



HAL
open science

Physico-chimie soutenant la biologie des plans d'eau nationaux : Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils & Amélioration des connaissances par la télédétection

Pierre-Alain Danis, Vincent Roubeix

► To cite this version:

Pierre-Alain Danis, Vincent Roubeix. Physico-chimie soutenant la biologie des plans d'eau nationaux : Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils & Amélioration des connaissances par la télédétection. Onema; Irstea Aix en Provence. 2014. hal-03172072

HAL Id: hal-03172072

<https://hal.inrae.fr/hal-03172072v1>

Submitted on 17 Mar 2021

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.

Partenariat 2013

*Etat écologique, biodiversité et fonctionnement des systèmes lacustres
Action 29+64*



**Physico-chimie
soutenant la biologie
des plans d'eau nationaux :
Principes et méthodes
de définition des valeurs-seuils
&
Amélioration des connaissances
par la télédétection**

Rapport d'avancement

*Pierre-Alain Danis (Onema)
&
Vincent Roubéix (Irstea)*

Février 2014

Contexte de programmation et de réalisation

En accord avec les termes de la DCE, la définition des règles d'évaluation de l'état écologique des plans d'eau implique l'établissement des valeurs-seuils correspondant aux limites de classe d'état pour les 6 paramètres physico-chimiques généraux soutenant la biologie : la concentration en nutriments, la transparence, le bilan d'oxygène, la température de l'eau, la salinité et l'état d'acidification.

Le présent rapport présente les avancées méthodologiques réalisées en 2013 pour :

- la définition des valeurs-seuils de la concentration en phosphore total, de la concentration en ammonium et de la transparence sur la base d'un calage aux valeurs seuils des indicateurs biologiques disponibles et pertinents en terme de réponse à la physico-chimie, *i.e.* métriques MBA et MCS de l'indice phytoplancton IPLAC. Les autres indicateurs biologiques (poisson, macrophytes et macroinvertébrés) n'ayant pas présenté de réponse significative aux paramètres physico-chimiques testés ;
- la définition des valeurs-seuils de la concentration en nitrates par analyse de la réponse des concentrations en nitrates à la force motrice pourcentage d'agriculture sur les bassins-versants ;
- les potentialités de la télédétection pour le suivi et la surveillance des plans d'eau avec une première application au cas de la température de surface.

Les auteurs

Pierre-Alain Danis

Ingénieur Onema (Pierre-Alain.Danis@onema.fr)

Onema, Pôle études et recherches Onema-Irstea Hydroécologie Plans d'Eau, Aix-en-Provence

Irstea - Unité Hydrobiologie HYAX

3275 route de Cézanne – CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Vincent Roubéix

Ingénieur de recherche (Vincent.Roubéix@irstea.fr)

Irstea, UR HYAX, Pôle études et recherches Onema-Irstea Hydroécologie Plans d'Eau, Aix-en-Provence

Irstea - Unité Hydrobiologie HYAX

3275 route de Cézanne – CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

Les correspondants

Onema : **Yorick Reyjol**, DAST Onema, Vincennes, Yorick.Reyjol@onema.fr

Irstea : **Christine Argillier**, Irstea, Aix-en-Provence, Christine.Argillier@irstea.fr

Référence du document : Danis, P.-A. & V. Roubéix (2014) : Physico-chimie soutenant la biologie des plans d'eau nationaux : Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils & Amélioration des connaissances par la télédétection. Rapport d'avancement. Convention Onema/Irstea 2013. Pp 81.

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>France</i>
Niveau géographique :	<i>National</i>
Niveau de lecture :	<i>Professionnels, Experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Document PDF</i>

Physico-chimiques soutenant la biologie des plans d'eau nationaux

Pierre-Alain Danis & Vincent Roubex

1.	Introduction.....	4
2.	Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils	5
2.1.	Bilan des données physico-chimiques des réseaux de suivi	5
2.2.	Les bioindicateurs disponibles	6
	a) Phytoplancton : IPLAC	6
	b) Poisson : IIL	6
	c) Macrophytes : IBML	7
	d) Invertébrés : IMAIL	7
2.3.	Définition des seuils de nitrates à partir de la relation entre le paramètre et les forces motrices	8
	a) Méthodologie	8
	b) Déclinaison par critère typologique	9
	c) Limitations diverses	11
2.4.	Définition DISCRETE des seuils physico-chimiques à partir des relations entre variables physico-chimiques et indicateurs biologiques	11
	a) Méthode	11
	b) Limites (cas du phosphore total, valeur médiane)	14
2.5.	Définition CONTINUE des seuils physico-chimiques à partir des relations entre variables physico-chimiques et indicateurs biologiques	16
	a) Les valeurs-seuils des métriques IPLAC	16
	b) Détermination des valeurs-seuils des paramètres physico-chimiques	16
	c) Evaluation de l'incertitude sur les limites de classes	17
	d) Règle d'évaluation de la qualité des PE	20
	e) Dispersion des valeurs-seuils	21
	f) L'évaluation physico-chimique par la règle du percentile 66	23
	g) Les valeurs-seuils (VS_{P66}) des plans d'eau nationaux	26
	h) Effet typologique sur la distribution des VS_{P66}	30
3.	Amélioration des connaissances par la télédétection.....	46
3.1.	Amélioration des connaissances par la télédétection	46
	a) Problématique	46
	b) Résumé du rapport de stage de R. Simon : "Télédétection de paramètres physico-chimiques et biologiques de plans d'eau : état de l'art & étude de cas" (Simon 2013)	46
	c) Cas de la température de surface	47
4.	Conclusions et perspectives	48
4.1.	Conclusions sur la définition des valeurs-seuils	48
4.2.	Perspectives générales.....	51
5.	Références	53
6.	Annexes	54
6.1.	Seuils physico-chimiques pour le phosphore total.....	54
6.2.	Seuils physico-chimiques pour l'ammonium	63
6.3.	Seuils physico-chimiques pour la transparence.....	72

Physico-chimiques soutenant la biologie des plans d'eau nationaux
Pierre-Alain Danis & Vincent Roubeix

1. Introduction

La définition des règles d'évaluation de l'état écologique des plans d'eau implique l'établissement des valeurs-seuils correspondant aux limites de classe d'état pour les 6 paramètres physico-chimiques généraux soutenant la biologie que sont la transparence, la température de l'eau, le bilan d'oxygène, la salinité, l'état d'acidification et la concentration en nutriments.

Principalement (§2), le présent rapport détaille pour 2 des 6 paramètres physico-chimiques généraux (nutriments et transparence) les nouvelles méthodologies développées en 2013 et les propositions de valeurs-seuils estimées pour 4 variables : la concentration en phosphore total en zone euphotique (valeur médiane des observations), la concentration en ammonium en zone euphotique (valeur maximale des observations), la concentration en nitrates en zone euphotique (valeur maximale des observations), et la transparence (valeur médiane des observations). D'autres nutriments ont été testés, en particulier les nutriments présents dans le SEQ-Eau (e.g. PO₄, valeur maximale) mais n'ont pas montré de réponses significatives aux indicateurs biologiques ou aux forces motrices disponibles. Les autres paramètres physico-chimiques que sont le bilan d'oxygène, le niveau d'acidification, la salinité et la température n'ont pas pu être traités dans le temps imparti pour cette étude en vue de la mise à jour de l'arrêté d'évaluation en 2014.

Les indicateurs biologiques disponibles (cf. §2.2) pour le calage des valeurs-seuils des paramètres physico-chimiques sont l'indice phytoplancton, IPLAC (Feret and Laplace-Treytore 2013), l'indice poisson, IIL (Argillier, Caussé et al. 2013), l'indice macrophytes, IBML (Boutry, Bertrin et al. 2013), et l'indice Invertébrés, IMAIL (Gevrey, Provost et al. 2012). Les analyses réalisées dans cette étude ont montré que seul l'indice phytoplancton et ses deux métriques élémentaires (MBA et MCS) répondent significativement aux paramètres physico-chimiques en zone euphotique. Ce point particulier souligne la limite de cette étude dont les propositions de valeurs-seuils des métriques physico-chimiques (i.e. phosphore total, ammonium et transparence) sont calées sur les valeurs-seuils d'un compartiment biologique, le phytoplancton. Les valeurs-seuils des nitrates ont été calées sur une réponse à un gradient de surface agricole sur le bassin versant (cf. §1.-1334836257).

Afin de justifier les nouvelles valeurs-seuils physico-chimiques, les incertitudes correspondantes ont été évaluées dans la mesure du possible (cf. §2.5a). Pour ce faire, ont été considérées i) les incertitudes des modèles de prédiction des états de référence des métriques de l'indice phytoplancton (la concentration en chlorophylle a pour MBA et la métrique MCS), et ii) les incertitudes des modèles de réponses des compartiments biologiques aux caractéristiques physico-chimiques des plans d'eau. Ce travail repose sur une analyse par "bootstrap". La prise en compte de la propagation des incertitudes aboutit à des distributions de valeurs probables pour chaque valeurs-seuils et pour chaque couple métrique biologique/paramètre physico-chimique. Les valeurs-seuils finales ont été fixées

aux percentiles 66 des valeurs probables, ce qui correspond à un déclassement par la physico-chimie si et seulement si ce déclassement est probable à plus de 2 chances sur 3 (cf. 2.5f).

La profondeur moyenne théorique a été considérée comme critère typologique pour moduler les propositions de valeurs-seuils par plan d'eau pour les 4 éléments physico-chimiques phosphore total, ammonium, nitrates et transparence.

Par ailleurs (§3), le présent rapport reprend les avancées des travaux initiés en 2013 sur l'utilisation de la télédétection pour l'amélioration des connaissances physico-chimiques et biologiques des plans d'eau nationaux. Ces travaux en collaboration avec le Pôle Onema/Irstea de Lyon ont porté sur une analyse des potentialités de la télédétection dans le cas des plans d'eau nationaux et sur une première application au suivi de la température de l'eau en surface. Ils ont fait l'objet d'un rapport de stage et d'un article en cours de publication (Simon 2013; Simon, Tormos et al. Sous presse).

2. Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils

2.1. Bilan des données physico-chimiques des réseaux de suivi

Bilan des données disponibles

En 2013, les données physico-chimiques récentes et transmises par les agences ont été contrôlées et analysées. Les analyses statistiques présentées dans ce rapport ont porté sur les données issues de 380 plans d'eau (Tableau 1, 17% de lacs naturels et 83% de plans d'eau d'origine anthropique dont 68% de retenues, 12% d'étangs piscicoles et 3% de gravières) qui correspondent à 691 années-lacs.

Tableau 1 : Bilan du nombre de plans d'eau suivis par agences de bassin dont les données ont pu être analysées en 2013.

Agences	Nombres de plans d'eau DCE (Ref / Non-Ref)	Années de suivi disponibles	Nombres de plans d'eau utilisés en 2013	
			Ref	Non-Ref
AG	2 / 103	2005-2011	2	73
AP	0 / 5	2007-2012	-	5
LB	5 / 161	2005-2012	6	128
RM	0 / 29	2007-2012	-	18
RMC	20 / 95	2004-2012	20	87
SN	0 / 58	2008-2012	-	41

Problèmes des limites de quantification : la randomisation

Afin de pallier à la perte d'année-lacs dans le cas des valeurs mesurées inférieures aux limites de quantification, nous avons procédé à des tirages aléatoires de valeurs selon des lois uniformes entre les limites de détection et les limites de quantification. Ceci permet de

recupérer un nombre significatif d'années-lacs en particulier pour les plans d'eau de référence suivis dans le cadre de la mise en place du réseau de sites de référence et de certains paramètres souvent présents en faible quantité comme l'ammonium.

L'interprétation des termes "soutenant la biologie" a orienté les méthodologies vers une recherche de correspondance entre les valeurs-seuils des paramètres physico-chimiques ET les valeurs-seuils des indicateurs biologiques. Ces derniers n'étant disponibles que depuis peu et la mise à jour de l'arrêté d'évaluation étant programmée courant 2014, le temps imparti pour cette étude a imposé une priorisation des indicateurs physico-chimiques à caler (*i.e.* nutriments et transparence), et une impossibilité de remise en question des valeurs-seuils des indicateurs biologiques par l'analyse des courbes de réponse des caractéristiques élémentaires des compartiments biologiques aux paramètres physico-chimiques. De plus, l'influence des caractéristiques hydro-morphologiques n'a pas pu être considérée dans l'analyse des relations biologie-physicochimie.

2.2. Les bioindicateurs disponibles

a) Phytoplancton : IPLAC

L'indice Phytoplancton Lacustre (IPLAC, Feret et Laplace-Treytore 2013) est composé de deux métriques complémentaires : une Métrique de Biomasse Algale, MBA (De Bortoli and Argillier 2008) et une Métrique de Composition Spécifique, MCS (Feret and Laplace-Treytore 2013). Ces deux métriques ont été construites à partir de données provenant de lacs naturels et de lacs anthropiques (retenues, gravières et artificiels) et s'appliquent donc à l'ensemble des plans d'eau français. Elles ont été construites de façon indépendante à Irstea Aix-en-Provence en 2008 pour MBA et à Irstea Bordeaux en 2013 pour la dernière version de MCS. Les modèles de référence de chacune des métriques (pour calculer les EQR) sont continus. Ils utilisent tous deux la profondeur moyenne des plans d'eau comme variable explicative, ainsi que l'altitude pour la MCS ($R^2=0,67$ pour MBA et $0,27$ pour MCS). Les EQR issus de chacune des métriques sont négativement corrélés au phosphore total ($R^2=0,38$ pour MBA et $0,51$ pour MCS).

La métrique MBA correspond à la chlorophylle-a moyenne pendant la période de production végétale. Les limites de classes ont été établies à partir de l'intervalle de prédiction du modèle de référence sans ancrage inférieur. La métrique MCS se calcule à partir de déterminations spécifiques au microscope sur des échantillons de communautés phytoplanctoniques et utilise des coefficients spécifiques d'affinité pour le phosphore et de sténoécie, estimés au préalable à partir d'un jeu de données national. Les limites de classes sont obtenues par division de l'intervalle entre le centile 25 des EQR des plans d'eau de référence et la plus faible valeur d'EQR dans le jeu de données.

L'EQR IPLAC correspond à la moyenne pondérée des EQR normalisés des deux métriques avec une pondération de $0,3/0,7$ (MBA/MCS) établie de manière à maximiser la corrélation de l'indice avec le phosphore total.

b) Poisson : IIL

L'indice Ichtyofaune Lacustre européen (IIL) est composé de trois métriques qui représentent l'effectif total des captures (CPUE), celui des espèces omnivores (CPUE_OMNI) et la biomasse totale (BPUE), par unité d'effort de pêche (Argillier, Caussé et al. 2013). Chaque

métrique est reliée par un modèle linéaire à des paramètres environnementaux (profondeur maximale, surface du lac et du BV, altitude, température moyenne et amplitude thermique) et des variables de pression (pourcentage d'agriculture sur BV et phosphore total). Les modèles ont été construits à partir de données provenant de lacs naturels européens (n=445). Les valeurs de référence de chaque métrique pour chaque plan d'eau sont déterminées à partir du modèle en appliquant des valeurs minimales aux variables de pressions. La différence entre la valeur de référence de chaque métrique et la valeur mesurée est utilisée pour calculer l'EQR, les centiles 5 et 95 servant d'ancrage. La valeur de l'indice est finalement obtenue en sommant les EQR des trois métriques et en normalisant. La limite TRES BON/BON correspond au centile 25 des sites de référence, et l'intervalle entre cette limite et la valeur minimale de l'indice est divisée en 4 pour définir les autres limites de classes.

L'indice présente des corrélations d'environ -0,5 avec le pourcentage d'agriculture et le phosphore total. Mais ces corrélations semblent bien inférieures lorsque l'on ne considère que le jeu de données national (<-0,25 pour le phosphore total).

c) Macrophytes : IBML

Toujours en développement, l'Indice Biologique Macrophytique en Lacs (IBML) est actuellement composé d'une seule métrique, la note de trophie (Boutry et al 2013). Cette métrique prend en compte l'abondance, une côte spécifique par rapport au niveau trophique et le coefficient de sténoécie de différents taxons macrophytes. Elle s'applique à l'ensemble des plans d'eau français, naturels ou artificiels ayant un marnage inférieur ou égal à deux mètres. L'EQR de la métrique a été calculé par rapport à des lacs de référence appartenant à quatre méta-types de plans d'eau obtenus en croisant deux niveaux des facteurs altitude et alcalinité (limites 300 m et 1 mEq.L⁻¹). L'EQR normalisé de chaque méta-type discrimine bien les lacs hyper-eutrophes des lacs moins eutrophisés (selon les critères de l'OCDE). Le 1^{er} quartile des EQR normalisés des plans d'eau de référence définit la limite TRES BON/BON. L'intervalle entre un EQR minimal défini par expertise et cette limite est divisé en quatre pour définir les autres classes de qualité.

d) Invertébrés : IMAIL

L'indice Macroinvertébrés Lacustre (IMAIL) comprend trois métriques et ne s'applique qu'au secteur alpin. Il a été construit par identification des simples corrélations entre métriques et indicateurs de pression, sur une base de 14 lacs dont deux de référence (Gevrey, Provost et al. 2012). Il répond aux pressions de type hydromorphologique (LHMS) et trophique (charge de phosphore). L'EQR de l'indice est la moyenne des EQR de chaque métrique. Les classes ont été définies en divisant en 5 la gamme de variations de l'EQR.

2.3. Définition des seuils de nitrates à partir de la relation entre le paramètre et les forces motrices

L'absence de réponse des métriques biologiques MBA et MCS aux gradients de concentration maximale en nitrates dans les plans d'eau n'a pas permis l'application des stratégies de calage des valeurs-seuils des nitrates aux valeurs-seuils des compartiments biologiques (cf. §2.4 et §2.5). Ce constat s'explique par le fait que : 1) les nitrates sont généralement en excès dans les plans d'eau français (Figure 1, quand TN/TP est supérieur à 7), *i.e.* la quantité de production primaire (représentée par la métrique MBA) n'est pas limitée par la disponibilité en azote ; et 2) la métrique MCS a été construite pour répondre au phosphore (Feret and Laplace-Treytore 2013). Par contre, il est reconnu que les rapports stœchiométriques azote sur phosphore influencent la composition spécifique des communautés planctoniques (Tilman 1982). Des études seront menées en 2014 au Pôle Plans d'Eau pour exploiter ces relations (cf. §0)

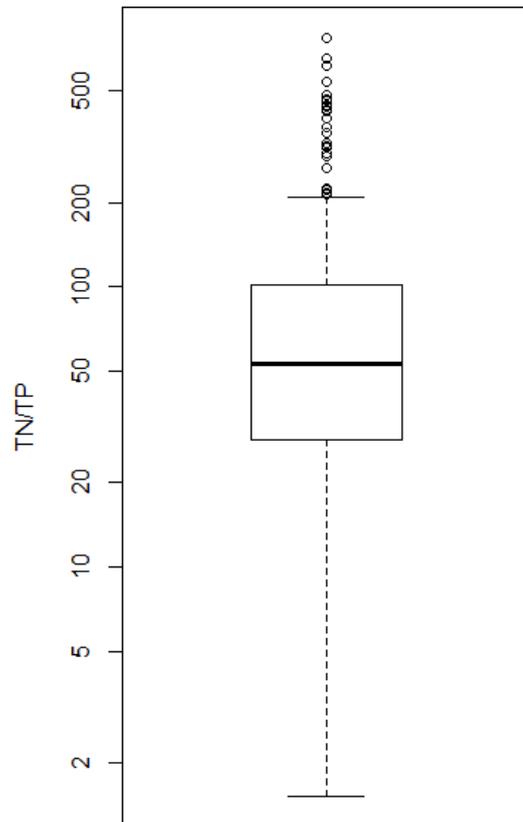


Figure 1 : Distribution des valeurs des rapports stœchiométriques azote total (TN) sur phosphore total (TP) dans les plans d'eau nationaux du réseau de suivi.

Depuis sa sortie le 12 décembre 1991, la directive européenne 91/676/CEE dite Nitrates a pour objectif de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. Dans ce contexte de double directives cadres, la redéfinition des valeurs-seuils Nitrates du SEQ-Eau s'impose. Une méthodologie alternative aux stratégies de calage à la biologie est donc proposée ici.

a) Méthodologie

La méthodologie se décompose en 3 points qui sont (voir illustration sur la Figure 2) :

- i. L'exploration des corrélations entre les valeurs maximales en Nitrates (NO₃max) dans la colonne d'eau des plans d'eau et les forces motrices décrites sur leur bassin-versant a permis d'identifier le pourcentage d'agriculture comme la force motrice expliquant plus de 40 % de la variance inter-plan d'eau de NO₃max.
- ii. Le calcul du percentile 90 des valeurs de NO₃max parmi les plans d'eau de référence (points rouges pour les lacs naturels et roses pour les retenues) pour la quantification de la valeur-seuil de la limite TRES BON/BON (ligne pointillée horizontale verte, ici 2000 µg/L).
- iii. Le découpage en 4 classes d'égales largeurs de la gamme de valeurs de log₁₀[NO₃max] supérieure à la limite TRES BON/BON (lignes pointillées horizontales bleue, ici 4899 µg/L, pour la limite BON/MOYEN, rouge, ici 12000 µg/L, pour la limite MOYEN/PASSABLE et marron, ici 29394 µg/L, pour la limite PASSABLE/MAUVAIS).

Les plans d'eau de référence Lac de Saint-Front (LSF43) et Lac de Barterand (BAR01) ont été volontairement exclus de par le pourcentage élevé d'agriculture sur leur bassin versant: 54 % et 48 % respectivement, qui rendait leur classement en référence discutable.

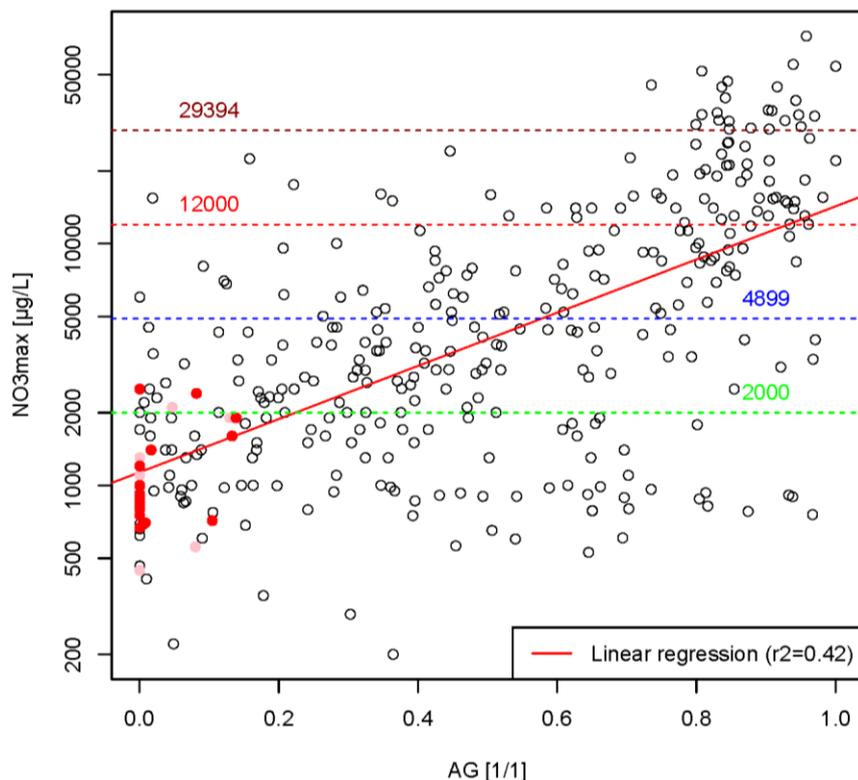


Figure 2 : Relation entre la variation inter-plan d'eau de la concentration maximale en nitrates (NO₃max, axe vertical, en format logarithmique) et le pourcentage d'agriculture sur les bassins-versants (AG, axe horizontal, source Corine Land Cover). Les points rouges sont les plans d'eau naturels de référence et les points roses sont les retenues de référence. La ligne oblique rouge est la droite de régression. Les lignes pointillées horizontales verte, bleue, rouge et marron sont respectivement les valeurs-seuils des limites TRES BON/BON (2000 µg/L), BON/MOYEN (4899 µg/L), MOYEN/PASSABLE (12000 µg/L) et PASSABLE/MAUVAIS (29394 µg/L).

b) Déclinaison par critère typologique

Le fonctionnement caractéristique des différents types de plans d'eau implique logiquement une déclinaison des valeurs-seuils des nitrates selon la profondeur moyenne comme cela a été proposé dans les stratégies de calage à la biologie.

La Figure 3 présente les relations entre les concentrations maximales en nitrates et le pourcentage d'agriculture sur les bassins-versants en considérant soit uniquement les plans d'eau de profondeur moyenne inférieure ou égale à 15 mètres (à gauche) ou uniquement les plans d'eau de profondeur moyenne strictement supérieure à 15 mètres (à droite). Le **Tableau 2** résume les valeurs-seuils proposées (en µg/L).

Les plans d'eau de référence desquels sont issus les valeurs-seuils pour la limite TRES BON/BON sont majoritairement des lacs naturels. L'analyse d'une déclinaison par type de plans d'eau (LN, R, A et G) n'a pourtant pas donnée de valeurs seuils contrastées.

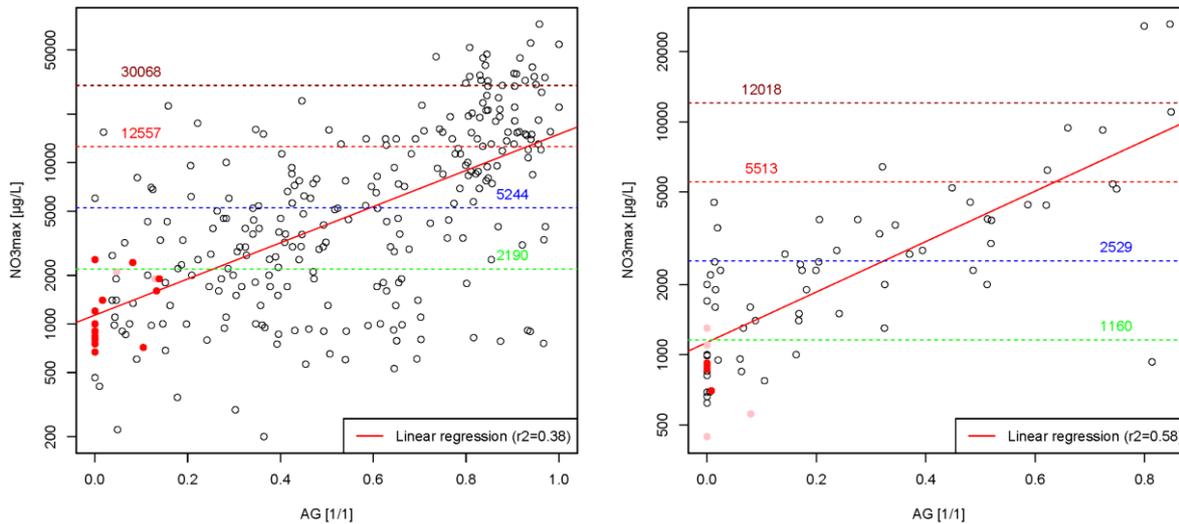


Figure 3 : Relation, pour les plans d'eau de profondeur moyenne inférieure ou égale à 15m (à gauche) et pour les plans d'eau de profondeur moyenne strictement supérieure à 15m (à droite), entre la variation inter-plan d'eau de la concentration maximale en nitrates (NO_3max , axe vertical, en format logarithmique) et le pourcentage d'agriculture sur les bassins-versants (AG, axe horizontal, source Corine Land Cover). Les points rouges sont les plans d'eau naturels de référence et les points roses sont les retenues de référence. La ligne oblique rouge est la droite de régression. Les lignes pointillées horizontales verte, bleue, rouge et marron sont respectivement les valeurs-seuils des limites TRES BON/BON (2190 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau peu profonds et 1160 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau profonds), BON/MOYEN (5244 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau peu profonds et 2529 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau profonds), MOYEN/PASSABLE (12557 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau peu profonds et 5513 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau profonds) et PASSABLE/MAUVAIS (30068 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau peu profonds et 12018 $\mu\text{g/L}$ pour les plans d'eau profonds).

Tableau 2: Valeurs seuils pour les concentrations maximales en nitrates en fonction de la profondeur moyenne des plans d'eau. *Les valeurs du SEQ-Eau pour l'azote minéral (NO_3+NH_4 , en μg de N/L) sont exprimées ici en μg de NO_3/L .

