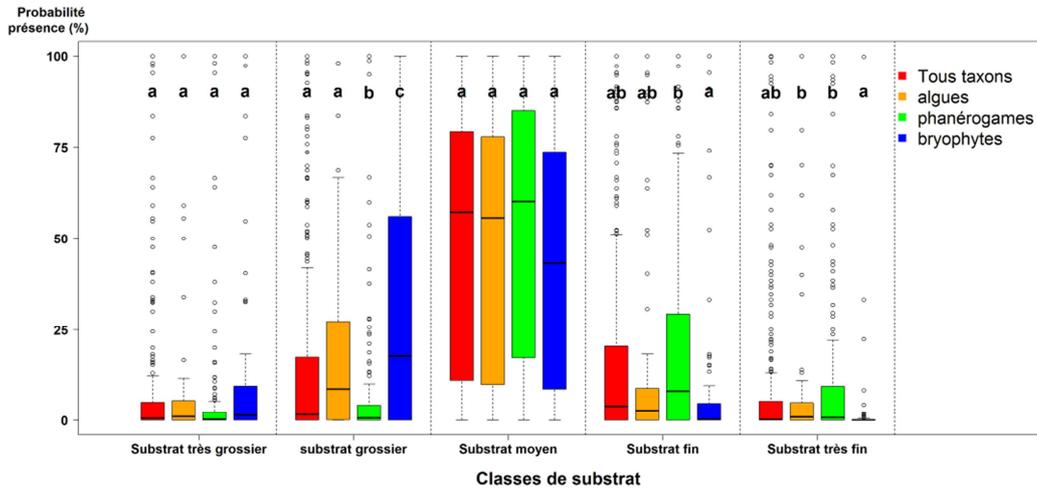


Figure 21 : Probabilités de présence des groupes taxonomiques suivant les modalités de substrat.

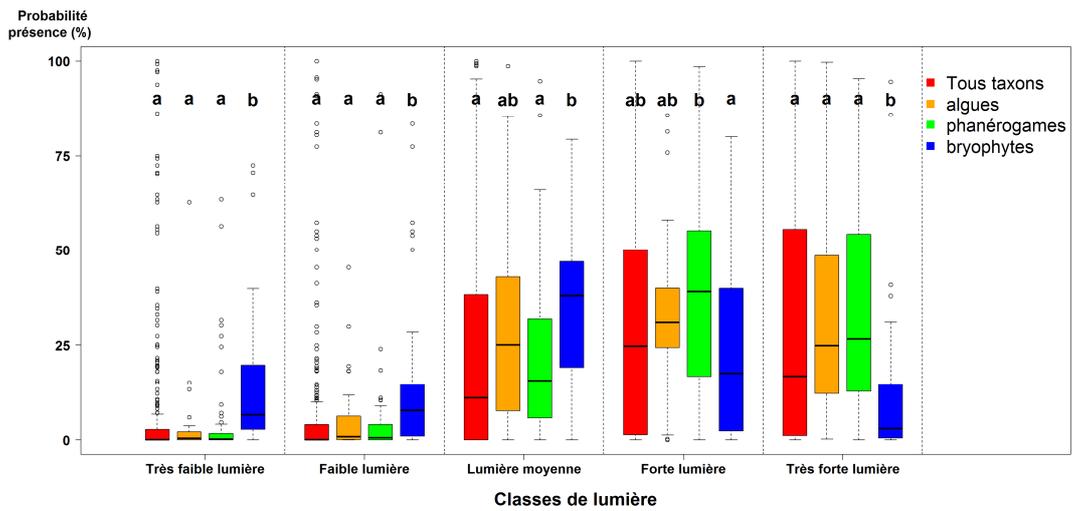
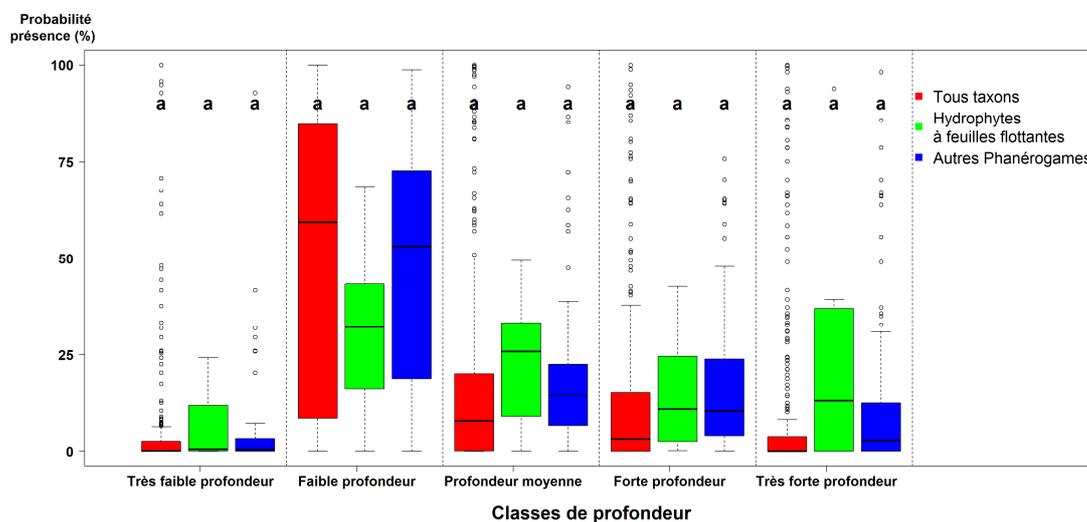


Figure 22: Probabilités de présence des groupes taxonomiques suivant les modalités de lumière.

Une analyse a été réalisée pour tester les profils écologiques par groupes fonctionnels. L'exemple présenté ici est celui des Hydrophytes à feuille flottantes (inclus dans les Phanérogames) et de leur affinité avec les différentes modalités de profondeur comparativement aux autres Phanérogames et à tous les taxons (Figure 23). Les résultats montrent une prépondérance des Phanérogames dans les « très fortes profondeurs » et notamment s'agissant des Hydrophytes à feuilles flottantes, bien que les probabilités de présence ne soient pas statistiquement différentes.



**Figure 23: Probabilités de présence suivant chacune des 5 modalités de profondeur.**

#### 4.3.3 Discussion

Les résultats présentés montrent qu'une réponse aux conditions environnementales des peuplements macrophytiques par groupes taxonomiques ou par groupes fonctionnels est mesurable. Ces résultats, à conforter par d'autres analyses statistiques, indiquent que la construction de métriques reposant sur des groupes taxonomiques et fonctionnels est possible avec le jeu de données actuellement constitué. La poursuite des analyses devraient permettre de mettre en évidence d'autres métriques. De plus, le renforcement du jeu de données par la bancarisation des données 2012 devrait permettre de pallier le biais dû à l'inégale répartition des modalités sur l'ensemble du jeu de données et ainsi renforcer la puissance des analyses statistiques. Enfin, l'analyse des profils écologiques des listes floristiques IBMR devrait permettre de préciser et de valider ces résultats en caractérisant les affinités d'un peuplement pour certaines modalités de conditions environnementales.

## 5 RECHERCHE DES METRIQUES DE DIAGNOSTIC

### 5.1 Démarche

Pour établir une liste de métriques « macrophytes en cours d'eau », une analyse bibliographique des publications<sup>1</sup> scientifiques relatives à l'étude des communautés, tout particulièrement des communautés végétales, en fonction des conditions environnementales a été effectuée. Il s'agit principalement de travaux d'écologie végétale aquatique, complétés, depuis 2000, par les travaux visant plus spécifiquement à développer des indicateurs DCE compatibles.

En fonction des types de réponses visés (catégories de pressions) et des connaissances documentées dans la bibliographie ou issues des fonctionnements écologiques généraux des cours d'eau, différentes catégories de métriques peuvent être envisagées (Hering *et al.*, 2006) :

- métriques de composition et d'abondance : elles donnent la proportion relative d'un taxon ou d'un groupe de taxons par rapport au nombre total ou à l'abondance. C'est un des aspects principaux sur lesquels reposent les notions de bioindicateurs biocénotiques (tel l'IBMR), en caractérisant les peuplements par les préférences écologiques des taxons qui les composent (notions de traits écologiques). Ces métriques peuvent porter sur chacun des traits définis pour les taxons, ou mettre en évidence la présence de taxons indicateurs de fonctionnalités particulières (espèces invasives, par exemple);
- métriques de richesse, de diversité : elles reposent sur le nombre de taxons, de genre ou autres rangs taxonomiques incluant le nombre total de taxons ainsi que les indices de diversité. Elles traduisent un aspect global de la structuration des peuplements, en reflétant la diversité habitationnelle ou la spécialisation des biocénoses. Ces métriques ne sont pas *a priori* liées à un taux de dégradation, mais caractérisent plutôt les types de situations écologiques (typologie écologique des cours d'eau) ;
- métriques de sensibilité et tolérance environnementale : elles renseignent sur les taxons connus pour être sensibles ou tolérants aux pressions, et portent sur le nombre de taxons ou leur abondance ; Ces métriques évaluent la spécialisation ou la banalisation des habitats. Elles sont généralement liées à un taux de dégradation.
- métriques fonctionnelles : elles donnent des indications sur l'écologie fonctionnelle des taxons (autres que leur sensibilité et tolérance à l'environnement) comme par exemple leurs habitats, leur cycle de vie, etc. Ces métriques doivent renseigner sur le fonctionnement des hydrosystèmes (connectivité, intégrité hydrologique, relations avec les habitats rivulaires).

### 5.2 Détails des métriques

#### 5.2.1 Métriques portant sur les groupes et sous-groupes fonctionnels

---

<sup>1</sup> Biggs, 1996 ; Wiegleb, 1988 ; Wiegleb, 1991 ; Lachavanne *et al.*, 1995 ; Den Hartog *et al.*, 1988 ; Willby *et al.*, 2000 ; Riis *et al.*, 2000 ; Barendregt *et al.*, 2003 ; Baattrup *et al.*, 2006 ; Daniel *et al.*, 2006 ; Gurnell *et al.*, 2006 ; Lacoul *et al.*, 2006 ; O'Hare *et al.*, 2006 ; Dodkins *et al.*, 2005 ; Szoszkiewicz *et al.*, 2006 ; Breugnot, 2007 ; Franklin *et al.*, 2008 ; Gurnell *et al.*, 2006 ; Haury *et al.*, 2008 ; Riis *et al.*, 2008 ; Gurnell *et al.*, 2010 ; Gurnell *et al.*, 2012 ; Gurnell, 2013 ; Dawson *et al.*, 1999 ; Willby *et al.*, 2000 ; Bornette *et al.*, 2011 ; O'Hare *et al.*, 2011 ; Ferreira *et al.*, 2012 ; Manolaki *et al.*, 2013

Les groupes et sous-groupes fonctionnels qui ont été considérés sont les Phanérogames et les sous-groupes fonctionnels des Hydrophytes, Hélophytes et Hygrophytes ; les Bryophytes et les sous-groupes des Mousses et des Hépatiques ; les Algues ; les Lichens ; les Hétérotrophes. Les métriques développées à partir des groupes et sous-groupes fonctionnels sont basées sur le nombre et l'abondance absolus et relatifs par relevé et par faciès.

### 5.2.2 Métriques portant sur les rangs taxonomiques

Les rangs taxonomiques considérés sont les Ordres, les Familles pour tous les taxons. Dans un premier temps, les Genres (*Ranunculus* sp. ; *Potamogeton* sp.) et les Espèces (*Ranunculus fluitans*, *Potamogeton nodosus*) n'ont pas été retenus. Pour les Phanérogames, les Clades (Monocotylédones et Dicotylédones) ont été distingués.

Pour les Algues, les Embranchements et les Classes ont été pris en considération car cette classification repose notamment sur la présence de pigments spécifiques. Ces pigments étant caractéristiques de l'adaptation des groupes aux conditions de luminosité, cette distinction peut être utilisée dans la recherche de métriques répondant aux conditions du milieu. Les EMBRANCHEMENTS et Classes associées sont: Embranchement des CHLOROPHYTES : *Chlorophyceae*, *Ulvaceae*, *Charophyceae*, *Conjugatophyceae*, *Trebouxiophyceae* ; RHODOPHYTES : *Florideophyceae*, *Bangiophyceae*, *Compsopogonophyceae* ; CYANOBACTERIA : *Cyanophyceae* ; OCHROPHYTES : *Bacillariophyceae*, *Phaeophyceae*, *Chrysophyceae*, *Xanthophyceae*.

Les métriques développées à partir des rangs taxonomiques sont basées sur le nombre et l'abondance absolus et relatifs par relevé et par faciès.

### 5.2.3 Métriques portant sur les formes de croissance

Les « formes de croissance » caractérisent la morphologie de chaque espèce. Cette morphologie est adaptée aux conditions de milieu dans lesquels la plante vit, en terme de contraintes habitationnelles (vitesse de courant, profondeur, lumière) et de relations chimiques avec l'environnement. A ce titre, les formes de croissances peuvent être considérées comme un proxy intégrant la majorité des caractéristiques adaptatives des espèces. Elles sont donc susceptibles de fournir des métriques traduisant les conditions environnementales.

Wiegand (1991) a proposé une classification des macrophytes par formes principales ou « groupes majeurs », puis par formes et sous-formes de croissance. Pour notre travail nous avons pu bénéficier des fichiers informatiques de codage de cette variable pour 766 taxons de macrophytes, réalisés et gracieusement mis à notre disposition par Sebastian Birk (Université de Essen, Allemagne). Ce travail a été repris et complété (Tableau 17) afin de classer les 332 taxons pris en compte ici pour le développement de métriques. Les Bryophytes supra-aquatiques (aquaticité 3) n'ayant pas été retenus, les mousses et lichens ont tous été classés comme Hydrophytes immergés. Les algues et les hétérotrophes ont été regroupés dans le groupe majeur « Phycophytes » et leur forme de croissance a été renseignée comme leur aspect macroscopique ou celui des colonies formées (tableau 17). Les métriques développées à partir des formes de croissance sont basées sur le nombre et l'abondance absolus et relatifs par relevé et par faciès.

Groupe majeur	Forme de croissance	Sous-forme de croissance	Description
Hydrophytes immergés	Bryide	-	Mousses et Hépathiques aquatiques
	Elodeide	Elodeide (s.s.)	Plantes non rhizomateuses à tiges verticillées à petites feuilles entières
		Magnopotamide	Plantes submergées avec des feuilles larges et entières
		Parvopotamide	Plantes submergées avec des feuilles linéaires et entières
	Isoetide	-	Plantes à tige inflexible et enracinées dans les sédiments
	Myriophyllide	Batrachide	Plantes à feuilles submergées entières ou découpées et (occasionnellement) des feuilles flottantes
		Charide	Plantes à feuilles verticillées vivant submergées et ancrées dans le sédiment par des rhizoïdes
Myriophyllide (s.s.)		Plantes submergées à tiges feuillées et feuilles découpées	
Hydrophytes à feuilles flottantes	Nymphaeide	Magnonymphaeide	Plantes à larges feuilles flottantes et souvent des feuilles submergées en rivière
		Parvonymphaeide	Plantes à longues feuilles oblongues flottantes
		Trapide	Plantes à rosettes flottantes
	Peplide	-	Plantes à feuilles oblongues et en forme de spatules, les dernières formant souvent des rosettes flottantes
	Stratiotide	-	Plantes flottantes avec des parties émergées, ancrées dans le sédiment par une longue racine
Vallisneride	-	Plantes à feuilles flottantes basales, longues et souples	
Pleustophytes (hydrophytes flottant librement)	Ceratophyllide	-	Plantes submergées flottant librement avec de grandes feuilles divisées
	Eichhorniide	-	Plantes flottant au-dessus de la surface de l'eau
	Hydrocharide	-	Plantes flottant librement avec des grandes feuilles flottantes
	Lemnide	-	Plantes flottant librement avec des petites tiges flottantes semblables à des feuilles
	Riccielide	-	Plantes flottants librement submergées avec des petites tiges semblables à des feuilles
Rhizophytes (enracinés)	Graminoïde	-	Hélophytes monocotylédones d'aspect herbacée
	Herbide	-	Hélophytes dicotylédones
	Sagittaride	-	Hélophytes monocotylédones petites avec des feuilles étroites
Phycophytes	-	-	Colonie encroûtante
			Colonie gélatineuse, globuleuse ou plaquée
			Feutrage, duvet, petites touffes
			Macro-algues (Characées)
			Masse filamenteuse ou réticulée
			Thalle foliacé, tubulaire
Thalle ramifié ou cespiteux			

**Tableau 17 : Groupes majeurs, formes et sous-formes de croissance (complété d'après Wiegler, 1991 et S. Birk, comm.pers.)**

#### 5.2.4 Métriques portant sur les traits morphologiques et biologiques

La base de données BioFlor<sup>2</sup> développée en Allemagne par l'UFZ – Centre pour la Recherche Environnementale, a été exploitée. Elle contient des données sur 3660 taxons appartenant aux Phanérogames et aux Ptéridophytes.

<sup>2</sup> Base de données disponible sur le portail web <http://www2.ufz.de/bioflor/index.jsp>

Pour chacun d'entre eux, 60 traits morphologiques et biologiques sont déclinés. Parmi ces traits, une sélection a été effectuée de façon à retenir les traits liés au développement en milieu aquatique (Tableau 18) c'est-à-dire la capacité à se disperser, à se multiplier, à coloniser un habitat et à être un bon compétiteur (Barrat-Segretain, 1996). Ces traits sont susceptibles de renseigner sur certaines fonctionnalités de l'hydrosystème (régime hydrique, stabilité des substrats, etc.)

Parmi les 155 taxons (Genre espèce) du jeu de données « macrophytes cours d'eau » sélectionné pour l'étude et appartenant aux Phanérogames et aux Ptéridophytes, seuls 19 ne sont pas renseignés dans BioFlor. Il s'agit notamment des taxons à répartition atlantique tels que *Oenanthe crocata* L. et *Ranunculus omiophyllus* Ten. absents de la flore allemande sur la base de laquelle BioFlor a été établie. Pour ces 19 taxons, les traits ont été complétés par avis d'expert.

Traits	Attributs
Type biologique	Géophyte ; Hémicryptophyte ; Hydrophyte
Forme des feuilles	Simple ; Linéaire ; Tubulaire ; Palmée ; Pennée ; Bipennée ; Ecaille
Type de reproduction	Végétative ; Végétative et rarement sexuée ; Sexuée et végétative ; Sexuée
Organes mâles et femelles	Hermaphrodisme ; Monoécie ; Dioécie
Type de fruit	Akène ; Capsule ; Charnu ; Follicule ; Noix ; Schizocarpe ; Silique ; Spores ; Végétive
Propagation végétative	Fragmentation ; Rhizome ; Traçant ; Traçant et fragmentation

**Tableau 18 : Traits morphologiques et fonctionnels d'après la base de données BioFLOR (UFZ).**

Le trait « Espèces Exotiques Envahissantes » ou « EEE » avec les modalités « avérée », « potentielle », « à surveiller » et « non EEE » a été ajouté. La présence d'EEE dans un cours d'eau peut en effet rendre compte de perturbations hydromorphologiques et trophiques.

Les métriques développées à partir des traits morphologiques et biologiques sont basées sur le nombre et l'abondance absolus et relatifs par relevé et par faciès.

## 5.2.5 Métriques portant sur la sensibilité et la tolérance environnementale

### 5.2.5.1 Aquaticité

L'aquaticité rend compte de l'affinité du taxon pour l'eau (cf. § 3.1.2.2). Dans cette étude, seuls les taxons d'aquaticité 1, exclusivement ou principalement aquatiques, aquaticité 2 : taxons aquatiques avec une forme terrestre ou amphibie et aquaticité 4 : taxons héliophytes ont été conservés dans le jeu de données. Les métriques développées à partir des aquaticités sont basées sur le nombre et l'abondance absolus et relatifs par relevé et par faciès. La valeur médiane de l'aquaticité est également calculée, par relevé et par faciès.

### 5.2.5.2 Cote spécifique

La cote spécifique est l'un des deux paramètres principaux de calcul de l'IBMR. Elle traduit l'affinité de chaque taxon contributif pour un niveau trophique du milieu, de 0 pour un taxon hypereutrophe-dystrophe à 20 pour un taxon ultraoligotrophe. Les métriques développées à partir des cotes spécifiques sont basées sur le nombre et l'abondance absolus et relatifs par relevé et par faciès. La moyenne, l'écart-type, la médiane, la valeur minimale et maximale des cotes spécifiques sont également calculées par relevé et au sein de chaque faciès. Afin de simplifier l'exploitation de la réponse de cette métrique 3 classes de cotes spécifiques ont été définies, comme cela a été fait dans des travaux précédents (Marzin *et al.*, 2012). : nombre et l'abondance des taxons de cotes spécifiques comprise entre 0 à 6, 7 à 13 et enfin 14 à 20.

### 5.2.5.3 Coefficient de sténo-euryécie

Le coefficient de sténo-euryécie est le second attribut des taxons contributifs à l'IBMR. Il traduit la valeur bioindicatrice du taxon. Il renseigne sur la tolérance environnementale et prend pour valeur 1 pour une espèce peu exigeante en termes de niveau trophique à 3 pour une espèce inféodée à un niveau trophique donné. Les métriques développées à partir du coefficient de sténo-euryécie sont le résultat du calcul de la médiane puis du nombre ou de l'abondance des taxons de coefficient 1, 2 ou 3, en absolu et en relatif, par relevé ou par faciès.

### 5.2.5.4 Indices de sensibilité environnementale

Dans le cadre d'un programme de recherche « ECOFACT » ou « ECOlogical FACTors controlling biodiversity in the British countryside », Hill *et al.*, (1999) ont repris et complété le travail de Ellenberg *et al.*, 1991 qui définissait, pour 1791 taxons Phanérogames et Ptéridophytes, des indices (« Indicator Values ») rendant compte de la niche écologique des plantes vasculaires d'Europe Centrale. Les indices retenus parmi ceux développés pour la recherche de métrique « macrophytes en cours d'eau » sont ceux concernant la lumière, la réaction au pH (sol ou eau) et l'azote. Les données relatives à 122 taxons sur les 155 Phanérogames et Ptéridophytes du jeu de données sont disponibles dans la base de données ECOFACT. Pour les 33 autres taxons, les données ont été complétées par avis d'expert.

L'établissement du profil écologique pour chaque taxon devrait permettre de développer des indices de sensibilité environnementale pour compléter ceux développés par les équipes scientifiques britanniques (WFD – UKTAG, 2008), indice RMNI d'affinité vis-à-vis de l'enrichissement et indice RMHI d'affinité vis-à-vis de l'hydraulicité.

Les métriques relevant des indices de sensibilité environnementale sont en cours d'exploitation ou de développement.

### 5.2.6 Métriques portant sur des indices de diversité des peuplements

Les Indices de diversité (Tableau 19) les plus couramment utilisés dans la littérature relative à l'écologie des communautés ont été retenus. Le calcul des métriques portant sur des indices de diversité prennent en compte la diversité sur les groupes taxonomiques (Phanérogames, Bryophytes, Ptéridophytes, etc.), les sous-groupes taxonomiques (Mousses, Hépathiques, etc.), les rangs taxonomiques (Ordres, Familles) ainsi que les formes et sous-formes de croissance de Wiegleb.

Nom du descripteur	Formule	Propriétés attendues
Richesse	<b>S</b>	Nombre de taxon ou catégorie de taxon par relevé
Indice de Shannon-Weaver (Shannon <i>et al.</i> , 1949)	$H = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln(P_i)$	Exprime la diversité en prenant en compte le nombre et l'abondance de taxon ou catégorie de taxon. Sensible aux catégories rares
Indice de diversité de Simpson (Simpson, 1949)	$1-D = \sum_{i=1}^S P_i^2$	Calcule la probabilité que deux individus sélectionnés aléatoirement dans un relevé soient le même taxon ou catégorie de taxon. Sensible aux catégories dominantes
Equitabilité de Piélou (Piélou, 1966)	$R = \frac{H}{\ln(S)}$	Varie de 0 : dominance d'un taxon ou d'un groupe de taxons à 1 : équirépartition des taxons ou groupes de taxons.
Berger-Parker (Berger <i>et al.</i> , 1970)	$\frac{1}{d} = \frac{Ab_{tot}}{Ab_{max}}$	Permet d'appréhender la dominance d'un taxon ou d'un groupe de taxon au sein d'un relevé.

**Tableau 19 : Indices de diversité calculés (avec S : nombre total de taxons ; P : proportion d'un taxon ; Ab : abondance.)**

### 5.2.7 Indice Biologique Macrophytique en Rivière

Des métriques ont été définies sur la base du nombre et de l'abondance des taxons contributifs à l'IBMR, en absolu ou en relatif, par relevé ou au sein de chacune des unités de relevé (UR). La valeur de l'IBMR calculée est elle-même testée comme métrique ainsi que la valeur d'EQR correspondante. Pour cela, les valeurs d'IBMR de référence utilisées sont celles définies dans le rapport sur la définition de la méthode d'évaluation de la qualité écologique des cours d'eau à partir des macrophytes (Chauvin *et al.*, 2013). Ces analyses sont en cours de traitement.