Type de plan d'eau selon leur profondeur moyenne	Valeurs-seuils [μg de NO_3/L]			
	Très Bon/Bon	Bon/Moyen	Moyen/Passable	Passable/Mauvais
$\leq 15\text{m}$	2200	5300	12600	30100
$> 15\text{m}$	1200	2600	5600	12100
SEQ-Eau*	900	1700	4400	8900

c) Limitations diverses

Le temps imparti pour la réalisation de cette analyse n'a pas permis d'affiner la réflexion sur les valeurs-seuils obtenues. En effet,

- la réalisation d'étude de sensibilité des résultats à la limite de la profondeur moyenne de 15 mètres serait à faire.
- la construction de la gamme de valeurs dans chacune des classes d'état a été faite en considérant la valeur de NO₃ maximale observée dans les plans d'eau français. Une comparaison aux valeurs observées dans les plans d'eau des autres états membres permettrait de parfaire les valeurs-seuils proposées.

2.4. Définition DISCRETE des seuils physico-chimiques à partir des relations entre variables physico-chimiques et indicateurs biologiques

a) Méthode

Cette méthode s'inspire de la stratégie adoptée par différents états membres et présentée par ces derniers lors de l'atelier de travail "ECOSTAT Workshop Nutrient Standards" à Birmingham les 19 et 20 février 2013.

Cette méthode utilise la relation entre les indices biologiques et les paramètres physico-chimiques pour déterminer les valeurs-seuils des variables physico-chimiques aux limites de classes des indices biologiques. De cette façon, on s'intéresse surtout à la limite de classes BON-MOYEN.

Cette méthode nécessite une corrélation significative entre les valeurs d'EQR des indices biologiques et les valeurs de chaque variable physico-chimique.

Les plans d'eau classés TRES BON ou BON par l'indice biologique le plus pertinent sont ensuite regroupés et le centile 90 des valeurs des variables physico-chimiques de ce groupe de plans d'eau représente la limite de classe BON-MOYEN de ces variables. Cela implique que 10% des plans d'eau au moins en bon état sont déclassés en moins que BON par la physico-chimie.

Cette approche est originellement appliquée par type de plan d'eau pour tenir compte des variations naturelles des paramètres physico-chimiques. Dans cette étude, la typologie nationale ne permettant pas d'avoir suffisamment de plans d'eau par type, nous avons testé les effets de 3 critères typologiques sur les valeurs-seuils extraites (*cf.* § b plus bas).

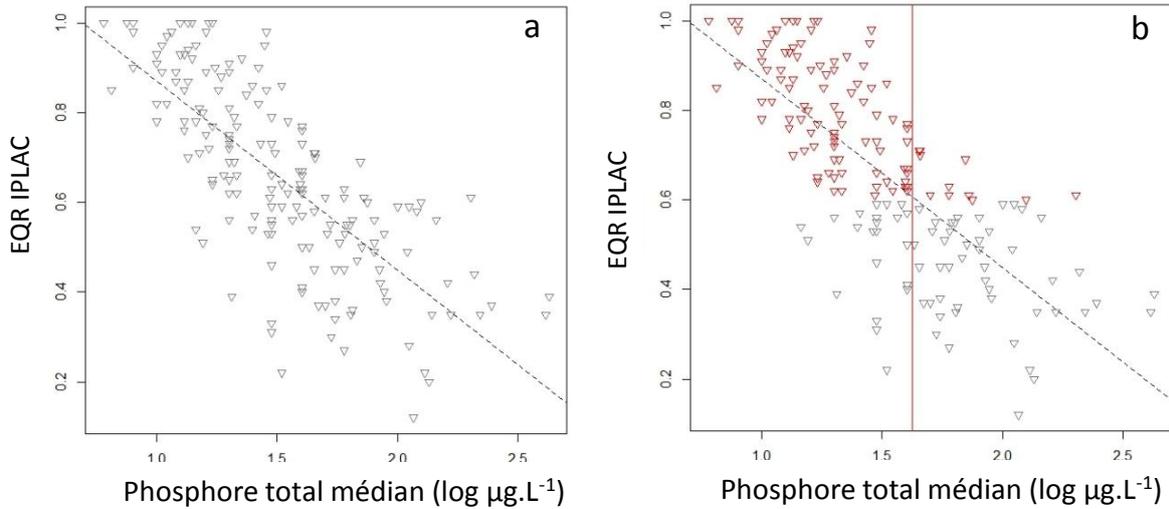


Figure 4 : (a) Relation entre l'IPLAC et la médiane des valeurs de phosphore total dans les plans d'eau (tous types confondus, $R^2 = 0,56$). (b) Détermination du centile 90 (ligne rouge verticale) du phosphore total des lacs au moins en BON état selon l'IPLAC ($Q_{90} = 42 \mu\text{g P.L}^{-1}$).

Pour illustrer cette méthode, considérons l'exemple du phosphore total fortement corrélé à l'indice IPLAC (Figure 4a). Le centile 90 des concentrations en phosphore total des lacs au moins en bon état (*i.e.* $EQR > 0.6$) est égal à $42 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Figure 4b) ce qui correspond à la limite BON-MOYEN de ce paramètre physico-chimique pour l'ensemble des plans d'eau.

Il peut être intéressant de nuancer les valeurs de cette limite selon le type de lac considéré. Si l'on prend la profondeur moyenne comme critère typologique, on peut ainsi définir une limite BON-MOYEN pour les lacs peu profonds et les lacs plus profonds. La Figure 5a montre les variations des centiles 90 dans chacun des deux groupes de profondeur selon la limite de profondeur moyenne considérée.

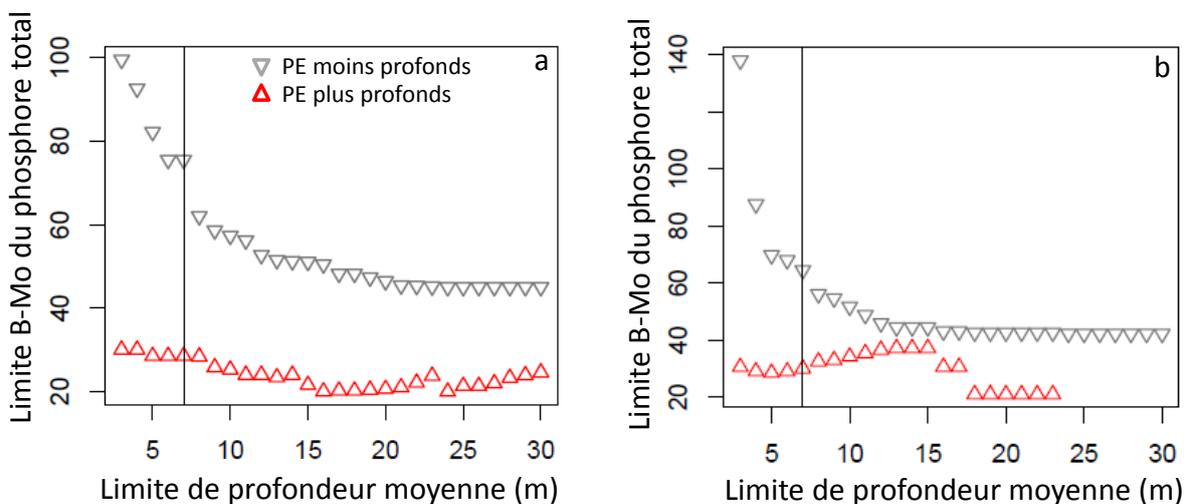


Figure 5 : Variations de la limite BON-MOYEN du phosphore total (axe vertical) dans deux groupes de plans d'eau selon la limite de profondeur moyenne (axe horizontal) entre les groupes, (a) en utilisant l'IPLAC ($n=316$) et (b) en utilisant l'IBML ($n=61$).

Si l'on considère maintenant l'IBML, la corrélation avec le phosphore total est plus faible. La seule limite de profondeur pour laquelle, dans les deux groupes, les concentrations en phosphore des plans d'eau au moins bons et moins que bons sont significativement différentes (Wilcoxon test, $p < 0.05$), est égale à 7 m (Figure 6). Les limites BON-MOYEN pour le phosphore total dans les groupes peu profonds et profonds sont alors 30 et 64 $\mu\text{g.L}^{-1}$ respectivement (Figure 5b). En prenant la même limite de profondeur avec l'IPLAC, on arrive à des limites de phosphore total égales à 28 et 75 $\mu\text{g.L}^{-1}$.

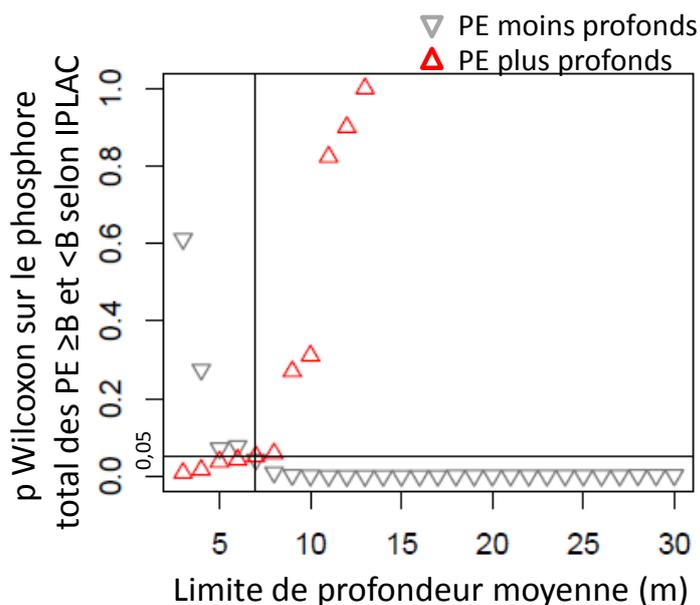


Figure 6 : Résultats du test de Wilcoxon sur les valeurs de phosphore total entre les PE au moins bons et moins que bons selon l'IBML et dans chacun des groupes typologiques, en fonction de la limite de profondeur entre les groupes.

La Figure 7 montre les distributions des valeurs de phosphore total dans chacun des groupes de profondeurs et des groupes de qualités biologiques, selon l'IPLAC (Figure 7a) et selon l'IBML (Figure 7b). La profondeur apparaît ainsi être un critère typologique important à prendre en compte.

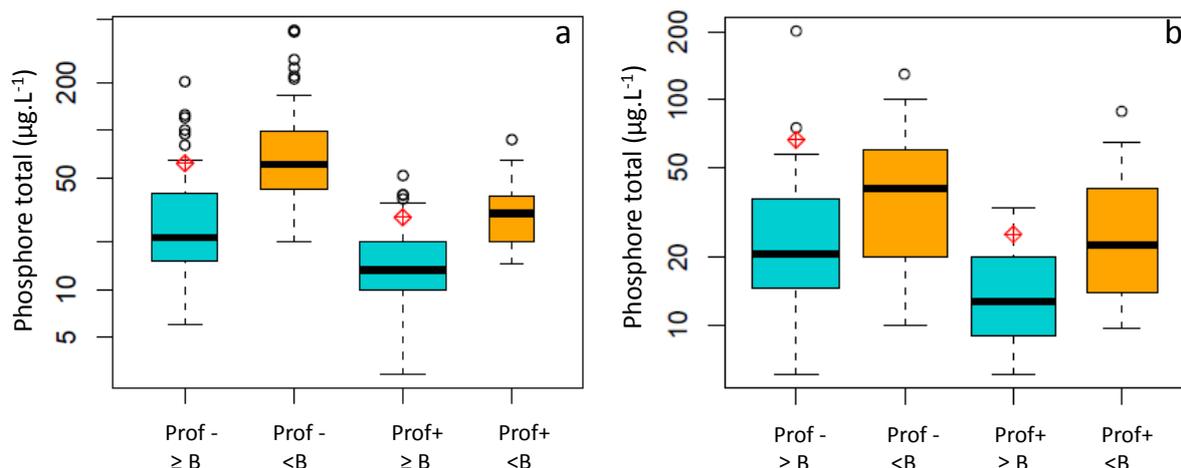


Figure 7 : Distribution du phosphore total dans les plans d'eau selon deux groupes de profondeur (- et +) définis par la limite de 7 m et selon l'état écologique donné par (a) l'IPLAC et (b) l'IBML (\geq BON : au moins bons, <BON : moins que bons). Les diamants rouges indiquent les limites BON-MOYEN pour le phosphore total.

b) Limites (cas du phosphore total, valeur médiane)

Les analyses typologiques ont permis de mettre en évidence une sensibilité des valeurs seuils aux caractéristiques environnementales suivantes :

- i. la profondeur moyenne: suite à une première typologie comprenant 2 groupes de profondeur avec une limite égale à 7m (voir ci-dessus), il a semblé pertinent pour le phosphore total de faire trois groupes en ajoutant une limite de profondeur moyenne à 3m (Figure 8). Les limites BON-MOYEN étaient alors de 106, 40 et 28 $\mu\text{g.L}^{-1}$ respectivement pour les trois groupes de profondeur croissante.
- ii. l'alcalinité : il est apparu que l'alcalinité avait un effet moins marqué que la profondeur moyenne. Si la limite entre deux groupes d'alcalinité se situe entre 1,2 et 3 mEq.L^{-1} , il n'y a pratiquement pas de différence de limite BON-MOYEN pour le phosphore total (Figure 9), même si dans chacun des groupes le phosphore discrimine bien les groupes de qualité biologique selon l'IPLAC (données non présentées). Quelle que soit la limite, on note toutefois une tendance pour les plans d'eau les plus alcalins à tolérer des concentrations en phosphore total supérieures. Ainsi, si la limite entre les groupes est fixée à 1 mEq.L^{-1} (comme pour l'IBML), les limites BON-MOYEN du phosphore total sont de 39 et 55 $\mu\text{g.L}^{-1}$ pour les PE moins alcalins et plus alcalins, respectivement.
- iii. l'altitude : on note une réponse des valeurs-seuils à ce critère typologique mais les relations mises en évidence entre ce paramètre environnemental et les forces motrices anthropiques (Maxime Logez, communication personnelle, mars 2013 et Figure 37) ne permettent pas de l'utiliser comme critère environnemental objectif.

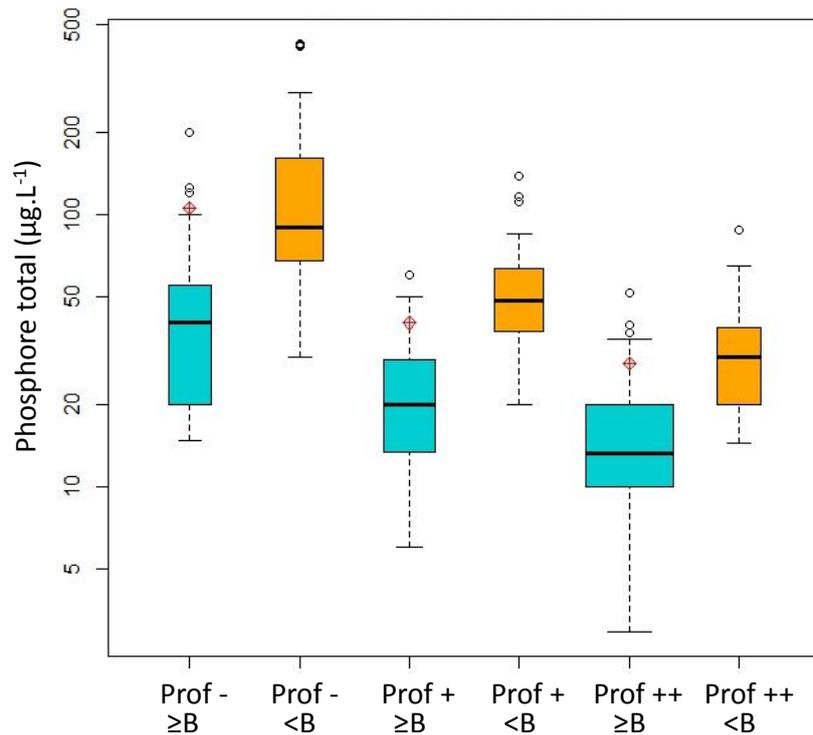


Figure 8 : Distribution du phosphore total dans les plans d'eau selon trois groupes de profondeur (Prof - , Prof + et Prof ++) définis par les limites de 3 m et 7 m et selon l'état biologique donné par l'IPLAC (≥BON : PE au moins bons, <BON : moins que bons). Les diamants rouges indiquent les limites BON-MOYEN pour le phosphore total.

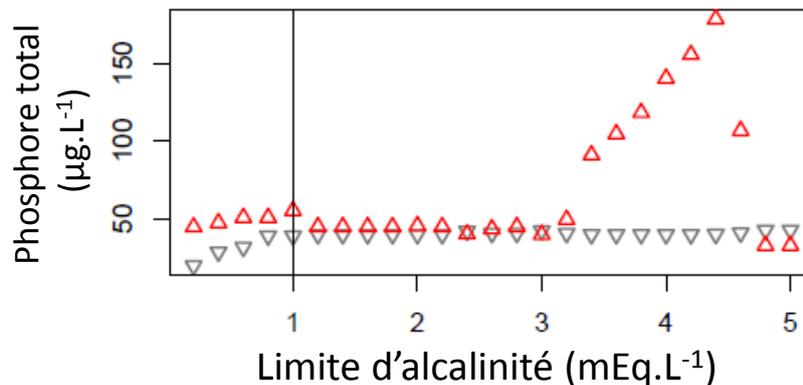


Figure 9 : Evolution des valeurs-seuils en phosphore total en fonction d'une valeur d'alcalinité limite prise comme critère typologique.

Cette méthodologie permet d'ajuster les valeurs seuils aux conditions environnementales mais de façon discrète. Or, les outils de modélisation statistiques utilisés dans le calcul de l'IPLAC prennent en compte de façon continue le critère typologique qu'est la profondeur moyenne. Nous avons donc adopté une seconde stratégie (cf. § suivant) afin de produire des limites de classe continuellement dépendantes de la profondeur moyenne.

D'autres critères typologiques tels que le type de plan d'eau (naturel, retenue, étang piscicole ou gravière) ou l'alcalinité, ont été testés mais n'ont pas révélé d'impact significatif sur les valeurs seuils.

2.5. Définition CONTINUE des seuils physico-chimiques à partir des relations entre variables physico-chimiques et indicateurs biologiques

Un des grands inconvénients des deux premières approches est de fournir des valeurs seuils des paramètres physico-chimiques constantes pour deux ou trois groupes de PE. Ceci pose des problèmes pour les PE à la frontière entre deux groupes ou pour les PE dont les paramètres environnementaux changent durant l'année (cas du marnage). Un modèle de référence continu donnant des valeurs de référence site-spécifiques nous a semblé plus satisfaisant. Il a donc été choisi d'utiliser les modèles de référence des deux métriques de l'IPLAC et à partir des corrélations entre les métriques et les paramètres physico-chimiques, de transposer les limites de classes des métriques biologiques en limites de classes physico-chimiques. De plus, il est apparu important de prendre en compte les incertitudes des modèles dont la qualité était inégale entre les métriques et entre les paramètres physico-chimiques considérés.

a) Les valeurs-seuils des métriques IPLAC

Les valeurs seuils des métriques de l'IPLAC (MBA et MCS) ont été obtenues à partir des modèles de référence de chacune des métriques. Pour la MCS, le modèle n'ayant que la profondeur moyenne comme variable explicative a été utilisé, pour être cohérent avec le modèle de référence de la MBA (De Bortoli and Argillier 2008; Feret and Laplace-Tretyure 2013). Pour chaque plan d'eau, les valeurs de référence des métriques ont été calculées, puis les différentes valeurs-seuils des métriques ont été déduites des limites EQR.

b) Détermination des valeurs-seuils des paramètres physico-chimiques

Un modèle de régression linéaire a été établi entre les métriques brutes de l'IPLAC (Chla et MCS) et chaque paramètre physico-chimique. Les valeurs des métriques brutes ont été utilisées plutôt que les valeurs EQR pour pouvoir tenir compte des variations non anthropiques et avoir une meilleure linéarité des modèles. Par exemple, si on utilise une relation entre l'EQR de la MBA et le phosphore total, il en résultera des limites de classes constantes pour le phosphore quelle que soit la profondeur moyenne des plans d'eau (De Bortoli and Argillier 2008), ce qui n'est pas acceptable étant donné l'effet important de la profondeur moyenne sur la limite Bon-Moyen démontrée plus haut. En effet, pour la métrique MCS qui est essentiellement un indice de phosphore total et pour la chlorophylle-a qui est directement reliée au phosphore total (effet trophique de l'élément généralement limitant), il n'est pas cohérent de tenir compte de variations non anthropiques de ces métriques brutes (voir modèles de référence) et de nier les variations non anthropiques du phosphore total. Seuls les paramètres de concentration médiane en phosphore total, de concentration maximale en ammonium et de valeur médiane de transparence (disque de Secchi) ont montré une corrélation suffisante avec les métriques de l'IPLAC (>0.6 , Spearman) pour que les modèles puissent être utilisés (Figure 10). Ces modèles ont permis d'établir une

correspondance entre les valeurs seuils des métriques biologiques et celles des paramètres physico-chimiques. Quatre limites de classes ont ainsi pu être déterminées à partir des limites des deux métriques de l'IPLAC pour chacun des trois paramètres.

c) Evaluation de l'incertitude sur les limites de classes

Une analyse "*bootstrap*" a été conduite sur les modèles de référence (Figure 11) et les modèles d'impact des paramètres physico-chimiques sur chacune des métriques (Figure 12) afin de tenir compte de l'incertitude des modèles dans la détermination des seuils de qualité physico-chimique. Pour la MBA, un intervalle de prédiction a été estimé par "*bootstrap*" (n=1000) pour la concentration en chlorophylle-a de chaque plan d'eau en condition de référence. Les limites de classes définies à partir de l'intervalle de prédiction à 90% (De Bortoli and Argillier 2008) ont ensuite été utilisées pour déterminer l'intervalle de prédiction des limites de classes physico-chimiques correspondantes en utilisant les modèles linéaires d'impact (Figure 10). Pour la MCS, les valeurs probables de référence ont été déterminées par "*bootstrap*" (n=1000) pour chaque PE et les limites de classes qui en découlent ont été reportées dans les modèles d'impact (Figure 10) pour obtenir une distribution des limites de classe physico-chimiques possibles. Les incertitudes du modèle de référence ont ainsi été propagées dans le modèle d'impact afin de tenir compte de l'erreur des deux modèles.

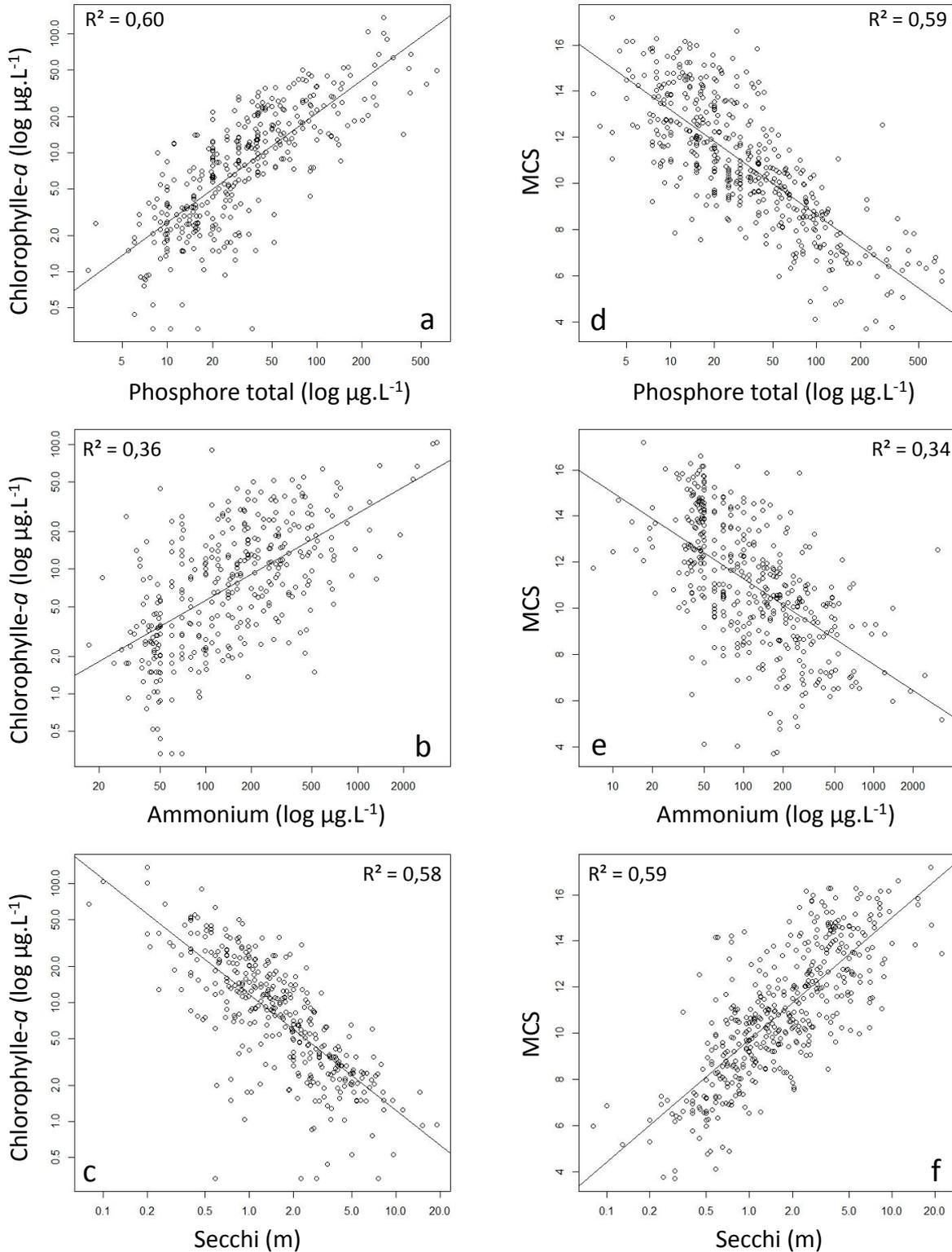


Figure 10 : Relations "pression/impact" entre les métriques brutes de l'IPLAC (chlorophylle-a et MCS) et les paramètres physico-chimiques (phosphore total, ammonium et profondeur de Secchi), utilisées pour calculer les limites de classes des trois paramètres.

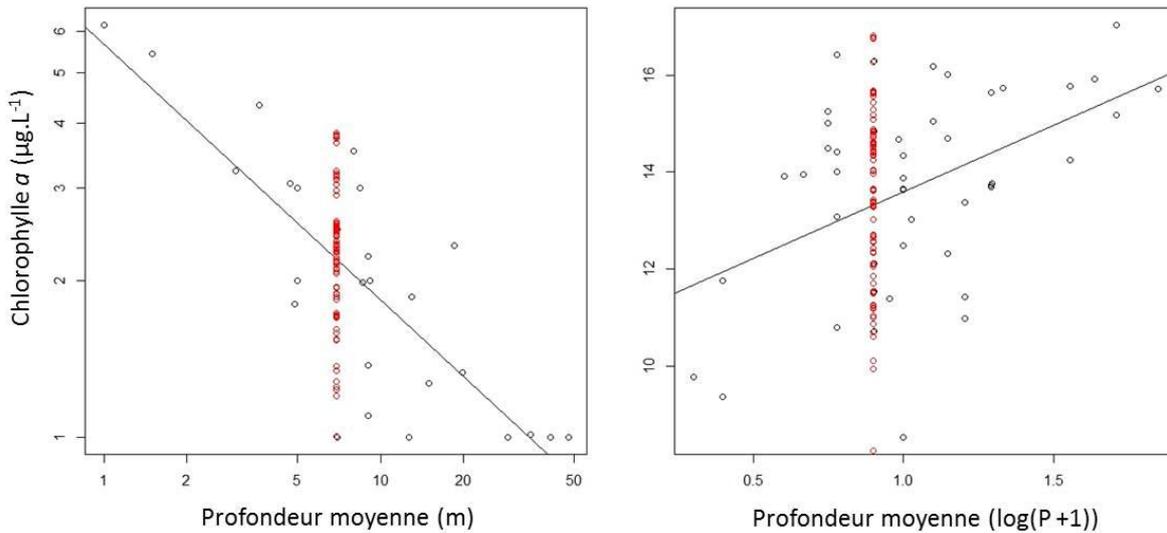


Figure 11 : Modèles de référence. Valeurs des métriques brutes MBA (cercles noirs à gauche, i.e. concentration en chlorophylle a) et MCS (cercles noirs à droite) représentées en fonction de la profondeur moyenne des PE de référence. Les cercles rouges correspondent aux distributions "bootstrap" respectives des valeurs de référence prédites pour le lac d'Anterne.