#### 5.2.8 Synthèse sur les métriques et calculs

4915 métriques « macrophytes en cours d'eau » ont été définies dans cette première phase de l'étude.

Elles sont présentées dans un tableau de synthèse disponible en format informatique. Pour chaque métrique, le tableau présente :

- l'intitulé de chaque métrique ;
- le trait ou les traits sur le(s)quel(s) elle est construite ;
- si elle porte sur l'ensemble du relevé ou sur l'un ou l'autre des UR ;
- le type d'abondance analysée : nombre ou recouvrement, absolu ou relatif ;
- les valeurs caractéristiques des métriques : valeur minimale, maximale, médiane, moyenne et écart-type.

## 5.3 Tests des métriques

### 5.3.1 Caractérisation des gradients environnementaux

Préalablement au test des métriques, une Analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée afin d'appréhender la structuration des données et plus particulièrement d'appréhender les relations linéaires existant entre variables, ici les facteurs abiotiques. Le résultat des ACP est une projection sur un plan des différents facteurs abiotiques et un tableau présentant la contribution de chacun des facteurs aux axes de la projection. A partir de ces deux éléments, il a été possible d'identifier quels sont les facteurs covariants et de caractériser les gradients qui régissent les conditions stationnelles dans les stations ayant fait l'objet de relevé IBMR.

La réponse des métriques au gradient mis en évidence a alors été testée. Puis, pour affiner le test de la réponse des métriques aux gradients, ces derniers ont été discrétisés en 4 modalités par la méthode *k-means* (Forgy, 1965 ; Hartigan *et al.*, 1979). Contrairement au travail sur la définition des limites pour la détermination des profils écologiques, les gradients étudiés ici présentent moins de données extrêmes (outliers) et ne nécessite donc pas l'utilisation de méthodes plus lourdes d'application telles que les *k-medoids*. Ces différentes modalités ont été portées sur une carte de répartition géographique afin de vérifier la cohérence des gradients et des modalités qui ont été définies. La réponse de métriques à chacun des gradients et des modalités de gradient a été analysée. Par un test de comparaison de *pairwise* (Adler J., 2011), la significativité des différences de réponses des métriques en fonction des gradients et des modalités de gradients a été analysée.

L'hydromorphologie et la physico-chimie ont été traitées séparément pour éviter des gradients environnementaux trop complexes à interpréter.

#### 5.3.1.1 Analyse sur les paramètres hydromorphologiques

Pour caractériser les gradients hydromorphologiques, 14 paramètres ont été retenus (Tableau 20). Le jeu de données correspondant à ces paramètres est complet pour 2881 points de prélèvements IBMR.

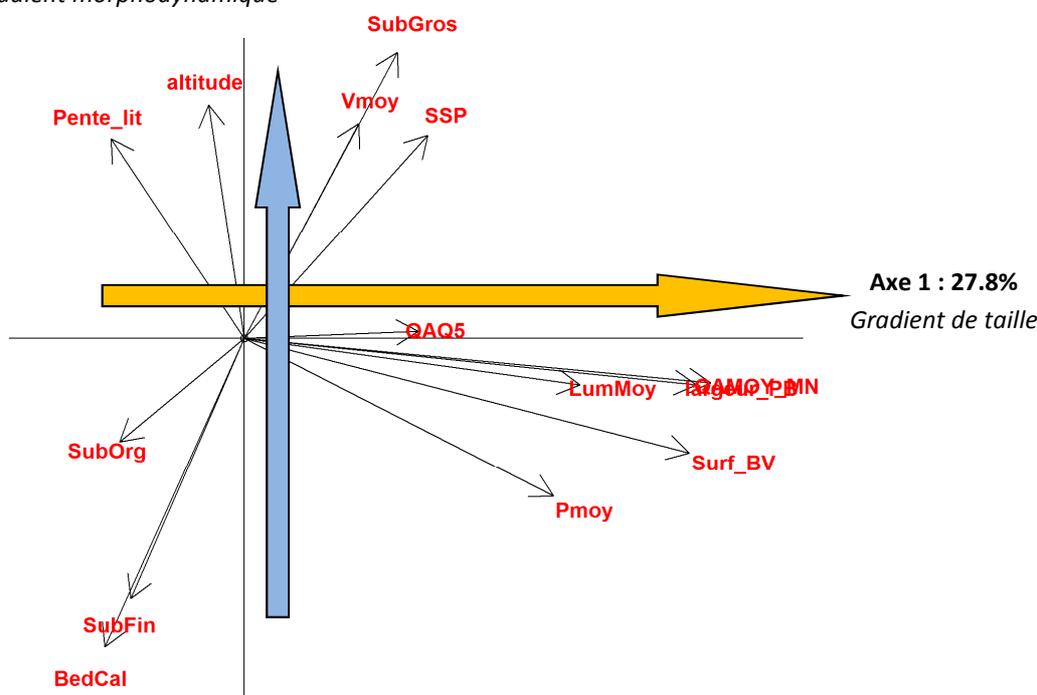
	Min	Max	Moy	sd	Transformation
Altitude	0	1739	227.94	260.4	log <sub>10</sub>
BedCal	-8	9	-4.94	2.61	
Largeur_PB	1.5	422	21.17	34.41	log <sub>10</sub>
LumMoy	0.2	1	0.69	0.22	
Pente_lit	0	19.32	0.59	1.26	
Pmoy	0.05	2	0.56	0.43	
QAMOY_MN	0	1558.46	25.22	115.37	log <sub>10</sub>
QAQ5	0	0.67	0.13	0.11	
SSPétiage	0	389.38	1.90	22.28	log <sub>10</sub>
SubFin	0	100	9.82	21.12	
SubGros	0	100	62.42	32.29	
SubOrg	0	75	1.80	5.3	
Surf_BV	0.27	108758	1677.98	6891.29	log <sub>10</sub>
Vmoy	0.03	1	0.34	0.25	

**Tableau 20 : Paramètres de l'Analyse en Composantes Principales sur les paramètres hydromorphologiques.**

Les deux premiers axes de l'ACP expliquent respectivement 27,8 et 24,6% de la variance totale. La **Figure 24** et le **Tableau 21** permettent de rendre compte de la contribution de chacun des paramètres à chacun de ces deux axes. La surface du bassin-versant, la largeur de plein bord, la lumière, le module (QAMOY\_MN) et la profondeur moyenne sont les paramètres contributifs de l'axe 1. Ce sont des paramètres qui sont en lien avec la taille des cours d'eau. L'axe 1 peut ainsi être interprété comme un gradient de taille des cours d'eau. Les indices de substrat, la vitesse moyenne, l'altitude, la pente du lit et la puissance hydraulique spécifique à l'étiage (SSP<sub>étiage</sub>) contribuent quant à eux à l'axe 2. Ce sont des paramètres à mettre en lien avec la morphologie et l'hydrodynamisme des cours d'eau. L'axe 2 peut ainsi être interprété comme un gradient morphodynamique.

**Axe 2 : 24.6%**

*Gradient morphodynamique*



**Figure 24: Projection des 14 paramètres hydromorphologiques de l'ACP (n=2881).**

	Gradient de taille	Gradient morphodynamique
SubOrg	-0.12	-0.15
BedCal	-0.14	<b>-0.45</b>
Vmoy	0.12	<b>0.31</b>
Pente_lit	-0.13	<b>0.29</b>
altitude	-0.04	<b>0.34</b>
Pmoy	<b>0.31</b>	-0.23
largeur_PB	<b>0.45</b>	-0.07
LumMoy	<b>0.34</b>	-0.07
Surf_BV	<b>0.45</b>	-0.17
QAMOY_MN	<b>0.47</b>	-0.06
SSP	0.18	<b>0.29</b>
QAQ5	0.17	0.01
SubFin	-0.11	<b>-0.38</b>
SubGros	0.15	<b>0.41</b>

**Tableau 21 : Contribution normée de chacune des variables à l'axe 1 et 2 de l'ACP**

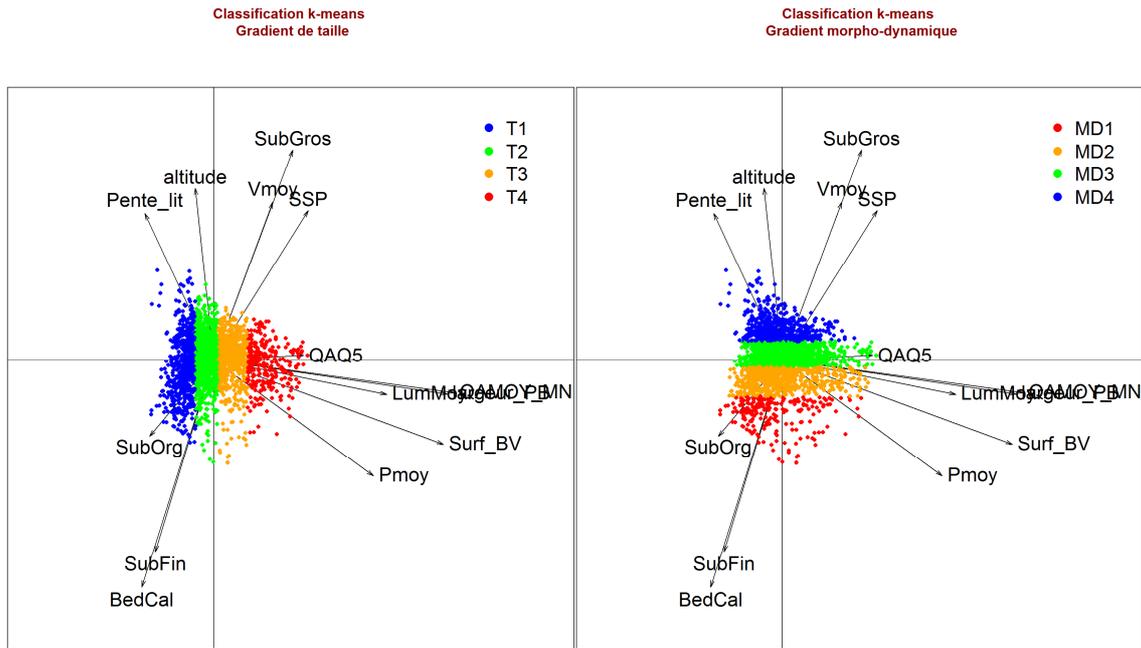
Pour tester la réponse des métriques à ces gradients, une sélection a été effectuée. 3 métriques dont il est possible de prédire la réponse par avis d'expert ont été retenues afin de valider les méthodes statistiques mises en œuvre pour le test de l'ensemble des métriques. Les métriques retenues sont l'abondance relative en Phanérogames, l'abondance relative des Bryophytes et la note IBMR. Les résultats montrent que l'abondance relative des Phanérogames est significativement et positivement corrélée au gradient de taille et négativement au gradient morphodynamique, à l'inverse de l'abondance relative des bryophytes et de la note IBMR (Tableau 22).

	Abondance relative Bryophytes	Abondance relative Phanérogames	IBMR
Gradient de taille	-0.32***	0.22***	-0.39***
Gradient morphodynamique	0.44***	-0.56***	0.56***

**Tableau 22: Coefficients de corrélation de Pearson entre 3 métriques et chacun des deux gradients hydromorphologiques (\*\*\*) : p-value<0.01)**

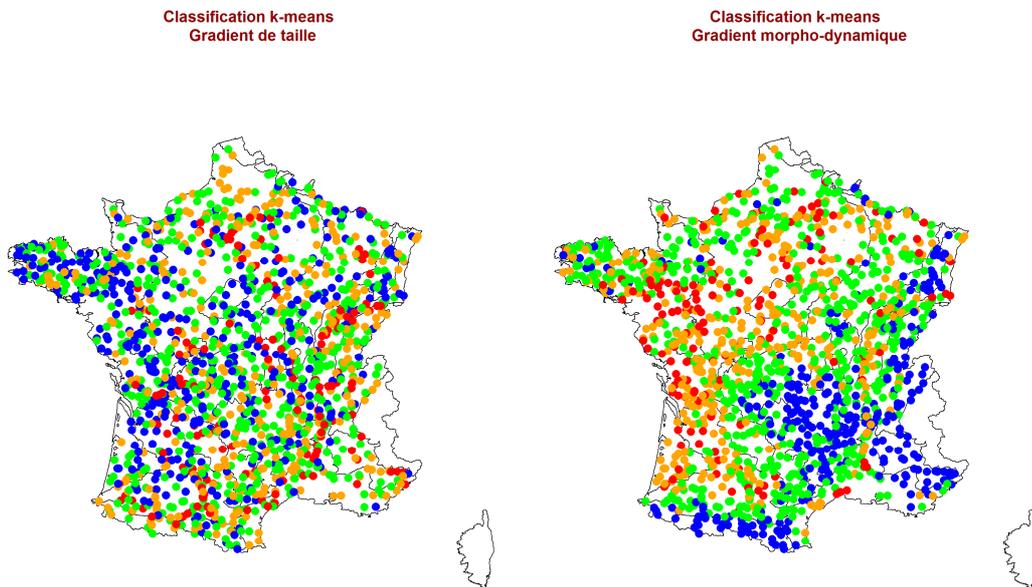
Les deux gradients hydromorphologiques ont ensuite été discrétisés par la méthode *k*-means (

Figure 25).