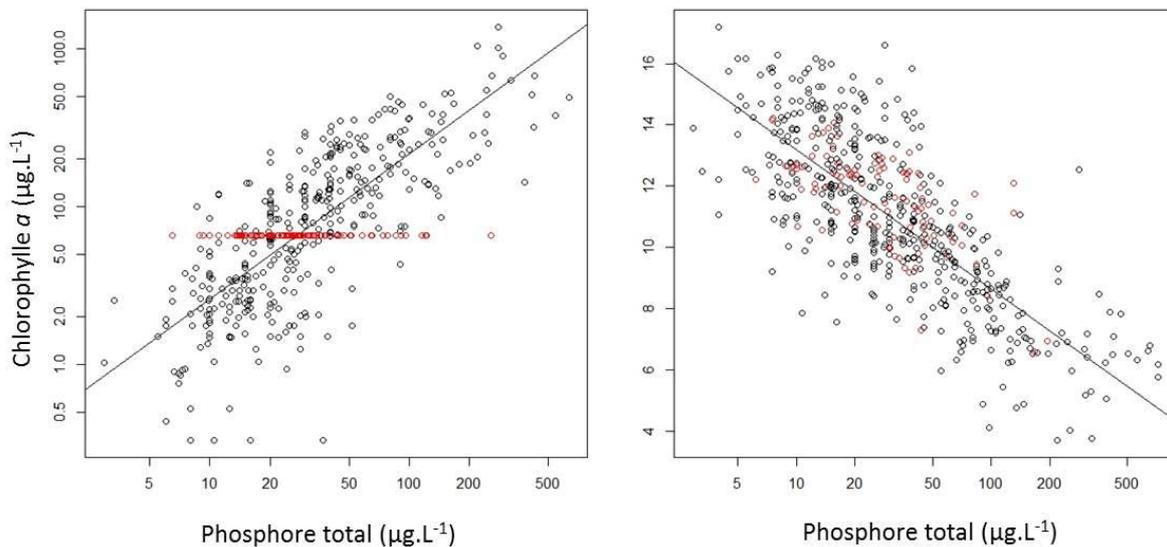


Figure 12 : Transposition des limites de classe des métriques brutes en limite de classes physico-chimiques. Exemple de la limite Bon-Moyen et du phosphore total (valeur médiane des mesures en zone euphotique). Les points rouges représentent la distribution "bootstrap". Pour la métrique MBA (à gauche), les limites de classe sont issues de l'intervalle de prédiction et sont donc fixes pour l'ensemble des simulations "bootstrap". Pour la métrique MCS (à droite), l'incertitude sur le modèle de référence est propagée dans le modèle de pression.

d) Règle d'évaluation de la qualité des PE

Finalement, les centiles 66 des distributions ont été arbitrairement choisis comme limites de classe de manière à ce que le risque de déclasser par erreur un plan d'eau soit dans tous les cas strictement inférieur à 34% (1 chance sur trois) (Figure 13). Pour l'évaluation des PE, il a été choisi de considérer la métrique qui fournissait les limites de classes physico-chimiques les plus basses (critère de l'élément le plus déclassant). Un exemple d'application de la méthode est présenté ci-dessous avec le cas du phosphore total pour le lac d'Anterne (Figure 14).

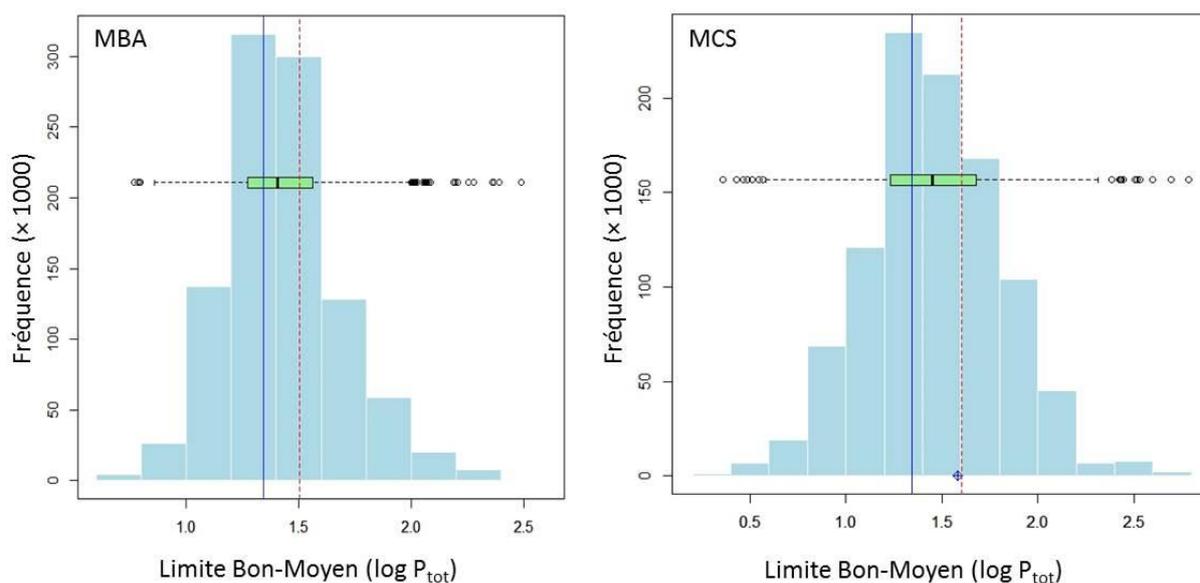


Figure 13 : Distribution des valeurs-limites de classes physico-chimiques possibles pour chacune des métriques : exemple de la limite BON/MOYEN pour le phosphore total. La ligne verticale discontinue rouge représente le centile 66 qui constitue la limite de classe BON/MOYEN du phosphore total retenue pour l'évaluation. La ligne verticale continue bleue indique la valeur médiane de phosphore total observé en 2007 dans le lac d'Anterne.

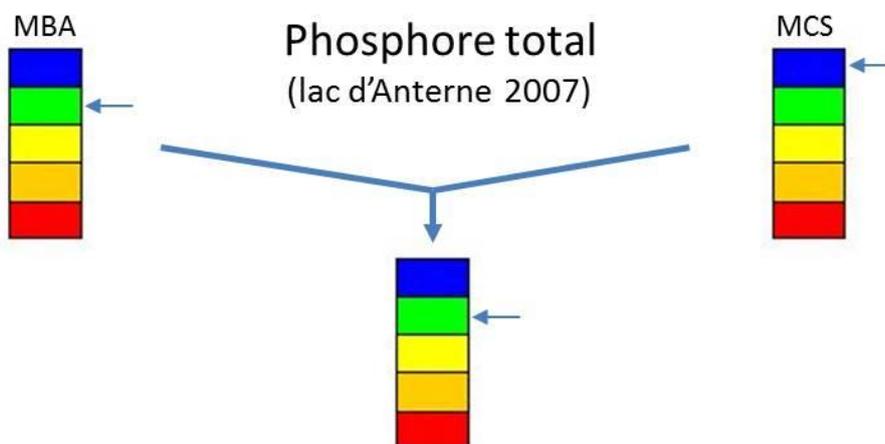


Figure 14 : Application du principe de l'élément le plus déclassant aux résultats des deux métriques, exemple du lac d'Anterne. Pour chacune des métriques, la concentration en phosphore total est plus basse que la concentration limite BON/MOYEN (i.e. correspond

à un état situé au-dessus de la classe BON/MOYEN). Les deux métriques sont concordantes pour dire que le plan d'eau est au moins dans l'état BON. En considérant la limite TRES BON/BON, on constate en fait que la métrique la moins sévère, i.e. ici MCS, classe le plan d'eau en état TRES BON (à droite) pour le phosphore total. L'application du principe de l'élément le plus déclassant aux résultats des deux métriques conduit finalement à classer le plan d'eau en état BON.

e) Dispersion des valeurs-seuils

La Figure 15 illustre, pour les métriques MBA et MCS, les distributions des valeurs-seuils probables dans le cas du phosphore total pour le lac d'Anterne (74) pour les limites TRES BON/BON, BON/MOYEN, MOYEN/PASSABLE et PASSABLE/MAUVAIS. Les distributions des valeurs-seuils probables de chaque limite de classe montrent :

- un chevauchement des distributions entre les seuils ;
- une dispersion des valeurs seuils probables d'après le calage avec la métrique MCS supérieure à la dispersion des valeurs-seuils probables avec calage sur les seuils de la métrique MBA. Comme les modèles d'impacts sont les mêmes (Figure 10), ce sont les qualités des modèles de référence qui expliquent cette plus grande dispersion des valeurs seuils lorsqu'ils sont définis avec la métrique MCS. En effet, le modèle de référence explique 27% de la variance pour MCS contre 67% de la variance pour MBA (cf. §2.2a).

La comparaison des valeurs-seuils de cette étude (VS_{P66} , chiffres verts foncés entre parenthèses) aux valeurs-seuils moyennes prédites par les modèles linéaires (VS_{moy} , chiffres noirs entre parenthèses), i.e. sans la prise en compte des incertitudes, montre que :

- il n'y a pas coïncidence entre les VS_{P66} et VS_{moy} ;
- les VS_{moy} sont toujours inférieures à VS_{P66} ;
- l'écart VS_{moy} / VS_{P66} entre les limites de classe est stable pour MBA (2-4 μ g/L) et croît pour MCS (de 12 μ g/L à 64 μ g/L) ;
- les VS_{P66} divergent entre MBA (de 24 à 68 μ g/L) et MCS (de 32 à 208 μ g/L) ;
- de plus, les écarts inter-limites des VS_{P66} varient de l'état BON à l'état PASSABLE : de 11 à 21 μ g/L pour MBA et de 28 à 100 μ g/L pour MCS ;
- les VS_{P66} de MBA sont le plus souvent les plus déclassantes des VS.

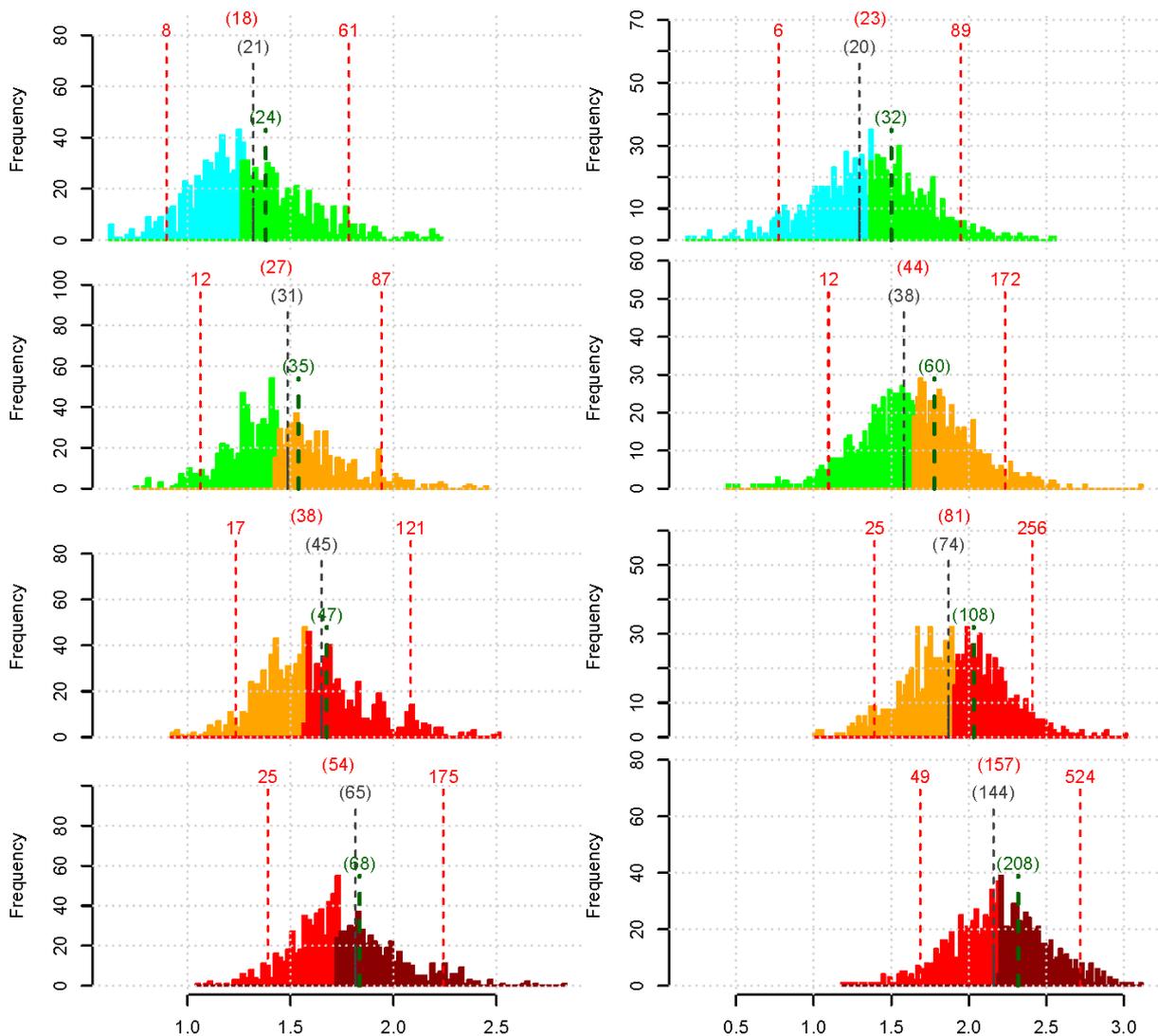


Figure 15 : Distributions des valeurs-seuils probables du phosphore total (axe horizontal en $\log_{10}[\mu\text{g/L}]$) pour le lac d'Anterne, 74, agence RMC en 2005 (de haut en bas : limite TRES BON/BON, limite BON/MOYEN, limite MOYEN/PASSABLE et limite PASSABLE/MAUVAIS) selon la métrique MBA (colonne de gauche) et la métrique MCS (colonne de droite). Les lignes pointillées verticales rouges et les chiffres rouges sont les percentiles 5 et 95 des valeurs-seuils. Les chiffres rouges entre parenthèses sont les valeurs médianes. Les lignes verticales pointillées noires et les chiffres noirs entre parenthèses sont les valeurs-seuils donnés par le modèle moyen, *i.e.* sans considérer les incertitudes. Les lignes verticales pointillées et les chiffres en vert-forcé entre parenthèses sont les valeurs-seuils donnés par cette étude, *i.e.* les percentiles 66 des valeurs probables.

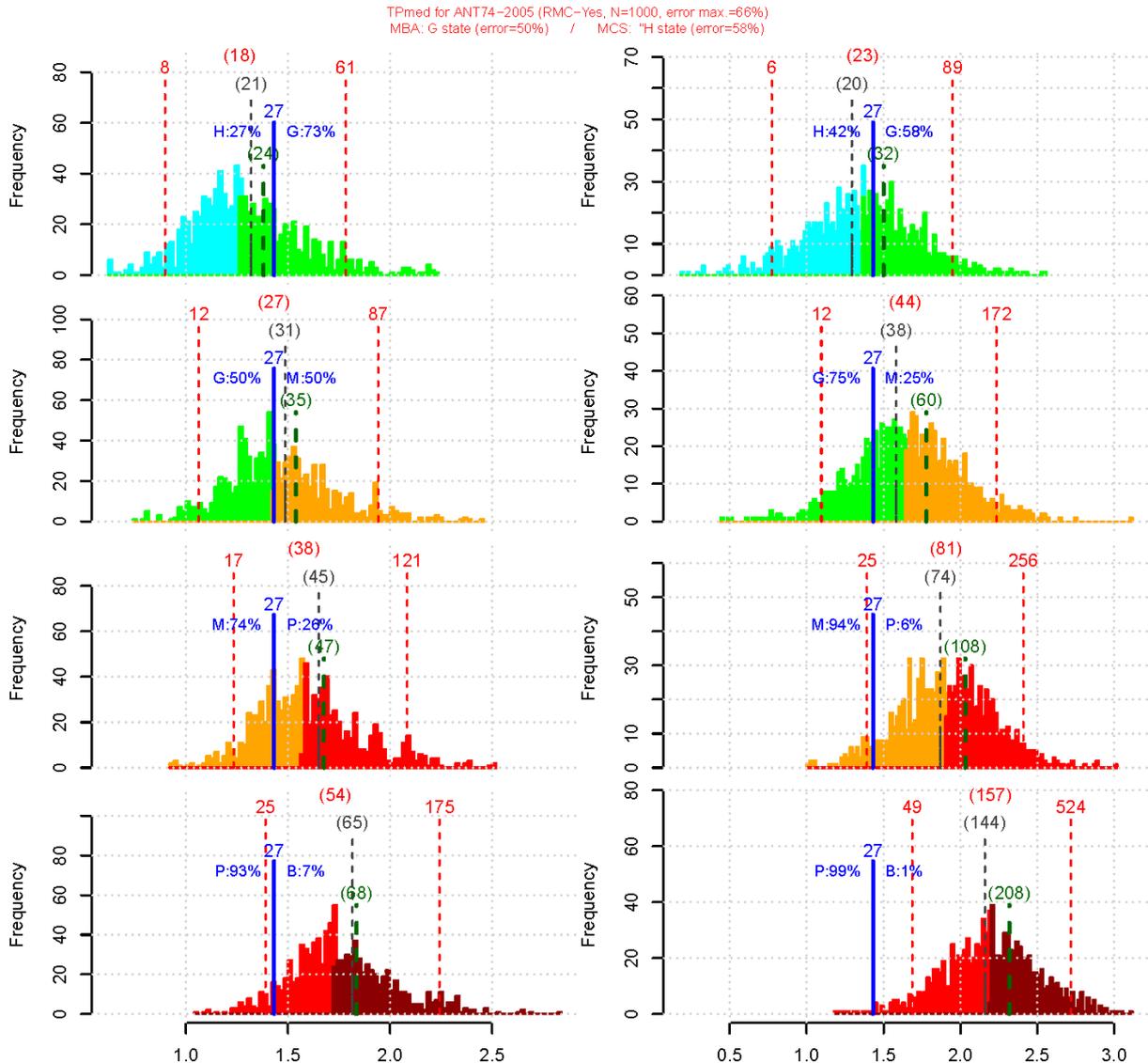


Figure 16 : Voir la légende de la Figure 15. La ligne verticale bleue et le chiffre au-dessus, ici 27 µg/L, représentent la médiane des valeurs observées en phosphore total en 2005. Les pourcentages représentent les probabilités que le plan d'eau soit classé (à gauche) ou déclassé (à droite) dans chacun des états H ('High state'=TRES BON), G ('Good state'=BON), M ('Moderate state'=MOYEN), P ('Poor state'=PASSABLE) ou B ('Bad state'=MAUVAIS). L'interprétation de cette figure se fait verticalement de haut en bas et par métrique, *i.e.* colonne par colonne (voir explication dans partie a du §2.5f).

f) L'évaluation physico-chimique par la règle du percentile 66

Pour l'évaluation de la qualité physico-chimique des plans d'eau, nous avons pris l'option de déclasser un plan d'eau par un paramètre physico-chimique s'il y a au moins 66% de chances que ce déclassement soit probable. D'après l'exemple de la Figure 17, en 2005, le plan d'eau d'Anterne est donc classé par le phosphore total en BON état selon les valeurs-seuils données par MBA et en TRES BON état selon les valeurs-seuils données par MCS.

En effet, l'interprétation de la Figure 17 se fait verticalement de haut en bas et par métrique, *i.e.* colonne par colonne en comptabilisant les valeurs seuils situées de part et d'autre de la mesure physico-chimique (ici $27\mu\text{g/L}$). Le plan d'eau a donc :

1) pour MBA (colonne de gauche) :

- en première ligne : 73% de chances d'être déclassé en moins que TRES BON, ce qui est suffisant ;
- en deuxième ligne : 50% de chances d'être déclassé en moins que BON, ce qui est insuffisant ;
- en troisième ligne : 26% de chances d'être déclassé en moins que MOYEN, ce qui est insuffisant ;
- en quatrième ligne : 7% de chances d'être déclassé en moins que PASSABLE, ce qui est insuffisant.

2) pour MCS (colonne de droite) :

- en première ligne : 58% de chances d'être déclassé en moins que TRES BON, ce qui est insuffisant ;
- en deuxième ligne : 25% de chances d'être déclassé en moins que BON, ce qui est insuffisant ;
- en troisième ligne : 6% de chances d'être déclassé en moins que MOYEN, ce qui est insuffisant ;
- en quatrième ligne : 1% de chances d'être déclassé en moins que PASSABLE, ce qui est insuffisant.

Critère de déclassement

La méthode de la métrique déclassante pour l'évaluation physico-chimique a été privilégiée. En 2005, le lac d'Anterne est donc en BON état d'après le phosphore total (et en TRES BON état d'après l'ammonium et la transparence, *cf.* Figure 17 et Figure 18). Il aurait aussi été possible de faire les moyennes pondérées des VS_{P06} des deux métriques selon l'équation de calcul de l'IPLAC (§2.4 dans Feret et Laplace-Treytore (2013)) mais, le critère d'optimisation des coefficients de la moyenne pondérée n'est pas apparu pertinent pour cette étude.

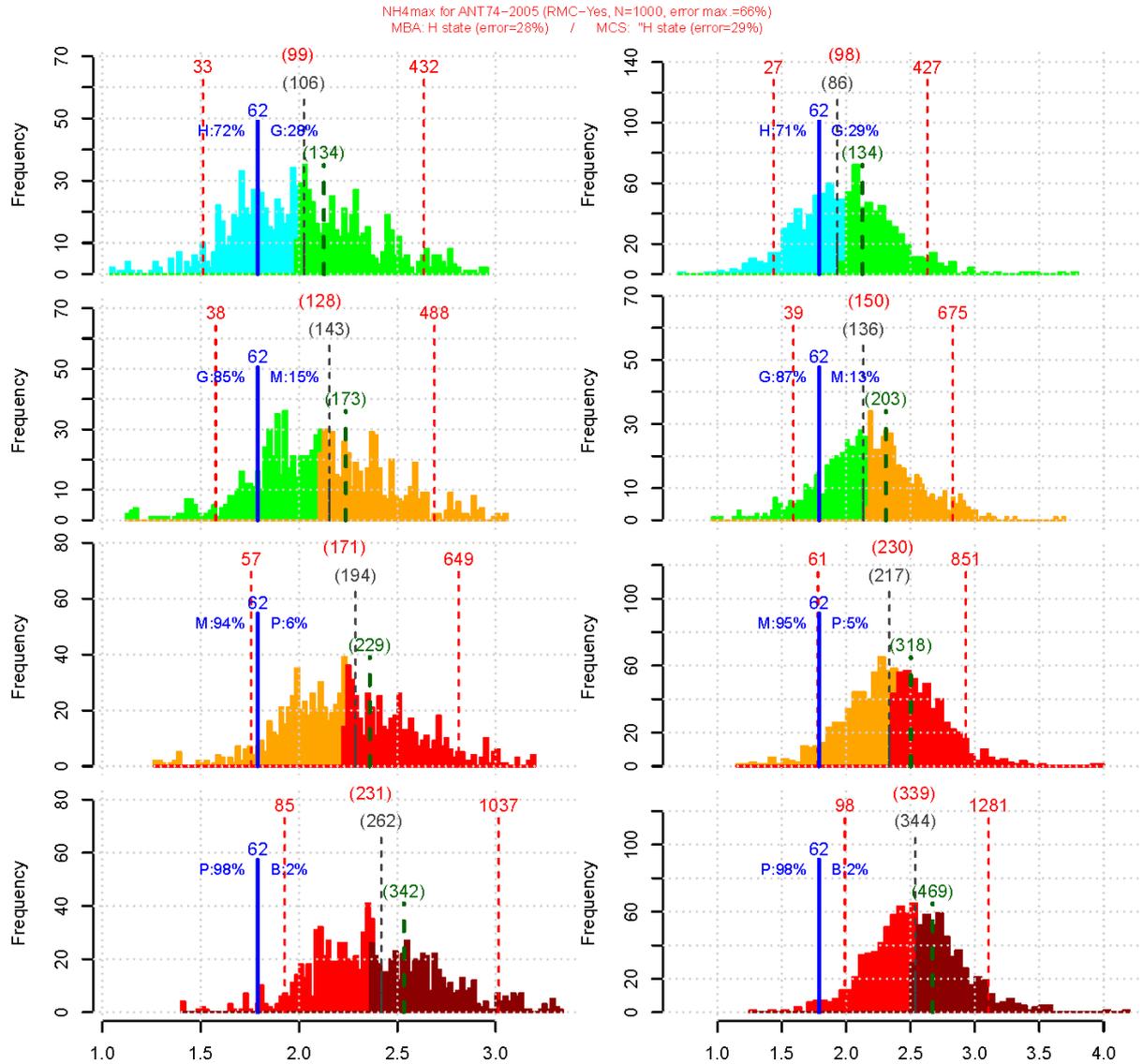


Figure 17 : Voir légende de la Figure 16. La ligne verticale bleue et le chiffre au-dessus, ici 62 µg/L, représentent la valeur maximale des concentrations en ammonium observées dans la zone euphotique du Lac d'Anterne en 2005.

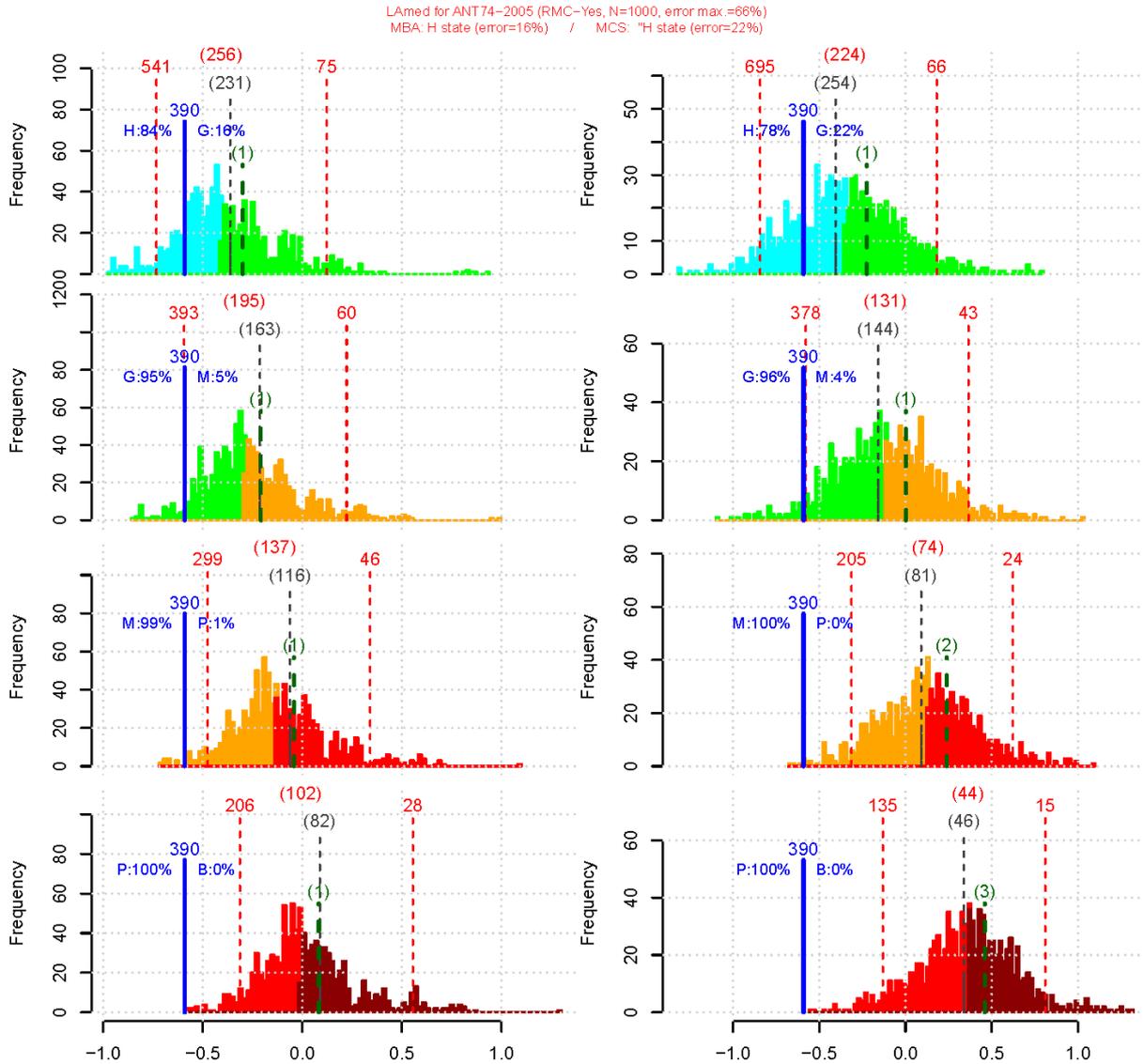


Figure 18 : Voir légende de la Figure 16. La ligne verticale bleue et le chiffre au-dessus, ici 390 cm, représentent la médiane de la transparence du Lac d'Anterne en 2005.

g) Les valeurs-seuils (VS_{P66}) des plans d'eau nationaux

La prise en compte des incertitudes associées aux modèles de référence (Figure 11) et aux modèles de pression (Figure 12) génère des valeurs-seuils probables (cf. §6 Annexes) dont la dispersion témoigne de la qualité des deux modèles. Cette dispersion est ici mesurée par l'écart entre le percentile 95 et le percentile 5 des valeurs-seuils probables (*i.e.* lignes verticales rouges pointillées sur la Figure 15). Les 3 figures suivantes illustrent, pour le phosphore total, l'ammonium et la transparence pour l'ensemble des plans d'eau, les distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN choisies, *i.e.* les percentiles 66, ainsi que les distributions des dispersions.