**Figure 25: Classification k-means sur les gradients de taille et morpho-dynamique de l'ACP.**

La projection des modalités sur une carte des stations ayant fait l'objet d'un relevé IBMR a permis d'apprécier la distribution géographique des gradients (**Figure 26**) et de valider la cohérence des gradients et des modalités. La projection du gradient de taille (axe 1) a permis de distinguer les principaux grands cours d'eau métropolitain (Rhône, Seine, Loire, Garonne, etc.). La typologie sur le gradient morpho-dynamique (Axe 2) a permis de distinguer nettement les massifs montagneux (Alpes, Pyrénées, Massif Central, Massif Armoricain) des plaines (Bassin Parisien, Pays de la Loire, etc.).



**Figure 26: Distribution des classes des 2 gradients hydromorphologiques sur l'ensemble des stations disposant de données IBMR.**

La distribution des métriques en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques ont été analysées par une représentation en « boxplot » (Figures 26, 27 et 28). La significativité de la différence de distributions a été évaluée par un test de *pairwise* (Adler J., 2011) avec ajustement de *Bonferroni*.

**Abondance relative des bryophytes (en %)**

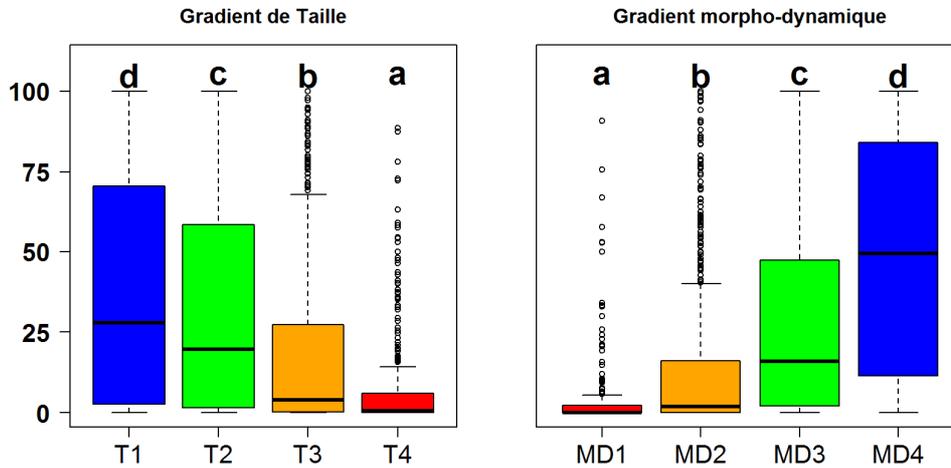


Figure 27: Distribution de la métrique « Bryophytes » en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques.

**Abondance relative des phanérogames (en %)**

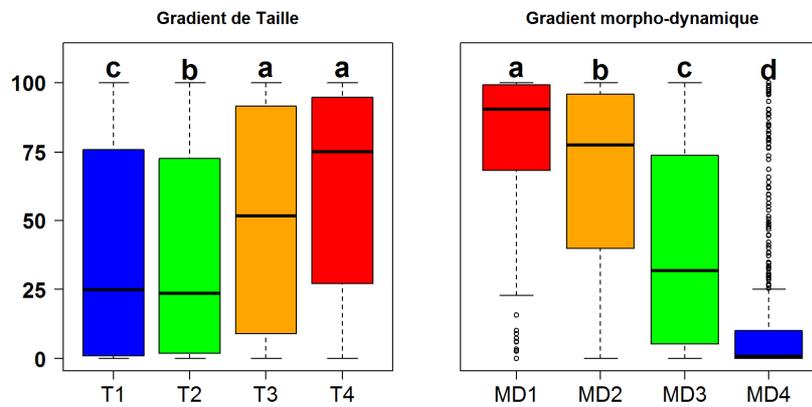
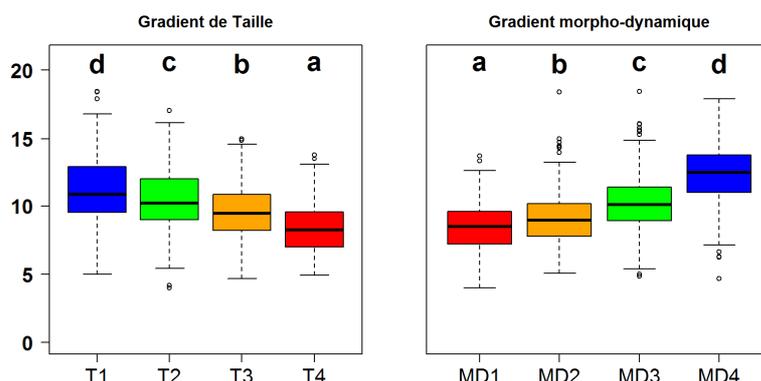


Figure 28 : Distribution de la métrique « Phanérogames » en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques.

**IBMR**


**Figure 29 : Distribution de la métrique « IBMR » en fonction des modalités des deux gradients hydromorphologiques.**

### 5.3.1.2 Analyse sur les paramètres physico-chimiques

La même démarche a été suivie pour caractériser les gradients physico-chimiques et tester la réponse d'une sélection de métriques. 9 paramètres physico-chimiques ont été analysés (Tableau 23).

	Min	Max	Moyenne	SD	Transformation
NH4	0.010	4.650	0.11	0.180	log <sub>10</sub>
PO4	0.010	2.245	0.17	0.171	log <sub>10</sub>
NO3	0.400	81.000	13.61	12.210	log <sub>10</sub>
DBO5	0.500	11.000	1.78	0.908	log <sub>10</sub>
Corg	0.400	12.000	3.63	2.024	log <sub>10</sub>
MES	1.700	219.000	10.69	12.171	log <sub>10</sub>
Temp	5.355	22.900	14.90	2.718	/
Cond	15.000	3845.000	398.66	294.241	log <sub>10</sub>
pH	6.260	8.580	7.74	0.369	/

**Tableau 23 : Paramètres de l'ACP sur les paramètres physico-chimiques.**

Les orthophosphates (PO<sub>4</sub>), la DBO<sub>5</sub> et le carbone organique sont les paramètres les plus contributifs à l'axe 1. L'axe 1 peut être interprété comme un gradient trophique (nutriments limitants et matière organique). Le pH, et la conductivité sont les paramètres les plus contributifs à l'axe 2. L'axe 2 peut être interprété comme un gradient de minéralisation.

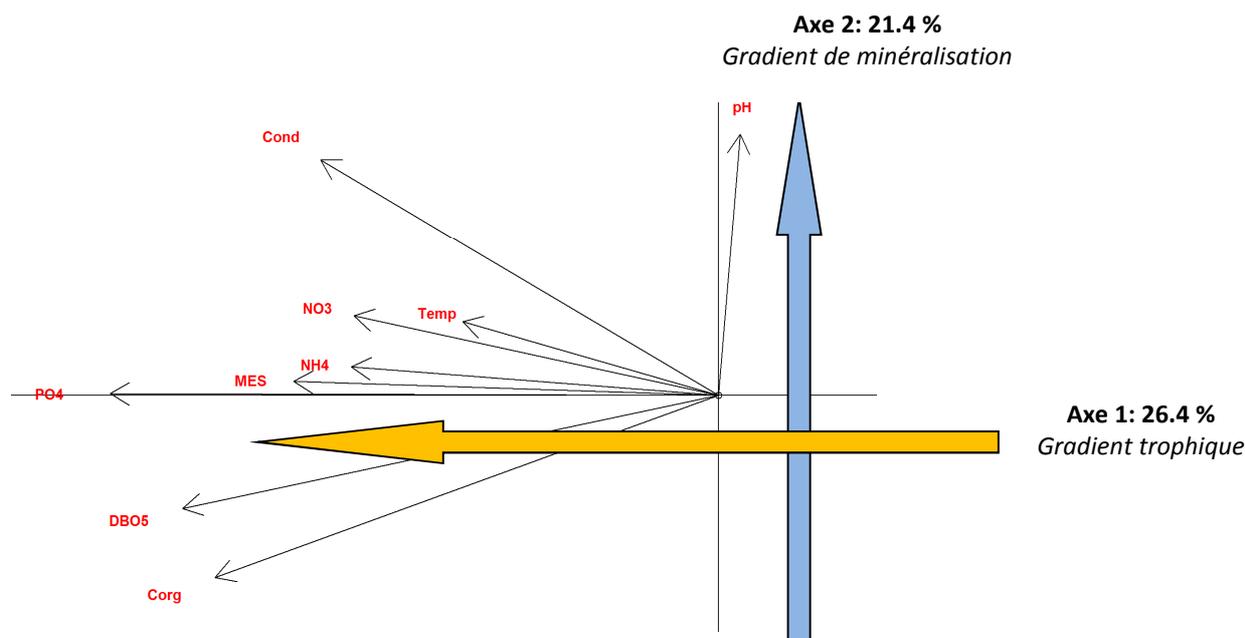


Figure 30: Analyse en composante principale sur 9 paramètres physico-chimiques (n=1302).

	Gradient de trophie	Gradient de minéralisation
Cond	-0.32	<b>0.55</b>
Corg	<b>-0.40</b>	-0.43
DBO <sub>5</sub>	<b>-0.43</b>	-0.27
MES	-0.34	<b>0.03</b>
NH <sub>4</sub>	-0.29	0.07
NO <sub>3</sub>	-0.29	0.19
pH	0.02	<b>0.61</b>
PO <sub>4</sub>	<b>-0.48</b>	0.00
Temp	-0.20	0.17

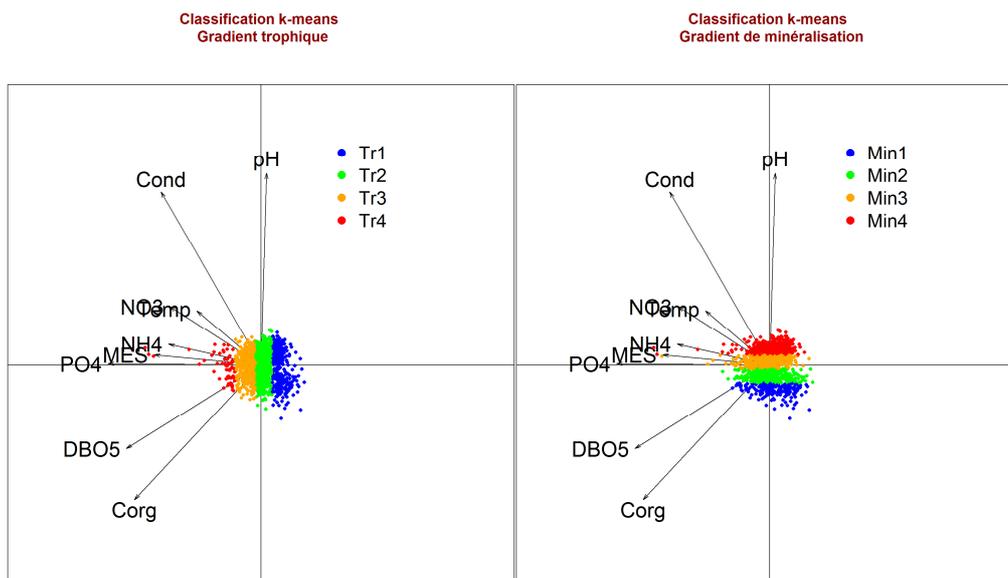
Tableau 24: Contribution normée des paramètres aux deux premiers axes

L'analyse de la corrélation entre les 3 métriques et les gradients a été réalisée par un test de corrélation de Pearson (Pearson *et al.*, 1978). Les résultats montrent que l'abondance relative des Phanérogames est corrélée de façon significativement positive avec les deux gradients tandis que l'abondance relative des Bryophytes et la note IBMR sont corrélées de façon significativement négative (Tableau 25). Les résultats obtenus pour la note IBMR sont ceux attendus s'agissant d'un indice de trophie.