La comparaison des nouvelles valeurs-seuils (VS_{P66}) et des règles 2012 d'évaluation de l'état écologique des plans d'eau (Tableau 3) est détaillée dans l'étude d'impact car une simple comparaison n'est pas possible du fait des différences entre les métriques de cette étude et les métriques des règles 2012 (Logez, Danis et al. 2014).

Dans le cas du phosphore total (valeur médiane annuelle), la Figure 19 montre que :

- la VS_{P66} moyenne pour la limite BON/MOYENNE est de l'ordre de $38\mu\text{g/L}$ d'après MBA et de $63\mu\text{g/L}$ d'après MCS.
- 90% des VS_{P66} se situent dans la gamme $20\text{-}62\mu\text{g/L}$ d'après MBA et de $40\text{-}88\mu\text{g/L}$ d'après MCS.

Dans le cas de l'ammonium (valeur maximale annuelle), la Figure 20 montre que :

- la VS_{P66} moyenne pour la limite BON/MOYEN est de l'ordre de $194\mu\text{g/L}$ d'après MBA et de $212\mu\text{g/L}$ d'après MCS. Ces deux valeurs ne sont pas comparables aux règles 2012 d'évaluation de l'état écologique des plans d'eau qui réunissaient l'ammonium avec les nitrates (Tableau 3).
- 90% des VS_{P66} se situent dans la gamme $115\text{-}297\mu\text{g/L}$ d'après MBA et de $151\text{-}271\mu\text{g/L}$ d'après MCS.

Dans le cas de la transparence (valeur médiane annuelle), la Figure 21 montre que :

- la VS_{P66} moyenne pour la limite BON/MOYEN est de l'ordre de 151 cm d'après MBA et de 98 cm d'après MCS.
- 90% des VS_{P66} se situent dans la gamme $86\text{-}245\text{ cm}$ d'après MBA et de $70\text{-}136\text{ cm}$ d'après MCS.

Ces résultats montrent encore que les VS_{P66} déduites de la MCS sont plus tolérantes et donc ne seront que parfois les VS_{P66} déclassantes.

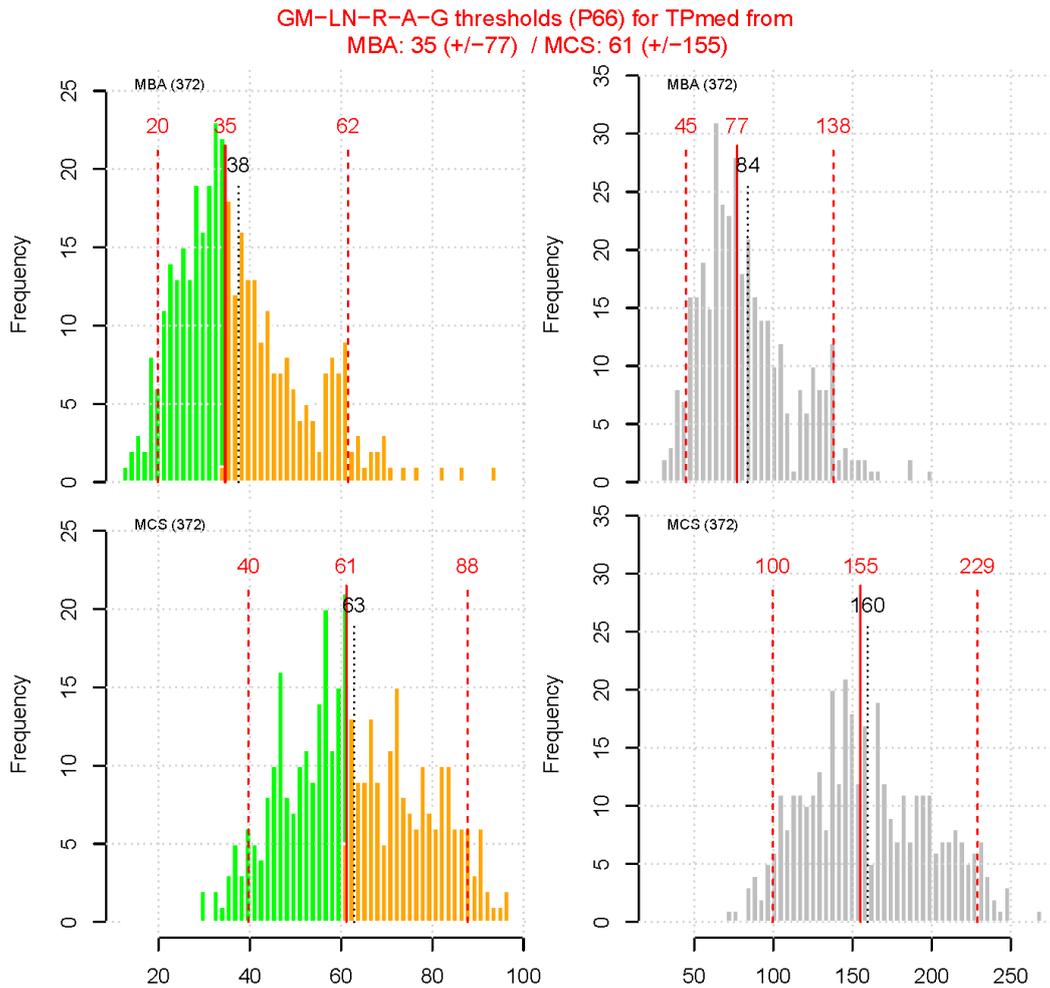


Figure 19 : A gauche : distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des concentrations annuelles en phosphore total mesurées en zone euphotique d'après MBA (en haut) et MCS (en bas). A droite : distributions des dispersions (percentile 95 - percentile 5) associée aux valeurs-seuils. Les lignes verticales sont : en pointillées rouges, les percentiles 5 et 95 ; en continue rouges, les médianes ; et en noires, les moyennes.

Tableau 3 : Règles 2012 d'évaluation de l'état écologique des plans d'eau pour les paramètres physico-chimiques généraux soutenant la biologie (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable 2012).

Paramètres par élément de qualité	Limites des classes d'état				
	très bon	bon	moyen	médiocre	mauvais
Nutriments ¹					
N minéral maximal ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) (mg N.l ⁻¹)	0.2	0.4	1	2	
PO_4^{3-} maximal (mg P.l ⁻¹)	0.01	0.02	0.03	0.05	
phosphore total maximal (mg P.l ⁻¹)	0.015	0.03	0.06	0.1	
Transparence ¹					
transparence moyenne estivale (m)	5	3.5	2	0.8	
Bilan de l'oxygène ²					
Présence ou absence d'une désoxygénation de l'hypolimnion en % du déficit observé entre la surface et le fond pendant la période estivale (pour les lacs stratifiés)	*	50	*	*	
Salinité					
Acidification			*		
Température					

**GM-LN-R-A-G thresholds (P66) for NH₄max from
MBA: 185 (+/-515) / MCS: 209 (+/-577)**

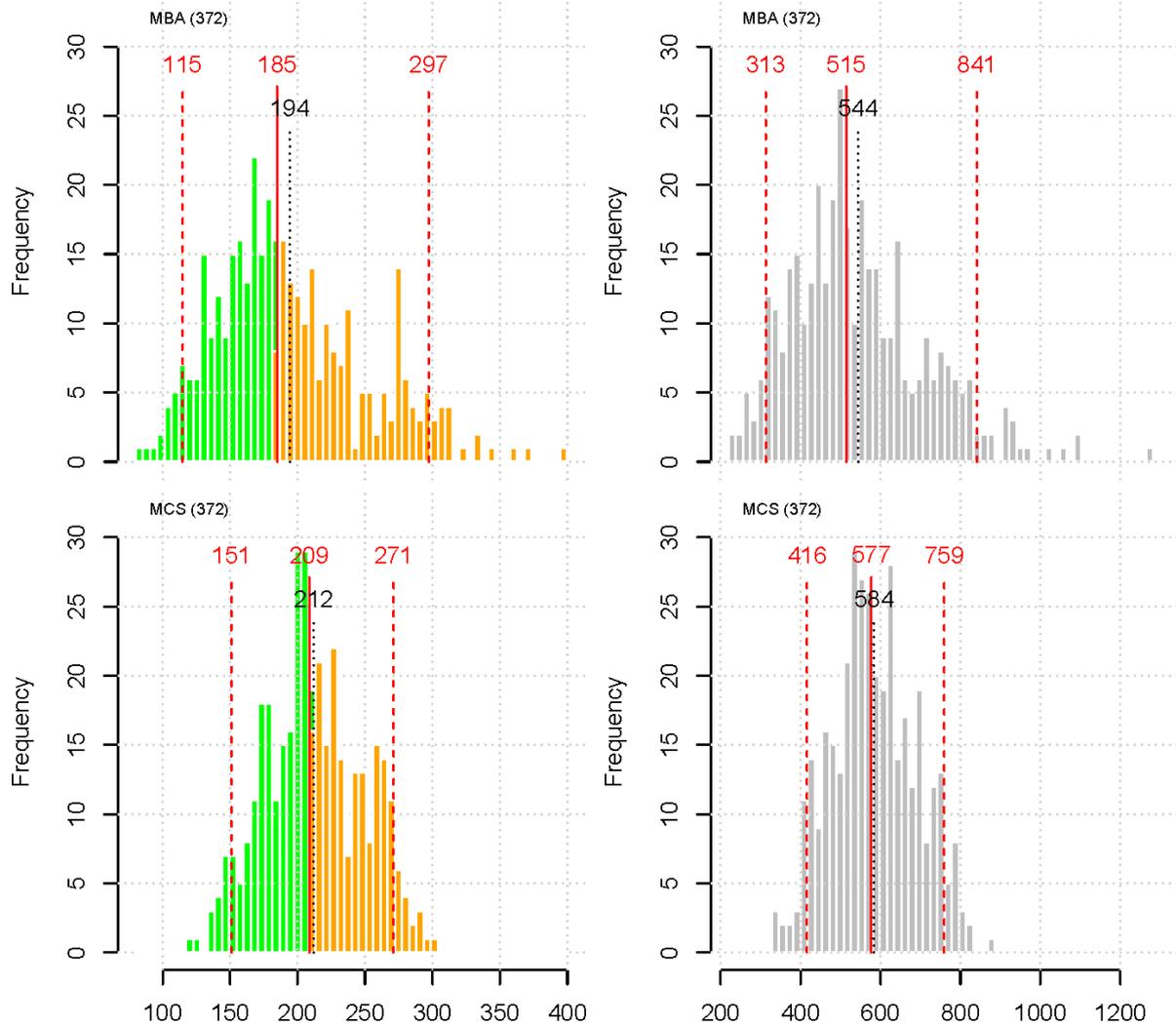


Figure 20 : A gauche : distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour les concentrations annuelle maximale en ammonium mesurées en zone euphotique d'après MBA (en haut) et MCS (en bas). A droite : distributions des dispersions (percentile 95 - percentile 5) associée aux valeurs-seuils. Les lignes verticales sont : en pointillées rouges, les percentiles 5 et 95 ; en continue rouges, les médianes ; et en noires, les moyennes.

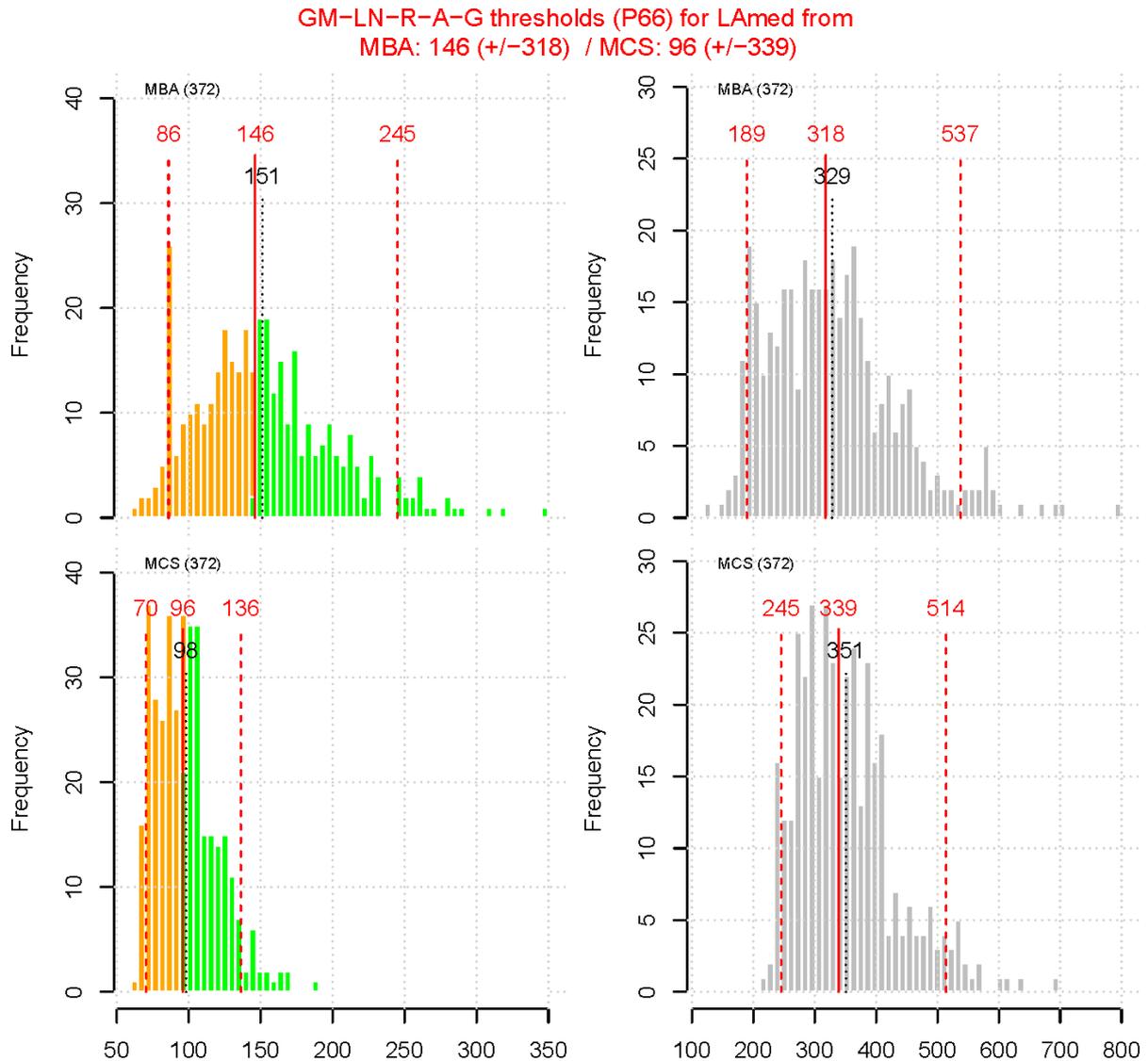


Figure 21 : A gauche : distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des profondeurs de disparition du disque de Secchi d'après MBA (en haut) et MCS (en bas). A droite : distributions des dispersions (percentile 95 - percentile 5) associée aux valeurs-seuils. Les lignes verticales sont : en pointillées rouges, les percentiles 5 et 95 ; en continue rouges, les médianes ; et en noires, les moyennes.

h) Effet typologique sur la distribution des VS_{P66}

Critère "grand type de plan d'eau"

L'analyse, selon les grands types de plans d'eau, des distributions des nouvelles valeurs-seuils (VS_{P66}) des paramètres physico-chimiques révèle logiquement que, en moyenne, les VS_{P66} sont proches pour les lacs naturels (N) et les retenues (R), sont plus tolérantes pour les gravières (G) et sont encore plus tolérantes pour les étangs piscicoles (A). En effet, le seul critère typologique considéré dans cette analyse est la profondeur moyenne et les valeurs de celle-ci se répartissent selon un gradient typologique bien marqué (Figure 22).

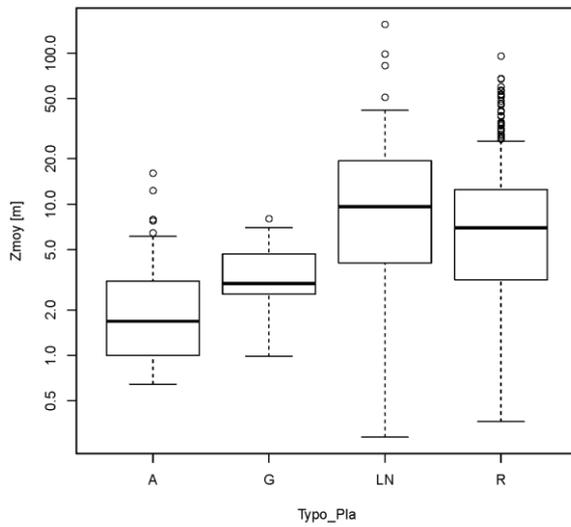


Figure 22 : Distributions des profondeurs moyennes parmi les plans d'eau nationaux de type artificiel (A), gravière (G), lac naturel (LN) et retenue (R).

Les 3 figures suivantes présentent les VS_{P66} de la limite BON/MOYEN pour le phosphore total (Figure 24 et Figure 24), l'ammonium (Figure 25 et Figure 26) et la transparence (Figure 27 et Figure 28).

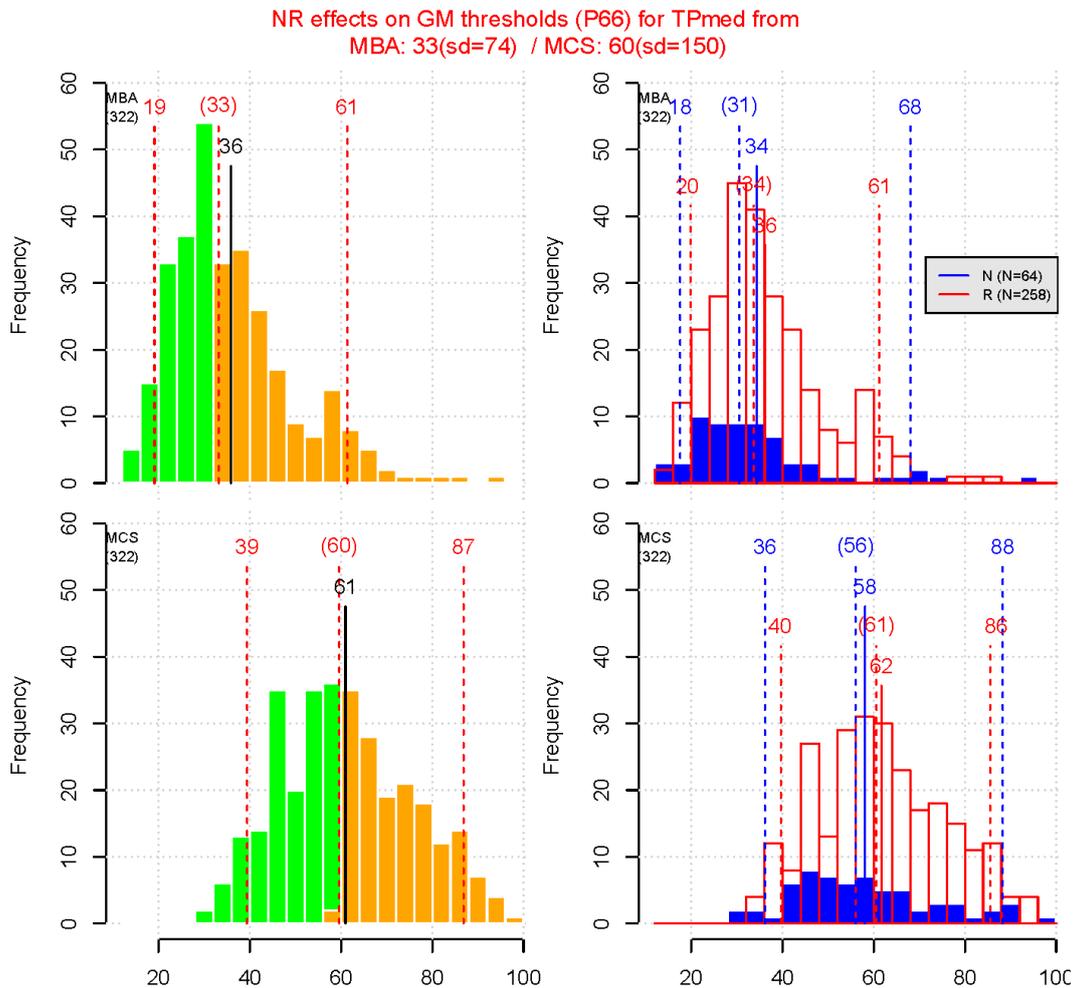


Figure 23 : Distributions des nouvelles valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des concentrations annuelles en phosphore total en zone euphotique d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) et ceci, à gauche, pour l'ensemble plans d'eau naturels et retenues et, à droite, séparément, pour les plans d'eau naturels (N, en bleu) et les retenues (R, en rouge).

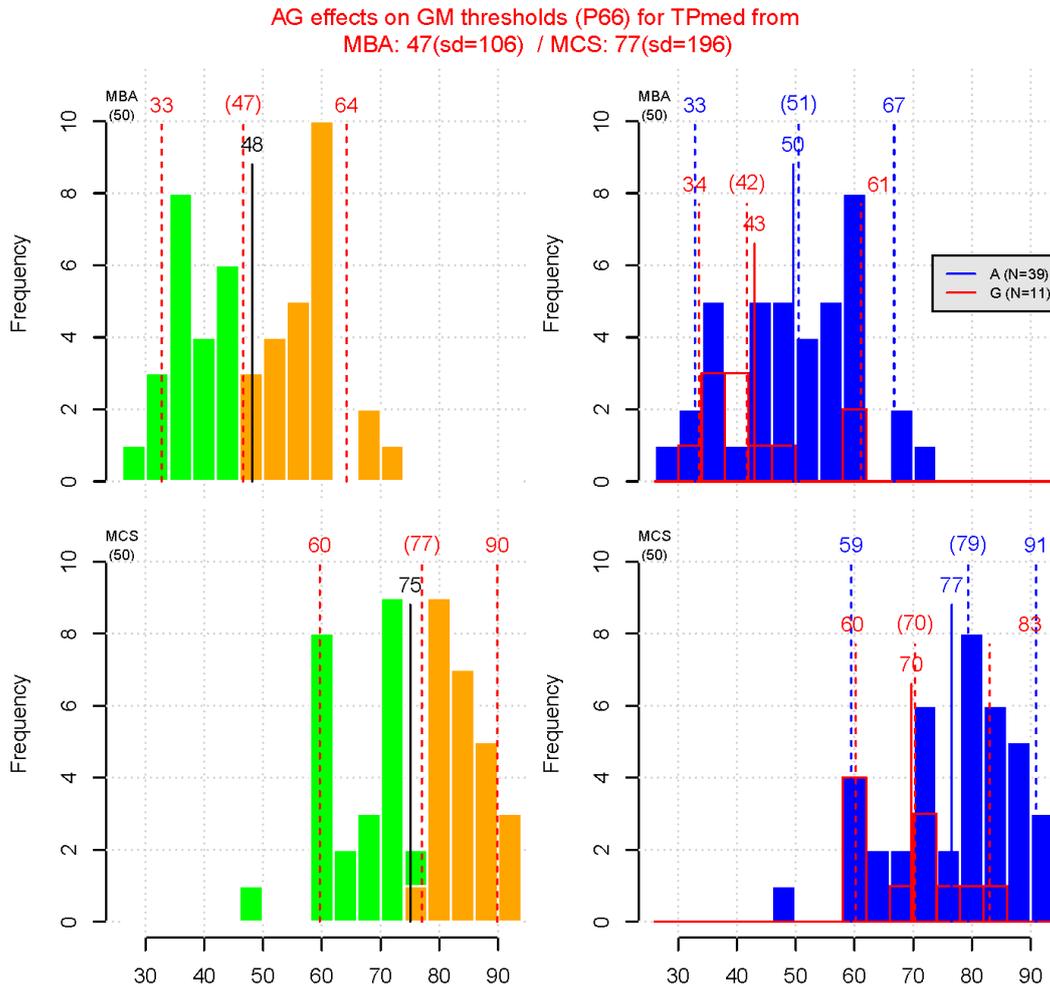


Figure 24 : Distributions des nouvelles valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des concentrations annuelles en phosphore total en zone euphotique d'après MBA (en haut) et MCS (en bas), à gauche, pour l'ensemble des plans d'eau de type étang piscicole (A) et les gravières (G) et, à droite, séparément, pour les plans d'eau de type étang piscicole (A, en bleu) et les gravières (G, en rouge).

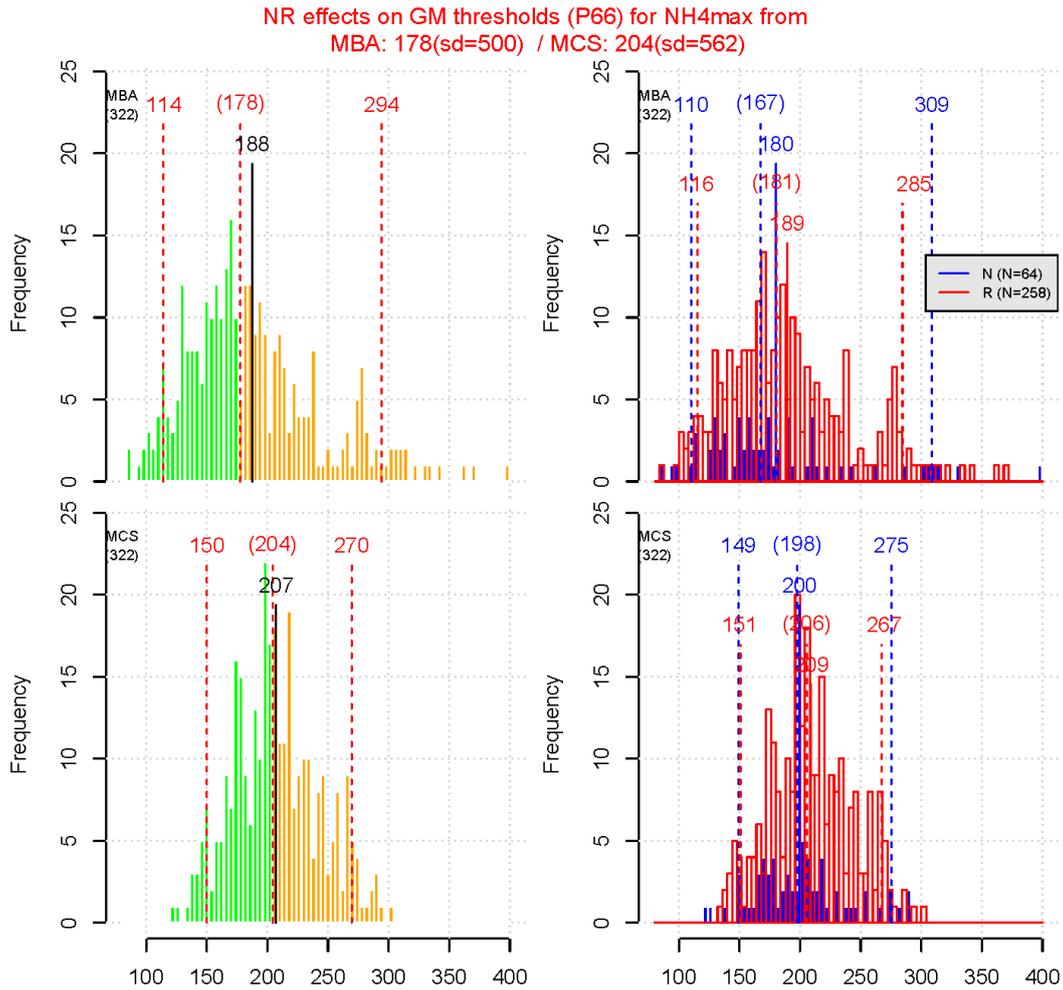


Figure 25 : Distributions des nouvelles valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour les valeurs des concentrations annuelles maximales en ammonium en zone euphotique d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) : A) à gauche, pour l'ensemble plans d'eau naturels et retenues et, à droite, séparément, pour les plans d'eau naturels (N, en bleu) et les retenues (R, en rouge).