	Abondance relative des Phanérogames	Abondance relative des Bryophytes	IBMR
Trophie	0.28***	-0.23***	-0.42***
Minéralisation	0.12***	-0.26***	-0.43***

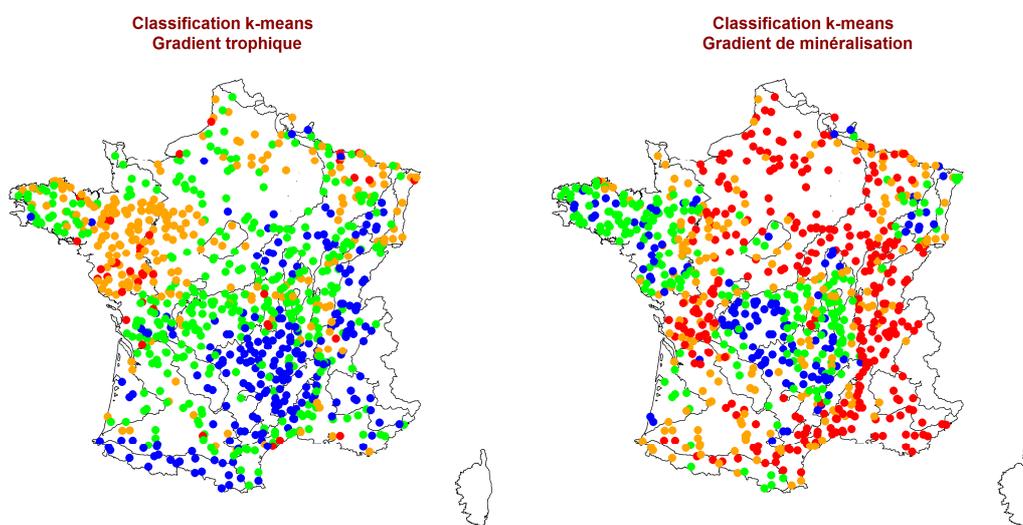
Tableau 25: Coefficients de corrélation de Pearson entre les 3 métriques et les gradients physico-chimiques (\*\*\*) : *p-value*<0.01)

Les différentes modalités des deux gradients physico-chimiques ont été déterminées par la même méthode des *k-means* (Figure 31).



**Figure 31: Classification k-means des gradients trophique et de minéralisation.**

La projection des modalités des deux gradients physico-chimiques sur le réseau hydrographique métropolitain (Figure 32) montre par exemple qu'une partie du Bassin « Loire-Bretagne » apparaît comme zone de trophie élevée tandis que le Massif Central apparaît comme des secteurs de faible trophie. En ce qui concerne le gradient de minéralisation, les modalités des gradients permettent bien de distinguer les massifs cristallins (Massif Central, Massif Armoricain, Vosges).



**Figure 32: Distribution géographique des classes de gradients trophique et de minéralisation de l'ACP.**

La distribution des métriques en fonction des modalités des deux gradients physico-chimiques a été analysée par une représentation en « boxplot » (Figures 32,33 & 34). La significativité de la différence de distribution a été évaluée par un test de *pairwise* (Adler J., 2011) avec ajustement de *Bonferroni*. Cette analyse montre que l'abondance relative en Phanérogames (Figure 33) est significativement plus élevée lorsque le niveau trophique et la minéralisation sont élevés et inversement pour les Bryophytes (Figure 34). La note IBMR (Figure 35) diminue quand le niveau trophique et la minéralisation augmentent. Ces résultats concernant la note IBMR sont ceux attendus et rejoignent les résultats concernant la définition des IBMR de référence (Chauvin *et al.*, 2013) qui montraient que les types de cours d'eau cristallins sont caractérisés par des IBMR de référence plus faibles que les types de cours d'eau à forte conductivité, à taille équivalente.

**Abondance relative des phanérogames (en %)**

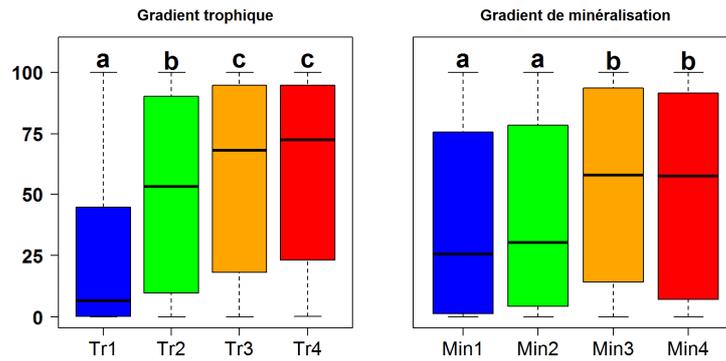


Figure 33: Distribution de l'abondance relative des phanérogames selon les 2 gradients physico-chimiques

**Abondance relative des bryophytes (en %)**

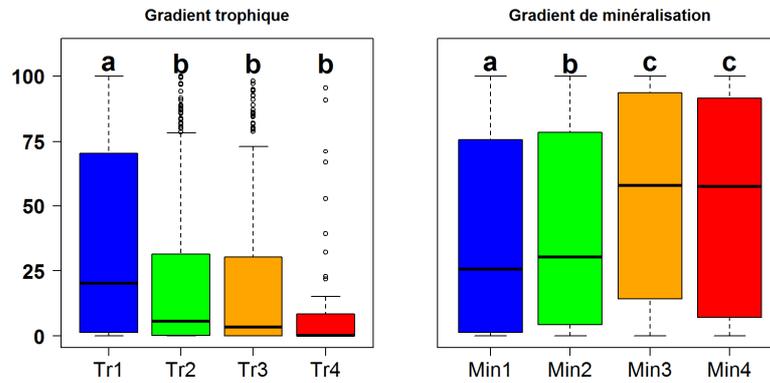


Figure 34: Distribution de l'abondance relative des bryophytes selon les 2 gradients physico-chimiques

**IBMR**

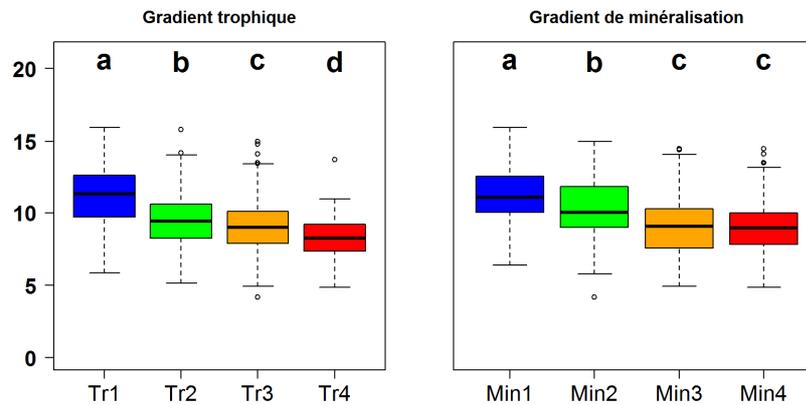


Figure 35: Distribution de l'IBMR selon les 2 gradients physico-chimiques

## 5.3.2 La régression *Partial Least Square* (PLS)

### 5.3.2.1 Méthode

La régression PLS utilise un algorithme qui tient à la fois de l'analyse en composantes principales (ACP) et de la régression linéaire (Tenehaus *et al.*, 1995, Villeneuve *et al.*, 2011). Cette méthode présente moins d'instabilité face aux fortes colinéarités des descripteurs, ici les facteurs abiotiques, et elle admet les valeurs omises ce qui permet de travailler sur un jeu de données le plus large possible. Cette méthode permet de déterminer la part de variabilité d'une métrique explicable par l'ensemble des descripteurs, puis l'importance et le sens de la corrélation entre la métrique et chacun des descripteurs pris individuellement.

Pour chacun des coefficients de corrélation établis entre une métrique et un facteur abiotique, un intervalle de confiance à 95% est déterminé à l'aide de la méthode de rééchantillonnage *Jackknife* (Martens *et al.*, 2000 ; Wasson *et al.* 2010 ; Villeneuve *et al.*, 2011; Alahuhta *et al.*, 2013a ; 2013b) pour sélectionner les variables significativement corrélées ( $p\text{-value} \leq 5\%$ ).

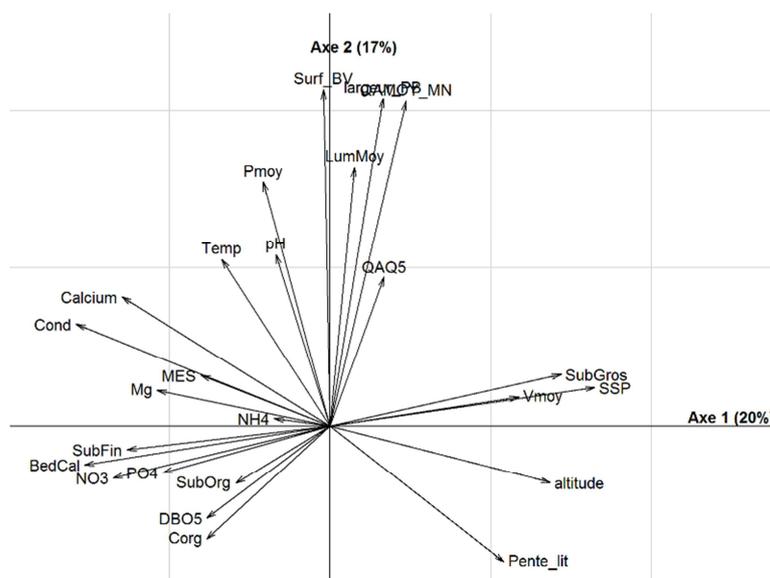
### 5.3.2.2 Transformation et analyse préliminaire du jeu de données

La méthode PLS étant plus robuste face aux fortes colinéarités des prédicteurs et acceptant les valeurs omises, il a été possible d'utiliser un plus grand nombre de descripteurs environnementaux que dans la définition des gradients environnementaux. Ainsi, 25 descripteurs ont été utilisés et certains ont subi une transformation logarithmique pour garantir leur normalité (Tableau 26).

	Paramètre	Transformation
<b>Hydromorphologie</b>	SubOrg	
	BedCal	
	Vmoy	
	Pente_lit	
	Altitude	Log <sub>10</sub>
	Pmoy	
	largeur_PB	Log <sub>10</sub>
	LumMoy	
	Surf_BV	Log <sub>10</sub>
	QAMOY_MN	Log <sub>10</sub>
	SSP <sub>étiage</sub>	Log <sub>10</sub>
	QAQ5	
	SubFin	
SubGros		
<b>Physico-chimie</b>	NH <sub>4</sub>	Log <sub>10</sub>
	PO4	Log <sub>10</sub>
	NO3	Log <sub>10</sub>
	DBO5	Log <sub>10</sub>
	Corg	Log <sub>10</sub>
	MES	Log <sub>10</sub>
	Température	
	Conductivité	Log <sub>10</sub>
	pH	
	Calcium	Log <sub>10</sub>
	Magnésium	Log <sub>10</sub>

**Tableau 26 : Paramètres environnementaux pris en compte pour le test des métriques.**

Une Analyse en Composante Principale a été mise en place sur les variables descriptives pour appréhender le jeu de corrélation s'opérant entre elles et notamment entre les descripteurs physico-chimiques et hydromorphologiques. Cette analyse a pour objectif de visualiser les données utilisées dans la PLS, l'auto-corrélation des variables n'est pas importante. Les axes 1 et 2 (Figure 36) permettent d'expliquer 37% de l'inertie totale. Les variables principalement contributives au premier axe sont celles liées au substrat, à la vitesse, à la minéralisation, à l'altitude et au niveau trophique. Le deuxième axe est constitué des différentes variables liées à la taille de la station (largeur de plein bord, surface du bassin versant amont, débit, lumière, profondeur, etc.).



**Figure 36: ACP réalisée sur 25 facteurs abiotiques (axes 1 et 2).**

Les 3 métriques retenues pour la caractérisation des gradients environnementaux sont conservés pour le test de la méthode PLS. En effet, les connaissances sur ces métriques sont suffisantes pour connaître *a priori* leur réponse aux paramètres abiotiques étudiés. Les PLS comme outil d'évaluation de la réponse des métriques aux facteurs abiotiques seront donc testées sur la note IBMR, l'abondance relative des Phanérogames et l'abondance relative des Bryophytes.

### 5.3.2.3 Régression PLS de la métrique « note IBMR »

L'ensemble des variables descriptives permet d'expliquer 59% ( $R^2=0,59$ ) de la variabilité de la note IBMR (Figure 37). Les corrélations négatives sont figurés en rouge, les corrélations positives en bleu, les non-significatives en gris. Logiquement, les résultats montrent que la note IBMR est positivement corrélée aux paramètres en lien avec le niveau trophique.

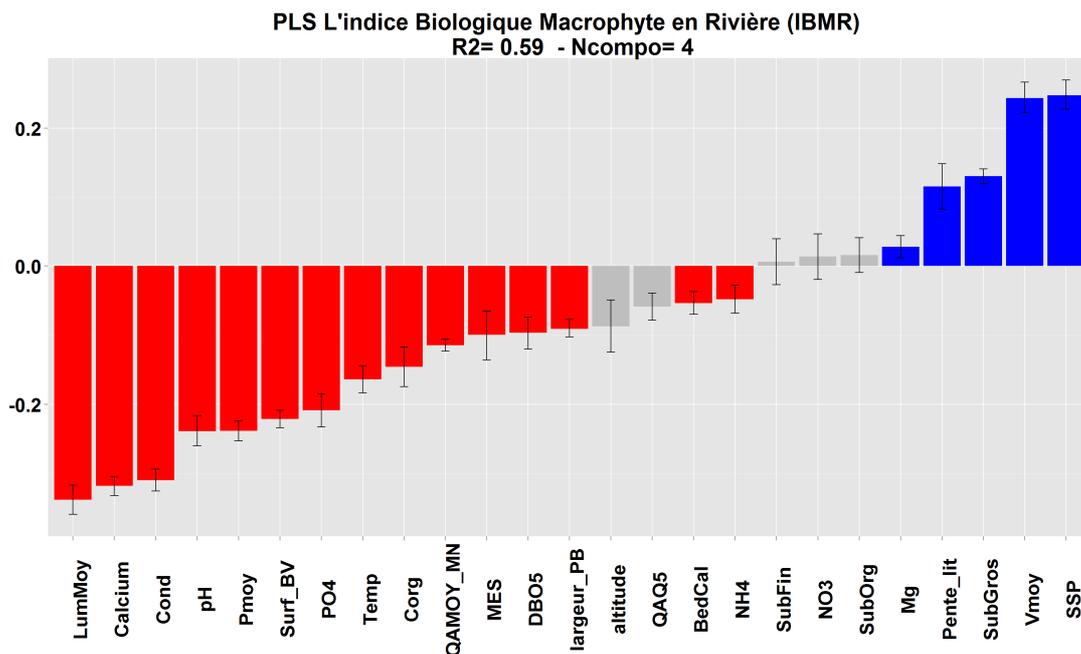


Figure 37: Régression PLS de la métrique "IBMR" selon 25 descripteurs (facteurs abiotiques).

#### 5.3.2.4 Régression PLS de la métrique « abondance relative des phanérogames »

L'ensemble des variables descriptives permettent d'expliquer 41% ( $R^2=0,41$ ) de la variabilité de la métrique « abondance relative des Phanérogames » (Figure 38). L'abondance relative des Phanérogames apparaît notamment positivement corrélée à la lumière, à la profondeur et à la présence de substrats fins, tel qu'attendu.

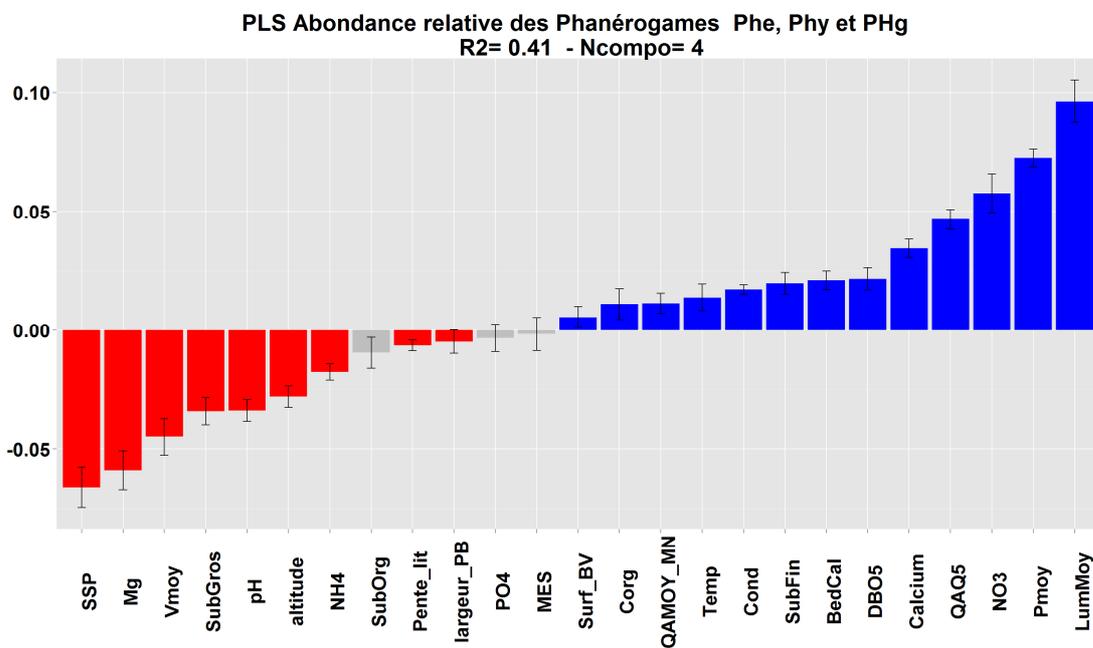


Figure 38: Régression PLS de la métrique "Phanérogames" selon 25 descripteurs (facteurs abiotiques).

#### 5.3.2.5 Régression PLS de la métrique « abondance relative des Bryophytes ».

L'ensemble des variables descriptives permettent d'expliquer 33% ( $R^2=0,33$ ) de la variabilité de la métrique « abondance relative des Bryophytes » (Figure 39). L'abondance relative des Bryophytes apparaît positivement corrélée à la vitesse, la pente du lit et la présence de substrats grossiers tel qu'attendu écologiquement.

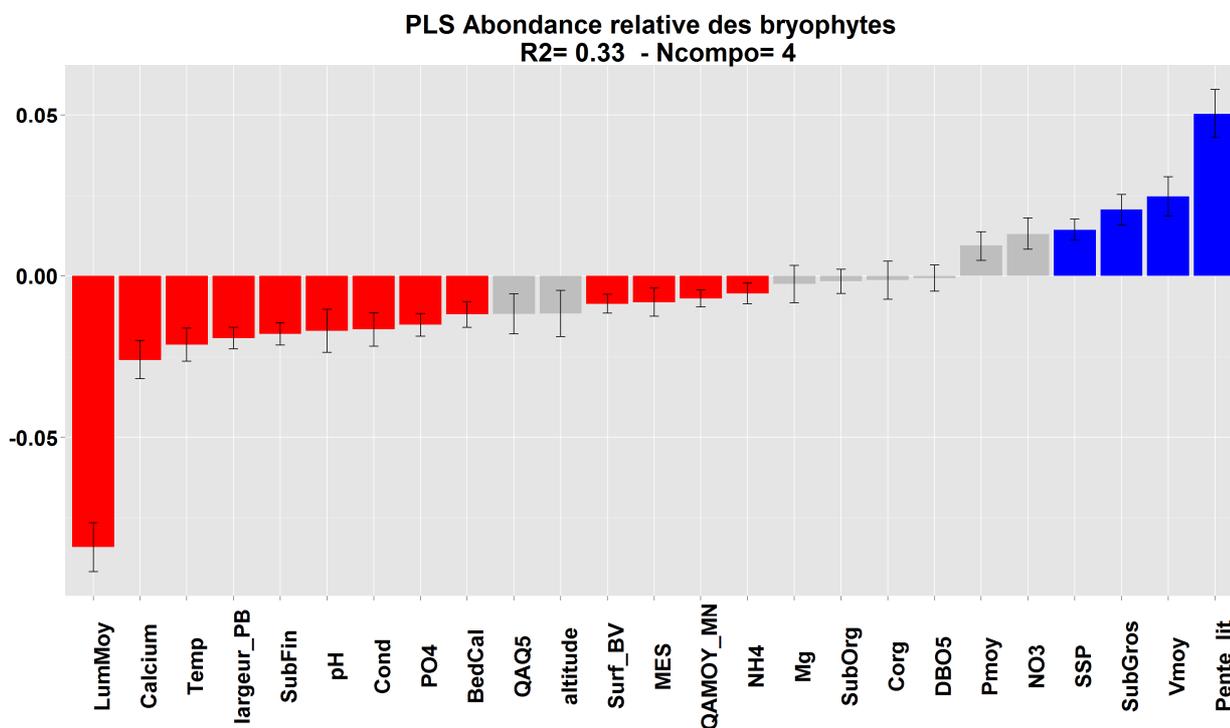


Figure 39 : Régression PLS de la métrique "Bryophytes" selon 25 descripteurs (facteurs abiotiques)

### 5.3.2.6 Perspective d'utilisation de la régression PLS

Les résultats du test de la méthode PLS comme outil d'analyse de la réponse des métriques aux facteurs abiotiques apparaissent comme concluants. La réponse des 4915 métriques « macrophytes en cours d'eau » pourra être testée dans un modèle de régression PLS.

## **6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

### **6.1 Le renforcement du jeu de données « IBMR »**

La bancarisation des relevés IBMR 2011 a permis de considérablement accroître le jeu de données « macrophytes en cours d'eau » dans la banque de données Pandore gérée par Irstea. Le volume des données s'est accru de 37 % avec une meilleure couverture du territoire national et des types de cours d'eau ainsi qu'une augmentation du nombre de réplicats par station. La base de données ainsi constituée contient des données sur 3162 opérations de contrôle IBMR réalisées dans 1740 stations DCE. La bancarisation des données IBMR 2012 interviendra au premier trimestre 2014. Ce sont à l'heure actuelle 806 relevés qui viendront s'ajouter au jeu de données. La taille du jeu de données augmentant, il est attendu que la robustesse des analyses statistiques soit renforcée.

Un relevé IBMR comprend deux entités : une liste floristique et un descriptif des conditions stationnelles. Ces deux éléments sont indissociables pour que les données floristiques puissent être qualifiées. De plus les relevés IBMR étant réalisés selon deux ensembles de faciès, les données ainsi collectées sont propices à l'étude des relations entre les macrophytes et les conditions environnementales à l'échelle du point de prélèvement.

### **6.2 La compilation des données environnementales**

En complément des données environnementales collectées dans le cadre des relevés IBMR, un important travail de compilation de données environnementales disponibles dans des bases de données nationales a été réalisé. Les données du projet SYRAH-CE ont été collectées ainsi que les données de la Banque Hydro. Un travail de jointure spatiale avec les stations ayant fait l'objet d'un relevé IBMR a été effectué. Ce sont ainsi des données sur l'hydrologie et l'hydromorphologie qui ont pu être collectées à l'échelle de tronçon et rapportées à l'échelle de la station. Une demande d'accès aux données ONEMA Carhyce a été effectuée et les données concernant la caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau ont pu être collectées. Etant donné l'important volume de données, elles sont actuellement toujours en cours de traitement. Une collaboration avec les équipes de l'ONEMA, Irstea Antony et l'Université Paris 1 qui développent des indices agrégés à partir des données élémentaires de Carhyce est envisagée. Le Référentiel national des Obstacles à l'Écoulement de l'ONEMA a également été collecté. Il sera analysé ultérieurement. Pour la physico-chimie, les données relevées entre 2005 et 2009 ont pu être collectées dans la base de données Castor (Pandore – Irstea) et dans la base de données SEEE (ONEMA) pour 2010. Les données 2011 doivent à présent être disponibles dans le SEEE. Elles seront collectées et ajoutées au jeu de données au premier trimestre 2014, de même que les données 2012 si elles sont disponibles. Le travail sur les paramètres physico-chimiques va se focaliser principalement sur les paramètres généraux. Le très important volume de données concernant les toxiques nécessitera un pré-traitement afin de travailler, dans un premier temps, par grandes familles de composés (pesticides, hydrocarbures, métaux).