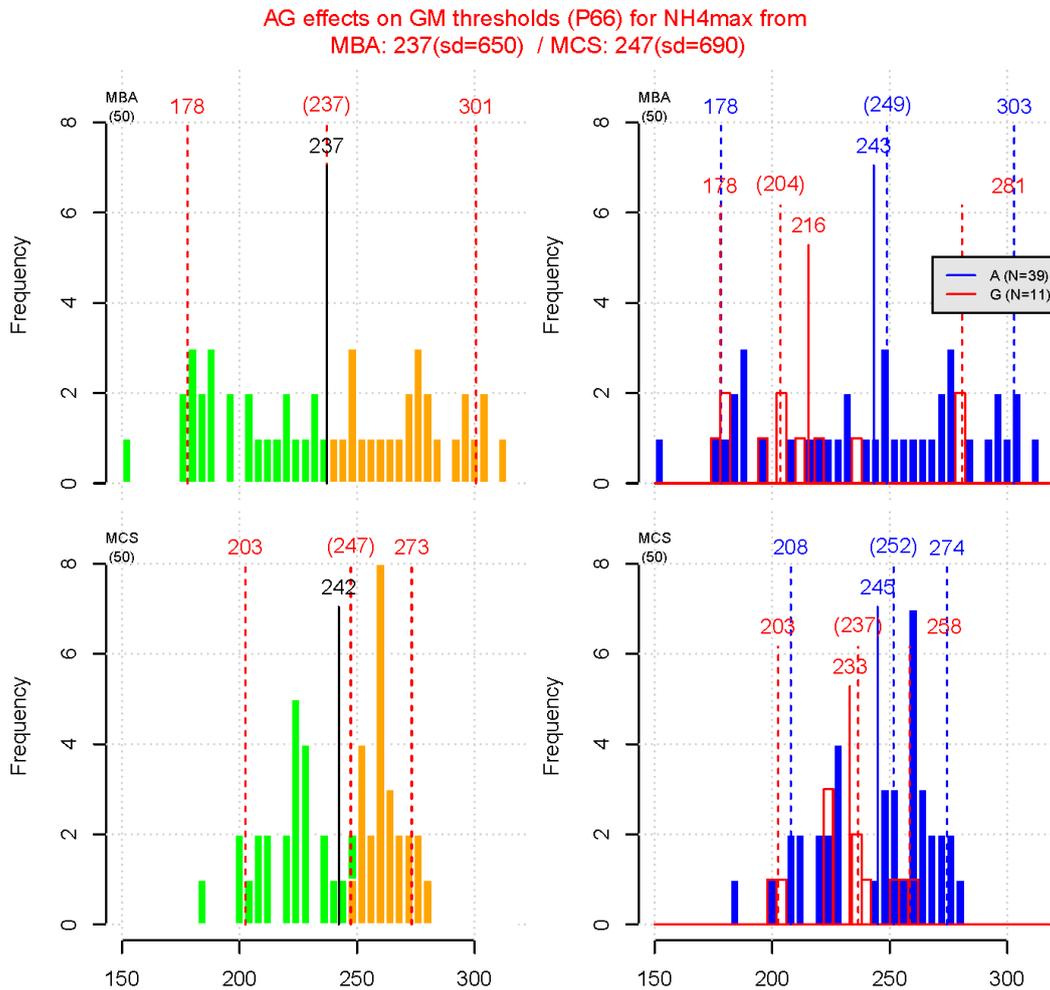


Figure 26 : Distributions des nouvelles valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour les valeurs des concentrations annuelles maximales en ammonium en zone euphotique d'après MBA (en haut) et MCS (en bas), à gauche, pour l'ensemble plans d'eau artificiels de type étang piscicole et les gravières et, à droite, séparément, pour les plans d'eau de type étang piscicole (A, en bleu) et les gravières (G, en rouge).

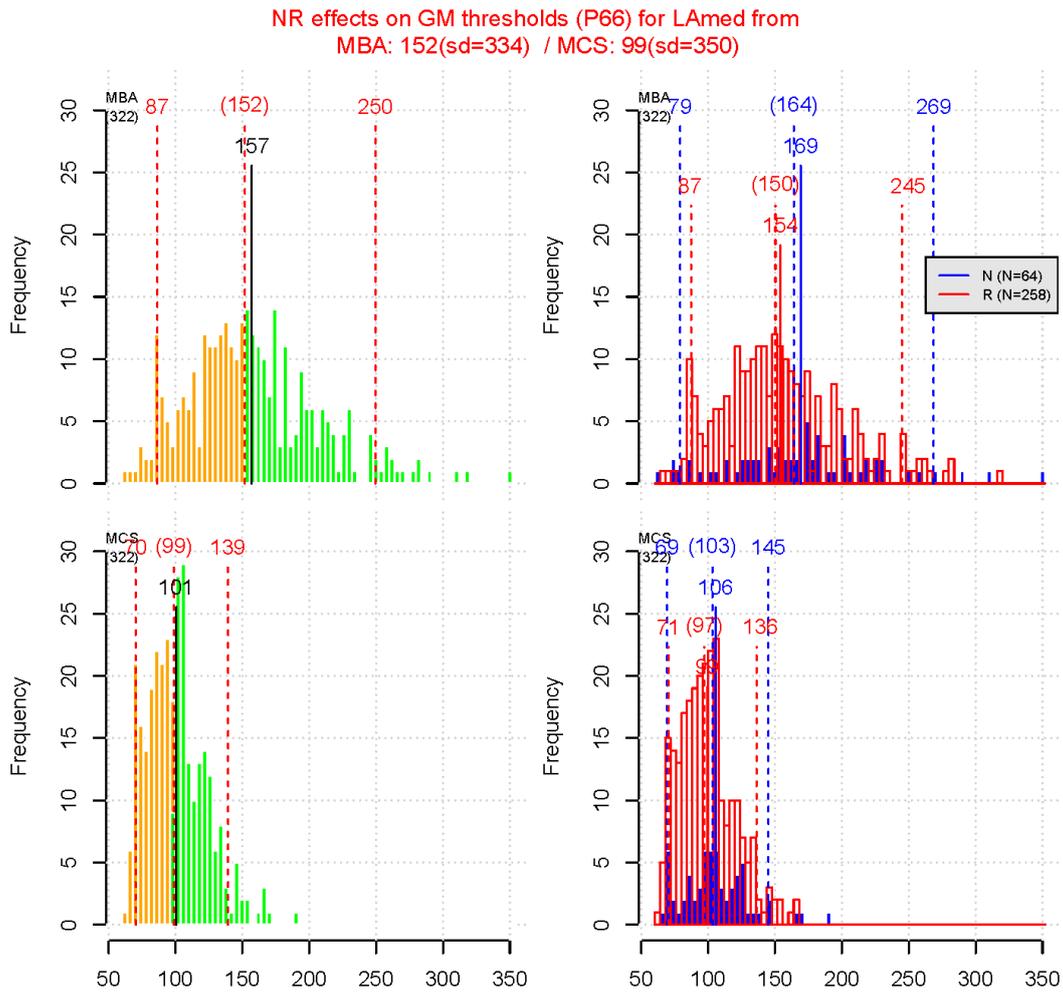


Figure 27 : Distributions des nouvelles valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des profondeurs de transparence d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) : A) à gauche, pour l'ensemble plans d'eau naturels et retenues et, à droite, séparément, pour les plans d'eau naturels (N, en bleu) et les retenues (R, en rouge).

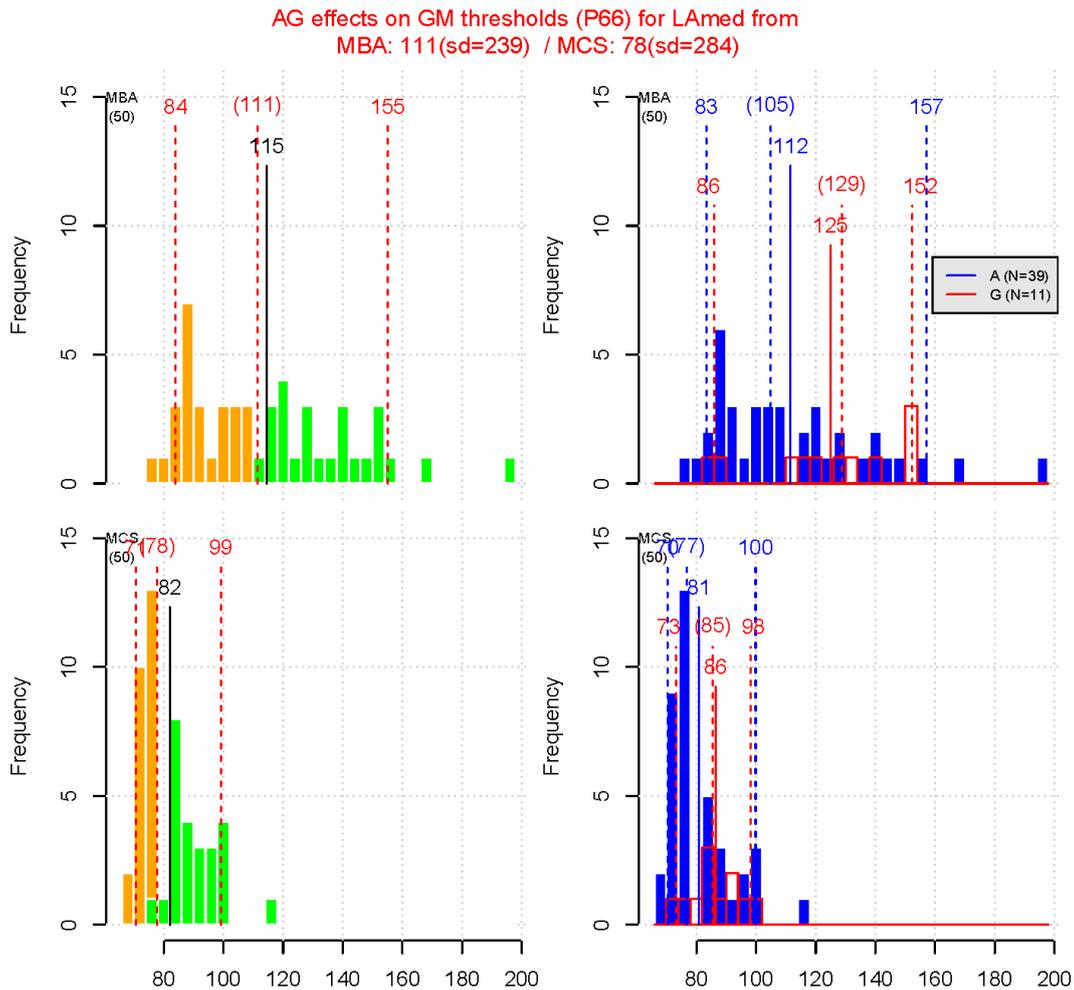


Figure 28 : Distributions des nouvelles valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des profondeurs de transparence d'après MBA (en haut) et MCS (en bas), à gauche, pour l'ensemble plans d'eau de type étang piscicole et les gravières et, à droite, séparément, pour les plans d'eau de type étang piscicole (A, en bleu) et les gravières (G, en rouge).

Critère "type de plan d'eau"

L'analyse, selon les types de plan d'eau, des distributions des nouvelles valeurs-seuils (VS_{P66}) des paramètres physico-chimiques révèle que les nouvelles VS_{P66} s'étalent sur une gamme de valeurs correspondant à plus de deux classes d'état du SEQ-EAU 2012. En effet, dans les cas du phosphore total (Figure 29), les VS_{P66} s'étalent entre des valeurs inférieures à la limite TRES BON/BON du SEQ-Eau (ligne bleue) à des valeurs proches de la limite PASSABLE/MAUVAIS du SEQ-Eau (ligne rouge). Pour l'ammonium (Figure 30), les limites du SEQ-Eau ont été placées pour information même si elles correspondent à la somme de l'ammonium et des nitrates. Il est donc difficile de les comparer aux VS_{P66} . Pour la transparence (Figure 31), la gamme des VS_{P66} de la limite BON/MOYEN oscille entre des valeurs plus sévères que la valeur de la limite PASSABLE/MAUVAIS du SEQ-Eau (*i.e.* <0.8m) à des valeurs proches de la limite BON/MOYEN du SEQ-Eau (*i.e.* 3.5m).

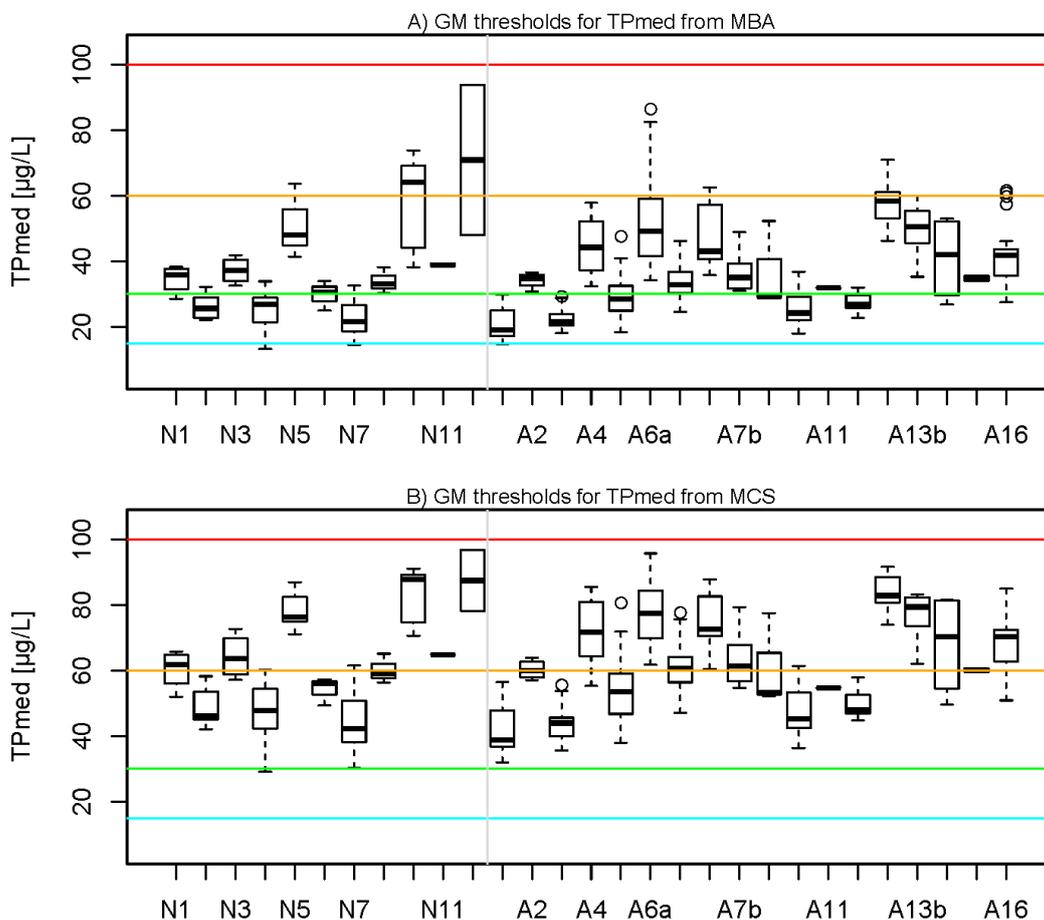


Figure 29 : Distribution d'après MBA (A) et d'après MCS (B) des nouvelles valeurs-seuils de phosphore total (VS_{P66}) pour la limite BON/MOYEN ("GM = GOOD/MODERATE") pour chacun des types de plan d'eau nationaux. Les lignes horizontales illustrent de bas en haut les valeurs-seuils du SEQ-Eau 2012 pour les limites TRES BON/BON (bleu), BON/MOYEN (vert), MOYEN/PASSABLE (orange) et PASSABLE/MAUVAIS (rouge).

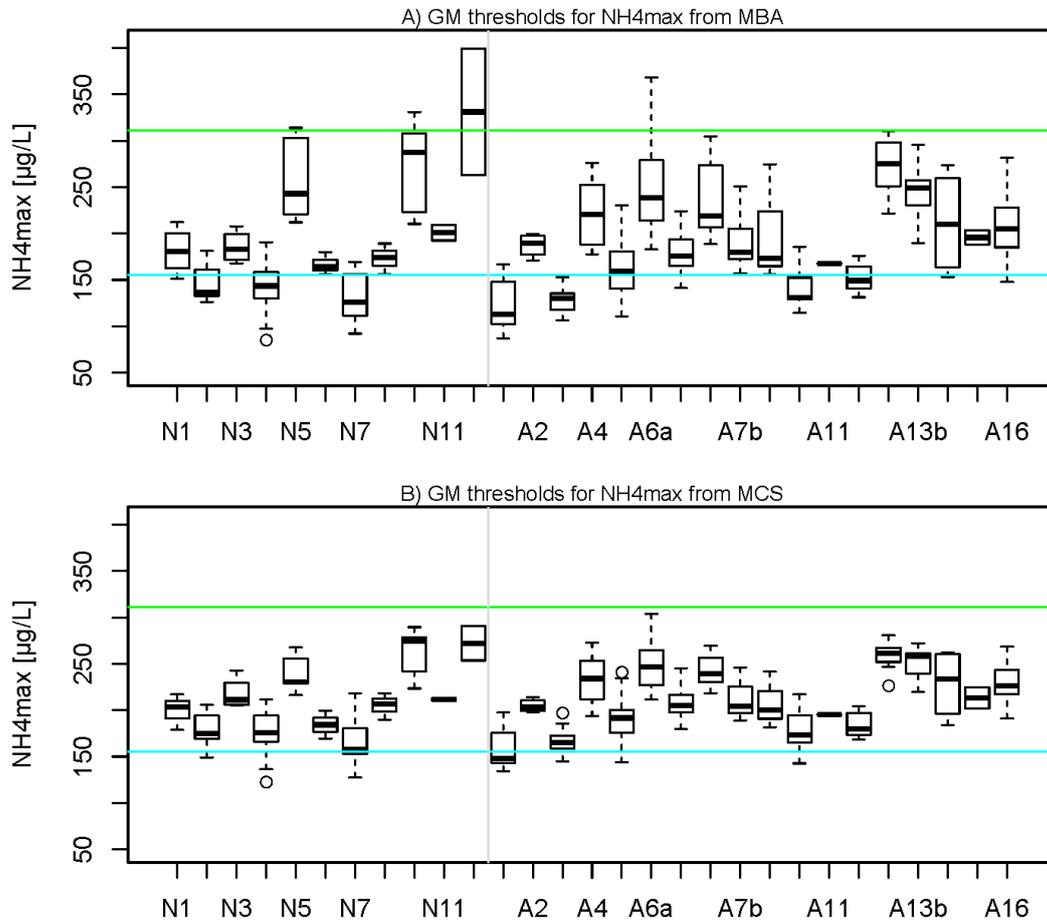


Figure 30 : Distributions d'après MBA (A) et d'après MCS (B) des nouvelles valeurs-seuils d'ammonium (VS_{P66}) pour la limite BON/MOYEN ("GM = GOOD/MODERATE") pour chacun des types de plan d'eau nationaux. Les lignes horizontales illustrent de bas en haut les valeurs-seuils de l'azote minéral (*i.e.* NO_3+NH_4) du SEQ-Eau 2012 pour les limites TRES BON/BON (bleu) et BON/MOYEN (vert).

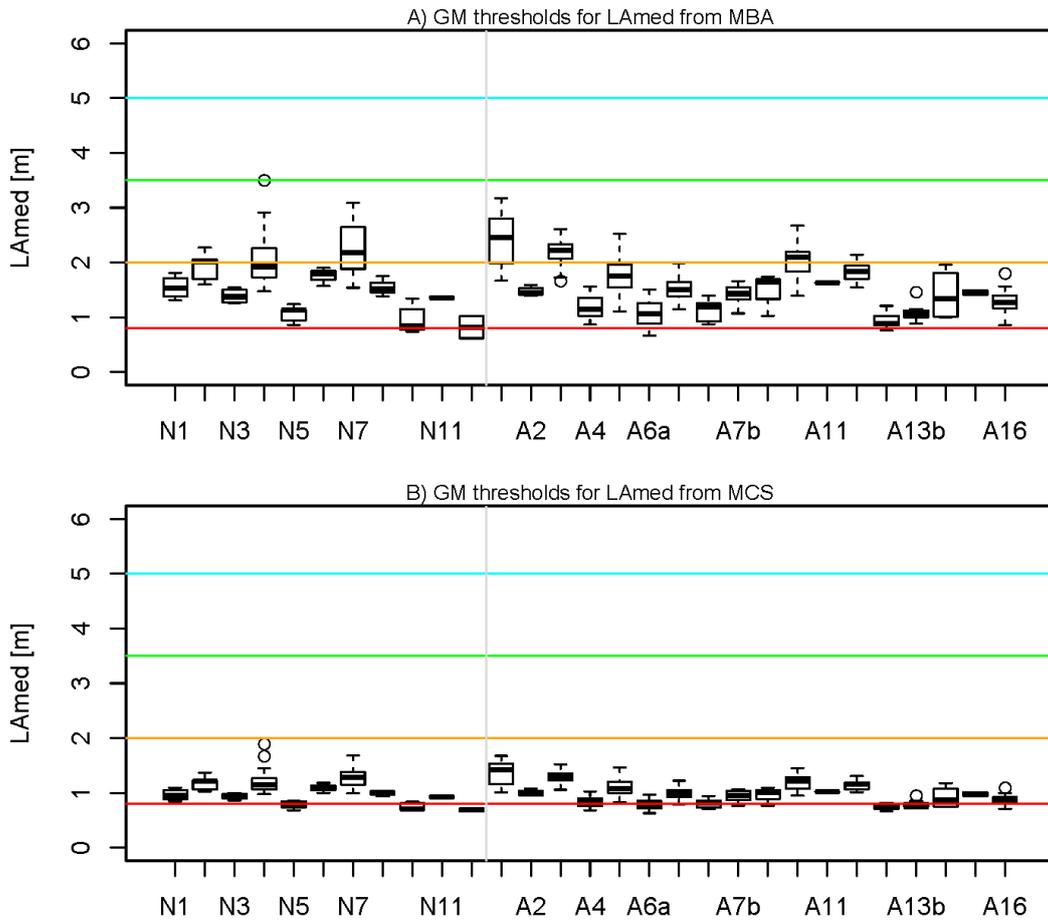


Figure 31 : Distributions d'après MBA (A) et d'après MCS (B) des nouvelles valeurs-seuils de transparence (VS_{P66}) pour la limite BON/MOYEN ("GM = GOOD/MODERATE") pour chacun des types de plan d'eau nationaux. Les lignes horizontales illustrent de haut en bas les valeurs-seuils du SEQ-Eau 2012 pour les limites TRES BON/BON (bleu), BON/MOYEN (vert), MOYEN/PASSABLE (orange) et PASSABLE/MAUVAIS (rouge).

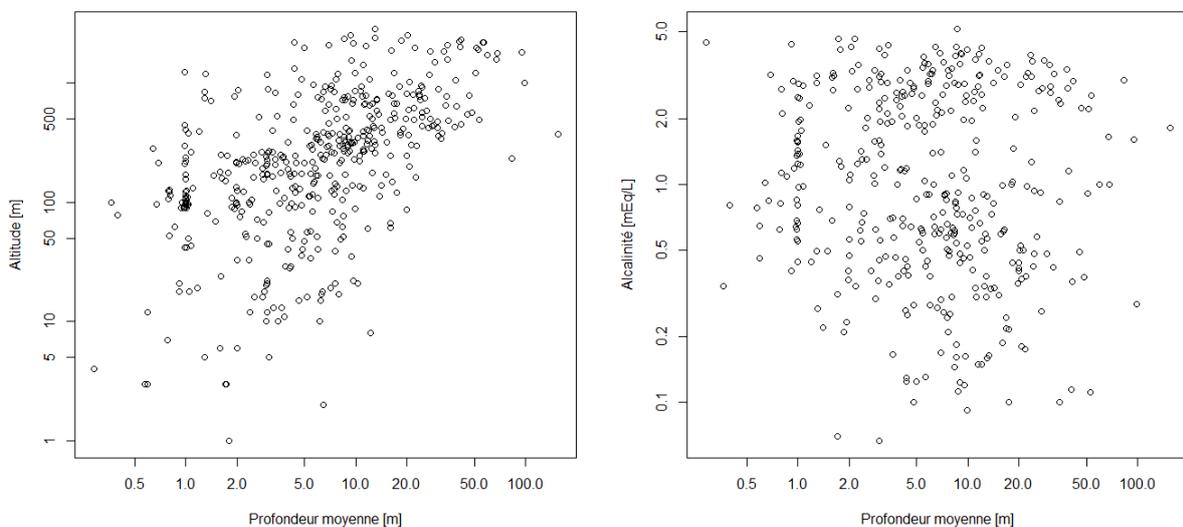


Figure 32 : Relations entre (à gauche) l'altitude ou (à droite) l'alcalinité, et la profondeur moyenne des plans d'eau nationaux.

Critères altitude et alcalinité

Les 3 figures suivantes illustrent la discrimination des VS_{P66} par l'altitude mais pas par l'alcalinité. En effet, dans les plans d'eau d'altitude supérieure à 300 m, les VS_{P66} sont plus tolérantes d'après les deux métriques MCS et MBA que dans les plans d'eau d'altitude inférieure à 300 m. Cette différenciation s'explique par la dépendance observée de la profondeur moyenne à l'altitude et pas à l'alcalinité (Figure 32).

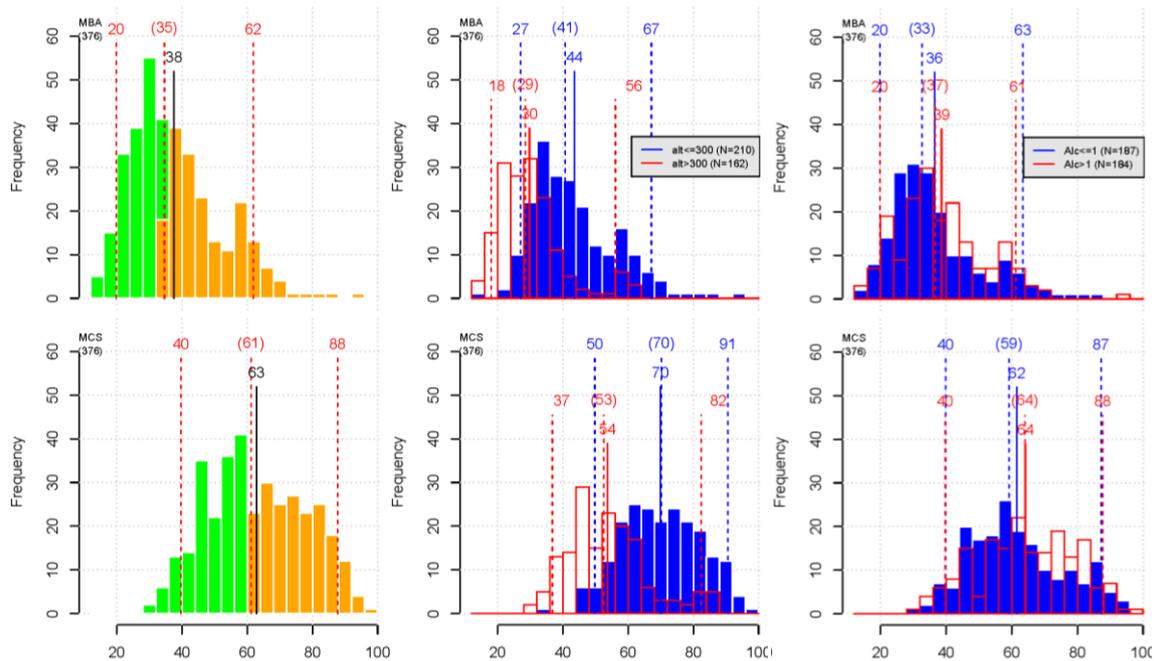


Figure 33 : Distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane du phosphore total [$\mu\text{g/L}$] d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) pour, colonne de gauche, l'ensemble des plans d'eau ; au centre, les plans d'eau de plaine (altitude \leq 300m, en bleu) et les plans d'eau d'altitude (altitude $>$ 300m, en rouge) ; et à droite, les plans d'eau peu alcalins (alcalinité \leq 1mEq/L, en bleu) et les plans d'eau alcalins (alcalinité $>$ 1mEq/L, en rouge).

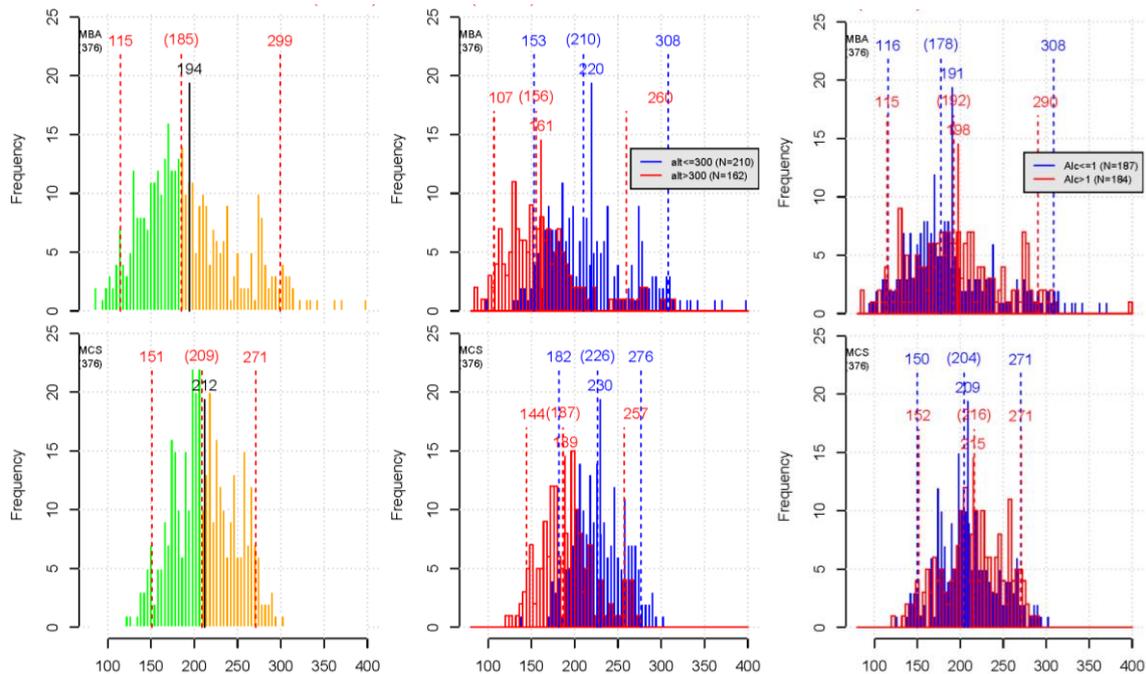


Figure 34 : Distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la valeur maximale de l'ammonium [µg/L] d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) pour, colonne de gauche, l'ensemble des plans d'eau ; au centre, les plans d'eau de plaine (altitude≤300m, en bleu) et les plans d'eau d'altitude (altitude>300m, en rouge) ; et à droite, les plans d'eau peu alcalins (alcalinité≤1mEq/L, en bleu) et les plans d'eau alcalins (alcalinité>1mEq/L, en rouge).

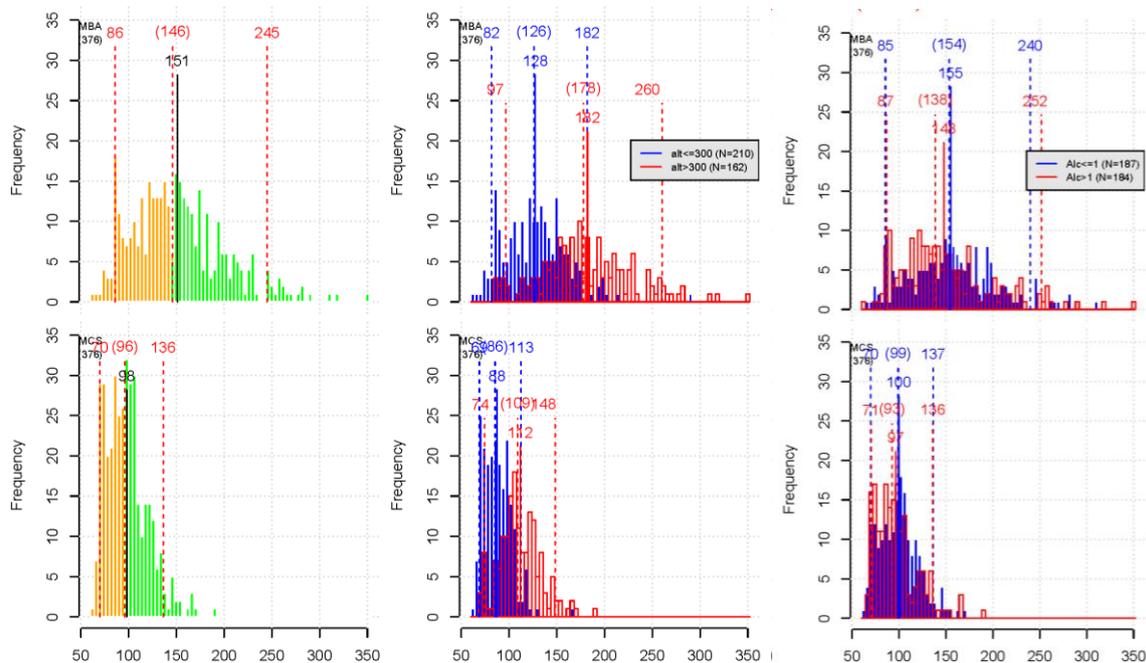


Figure 35 : Distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour la médiane des profondeurs de transparence [cm] d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) pour, colonne de gauche, l'ensemble des plans d'eau ; au centre, les plans d'eau de plaine (altitude≤300m, en bleu) et les plans d'eau d'altitude (altitude>300m, en rouge) ; et, à droite, les plans d'eau peu alcalins (alcalinité≤1mEq/L, en bleu) et les plans d'eau alcalins (alcalinité>1mEq/L, en rouge).

Critère "force-motrice"

Par curiosité, nous avons vérifié si les forces motrices avaient une influence sur les distributions des VS_{P66} . Force est de constater que les VS_{P66} discriminent les plans d'eau selon leur pourcentage d'agriculture (Figure 36). Cela pourrait être lié à une certaine dépendance entre l'agriculture et la profondeur moyenne, dépendance qui pourrait s'expliquer par le biais de leur dépendance réciproque à l'altitude (Figure 37). En effet, il est logique d'avoir plus d'agriculture en plaine et d'avoir les plans d'eau les moins profonds en plaine.

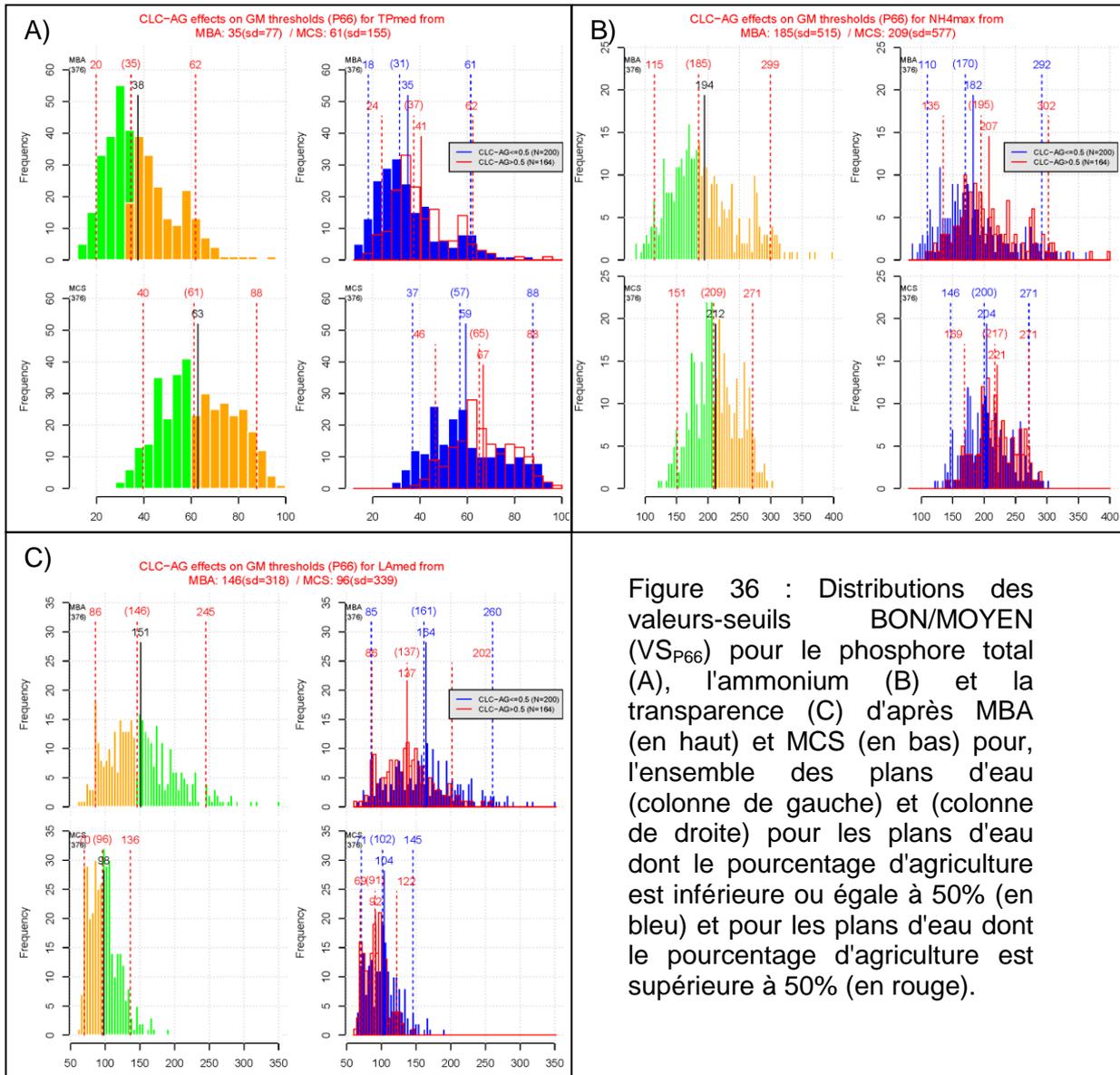


Figure 36 : Distributions des valeurs-seuils BON/MOYEN (VS_{P66}) pour le phosphore total (A), l'ammonium (B) et la transparence (C) d'après MBA (en haut) et MCS (en bas) pour, l'ensemble des plans d'eau (colonne de gauche) et (colonne de droite) pour les plans d'eau dont le pourcentage d'agriculture est inférieur ou égal à 50% (en bleu) et pour les plans d'eau dont le pourcentage d'agriculture est supérieur à 50% (en rouge).

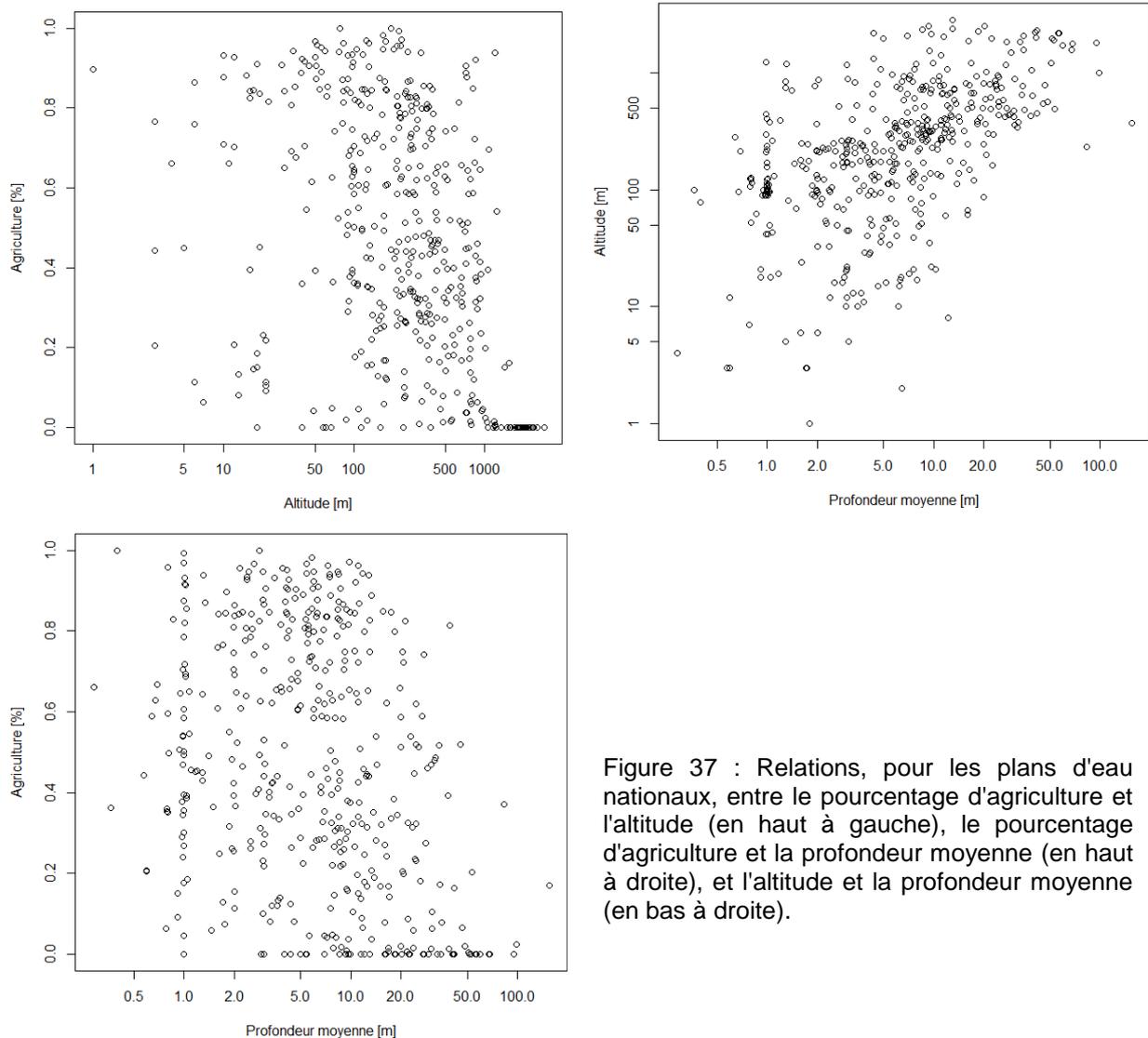


Figure 37 : Relations, pour les plans d'eau nationaux, entre le pourcentage d'agriculture et l'altitude (en haut à gauche), le pourcentage d'agriculture et la profondeur moyenne (en haut à droite), et l'altitude et la profondeur moyenne (en bas à droite).

Critère "métrique biologique"

Les différences entre les VS_{P66} données par MBA et les VS_{P66} données par MCS montrent que (Figure 38) :

- i. pour le phosphore total, les $VSP66$ données par MBA sont quasiment toujours (sauf pour 2 plans d'eau) plus strictes (concentrations plus basses) que celles données par MCS ;
- ii. pour l'ammonium, les $VSP66$ données par MBA sont le plus souvent (sauf pour la limite TRES BON/BON et pour quelques plans d'eau-années pour les autres limites) plus strictes (concentrations plus basses) que celles données par MCS ;
- iii. pour la transparence, les $VSP66$ données par MBA sont quasiment systématiquement (sauf pour quelques plans d'eau) plus strictes (profondeur de transparence plus élevées) que celles données par MCS.

Par conséquent, les VS_{P66} qui déclassent en-dessous de la limite BON/MOYEN sont généralement celles calées avec MBA sauf dans le cas de l'ammonium ou de la transparence de quelques plans d'eau.

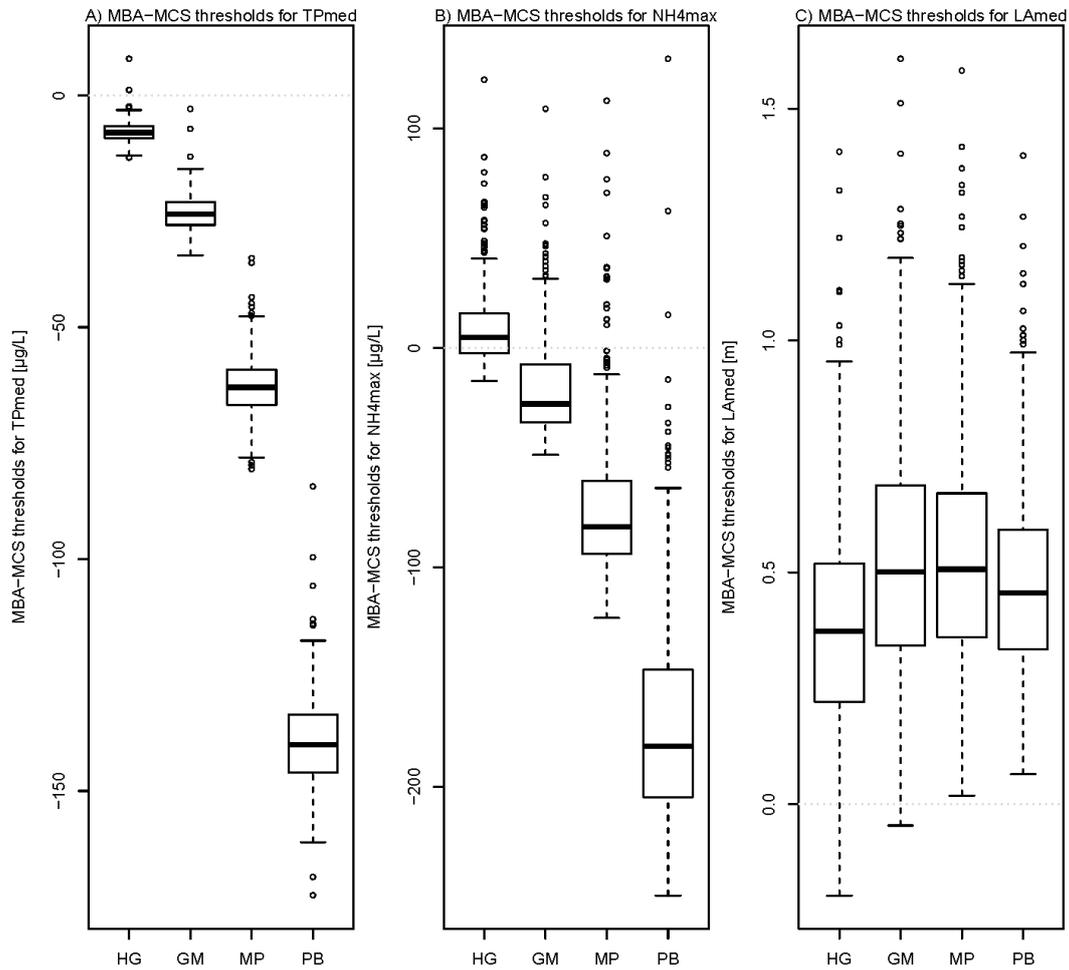


Figure 38 : Distributions des différences entre les VS_{P66} selon MBA et les VS_{P66} selon MCS pour (A) le phosphore total (TPmed), (B) l'ammonium (NH4max) et (C) la transparence (LAmed) i pour les limites TRES BON/BON (HG="HIGH/GOOD"), BON/MOYEN (GM="GOOD/MODERATE"), MOYEN/PASSABLE (MP="MODERATE/POOR") et PASSABLE/MAUVAIS (PB="POOR/BAD").

3. Amélioration des connaissances par la télédétection

Cette partie présente les premiers résultats de l'utilisation de la télédétection pour l'amélioration des connaissances des caractéristiques physico-chimique et biologique des plans d'eau. A terme, les données issues de la télédétection pourront être utilisées pour extrapoler les données RCS, ponctuelles et annuelles, par rapport à la masse d'eau et par rapport au plan de gestion.

3.1. Amélioration des connaissances par la télédétection

a) Problématique

Les variabilités spatiales et temporelles rendent complexe l'interpolation des données ponctuelles des réseaux de suivi (*i.e.* 4 campagnes a minima par année et une année a minima par plan de gestion de 6 ans) à l'échelle de la masse d'eau (variabilité spatiale) et à l'échelle du plan de gestion (variabilité temporelle). Aujourd'hui, les chroniques d'images satellites LANDSAT ont une résolution spatiale de 60m qui est parfaitement adaptée à leur utilisation pour l'amélioration des connaissances des variabilités des conditions physico-chimiques (température, transparence) de nombreux plans d'eau DCE. Les deux parties suivantes reprennent les résumés du rapport de stage qui a permis a) de mettre en lumière le potentiel des images satellites pour le suivi des plans d'eau, et b) de publier une première mise en application de méthodologie d'analyse des images dans le cas de la température via l'infrarouge thermique des images LANDSAT.

b) Résumé du rapport de stage de R. Simon : "*Télédétection de paramètres physico-chimiques et biologiques de plans d'eau : état de l'art & étude de cas*" (Simon 2013)

La télédétection représente un outil efficient pour des applications en écologie et en sciences de l'environnement grâce à une vision spatialement synoptique et temporellement régulière sur de grands territoires. Les pôles ONEMA/Irstea Hydroécologie des Cours d'Eau (centre Irstea de Lyon-Villeurbanne) et Hydroécologie des Plans d'Eau (centre d'Aix-en-Provence) s'intéressent aux applications de cette technologie pour le suivi et l'enrichissement de l'information portant sur les plans d'eau en France. En effet, grâce aux progrès des capteurs et des méthodes depuis une trentaine d'années, il est aujourd'hui possible d'extraire et de suivre de nombreux paramètres physico-chimiques et biologiques de masses d'eau, tels que la clarté de l'eau, la température de surface et les concentrations en chlorophylle-a, en matière en suspension et en matière organique dissoute colorée.

Dans le domaine de la télédétection optique, des modèles statistiques (régressions simples ou multiples) ou déterministes (modèles bio-optiques) vont relier le signal enregistré par le capteur aux concentrations de paramètres d'intérêt dans l'eau. Cependant, des questions de recherche en suspens, principalement portant sur les modèles déterministes censés être plus robustes et capables de réduire les besoins en données de terrain, sont à approfondir avant l'opérationnalisation complète des méthodes.

Dans le domaine de l'infrarouge thermique, où le signal capté peut être directement converti en température de surface (relative aux premiers 100 µm de profondeur), le défi majeur est de corriger les images des effets atmosphériques. Pour des images LANDSAT dont les

caractéristiques correspondent pour l'instant le mieux aux besoins de la télédétection pour le suivi de la physico-chimie des plans d'eau français, une méthode relativement récente de correction (l'algorithme mono-bande) a été identifiée comme la plus opérationnelle. Cette méthode a été testée sur deux plans d'eau présents sur le territoire français à l'aide d'une chaîne semi-automatisée de prétraitement et de traitement d'images.

Les résultats sont bons et en accord avec ceux fournis par la littérature (R^2 toujours supérieur à 0,90 ; RMSE compris entre 1 et 2°C), malgré le fait que le jeu de données de terrain utilisé pour la validation présentait de nombreux défauts. En effet, le fait que les mesures de température n'étaient disponibles que pour un seul point par date et par plan d'eau a sévèrement limité le choix d'analyses. Ainsi, une des conclusions majeures de ce travail est la nécessité primordiale de constituer un jeu de données de terrain spécifiquement adapté à la validation des méthodes (optiques ou thermiques). C'est une étape indispensable et préalable à une utilisation dans un cadre opérationnel.

La mise à disposition prochaine de nouvelles images de meilleure qualité (LANDSAT 8 et SENTINEL) laisse aussi entrevoir des perspectives opérationnelles très intéressantes.

c) Cas de la température de surface

Les résultats d'un premier travail portant sur la conception d'une méthode opérationnelle de traitement des images LANDSAT pour le paramètre température de surface (Figure 39) ont fait l'objet d'un article en cours de publication (Simon, Tormos et al. Sous presse, Voir résumé ci-après) ; à ce jour, ces images ont été identifiées comme les plus appropriées au suivi des caractéristiques des plans d'eau français. Une méthode de correction atmosphérique potentiellement opérationnelle a été testée sur deux plans d'eau français relativement bien instrumentalisés pour la validation de la méthode.

Résumé de "Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel emissivity and atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs" (Simon, Tormos et al. Sous presse)

La température de surface des plans d'eau est un élément clé de leur caractérisation thermodynamique, et les images infrarouges thermiques LANDSAT sont aujourd'hui la meilleure alternative pour le suivi de ce paramètre, en particulier pour les réservoirs de forme irrégulière impliquant une hétérogénéité thermique spatiale. Cependant, les images doivent être corrigées principalement des effets atmosphériques afin d'être pleinement exploitables. L'objectif de cette étude est de valider un algorithme de correction dite "mono-canal" issu de la littérature pour les images infrarouge thermique LANDSAT de type mono-bande. Deux réservoirs d'eau douce situés en France métropolitaine ont été choisis comme sites d'étude, et une meilleure utilisation a été faite de toutes les images et les données de terrain disponibles. Les résultats obtenus sont satisfaisants et conformément à la littérature ($R^2 > 0,90$) et le carré de l'erreur quadratique moyenne est comprise entre 1 et 2°C. De plus, le test de Wilcoxon a montré une différence hautement significative entre le terrain et les données images non-corrigées, une différence très hautement significative entre les données image corrigées et les données images non-corrigées, et aucune différence significative entre les in situ et les données image corrigées. L'algorithme "mono-canal" est donc recommandé pour corriger les archives d'images infrarouges thermiques LANDSAT de type mono-bande pour les plans d'eau.

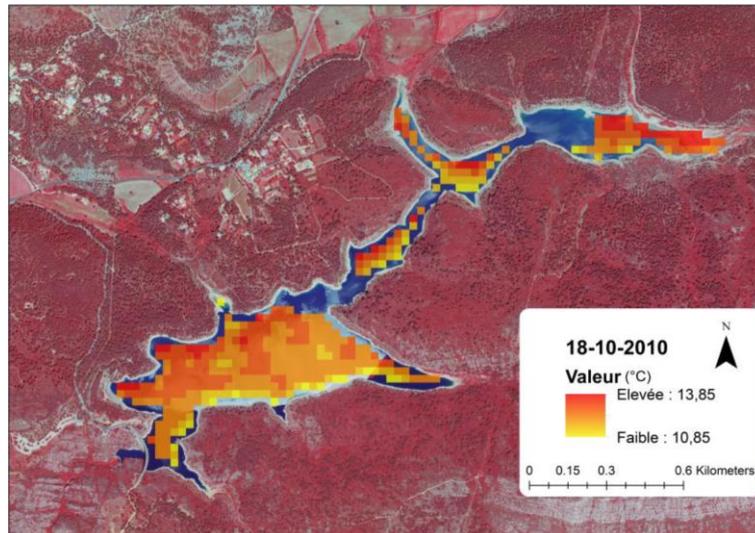


Figure 39 : Température de surface le 18/10/2012 pour le Lac de Bimont (latitude : 43.54053°, longitude : 5.53654°). Sources des images : Institut Géographique National (IGN) (fausse couleur) et « United States Geological Survey » (USGS) (Simon, Tormos et al. Sous presse).

4. Conclusions et perspectives

4.1. Conclusions sur la définition des valeurs-seuils

Ce rapport présente trois stratégies de calages des valeurs seuils des paramètres physico-chimiques généraux soutenant la biologie. Ces techniques ont été développées afin de permettre la mise à jour des valeurs-seuils des paramètres physico-chimiques présentes dans le SEQ-Eau Plan d'Eau. En effet, les valeurs-seuils du SEQ-Eau n'ont pas été construites pour "soutenir explicitement la biologie" et ne sont pas modulées en fonction des types de plans d'eau.