Il a été possible de rattacher 1699 stations IBMR à une donnée du projet SYRAH-CE et 1626 stations IBMR à des données de la banque Hydro. 1422 données physico-chimiques ont pu être rattachées à une des opérations de contrôle IBMR.

### **6.3 Un atlas des profils écologiques**

L'exploitation de la base de données IBMR Pandore et la jointure des données environnementales compilées d'après des banques nationales a eu comme première résultante la constitution d'un atlas des profils écologiques de 332 macrophytes en cours d'eau. Les profils écologiques pourront être révisés suivant l'enrichissement de la base de données IBMR notamment en ce qui concerne les taxons pour lesquels seules 1 à 2 occurrences étaient disponibles. D'ores et déjà, il s'agit sans doute d'un outil unique à l'échelle de la France de par sa couverture du territoire nationale, la diversité des types de cours d'eau et donc d'habitats naturels pris en compte et de la diversité des taxons pris en considération, depuis les Phanérogames jusqu'au Hétérotrophes. Il s'agit là d'un outil qui devrait contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'écologie des taxons, et qui pourra être confronté aux approches déjà formalisées, pour les compléter.

Les possibilités d'exploitation des profils écologiques sont vastes. Partant du profil écologique des taxons et de listes floristiques des relevés IBMR, l'établissement de profil écologique de peuplements sera testé. Il est attendu que le profil écologique des peuplements puisse contribuer à mettre en évidence les affinités environnementales de certains groupes taxonomiques, groupes fonctionnels ou groupes de taxons et ainsi conduire à la construction de nouvelles métriques.

Les affinités des taxons étant décrites quantitativement et par modalités pour un paramètre donné, des indices d'affinité environnementale pourront être établis sur le modèle des indices d'affinité trophique et de morphodynamisme développés au Royaume-Uni. Ces indices constitueront eux-mêmes une source possible de nouvelles métriques. Enfin, la précision des exigences écologiques des taxons pourrait constituer une base pour la révision de l'indicateur d'évaluation DCE (IBMR, actuellement normalisé NF T90-395, AFNOR 2003) avec des modifications possibles de la liste des taxons contributifs à l'indice (ajout, retrait, ajustement des valeurs de CS et E).

L'analyse des profils écologiques pourraient également conduire à modifier la valeur des métriques « cotes spécifiques » et « coefficient de sténocécie » qui sont associés à chacun des taxons contributifs et dont la valeur pourrait être ajustée en fonction des connaissances ou précisions à apporter par l'établissement des profils écologiques.

#### 6.4 Une base de données sur les traits morphologiques et fonctionnels des macrophytes

Pour 332 macrophytes, une base de données compilant des informations relatives à la taxonomie et à 20 traits morphologiques et fonctionnels a été construite. Ceci a été possible grâce à la compilation de base de données européennes pré-existantes (base de Wiegleb, base BioFLor) adaptées et complétées par avis d'expert. L'apport de nouveaux traits est programmé par l'exploitation des profils écologiques établis pour les taxons. De nouveaux traits pourront également être définis en partant du travail réalisé par Ellenberg *et al* (1991) repris dans le cadre du projet britannique ECOFACT (Hill *et al.*, 1999) et portant sur la construction d'indices d'affinité avec la lumière, le pH et l'azote.

#### 6.5 La construction, le calcul et le test des métriques

Le recoupement des données environnementales et des données sur les traits des taxons a permis de définir 4915 métriques « macrophytes en cours d'eau ». Il s'agit uniquement de métriques ayant un sens écologique. Pour autant, un important travail d'analyse de ces métriques a été entamé et devra être poursuivi afin d'éliminer les métriques n'apportant que peu d'information ou des informations redondantes. C'est la phase suivante de test de la réponse des métriques qui vise également à déterminer à quel paramètre environnemental la métrique répond et avec quelle intensité. Pour effectuer le test des métriques, la méthode statistique retenue dans un premier temps a été celle des PLS, reconnue dans la littérature scientifique comme probante. Cette méthode s'est effectivement avérée efficace pour tester la réponse d'une sélection de 3 métriques « macrophytes en cours d'eau ». Elle devra être appliquée à l'ensemble des métriques. Pour autant, d'autres méthodes statistiques pourront être testées telle que des analyses multivariées classiques (CCA, RLQ, ktables, etc.) ou des méthodes de régression (régression logistique, PLS logistique, réseaux de neurones, etc.) (Mondy *et al.*, 2013 ; Gebler *et al.*, 2013).

#### 6.6 Pressions environnementales et échelle spatiale

Les études exploratoires de Villeneuve *et al.*, 2001 ; Marzin *et al.*, 2012 tendaient à montrer que l'IBMR ne répond pas de façon satisfaisante aux pressions à large échelle. La construction et le test des métriques ont ici été réalisés en analysant les données environnementales disponibles en grand nombre et collectées à l'échelle du point de prélèvement IBMR. L'interprétation des données floristiques à partir des données

environnementales à petite échelle étant ici d'autant plus directe puisque les relevés IBMR s'effectuent par faciès hydromorphologique. Pour autant des données environnementales à l'échelle du tronçon ou à large échelle (bassin versant) ont été collectées dans des bases de données nationales et compilées par jointure spatiale aux données IBMR. Ces données ont d'ores et déjà été utilisées pour partie pour la caractérisation des gradients régissant les conditions environnementales dans les cours d'eau français métropolitains. Le test de l'ensemble des métriques aux pressions à large échelle devra être réalisé en parallèle à un travail de recherche sur l'impact des pressions à large échelle sur les facteurs abiotiques à petite échelle.

## 6.7 Métriques de diagnostic, métriques candidates et indice multimétrique

Le test des métriques doit permettre de définir quelles sont celles qui répondent le mieux aux modifications des conditions environnementales. Pour que les métriques sensibles aux conditions environnementales puissent constituer des métriques de diagnostic, un jeu de données de référence devra être constitué afin de mesurer la valeur différentielle de la métrique entre conditions environnementales de référence et conditions perturbées (par une ou plusieurs pressions). Les métriques candidates à une intégration dans un futur indice multimétrique « macrophytes en cours d'eau » sont celles qui présenteront les réponses les plus fortes à un type de pression donnée. Les deux autres caractéristiques recherchées chez les métriques candidates sont la non-redondance et la complémentarité de façon à ce que l'indice multimétrique puisse rendre compte, tel qu'attendu, de pressions environnementales de différentes natures et intensité.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, 2003. Indice Biologique Macrophytique Rivière. Norme NF T90-395 octobre 2003.
- AFNOR 2004. Qualité de l'eau. Guide pour l'étude des macrophytes aquatiques dans les cours d'eau. NF EN 14184, 13 p.
- Adler J., 2011. R, l'essentiel. Pearson Education France. 599 p.
- Aguiar F.C., Ferreira M.T., Albuquerque A., Rodriguez-Gonzalez P., Segurado, P. 2009. Structural and functional responses of riparian vegetation to human disturbance: performance and scale-dependence. *Fundam. Appl. Limnol.* 175, 249–267.
- Alahuhta J., Kanninen A., Hellsten S., Vuori, K. M., Kuoppala, M., Hämäläinen, H. 2013a. Environmental and spatial correlates of community composition, richness and status of boreal lake macrophytes. *Ecological Indicators*. 32: 172-181.
- Alahuhta J., Kanninen A., Hellsten S., Vuori K. M., Kuoppala M., Hämäläinen H. 2013b. Variable response of functional macrophyte groups to lake characteristics, land use, and space: implications for bioassessment. *Hydrobiologia*. 32: 1-14.
- Baattrup-Pedersen A., Szoszkiewicz K., Nijboer R., O'Hare M., Ferreira T. 2006. Macrophyte communities in unimpacted European streams : variability in assemblage patterns, abundance and diversity. *Hydrobiologia*, 566 : 179-196.
- Barrat-Segretain M.H., 1996. Strategies of reproduction, dispersion, and competition in rivers plants: a review. *Vegetatio* 123 : 1337.
- Barendregt A., Bio A.M.F. 2003. Relevant variables to predict macrophyte communities in running waters. *Ecological modelling* 160: 205 – 217.
- Berger W.H., Parker F.L. 1970. Diversity of planktonic Foraminifera in deep sea sediments. *Science*, 168: 1345 – 1347.
- Biggs B.J.F., 1996. Hydraulic habitat of plants in streams. *Regulated Rivers : Research & management*, vol 12, 131-144.
- Birk, S., Willby W., Chauvin C., Coops H., Denys L., Galoux D., Kolada A., Pall K., Pardo I., Pot R., Stelzer D.. 2007. Report on the Central Baltic River GIG macrophytes intercalibration exercise, CIRCA.
- Bougon N., Ferréol M., 2011. Physicochimie soutenant la biologie. Typologie chimique nationale des cours d'eau. ONEMA - Cemagref. 39 p.
- Bornette G., Puijalon S., 2011. Response of aquatic plant to abiotic factors : a review. *Aquatic Sciences*, 73: 1-14.
- Breugnot E., 2007. Déterminisme spatiotemporel des peuplements macrophytiques en grands cours d'eau. Application à la Garonne et à la Dordogne. Thèse de l'Université Bordeaux 1. 303 p.
- Brookes A., Gregory K., 1988. Channelization, river engineering and geomorphology. In Hooke, J.M. (ed.). *Geomorphology in Environmental Planning*. John Wiley. Chichester p 145-167.
- CEN – Comité européen de normalisation, 2011. Water quality - Guidance on the design of Multimetric Indices. Technical report 16151, Chandresis A., Mengin N., Malavoi J.R., Souchon Y., Pella H., Wasson J.G., 2008. SYRAH-CE, principes et méthodes. 81 p.

- Chandesris A., Mengin N., Malavoi J.R., Souchon Y., Wasson J.G., 2009. SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Atlas à Large Echelle V\_2.0. Cemagref – ONEMA, 58p.
- Chandesris A., Mengin N., Moiroud L., Ferréol M., Roussel F., 2009. Réseaux DCE et bancarisation des données hydrobiologiques. Présentation au GNQE/MEDDAD, Paris, 27 nov. 2009.
- Chauvin C., 2008. Echantillonnage des macrophytes dans les réseaux de mesure DCE - Note méthodologique. In Circulaire MEDAD 2008-093 BEMA du 8 février 2008.
- Chauvin C., Loriot S., Feret T. (2013). Evaluation de l'état écologique des cours d'eau par les macrophytes. Proposition d'un système de classification. Rapport d'étude. Irstea. Onema. 30p.
- Daniel H., Bernez I., Haury J., 2006. Relationships between macrophytic vegetation and physical features of river habitats : the need for a morphological approach. *Hydrobiologia*, 570 : 11-17.
- Dawson F.H, Szoszkiewicz K., 1999. Relationships of some factors with the associations of vegetation in British rivers. *Hydrobiologia*, 415: 117-122.
- Den Hartog C., Van Der Velde G., 1988. Structural aspects of aquatic plant communities in J.J. Symoens (ed.), *Vegetation of Inland Waters*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p. 113 – 153.
- Dodkins I., Rippey B., Hale P., 2005. An application of canonical correspondence analysis for developing ecological quality assessment metrics for river macrophytes. *Freshwater Biology*, 50: 891-904.
- Ellenberg H., Weber H.E, Wirth V., Werner W, Paulissen D., 1911. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, 18: 1 – 248.
- European Commission, 2005. Guidance on the intercalibration process 2004-2006. Common implementation strategy for the water framework directive. Guidance document n°14
- Ferreira M.T., A. Albuquerque, F.C. Aguiar & N. Sidorkewicz, 2002. Assessing reference sites and ecological quality river plant assemblages from an Iberian basin using a multivariate approach. *Archive für Hydrobiologie*, 155: 121-145.
- Forgy, E. W. , 1965. Cluster analysis of multivariate data: efficiency vs interpretability of classifications. *Biometrics* 21, 768–769.
- Franklin P., Dunbar M., Whitehead P., 2008. Flow controls on lowland river macrophytes: a review. *Science of the total environment*. 400: 369-378
- Gebler D., Kayzer D., Szoszkiewicz K., Budka A. 2013. Artificial neural network modeling of macrophyte indices based on physic-chemicals characteristics of water. *Hydrobiologia* (en cours de publication).
- Gurnell A.M., Oosterhout M.P.V, De Viegler B., Goodson J.M., 2006. Reach-scale interactions between aquatic plants and physical habitat : river frome, dorset. *River Research and Applications*, 22 : 667 – 680.
- Gurnell A.M., O'Hare J.M., O'Hare M.T., Dunbar M.J., Scarlett P.M., 2010. An exploration of associations between assemblages of aquatic plant morphotypes and channel geomorphological properties within British rivers. *Geomorphology*, 116 (1-2). 135-144.
- Gurnell A.M., Bertoldi W., Corenblit D., 2012. Changing river channels : The role of hydrological processes, plants and pionner fluvial landforms in humid temperate, mixed load, graded bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 111 : 129 – 141.
- Gurnell, A. 2013, Plants as river system engineers. *Earth Surf. Process. Landforms*. doi: 10.1002/esp.3397
- Hartigan, J. A. and Wong, M. A., 1979. A Kmeans clustering algorithm. *Applied Statistics*, 28: 100–108.