Cas du phosphore total, de l'ammonium et de la transparence

Deux des trois **stratégies** sont **basées sur les réponses des métriques biologiques aux paramètres physico-chimiques** et ont abouti à des propositions de nouvelles valeurs-seuils pour le phosphore total (valeur médiane des observations en zone euphotique, §6.1), l'ammonium (valeur maximale des observations en zone euphotique, §6.2) et la transparence (valeur médiane des observations, §6.3). Les métriques biologiques ayant permis la définition de ces seuils sont les métriques relative à l'abondance "Métrique de Biomasse Algale", MBA (De Bortoli and Argillier 2008) et à la composition "Métrique de Composition Spécifique", MCS (Feret and Laplace-Treytore 2013) du phytoplancton. Dans ces stratégies, les valeurs-seuils ont été modulées par la profondeur moyenne théorique des plans d'eau. Les autres métriques des compartiments biologiques poissons, macrophytes ou

invertébrés n'ont pas montré de réponse significative aux paramètres physico-chimiques testés.

Dans l'état d'avancement des travaux, trois points sont à souligner concernant ces stratégies de calage à la biologie :

1. les **méthodologies de calage des valeurs-seuils à la biologie** impliquent une dépendance directe de la qualité des valeurs-seuils physico-chimiques à la qualité des valeurs-seuils des compartiments biologiques. Or, dans le cas des métriques de l'indice phytoplancton utilisées, les critères de positionnement des valeurs-seuils par rapport aux valeurs de référence et à la gamme des observations ont été choisis géométriquement et façon arbitraire, *i.e.* la gamme des valeurs des EQB a été divisée en 5 classes de même amplitude. Des analyses plus fines des courbes de réponse des caractéristiques des compartiments biologiques et des paramètres physico-chimiques pourraient donc être réalisées afin d'asseoir les valeurs-seuils biologiques et les valeurs-seuils physico-chimiques sur des changements de réponses effectives.
2. Conséquence de ce premier point, les deux métriques de l'indice phytoplancton (MBA et MCS) donnent des **valeurs-seuils physico-chimiques divergentes** ce qui, illustre la complexité d'un calage par la biologie par ce choix méthodologique. Cette divergence peut être le fruit de réponses différentes de l'abondance (MBA) et de la composition spécifique (MCS) aux paramètres physico-chimiques, ou peut être liée au fait que les deux métriques biologiques élémentaires MBA et MCS, développées à 5 ans d'intervalle, souffrent d'une différence de méthodologie et d'un manque de réalité biologique quant aux choix des valeurs-seuils et des points d'ancrages.
3. De plus, les valeurs de profondeurs moyennes utilisées dans les modélisations statistiques sont les **profondeurs moyennes dites "théoriques"**, *i.e.* définie selon le rapport entre le volume et la surface. Dans le cas des plans d'eau à marnage, naturel ou artificiel, les conditions hydrologiques de l'année du suivi peuvent différer significativement des conditions correspondant aux volumes et surfaces utilisés ici. Ceci est en particulier le cas pour les retenues où les données de surfaces et de volumes correspondent à la cote normale d'exploitation qui peut être que rarement atteinte. Des effets de concentration des apports du bassin-versant ou du phytoplancton peuvent alors induire des déclassements mécaniques des plans d'eau liés aux conditions hydrologiques exceptionnelles. Une méthodologie d'ajustement des valeurs-seuils en fonction de la profondeur moyenne de l'année voire de la campagne de suivi pourrait être développée. (Remarque : Ce point est étroitement lié à la définition du bon potentiel écologique des retenues, bon potentiel qui doit prendre en compte le marnage comme une contrainte technique obligatoire. Le choix de la profondeur moyenne à considérer dans les modélisations des conditions de référence et dans les critères typologiques doit donc être clarifié.)

Cas particulier des Nitrates

La troisième méthode présentée dans ce rapport (§2.3) a permis de proposer des valeurs-seuils pour le paramètre nitrates (valeur maximale des observations en zone euphotique) en se basant sur l'existence d'une relation significative entre le paramètre physico-chimique et un indicateur des pressions anthropiques subies par les plans d'eau. Ici, les nitrates répondent à la force motrice pourcentage d'agriculture extraite de la base de données Corine Land Cover. Dans cette approche, le soutien à la biologie n'est pas mis en évidence or, les compositions spécifiques des populations de phytoplancton sont connues pour répondre au composés azotés (Tilman 1982), réponses qui pourront être analysées dans la suite de cette

étude. Enfin, le critère typologique profondeur moyenne théorique a également été utilisé ici pour moduler les valeurs-seuils de nitrates entre les types de plans d'eau.

Cas particulier des Orthophosphates

Les orthophosphates sont des éléments nutritifs pour les végétaux dont le cycle de croissance-mort-sédimentation et les vitesses de changement d'état dépendent de nombreux facteurs environnementaux limitant ou amplificateurs. Leur biodisponibilité au sein des plans d'eau peut donc être très variable selon les systèmes. De plus, même si les activités anthropiques sur les bassins-versants apportent des volumes importants de phosphates, leur concentration au sein des plans d'eau à un instant donné peut être faible si elle est mesurée après un événement rapide de croissance de végétaux, en particulier de phytoplancton. Dans les réseaux de suivi, la relativement faible fréquence de suivi des conditions physico-chimiques (*i.e.* 4 campagnes annuelles, une année par plan de gestion) vis-à-vis de la rapidité des réactions de consommation des orthophosphates (Figure 40) ne permet pas d'avoir une image globale objective de leur quantité bio-disponible, et donc du niveau d'eutrophisation des plans d'eau. Le suivi des orthophosphates est donc peu pertinent dans notre cas contrairement au suivi du phosphore total qui englobe la part biodisponible et la part consommée des orthophosphates. Même avec 4 valeurs annuelle, le suivi des orthophosphates donne une image globale du niveau de phosphore des plans d'eau.

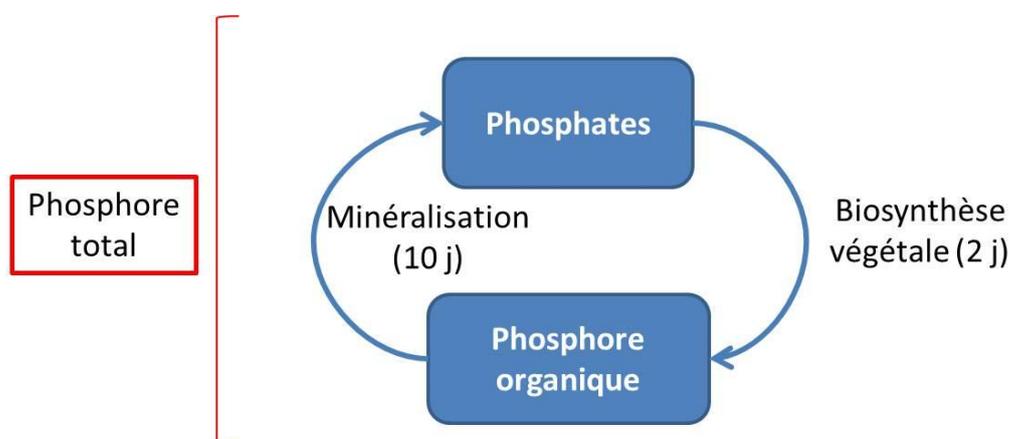


Figure 40 : Schéma des échanges de phosphore entre les phosphates biodisponibles et le phosphore organique. Dès que les conditions sont favorables à la croissance des végétaux, les phosphates de la colonne sont absorbés par les végétaux et incorporés dans la matière organique. La teneur du plan d'eau en phosphore risque donc d'être sous-évaluée par la simple mesure des phosphates dans l'eau à cause du stockage du phosphore dans la biomasse. L'analyse du phosphore total (minéral+organique) évite ce risque et permet de mieux d'appréhender le niveau trophique d'un plan d'eau. Les phosphates sont restitués à la colonne d'eau suite à la mort des organismes lors de la décomposition et minéralisation de la matière organique, processus plus long que la biosynthèse. Les constantes de temps pour la biosynthèse par le phytoplancton et le recyclage sont de l'ordre de 2 et 10 jours (Officer and Ryther 1980).

4.2. Perspectives générales

La définition des valeurs-seuils et recherche des effets sur les communautés biologiques

Des recherches sont actuellement en cours pour essayer d'analyser plus directement l'effet de divers paramètres physico-chimiques sur les communautés biologiques, sans passer nécessairement par les indices biologiques. L'objectif est d'étudier la réponse des communautés dans leur globalité (composition spécifique) ou de certaines métriques biologiques pertinentes, aux paramètres physico-chimiques soutenant la biologie, en cherchant particulièrement des seuils d'effet. Cela donnera des indices pour fixer des limites de classes et on obtiendra ainsi une évaluation physico-chimique des PE plus indépendante de l'évaluation biologique.

Par exemple, plutôt que de s'intéresser à l'effet des nitrates sur l'indice phytoplancton, une autre approche consiste à repérer des changements significatifs des communautés de phytoplancton dans un gradient de nitrates. On peut essayer de minimiser la variance de part et d'autre d'un seuil d'effet de nitrates, en suivant la méthode décrite par (Bougon and Ferréol 2012) mais en utilisant des dissimilarités entre communautés (Figure 41) plutôt que des notes d'indice.

Cette approche peut être généralisée à l'effet de nombreux paramètres environnementaux en interactions. Pour ce faire, des méthodes statistiques récentes de partitionnement récursif sur données multivariées seront utilisées.

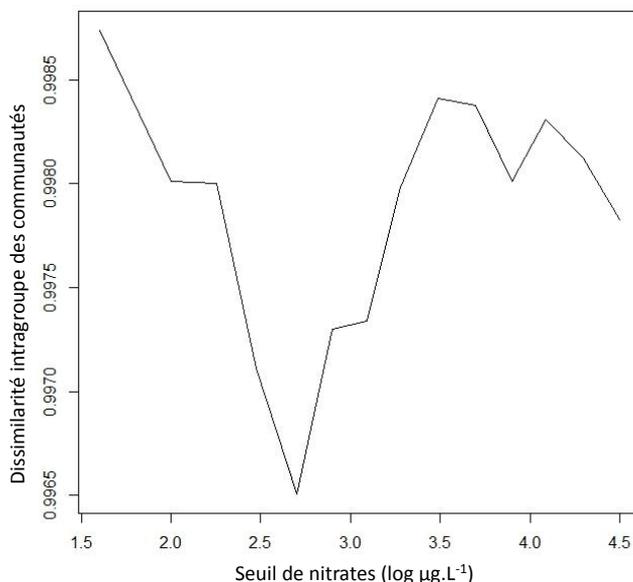


Figure 41 : *Analyse de la variance des communautés de phytoplancton dans un gradient de nitrates. Une valeur de concentrations en nitrates (2,7) révèle un possible seuil d'effet à partir duquel les communautés sont significativement différentes (NPMANOVA). Ce seuil est déterminé par un critère de minimisation des dissimilarités de Bray-Curtis dans les deux groupes définis par le seuil (données de phytoplancton ayant servi au développement de l'IPLAC, aucune typologie n'a été appliquée ici).*

Ces perspectives pourront aussi s'appliquer aux autres compartiments physico-chimiques que sont le bilan d'oxygène, le niveau d'acidification, la salinité et la température, compartiments qui n'ont pas pu être traités dans le temps imparti pour cette étude en vue de la mise à jour de l'arrêté évaluation en 2014.

La télédétection et son utilisation pour le suivi des plans d'eau

En 2013 a été initié un travail sur l'utilisation des images satellites pour le suivi des plans d'eau à travers un stage de master 2 réalisé par Ricardo SIMON en collaboration avec Thierry TORMOS au Pôle Onema-Irstea Hydroécologie des Cours d'eau à Lyon. Ce stage a abouti à un bilan des paramètres physico-chimiques (température, transparence...) voire biologique (chlorophylle a) potentiellement suivis par les satellites à différentes résolutions spatiales et temporelles parfaitement compatibles avec les surfaces et structures des plans d'eau français. Ce travail a fait l'objet d'un rapport de stage et d'un article accepté portant sur le cas de la température de surface des plans d'eau. Ce travail de développement de méthodologie d'analyse d'image se poursuit aujourd'hui à Lyon sur le suivi du marnage et le suivi de la transparence.

A terme, la meilleure finesse des bandes spectrales des images satellitaires à venir devrait permettre de déconvoluer les concentrations respectives de matière minérale, de matière biologique et de matière organique dissoute colorée (CDOM = "*Colored Dissolved Organic Matter*") qui influencent la transparence. Pour ce faire, des suivis des propriétés optiques inhérentes aux plans d'eau doivent être réalisés afin de parfaire les outils d'analyse d'images et de permettre un suivi opérationnel des plans d'eau à des résolutions temporelles inférieures à 60m et à des temps de retour de l'ordre de la semaine. Ces nouvelles données apporteront des connaissances indispensables à une meilleure évaluation de l'état des plans d'eau dans un souci d'interpolation des mesures ponctuelles à l'ensemble de la masse d'eau et à l'ensemble du plan de gestion.

5. Références

- Argillier, C., S. Caussé, et al. (2013). "Development of a fish-based index to assess the eutrophication status of European lakes." Hydrobiologia **704**: 193-211.
- Bougon, N. and M. Ferréol (2012). Physico-Chimie soutenant la biologie : Identification des seuils Physicochimique en soutien au Bon Etat Ecologique des cours d'eau. Rapport convention Onema/Irstea 2011. Lyon, Irstea, UR MALY, Pôle Onema/Irstea: 65.
- Boutry, S., V. Bertrin, et al. (2013). Méthode d'évaluation de la qualité écologique des plans d'eau basée sur les communautés de macrophytes. Indice Biologique Macrophytique en Lac (IBML) - Rapport d'avancement. Rapport convention Onema/Irstea 2012. Bordeaux, Irstea, REBX: 26+annexes.
- De Bortoli, J. and C. Argillier (2008). Définition des conditions de référence et des limites des classes d'état sur la base d'une approche pressions/impacts - Plans d'eau - Paramètre chlorophylle-a, Cemagref: 51.
- Feret, T. and C. Laplace-Treyture (2013). IPLAC : l'indice Phytoplancton Lacustre : Méthode de développement, description et application nationale 2012. Rapport convention Onema/Irstea 2012. Bordeaux, Irstea, UR REBX: 69.
- Gevrey, M., C. Provost, et al. (2012). Développement et optimisation des méthodes de bioindication pour les plans d'eau - Indices invertébrés. Rapport convention Onema/Irstea 2011. Aix-en-Provence, Irstea, UR HYAX, Pôle Onema/Irstea: 46.
- Logez, M., P.-A. Danis, et al. (2014). Etude d'impact de l'utilisation des nouveaux indicateurs biologiques et physicochimiques pour l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau. Rapport convention Onema/Irstea 2013. Aix-en-Provence, Irstea, UR HYAX, Pôle Onema/Irstea: 130.
- Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (2012). Guide technique : évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau): 84.
- Officer, C. B. and J. H. Ryther (1980). "The Possible Importance of Silicon in Marine Eutrophication." Marine Ecology - Progress Series **3**: 83-91.
- Simon, R. N. (2013). Télédétection de paramètres physico-chimiques et biologiques de plans d'eau: Etat de l'art & étude de cas sur la température de surface, ONEMA Irstea: 68.
- Simon, R. N., T. Tormos, et al. (Sous presse). "Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.
- Tilman, D. (1982). Resource Competition And Community Structure. Princeton, Princeton University Press.

6. Annexes

6.1. Seuils physico-chimiques pour le phosphore total

Code Lac	Profondeur moyenne théorique	Phosphore total (P), valeur médiane ($\mu\text{g P.L}^{-1}$)									
		MBA					MCS				
		TB	B	Mo	Me	Ma	TB	B	Mo	Me	Ma
ABB39	7,119	24	34	47	66		32	60	114	209	
AIG15	31,598	15	20	30	43		21	38	83	174	
AIG73	32,188	14	21	30	41		21	41	86	174	
AIL02	2,088	34	49	68	97		42	77	133	238	
ALB85	3,099	30	44	60	88		41	76	128	236	
ALE2B	22,647	17	23	33	47		23	45	93	179	
ALL01	11,038	20	28	40	56		28	54	100	196	
ALL04	18,500	17	26	34	49		23	45	92	176	
ALZ81	9,673	22	30	45	64		29	55	112	216	
AMA10	4,385	27	39	56	82		40	69	118	228	
ANG85	4,074	28	39	57	78		38	68	126	224	
ANN74	41,751	13	19	26	37		19	37	79	161	
ANT74	6,915	24	35	47	68		32	60	108	208	
APR85	2,378	32	45	66	94		42	78	128	245	
ARG19	5,801	25	35	50	71		35	64	114	219	
ART64	41,057	14	19	26	38		19	38	80	161	
ARZ35	8,306	22	32	43	61		31	57	106	213	
AST32	6,188	24	33	49	71		33	64	109	208	
AUL13	3,816	27	38	52	74		36	65	126	229	
AUM44	2,012	34	46	64	87		43	78	136	240	
AUR40	2,000	36	48	69	99		43	76	134	251	
AVE34	28,202	16	21	31	44		21	41	86	169	
AYD63	7,462	23	34	49	68		31	57	111	197	
AYG64	5,704	24	35	50	77		35	62	117	221	
BAG12	8,695	22	31	42	66		31	61	118	211	
BAI08	4,806	27	36	53	73		35	60	118	214	
BAI36	1,004	42	59	83	119		51	81	149	264	
BAR01	8,000	23	33	47	66		33	57	101	200	
BAR32	4,149	28	41	56	76		38	65	118	235	
BAY58	2,791	32	44	62	82		38	73	131	236	
BCL12	18,907	16	25	35	50		23	49	92	175	
BDB40	10,597	22	30	41	59		30	53	102	196	
BEA36	0,990	43	61	86	113		49	94	143	256	
BEL36	1,003	43	62	87	130		53	86	159	252	
BEZ41	0,977	44	63	87	123		49	86	145	255	
BIG36	1,002	44	56	77	110		53	89	151	269	
BIM13	11,798	20	29	40	58		27	52	99	198	
BIS40	0,913	43	64	90	125		50	88	139	263	

BIS73	34,629	15	21	29	43	20	44	80	166
BLA40	0,600	52	74	104	154	55	91	156	273
BLC19	13,609	20	27	40	52	28	53	101	193
BLE65	22,367	17	23	33	46	23	45	86	174
BLI36	0,671	49	68	95	135	54	84	152	254
BLI44	1,493	39	54	73	105	50	83	146	257
BMC16	10,568	20	28	41	58	28	54	106	202
BMS40	2,834	32	46	62	89	41	73	130	227
BOR63	1,308	40	56	78	106	49	82	139	247
BOS22	5,969	23	36	49	69	33	61	112	210
BOU35	2,876	31	45	59	85	40	67	126	223
BOU43	16,754	18	25	35	51	27	51	99	189
BOU63	2,995	31	45	59	87	43	75	133	240
BOU66	11,506	20	29	41	59	29	56	102	195
BOU73	82,348	11	16	22	32	16	33	68	154
BOU88	8,061	22	32	45	66	31	58	112	194
BOU89	4,984	26	38	56	74	37	64	121	215
BRA47	5,593	25	35	48	68	33	63	113	220
BSA58	3,466	28	40	56	77	39	68	126	223
BSF31	10,329	20	30	42	60	28	54	101	195
BSJ32	4,103	28	39	54	74	38	70	121	230
BUJ87	8,597	22	31	48	63	31	57	107	212
BUL85	8,441	22	31	41	62	31	61	107	202
CAE35	0,400	60	82	117	160	59	96	160	259
CAL2B	21,703	17	24	34	48	22	44	94	177
CAN32	3,028	30	42	59	80	39	73	131	231
CAR35	0,796	46	67	90	132	55	87	158	267
CAR66	15,028	19	26	38	53	25	47	98	186
CAR83	8,633	23	32	45	62	31	56	102	211
CAS04	30,513	15	21	31	43	21	42	85	171
CAS63	2,027	35	48	69	96	44	76	135	244
CAU19	3,408	31	41	59	83	42	70	127	222
CAZ23	1,986	34	48	71	98	44	79	135	241
CAZ40	10,328	22	30	42	61	29	56	105	195
CEB79	7,445	24	31	47	69	32	58	113	216
CER21	5,875	25	37	49	71	33	60	112	212
CHA21	7,799	24	32	47	67	32	61	114	203
CHA23	8,353	22	33	45	63	30	59	111	207
CHA25	23,842	16	21	33	45	22	46	91	181
CHA35	2,447	33	45	61	85	42	79	136	236
CHA38	38,485	14	21	28	39	20	40	82	161
CHA39	22,061	17	23	33	45	24	48	91	184
CHA48	4,378	27	37	54	76	36	67	116	227
CHA52	5,970	25	34	51	73	31	62	117	211
CHA58	14,301	18	27	39	54	27	52	98	188

CHA63	3,037	29	41	57	79	41	71	136	252
CHA86	2,203	31	48	63	86	43	81	138	237
CHA87	3,622	30	41	60	85	39	72	125	229
CHE38	10,474	21	29	43	59	29	53	103	192
CHE73	95,221	10	15	21	29	15	32	69	147
CHO04	23,594	17	23	32	47	23	44	87	177
COD2B	13,796	19	27	39	54	25	48	101	182
COI39	11,613	21	29	40	57	28	52	102	199
COM23	12,452	19	27	40	57	27	53	100	190
COR22	4,442	27	38	52	78	36	68	118	230
COR41	0,365	61	86	121	167	60	94	157	280
CRA18	1,771	36	52	73	98	46	79	140	241
CRE89	11,076	21	29	41	58	29	57	105	201
DEV07	4,821	26	38	53	76	36	65	122	215
DRE29	7,548	24	32	46	64	32	60	113	216
DUC56	2,359	33	48	65	93	45	75	134	238
ECH33	3,648	28	38	57	71	40	71	133	229
EDC23	2,688	32	44	63	87	40	73	129	223
EDC63	4,325	28	37	49	71	39	67	118	228
EDG36	1,003	44	61	85	122	50	84	148	262
EGR45	4,355	28	39	52	75	40	67	124	224
EGU36	20,673	18	24	36	48	25	47	93	190
ENC15	24,613	16	24	33	43	23	46	90	177
ENT13	4,800	27	39	56	76	34	65	120	221
ENT25	3,348	29	42	58	81	39	73	125	232
EPT35	2,397	33	43	58	77	45	72	138	236
ESP04	30,796	15	22	30	44	22	44	87	172
EST11	9,841	22	31	44	61	29	56	106	206
ETI39	4,600	27	39	53	77	38	67	115	232
ETR23	8,577	22	32	44	62	28	57	108	200
EVJ59	3,353	30	42	59	81	40	72	123	230
EYC05	9,374	22	31	43	62	28	58	103	195
FEY19	4,325	27	39	53	75	36	62	117	216
FIG2B	8,161	22	32	45	64	31	58	107	207
FIL09	9,394	22	30	44	61	30	59	103	204
FON36	1,027	43	59	85	116	50	85	153	243
FOR35	0,864	47	65	87	126	54	91	148	257
GAB36	1,006	45	61	83	114	50	83	144	249
GAB64	12,087	19	27	39	57	27	51	103	195
GAR09	6,906	24	34	48	67	34	61	112	217
GAS14	4,386	27	37	54	78	36	66	124	227
GDL44	1,799	36	48	70	97	45	78	143	245
GEN82	4,696	27	35	53	72	35	63	119	231
GER88	16,854	17	25	38	51	25	49	95	182
GIO40	4,381	26	38	55	76	37	68	121	224

GIR73	67,720	11	15	22	32	17	35	72	151
GLC39	12,015	21	29	40	60	28	53	107	190
GON57	3,072	31	41	61	80	40	72	130	238
GOU03	2,573	33	47	62	95	40	70	130	236
GOU22	9,884	22	30	41	59	31	54	105	199
GOU82	7,482	24	33	47	69	32	61	107	195
GRA15	25,625	15	21	33	47	23	45	86	174
GRA42	14,143	18	27	38	55	27	51	97	193
GRA85	5,420	26	38	51	75	34	63	117	206
GRO21b	9,183	21	31	45	63	31	55	106	201
GUE22	17,497	18	25	36	48	26	49	95	184
HAG40	5,299	25	36	51	73	34	66	115	220
HAR22	1,983	34	48	66	92	43	76	135	241
HAU19	20,050	17	25	34	49	25	46	92	174
ILA39	10,868	22	29	41	57	28	55	99	199
ISS07	98,163	11	14	21	30	14	30	68	145
JUG22	4,169	27	37	48	64	37	68	119	221
LAC21	0,995	45	57	85	116	50	83	155	257
LAC33	3,269	30	40	61	87	41	73	126	235
LAD16	2,320	33	45	61	82	45	77	142	250
LAF38	24,669	16	22	32	44	23	46	84	181
LAN23	1,037	44	58	83	117	51	84	149	260
LAN66	40,814	14	19	28	39	19	41	79	161
LAO81	16,336	18	26	36	52	26	49	91	186
LAR31	5,436	26	34	52	68	36	65	114	220
LAS15	10,717	20	29	42	60	29	54	103	197
LAT10	8,768	22	32	44	63	31	57	108	202
LAU38	29,240	16	22	32	43	21	42	90	171
LAV16	8,246	22	32	47	65	30	55	109	199
LAV23	9,580	22	30	42	60	30	59	105	210
LAV43	19,888	18	24	35	50	24	47	97	185
LDC21	3,237	31	44	61	81	40	71	124	226
LDC25	8,596	23	31	41	59	31	56	110	193
LDC51	7,775	24	33	48	66	30	56	104	201
LDC63	27,090	16	22	31	44	21	42	82	173
LEJ85	3,490	31	42	60	83	39	70	121	210
LEM74	154,213	9	13	18	27	13	29	62	133
LEM85	6,361	24	35	46	71	33	61	110	208
LEO40	0,778	48	69	96	134	52	88	157	266
LES24	8,326	23	30	43	62	30	55	102	203
LGA36	0,934	42	59	79	115	48	90	153	256
LGM27	0,288	64	94	130	186	56	97	165	270
LGM39	11,511	21	28	40	56	28	50	104	202
LIE52	5,842	24	35	50	72	34	61	116	214
LKW68	16,850	18	25	37	53	25	47	89	179

LLI66	4,374	28	38	56	79	36	66	129	215
LNC04	12,900	20	27	40	56	29	51	103	194
LON88	13,271	19	28	38	53	26	51	99	200
LOU37	1,021	45	59	87	112	48	88	150	249
LOU64	12,878	20	28	40	55	27	55	104	200
LPC38	6,624	24	35	49	65	32	60	110	209
LRO39	7,681	24	34	46	65	31	56	110	207
LSF43	0,987	44	64	85	123	50	87	153	273
LSG81	18,189	17	24	33	51	24	47	92	186
LUN32	11,229	20	30	42	60	29	57	105	197
MAD55	3,345	31	41	58	84	39	70	128	217
MAR35	1,012	42	58	82	111	50	84	148	264
MAT66	9,376	22	30	43	63	29	56	104	199
MAU12	20,359	17	25	34	46	24	46	92	183
MIC68	9,793	22	30	44	62	28	53	103	199
MIE32	5,572	25	36	51	66	36	62	118	220
MON38	53,331	13	18	23	35	17	36	78	160
MON63	7,822	22	33	46	65	33	62	111	203
MON74	12,074	21	28	38	56	27	48	99	193
MOU52	9,100	21	32	44	60	30	58	104	205
MUS35	1,336	41	56	78	107	47	83	149	252
NAG09	52,624	12	18	25	37	18	37	76	161
NAN01	30,300	15	21	31	45	22	42	91	172
NAU48	18,118	18	26	35	51	23	47	92	188
NAU48bis	18,118	18	25	36	48	24	46	95	187
NAU48ter	18,118	17	25	36	52	25	46	91	187
NDC38	20,457	17	24	33	50	24	44	91	177
NEG06	12,900	19	29	39	54	27	52	99	194
NOY56	1,713	38	52	75	102	46	79	138	249
ORE65	16,142	18	25	39	53	25	48	97	186
ORX40	0,571	51	76	102	147	56	93	157	266
OSP2A	7,219	23	34	46	68	33	60	110	215
OUE35	1,929	33	49	70	97	44	75	138	234
PAI35	1,713	35	51	75	95	46	78	137	242
PAL07	20,725	17	25	34	47	25	47	94	177
PAL38	27,410	16	22	30	45	22	43	87	172
PAN21	6,860	24	35	47	71	30	59	110	216
PAN58	15,270	18	26	36	53	27	49	95	189
PAR12	15,575	19	26	36	54	25	51	97	181
PAR40	7,559	23	33	46	67	30	59	110	200
PAR54	2,152	35	49	66	96	46	79	138	238
PAV63	50,832	12	17	25	36	18	36	78	159
PDF44	1,586	37	53	72	102	47	75	148	247
PDH35	2,865	31	44	61	88	43	74	131	229
PET38	10,775	21	29	40	58	28	55	103	196