- Haury J., Peltre M.C., Trémolières M., Barbe J.P., Thiébaud G., Bernez I., 2006. A new method to assess water trophic and organic pollution – The Macrophyte Biological Index for Rivers (IBMR): its application to different types of river and pollution. *Hydrobiologia*, 570: 153-158.
- Haury J., Thiébaud G., Coudreuse J., Muller S., 2008. Les lichens, bryophytes, ptéridophytes et phanérogames aquatiques. SET, n° thématique, p. 23 – 36.
- Hering D., Feld C.K., Moog O., Ofenböck T., 2006. Cook book for the development of a Multimetric Index for biological condition of aquatic ecosystems: experiences from the European AQEM and STAR projects and related initiatives. *Hydrobiologia*, 566: 311-324.
- Hill M.O., Mountford J.O., Roy D.B., Bunce R.G.H., 1999. ECOFACT 2a Technical Annex. Ellenberg's indicator value for British Plants. 46p.
- Karr J.R., Chu E.W., 1999. Restoring life in running waters: better biological monitoring. Island Press, Washington, DC. 200 p.
- Lachavanne J.B., Juge R., Perfetta J., 1995. Structure des peuplements de macrophytes in Pourriot R., Meybeck M., Champ P., Arcady Meyer J. [eds] *Limnologie générale*. Masson, Paris. p.474 – 493.
- Lacoul P., Freedman B., 2006. Environmental influences on aquatic plants in freshwater ecosystems. *Environmental Review*, 14: 89 – 136.
- Léonard A., Zégel P., Augu H., Kreutzenberger K. (2013). Référentiel des Obstacles à l'Écoulement. Descriptif de contenu de la version simplifiée. Version 5.0. ONEMA. 31 p.
- Malavoi J.R. et Bravard J.P., 2010. *Elements d'hydromorphologie fluviale*. Onema. 224 pages.
- Manolaki P., Papastergiadou E. (2013). The impact of environmental factors on the distribution pattern of aquatic macrophytes in the midsized Mediterranean stream. *Aquatic Botany*, 104: 34-46.
- Marzin A., Archaimbault V., Belliard J., Chauvin C., Delmas F., Pont D. 2012. Ecological assessment of running waters: Do macrophytes, macroinvertebrates, diatoms and fish show similar responses to human pressures? *Ecological Indicators*, 23: 56-65.
- Martens H. and Martens M. (2000) Modified Jackknife Estimation of Parameter Uncertainty in Bilinear Modelling by Partial Least Squares Regression (PLSR). *Food Quality and Preference*, 11, 5–16.
- Mebane C.A., Simon N.S., Marret T.R., 2013. Linking nutrient enrichment and streamflow to macrophytes in agricultural streams. *Hydrobiologia* (en cours de publication).
- Mondy C.P., Villeneuve B., Archaimbault V., Usseglio-Polatera P., 2012. A new macroinvertebrate based multimetric index (I2M2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands: a taxonomical and trait approach. *Ecological indicators*, 18: 452 – 467.
- Mondy C.P., Usseglio-Polatera P., 2013. Using conditional tree forests and life history traits to assess specific risks of stream degradation under multiple pressure scenario. *Science of the Total Environment*. vol. 461-462, p750-760
- O'Hare M.T., Baatrup-Pedersen A., Nijboer R., Szoszkiewicz K., Ferreira T., 2006. Macrophyte communities of European streams with altered physical habitat. *Hydrobiologia*, 566: 197-210.
- O'Hare J.M., O'Hare M.T., Gurnell A.M., Dunbar M.J., Scarlett P.M., Laize C., 2011. Physical constraints on the distribution of macrophytes linked with flow and sediment dynamics in British rivers. *Rivers Research and Applications*, 27: 671 – 683.

- Pielou E.C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13: 131-144.
- Pearson, T. H., & Rosenberg, R. (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanographic Marine Biology Annual Review*, 16, 230-306.
- Pont, D. ; Delaigue, O. ; Marzin, A., Logez, M. ; Belliard, J. (2013). Programme IPR+. Révision de l'indice poisson rivière pour l'application de la DCE. Version V.2.0 de l'indicateur. Convention ONEMA - IRSTEA. Partenariat 2013. Domaine Qualité des eaux. Action 37. Rapport d'étape. 208 p.
- Raunkiaer C., 1934. The life forms of plants and statistical plant geography. Oxford University Press. 632 p.
- R Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, url: <http://www.R-project.org/>
- Reynolds, A., Richards, G., de la Iglesia, B., Rayward Smith, V. 1992 Clustering rules: A comparison of partitioning and hierarchical clustering algorithms. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 5: 475-504
- Riffard M., Andréassian V., Nicolle P., Peschard J., 2012. Combinaison multimodèle et cartographie de consensus du débit de référence d'étiage et du débit moyen à l'échelle de la France. Irstea – Onema 37p.
- Riis T., Sand-Jensen K., Vestergaard O., 2000. Plants communities in lowland Danish streams: species composition and environmental factors. *Aquatic Botany*, 66: 255 – 272.
- Riis T. & Biggs B.J.F., 2003. Hydrologic and hydraulic control of macrophytes in streams. *Limnology and Oceanography*, 48: 1488-1497.
- Riis T., Suren A.M., Ckauseb B., Sand-Jensen K., 2008. Vegetation and flow regime in lowland streams. *Freshwater Biology*, 53: 1531 – 1543.
- Shannon, C.E. and Weaver, W., 1949. The mathematical theory of communication. The University of Illinois Press, Urbana, Illinois, USA, 115 pp.
- Simpson E.H., 1949. Measurement of diversity. *Nature*, 163 : p.688.
- Szozzkiewicz K., Ferreira T., Korte T., BaatrupPedersen A., DavyBowker J., O'Hare M., 2006. European river plant communities: the importance of organic pollution and the usefulness of existing macrophytes metrics. *Hydrobiologia*, 566:211-234.
- Tenehaus M., Gauchi J.P., Ménardo C., 1995. Régression PL et applications. *Revue de statistiques appliquée XLIII(1)* : 763.
- Valette B., Cunillera A., 2010. Cahiers techniques SYRAH-CE. Cemagref – ONEMA. 93 p.
- Villeneuve B., Ferréol M., Valette L., Bougon N., Tormos T., 2011. Extrapolation spatiale de l'état écologique des masses d'eau et modèles diagnostics. Rapport technique. Irstea.
- Wasson J.G., Malavoi J.R, Maridet L., Souchon Y., Paulin L., 1998. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. Cemagref. 158p.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Sauquet E., Mengin N. 2006. Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. Typologie des cours d'eau de la France Métropolitaine. Cemagref. 62 p.

- Wasson, J-G. Villeneuve, B., lital, A., Murray-Bligh, J., Dobiasova, M., Bacikova, S., Timm, H., Pella, H., Mengin, N., Chandesris, A., 2010 Large-scale relationships between basin and riparian land cover and the ecological status of European rivers. *Freshwater biology*, 55: 1465–1482
- Water Framework Directive – United Kingdom Advisory Group (WFD – UKTAG), 2008. UKTAG River Assessment Methods. *Macrophytes (River LEAFPACS)*. 27 p.
- Wiegleb G., 1988. Analysis of flora and vegetation in rivers : concepts and applications. In J.J. SYmoens (ed.), *Vegetation of Inland waters*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. p.311 - 340.
- Wiegleb G., 1991. Die Lebens und Wuchsformen der makrophytischen Wasserpflanzen und deren Beziehung zur Ökologie, Verbreitung und Vergesellschaftung der Arten. *Tuexenia* 11: 135-147.
- Willby N.J, Pitt J.A, Phillips G., 2012. The ecological classification of UK rivers using aquatic macrophytes. Environmental Agency, Report SC010080/R1
- Willby N.J., Abernethy V.J., Demars B.O.L., 2000. Attributebased classification of European hydrophytes and its relationship to habitat utilization. *Freshwater Biology*, 43: 43-74.

**ANNEXES**

	Cond	Corg	DBO5	Dureté	HCO <sub>3</sub>	MES	Mg	NH <sub>4</sub>	Nkj	NO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub> diss	pH	PO <sub>4</sub>	Ptot	SiO <sub>2</sub>	TAC	Temp	TxO <sub>2</sub>
Calcium	0.93 ***	-0.25 ***	-0.02 *	0.98 ***	0.96 ***	0.15 ***	0.41 ***	0.11 ***	0.08 ***	0.41 ***	-0.09 ***	0.57 ***	0.17 ***	0.16 ***	0.08 ***	0.95 ***	0.09 ***	-0.08 ***
Cond	/	-0.09 ***	0.11 ***	0.95 ***	0.9 ***	0.2 ***	0.56 ***	0.18 ***	0.14 ***	0.48 ***	-0.18 ***	0.5 ***	0.3 ***	0.3 ***	0.13 ***	0.9 ***	0.16 ***	-0.18 ***
Corg	/	/	0.51 ***	-0.2 ***	-0.24 ***	0.33 ***	0.09 ***	0.14 ***	0.37 ***	0.18 ***	-0.35 ***	-0.43 ***	0.42 ***	0.45 ***	0.34 ***	-0.21 ***	0.15 ***	-0.38 ***
DBO <sub>5</sub>	/	/	/	-0.02.	-0.03 *	0.34 ***	0.14 ***	0.17 ***	0.08 ***	0.26 ***	-0.22 ***	-0.18 ***	0.47 ***	0.5 ***	0.27 ***	-0.06 ***	0.1 ***	-0.25 ***
Dureté	/	/	/	/	0.95 ***	0.15 ***	0.54 ***	0.13 ***	0.09 ***	0.41 ***	-0.12 ***	0.53 ***	0.18 ***	0.19 ***	0.06 **	0.94 ***	0.09 ***	-0.11 ***
HCO <sub>3</sub>	/	/	/	/	/	0.13 ***	0.44 ***	0.07 ***	0.06 ***	0.4 ***	-0.1 ***	0.6 ***	0.18 ***	0.17 ***	0.08 ***	1 ***	0.09 ***	-0.08 ***
MES	/	/	/	/	/	/	0.19 ***	0.21 ***	0.29 ***	0.18 ***	-0.19 ***	0.07 ***	0.28 ***	0.38 ***	0.1 ***	0.11 ***	0.13 ***	-0.2 ***
Mg	/	/	/	/	/	/	/	0.16 ***	0.2 ***	0.22 ***	-0.21 ***	0.25 ***	0.28 ***	0.29 ***	0.07 ***	0.43 ***	0.13 ***	-0.18 ***
NH <sub>4</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	0.43 ***	-0.07 ***	-0.17 ***	0.01 .	0.33 ***	0.37 ***	-0.06 **	0.1 ***	0.03 **	-0.21 ***
Nkj	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0.15 ***	-0.24 ***	-0.03 *	0.24 ***	0.33 ***	0 .	0.15 ***	0.05 ***	-0.26 ***
NO <sub>3</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0.12 ***	0.01 .	0.33 ***	0.28 ***	0.33 ***	0.32 ***	0.07 ***	-0.17 ***
O <sub>2</sub> diss	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.23 ***	-0.27 ***	-0.3 ***	-0.05 **	-0.1 ***	-0.43 ***	0.75 ***
pH	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0.05 ***	-0.06 ***	-0.26 ***	0.56 ***	0.07 ***	0.3 ***
PO <sub>4</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.82 ***	0.38 ***	0.14 ***	0.1 ***	-0.28 ***
Ptot	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.29 ***	0.17 ***	0.11 ***	-0.32 ***
SiO <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0.05 *	-0.03 .	-0.17 ***
TAC	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.1 ***	-0.08 ***
Temp	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.02 .

Annexe 1 : Tableau des corrélations de Spearman entre les différents paramètres physico-chimiques (p-value &lt;0.001: \*\*\*; &lt;0.01: \*\*;&lt;0.05:\*,&gt;0.5 : .)