PIE36	1,003	44	56	82	116	52	83	148	256
PIN49	2,645	32	46	65	93	42	71	127	237
PIR03	6,394	24	34	51	70	33	61	114	212
POI44	0,980	44	59	85	112	47	86	149	252
PON21	8,967	23	32	44	66	29	55	109	209
PON22	2,547	34	46	65	94	42	78	134	231
POU31	6,529	23	33	50	69	33	60	111	209
POU43	6,908	25	33	47	69	31	59	109	215
PRA03	12,918	19	27	41	55	27	51	100	195
PRA33	1,075	41	58	81	117	49	86	145	246
PRA66	4,975	28	37	52	74	37	64	119	217
PRO44	2,009	34	49	70	91	45	76	129	253
PUI18	3,261	31	42	58	79	39	72	129	233
PUY48	24,216	16	22	33	48	22	45	87	177
PUY66	11,121	21	30	40	58	28	53	105	202
QUE63	12,730	20	28	40	58	27	51	102	192
QUI04	11,676	21	29	40	55	29	55	105	201
RAB61	7,164	24	32	48	68	33	59	110	205
RAM23	1,290	41	56	77	112	49	85	142	238
RAV34	11,144	21	30	41	58	29	56	101	195
RBO63	45,225	13	18	27	38	19	39	76	157
RCB01	8,418	23	31	46	63	32	57	104	201
RCE35	7,283	25	35	48	65	33	61	108	205
RCM01	6,481	25	34	48	70	32	61	112	214
RCS70	12,769	20	29	40	56	27	52	107	198
RDC23	8,945	22	32	46	62	31	57	109	200
RDV35	5,596	26	34	51	71	34	63	117	210
REA13	1,628	37	52	71	101	47	78	143	242
REM25	9,878	21	29	43	59	29	54	103	194
RFB63	19,608	17	24	35	51	24	47	91	169
RGM38	59,665	12	16	25	36	17	37	73	160
RIN53	2,249	32	46	64	88	44	77	132	233
RKU22	3,911	27	40	56	76	38	70	121	214
RLB11	9,001	23	32	44	64	29	56	106	206
RMC73	51,132	12	18	25	37	18	37	77	161
RMN29	2,988	30	44	59	86	37	69	131	234
RMP85	5,166	26	36	51	73	36	65	120	224
RMR49	4,032	28	40	57	81	37	73	126	219
ROC85	4,236	27	37	54	74	35	62	117	219
ROP22	5,934	25	34	52	73	34	64	113	223
ROS73	67,116	12	17	25	34	17	34	74	148
ROU21	1,003	44	62	81	124	50	88	147	257
RPR71	8,809	22	31	44	60	29	57	102	201
RST35	8,444	22	33	46	66	31	59	112	199
RSV34	5,655	25	37	51	68	35	61	120	227

RTN71	6,206	26	34	50	69	34	59	113	211
RTV71	3,976	27	40	58	80	36	67	130	228
RVH22	7,123	24	34	48	66	34	61	113	202
SAL34	14,146	19	27	36	55	26	48	94	188
SAU36	0,947	43	58	81	111	46	81	145	262
SAU38	34,149	14	21	30	41	20	42	82	172
SCA83	16,321	18	26	36	51	24	49	95	176
SCR04	34,883	14	20	29	40	21	40	82	166
SEC15	24,461	16	23	32	46	22	46	86	176
SEI10	9,572	22	31	44	63	29	56	106	204
SER63	9,915	21	31	43	62	28	56	100	203
SET58	6,596	24	34	49	66	34	59	113	212
SFP53	4,211	28	38	53	75	37	70	125	230
SID18	7,474	24	34	48	67	31	57	107	217
SIL85	7,520	23	32	48	64	32	58	111	210
SMI29	3,001	31	43	59	86	39	72	131	227
SOR71	5,358	26	37	51	73	33	65	117	225
SOU09	34,606	14	20	28	39	21	39	82	162
SOU40	0,596	51	69	97	128	53	90	149	260
SPA87	6,976	23	35	46	66	33	63	111	200
SPC38	26,119	15	22	31	44	22	44	87	182
SPO04	46,262	13	19	26	36	19	38	78	163
SPO25	23,528	16	23	32	44	24	47	90	184
STO57	3,038	31	41	59	81	40	73	130	229
SUD41	1,008	42	61	90	122	48	83	146	256
SYL01	13,253	20	28	38	55	26	47	96	189
TAI40	3,583	29	41	60	81	39	72	124	218
TAZ63	38,950	13	20	28	37	19	40	82	174
TOL2A	48,066	13	18	27	39	18	36	75	164
TOR82	4,232	28	39	55	75	36	66	125	228
TOU79	11,055	21	30	42	57	28	52	103	201
TRE19	8,731	22	31	45	61	30	56	107	204
TRE35	1,863	34	51	72	104	44	75	135	253
TRI19	7,668	24	33	47	64	32	58	106	212
TSC32	5,837	26	36	52	70	35	61	116	222
TUI45	3,632	29	40	55	82	38	67	132	232
TYX63	1,405	41	56	76	108	48	83	143	269
UBY32	3,822	28	39	57	79	37	64	122	226
VAL38	20,210	18	23	33	47	24	46	95	189
VAL39	16,943	18	26	37	52	25	48	96	181
VAL45	2,017	36	49	70	99	44	77	137	243
VAS87	11,998	19	29	39	58	27	54	101	190
VAU58	3,237	30	42	60	82	39	72	130	229
VEN06	8,600	22	32	45	61	31	56	109	206
VER38	23,761	16	23	32	44	23	44	91	177

VER83	19,822	16	26	34	49	24	46	95	183
VEZ50	11,701	20	29	41	58	28	53	101	203
VFO08	3,739	27	38	54	75	38	67	128	220
VIG36	0,790	49	67	93	134	53	91	160	270
VIL12	6,292	25	34	48	67	32	62	116	215
VIL35	4,136	28	40	57	79	39	67	120	227
VIL42	26,888	16	23	30	48	22	44	84	169
VIL48	21,933	17	23	33	47	24	45	88	177
VIL52	5,497	25	37	51	79	34	64	112	220
VIL66	9,651	20	32	44	62	31	55	102	202
VIN66	15,958	18	26	38	52	27	50	93	189
VIO44	3,830	29	39	56	80	38	66	125	225
VOU39	38,035	14	20	27	39	20	40	81	164
VPR88	18,346	17	25	35	51	25	47	95	182
YRI40	5,160	26	38	51	72	35	65	122	214
AME54	0,693	50	69	95	142	53	91	152	265
ANS69	7,000	23	35	49	67	33	62	104	201
ARD62	1,288	41	54	75	100	48	83	147	243
ARJ40	16,000	18	27	37	53	25	50	91	188
ARM77	1,000	44	58	81	113	51	86	145	248
AUD62	1,736	36	51	70	98	44	74	142	246
BEA53	1,001	43	60	83	119	50	82	149	250
BGP77	5,000	25	38	52	74	36	66	119	224
BIR01	0,645	50	71	98	135	55	91	157	267
BIS55	1,621	37	53	72	100	45	79	140	240
BMM78	7,901	23	33	46	65	32	61	108	205
BOR33	6,450	24	34	47	69	33	59	115	212
BOU27	6,220	25	35	48	71	33	61	113	215
BOU33	7,740	23	33	46	65	31	59	112	205
CAN77c	3,000	30	41	59	84	40	71	130	238
CER95	3,000	30	42	59	82	41	72	125	235
CHA01	0,989	42	60	83	119	52	87	145	267
CHE18	0,999	44	58	82	116	49	83	145	260
DRA69	3,010	31	42	59	79	40	71	131	233
ECL28	3,088	30	43	60	89	43	72	131	234
EDC35	1,045	44	61	89	127	50	81	148	251
EGM55	1,001	43	60	87	118	48	88	150	256
EGR51	1,456	39	54	75	108	50	81	153	249
ESQ78	2,500	32	46	63	91	41	74	132	230
FRA25	1,290	40	57	78	113	48	82	142	263
GBB43	0,986	44	61	85	124	50	85	150	258
GEB69	2,841	32	42	62	79	40	70	127	229
GOR59	0,921	44	60	80	109	54	82	140	246
HER51c	0,796	47	64	90	130	52	83	153	260
HOR52	0,807	46	66	92	127	50	92	148	256

JAB77	4,889	27	36	50	68	35	63	119	222
JOU11	2,627	33	44	61	88	43	73	127	229
LAC55	2,250	35	47	64	91	44	76	132	242
LER27a	12,272	21	28	40	57	28	51	102	198
LET57	1,746	37	50	69	96	46	81	136	245
LIN55	2,070	36	49	66	96	44	78	142	242
MAL90	1,201	42	58	78	108	46	87	154	253
MAR21	0,983	43	61	87	118	50	89	147	259
MEB01	4,000	28	40	56	77	38	68	125	218
MON71	5,591	25	35	49	71	33	62	114	216
MOU01	1,075	43	59	86	116	48	83	145	255
MUN67	5,375	26	36	52	76	33	61	118	220
PPE14	3,025	31	43	61	89	40	70	120	226
RGL69	1,591	35	51	72	101	46	81	135	250
RIV35	2,824	32	44	63	85	40	71	129	240
SDB01	8,000	21	32	44	68	31	60	107	201
TOU27	3,105	31	42	60	86	41	72	132	224
TRA02	2,263	34	46	68	90	42	78	126	240
VAR72	1,037	43	57	85	115	49	84	152	257
VEN27	6,126	25	35	51	72	34	62	113	208
VIG59	1,620	36	53	73	105	46	81	139	241
VSM77	4,000	28	38	55	81	37	68	123	221
VVE70	1,978	35	47	67	87	42	79	131	246

6.2. Seuils physico-chimiques pour l'ammonium

 Ammonium (NH₄⁺), valeur maximale (µg NH₄⁺.L⁻¹)

Code Lac	Profondeur moyenne théorique	MBA					MCS				
		TB	B	Mo	Me	Ma	TB	B	Mo	Me	Ma
ABB39	7,119	134	191	237	335	135	212	331	498		
AIG15	31,598	92	119	159	202	98	165	251	423		
AIG73	32,188	94	113	175	225	96	161	264	412		
AILO2	2,088	194	229	326	428	166	236	361	556		
ALB85	3,099	158	209	271	401	156	233	377	546		
ALE2B	22,647	100	131	169	245	109	168	273	451		
ALL01	11,038	119	153	201	295	119	180	300	467		
ALL04	18,500	101	137	196	258	109	175	281	450		
ALZ81	9,673	125	159	213	321	140	200	305	482		
AMA10	4,385	163	199	265	336	144	207	354	556		
ANG85	4,074	156	195	253	360	150	224	347	515		
ANN74	41,751	88	115	164	206	92	150	246	425		
ANT74	6,915	134	173	229	342	134	203	318	469		
APR85	2,378	190	238	334	400	167	264	362	529		
ARG19	5,801	138	185	247	312	151	209	329	502		
ART64	41,057	86	112	144	202	90	148	244	417		
ARZ35	8,306	125	168	216	324	137	189	319	499		
AST32	6,188	144	175	245	324	138	205	323	485		
AUL13	3,816	170	209	251	317	153	210	335	533		
AUM44	2,012	179	239	301	390	163	246	362	571		
AUR40	2,000	180	235	323	406	158	247	369	530		
AVE34	28,202	99	127	170	209	99	157	269	432		
AYD63	7,462	142	180	231	305	130	200	331	505		
AYG64	5,704	138	188	268	314	144	213	320	533		
BAG12	8,695	137	180	218	283	122	200	320	472		
BAI08	4,806	150	188	241	332	142	231	330	472		
BAI36	1,004	230	289	377	527	189	258	400	573		
BAR01	8,000	128	168	243	331	134	205	317	494		
BAR32	4,149	153	201	257	356	134	215	355	503		
BAY58	2,791	162	206	280	356	157	226	350	508		
BCL12	18,907	102	148	175	237	110	177	285	440		
BDB40	10,597	128	170	206	275	127	200	284	464		
BEA36	0,990	232	275	364	482	189	270	404	589		
BEL36	1,003	244	301	378	490	180	266	402	573		
BEZ41	0,977	220	314	363	504	191	271	379	583		
BIG36	1,002	208	282	341	447	192	287	396	602		
BIM13	11,798	122	156	214	266	118	182	294	469		
BIS40	0,913	236	288	422	500	170	275	371	570		
BIS73	34,629	96	119	161	210	100	153	250	405		
BLA40	0,600	253	331	454	555	186	290	377	605		
BLC19	13,609	123	149	212	284	115	193	304	453		

BLE65	22,367	105	126	188	225	109	165	282	442
BLI36	0,671	269	336	396	527	183	267	408	576
BLI44	1,493	211	265	369	429	174	255	391	556
BMC16	10,568	132	167	205	280	121	198	308	481
BMS40	2,834	165	215	280	382	164	243	359	515
BOR63	1,308	199	303	353	463	174	256	375	552
BOS22	5,969	151	172	234	350	134	207	339	496
BOU35	2,876	166	220	318	371	151	234	323	527
BOU43	16,754	113	151	186	249	111	179	292	447
BOU63	2,995	166	212	275	392	155	229	340	516
BOU66	11,506	125	165	219	269	120	190	297	483
BOU73	82,348	70	97	137	164	79	136	221	401
BOU88	8,061	131	172	223	296	124	206	293	499
BOU89	4,984	145	195	253	320	138	222	333	475
BRA47	5,593	138	183	255	299	133	217	343	511
BSA58	3,466	156	201	297	351	149	226	354	506
BSF31	10,329	119	162	218	274	120	198	290	476
BSJ32	4,103	145	212	248	340	142	227	326	546
BUJ87	8,597	132	194	227	321	124	196	322	487
BUL85	8,441	129	174	228	275	134	200	308	483
CAE35	0,400	266	368	485	646	201	290	415	583
CAL2B	21,703	98	136	189	230	107	175	273	423
CAN32	3,028	156	220	302	339	162	221	365	519
CAR35	0,796	247	296	389	514	193	273	395	569
CAR66	15,028	116	147	191	241	115	178	296	466
CAR83	8,633	132	176	225	292	133	204	311	472
CAS04	30,513	96	123	162	213	101	163	259	433
CAS63	2,027	188	243	302	403	167	231	368	540
CAU19	3,408	167	225	281	347	142	230	354	524
CAZ23	1,986	186	251	304	463	176	248	392	527
CAZ40	10,328	122	156	226	294	122	190	299	449
CEB79	7,445	133	170	226	307	132	205	314	488
CER21	5,875	137	180	246	315	135	204	321	496
CHA21	7,799	130	181	221	299	131	198	320	473
CHA23	8,353	134	184	228	293	127	192	314	490
CHA25	23,842	100	132	179	228	113	171	282	438
CHA35	2,447	174	235	277	357	161	241	388	536
CHA38	38,485	86	117	166	207	87	151	249	434
CHA39	22,061	105	131	174	259	106	174	263	447
CHA48	4,378	163	197	246	332	142	211	345	487
CHA52	5,970	141	178	242	315	136	203	320	505
CHA58	14,301	121	158	194	266	116	190	314	475
CHA63	3,037	175	221	264	366	159	216	340	500
CHA86	2,203	172	230	302	373	157	234	361	546
CHA87	3,622	156	207	278	355	163	220	358	532

CHE38	10,474	126	173	205	302	122	200	290	490
CHE73	95,221	70	87	122	156	79	134	233	386
CHO04	23,594	99	130	178	225	107	167	260	454
COD2B	13,796	116	155	216	260	108	182	312	464
COI39	11,613	116	150	207	264	115	197	304	455
COM23	12,452	113	162	197	288	125	190	295	462
COR22	4,442	163	200	270	333	141	217	344	504
COR41	0,365	281	360	510	651	215	295	421	636
CRA18	1,771	195	263	329	434	171	257	370	560
CRE89	11,076	126	171	208	280	120	198	311	462
DEV07	4,821	143	203	255	338	151	219	349	541
DRE29	7,548	140	169	228	329	138	202	328	491
DUC56	2,359	176	233	297	394	159	232	363	557
ECH33	3,648	169	211	277	334	147	223	362	541
EDC23	2,688	170	220	309	371	156	232	370	519
EDC63	4,325	143	185	242	321	144	229	349	533
EDG36	1,003	209	278	381	477	168	264	390	610
EGR45	4,355	160	191	273	339	142	218	334	566
EGU36	20,673	101	132	171	229	108	176	290	463
ENC15	24,613	99	134	185	231	101	156	272	441
ENT13	4,800	153	192	252	356	142	213	331	486
ENT25	3,348	168	208	269	354	152	243	354	530
EPT35	2,397	182	214	263	338	154	245	353	524
ESP04	30,796	88	126	163	230	98	161	272	422
EST11	9,841	123	159	223	304	127	200	311	486
ETI39	4,600	153	191	258	364	150	215	349	528
ETR23	8,577	136	163	217	306	130	210	304	475
EVJ59	3,353	161	206	288	351	147	245	343	518
EYC05	9,374	133	181	222	276	126	200	312	499
FEY19	4,325	154	191	250	338	136	213	328	528
FIG2B	8,161	127	174	243	291	126	203	316	475
FIL09	9,394	125	165	217	281	125	191	307	457
FON36	1,027	218	279	390	488	175	280	380	561
FOR35	0,864	232	294	373	510	186	265	403	612
GAB36	1,006	213	275	356	460	173	258	375	543
GAB64	12,087	119	154	191	278	119	185	289	476
GAR09	6,906	142	178	241	336	134	204	334	513
GAS14	4,386	159	192	270	337	138	217	327	503
GDL44	1,799	193	263	320	416	171	254	364	566
GEN82	4,696	161	199	259	320	146	224	338	500
GER88	16,854	108	156	184	258	109	169	272	453
GIO40	4,381	148	198	279	340	142	219	361	531
GIR73	67,720	75	98	128	180	82	147	236	392
GLC39	12,015	120	154	195	286	116	194	300	471
GON57	3,072	165	213	280	354	155	244	346	557

GOU03	2,573	171	221	292	396	155	236	353	516
GOU22	9,884	121	158	205	296	130	194	295	477
GOU82	7,482	138	178	231	307	129	206	314	504
GRA15	25,625	99	121	182	235	109	165	273	439
GRA42	14,143	113	144	209	269	115	179	292	486
GRA85	5,420	151	193	245	318	140	227	322	496
GRO21b	9,183	138	174	214	331	138	189	313	465
GUE22	17,497	106	153	186	260	115	179	279	489
HAG40	5,299	139	185	247	326	139	211	330	488
HAR22	1,983	200	226	301	378	171	245	367	567
HAU19	20,050	101	140	177	255	102	173	284	441
ILA39	10,868	132	167	224	266	124	178	307	481
ISS07	98,163	69	92	131	163	77	127	237	373
JUG22	4,169	159	186	231	329	151	229	354	515
LAC21	0,995	232	284	357	512	176	266	381	587
LAC33	3,269	172	210	278	359	152	237	356	546
LAD16	2,320	190	239	295	351	169	250	376	534
LAF38	24,669	101	139	184	224	103	168	269	440
LAN23	1,037	202	276	356	489	198	273	395	610
LAN66	40,814	89	102	151	195	90	144	248	426
LAO81	16,336	109	141	180	248	119	168	276	464
LAR31	5,436	153	188	243	309	138	215	334	522
LAS15	10,717	116	170	205	276	124	205	302	491
LAT10	8,768	128	167	212	303	127	202	312	487
LAU38	29,240	97	133	156	211	100	149	276	428
LAV16	8,246	133	180	224	317	127	194	297	500
LAV23	9,580	127	163	212	278	123	191	319	488
LAV43	19,888	108	134	192	229	109	177	283	443
LDC21	3,237	167	211	286	370	152	229	367	530
LDC25	8,596	132	159	205	268	123	202	309	489
LDC51	7,775	141	176	214	331	128	196	302	471
LDC63	27,090	91	126	172	231	97	157	240	463
LEJ85	3,490	161	224	275	365	150	232	323	548
LEM74	154,213	65	85	105	145	68	122	209	365
LEM85	6,361	153	178	241	308	134	211	314	489
LEO40	0,778	231	309	433	553	187	282	396	567
LES24	8,326	121	162	216	279	129	197	315	468
LGA36	0,934	221	276	358	445	182	272	385	565
LGM27	0,288	314	400	519	742	192	291	407	611
LGM39	11,511	118	158	208	257	125	196	299	507
LIE52	5,842	141	185	244	304	143	217	333	538
LKW68	16,850	103	151	202	239	116	181	293	454
LLI66	4,374	159	212	280	338	144	217	344	516
LNC04	12,900	114	151	201	264	123	188	306	499
LON88	13,271	114	161	198	258	111	182	292	458

LOU37	1,021	214	273	362	476	181	256	371	555
LOU64	12,878	119	149	205	266	113	193	281	486
LPC38	6,624	135	175	228	339	135	207	324	493
LRO39	7,681	129	182	226	316	128	195	313	492
LSF43	0,987	237	314	374	515	180	268	376	584
LSG81	18,189	107	139	182	241	111	164	278	460
LUN32	11,229	130	152	205	279	126	191	315	489
MAD55	3,345	159	210	275	356	160	219	347	526
MAR35	1,012	211	290	379	453	182	248	385	592
MAT66	9,376	125	167	242	279	125	198	321	503
MAU12	20,359	101	139	174	242	109	176	282	430
MIC68	9,793	119	161	213	284	117	183	301	478
MIE32	5,572	135	183	235	300	141	204	323	528
MON38	53,331	79	106	149	176	89	145	242	404
MON63	7,822	124	169	220	298	138	218	331	493
MON74	12,074	114	149	207	274	117	179	287	479
MOU52	9,100	128	169	229	284	120	197	311	491
MUS35	1,336	217	277	348	423	169	253	373	557
NAG09	52,624	84	115	139	179	83	138	254	401
NAN01	30,300	93	131	170	223	99	169	269	417
NAU48	18,118	108	145	191	263	115	179	277	444
NAU48bis	18,118	104	136	184	257	109	177	301	453
NAU48ter	18,118	107	142	187	238	117	178	286	441
NDC38	20,457	102	135	175	238	102	173	271	442
NEG06	12,900	121	151	216	271	118	179	299	471
NOY56	1,713	195	272	315	447	178	258	370	592
ORE65	16,142	109	148	199	266	114	175	290	458
ORX40	0,571	257	323	429	548	192	304	416	582
OSP2A	7,219	134	169	224	295	139	217	320	497
OUE35	1,929	180	259	307	442	165	244	349	549
PAI35	1,713	186	238	347	422	170	239	363	525
PAL07	20,725	110	131	176	231	114	172	282	439
PAL38	27,410	97	132	166	218	99	165	257	413
PAN21	6,860	136	200	239	307	133	201	314	540
PAN58	15,270	111	143	203	258	115	179	291	487
PAR12	15,575	103	154	198	247	108	177	271	445
PAR40	7,559	135	174	235	298	133	207	311	475
PAR54	2,152	179	251	304	437	152	246	363	541
PAV63	50,832	81	110	137	198	90	152	239	395
PDF44	1,586	193	246	325	407	177	255	378	528
PDH35	2,865	168	229	296	414	164	227	352	528
PET38	10,775	121	154	227	267	117	191	313	499
PIE36	1,003	214	270	340	476	187	267	383	573
PIN49	2,645	166	237	290	401	168	234	359	540
PIRO3	6,394	139	178	233	334	137	204	313	486

POI44	0,980	218	310	369	467	177	269	370	585
PON21	8,967	125	171	225	289	124	198	308	510
PON22	2,547	171	223	292	384	160	234	362	535
POU31	6,529	143	185	230	314	130	216	315	500
POU43	6,908	131	184	226	317	128	200	324	498
PRA03	12,918	120	162	194	270	122	190	293	489
PRA33	1,075	213	283	368	441	176	265	409	567
PRA66	4,975	154	188	253	321	142	203	329	468
PRO44	2,009	175	233	323	405	176	256	345	566
PUI18	3,261	159	227	276	354	145	232	353	557
PUY48	24,216	104	131	169	226	111	174	260	446
PUY66	11,121	120	159	206	280	122	188	301	467
QUE63	12,730	113	147	204	260	121	184	278	465
QUI04	11,676	126	152	213	261	119	185	312	484
RAB61	7,164	134	169	251	321	137	208	333	484
RAM23	1,290	208	267	347	459	170	265	371	588
RAV34	11,144	119	160	203	290	123	181	304	478
RBO63	45,225	86	111	140	188	93	144	255	408
RCB01	8,418	135	171	241	280	124	198	321	487
RCE35	7,283	135	182	232	309	144	209	313	491
RCM01	6,481	132	184	252	350	131	214	325	514
RCS70	12,769	120	155	195	264	116	196	296	491
RDC23	8,945	121	165	216	315	132	197	305	485
RDV35	5,596	145	193	251	311	144	206	338	502
REA13	1,628	190	275	327	425	178	242	381	539
REM25	9,878	124	175	211	272	125	202	303	489
RFB63	19,608	106	142	177	236	114	174	290	442
RGM38	59,665	79	102	141	189	86	143	227	413
RIN53	2,249	173	240	284	394	161	249	362	555
RKU22	3,911	160	219	282	339	145	217	341	514
RLB11	9,001	129	181	217	314	125	198	302	470
RMC73	51,132	78	111	140	186	91	151	240	394
RMN29	2,988	165	237	283	370	154	221	342	517
RMP85	5,166	143	206	262	351	149	216	326	504
RMR49	4,032	166	199	259	348	141	224	333	539
ROC85	4,236	157	192	261	370	137	229	335	510
ROP22	5,934	144	189	243	313	148	208	317	540
ROS73	67,116	75	104	139	196	81	139	253	389
ROU21	1,003	228	280	355	488	192	260	401	592
RPR71	8,809	125	163	207	287	135	197	309	458
RST35	8,444	139	170	225	287	135	200	292	473
RSV34	5,655	150	186	237	306	138	214	313	504
RTN71	6,206	147	188	243	335	135	204	322	495
RTV71	3,976	158	207	258	369	147	241	327	490
RVH22	7,123	130	187	250	314	137	204	330	483

SAL34	14,146	122	152	208	251	115	191	280	445
SAU36	0,947	213	276	367	459	177	264	406	584
SAU38	34,149	94	131	157	210	100	159	261	442
SCA83	16,321	113	144	195	255	107	173	281	443
SCR04	34,883	94	118	164	201	96	161	258	407
SEC15	24,461	99	126	170	238	104	168	267	433
SEI10	9,572	126	157	227	294	124	194	295	481
SER63	9,915	123	164	231	278	125	184	299	470
SET58	6,596	140	178	233	306	144	212	326	498
SFP53	4,211	146	212	267	315	145	227	348	526
SID18	7,474	129	181	236	325	131	204	308	509
SIL85	7,520	139	168	240	294	133	204	315	496
SMI29	3,001	170	231	298	357	158	239	352	535
SOR71	5,358	148	189	264	322	140	211	342	539
SOU09	34,606	96	114	167	202	97	149	268	427
SOU40	0,596	267	307	417	522	187	275	386	571
SPA87	6,976	135	176	224	299	132	216	340	493
SPC38	26,119	100	130	167	216	102	171	286	426
SPO04	46,262	85	107	148	188	94	150	262	413
SPO25	23,528	102	129	165	237	107	166	283	458
STO57	3,038	171	205	268	352	156	245	330	511
SUD41	1,008	235	305	373	497	181	270	395	562
SYL01	13,253	111	148	203	256	113	184	279	442
TAI40	3,583	169	209	265	361	152	217	349	533
TAZ63	38,950	87	113	157	208	91	154	259	404
TOL2A	48,066	82	115	146	197	87	143	255	402
TOR82	4,232	158	206	270	330	144	220	332	520
TOU79	11,055	120	166	207	294	124	180	310	459
TRE19	8,731	133	167	226	317	127	201	316	484
TRE35	1,863	189	237	328	441	169	242	358	542
TRI19	7,668	135	168	225	291	138	207	322	490
TSC32	5,837	136	193	238	332	147	208	318	512
TUI45	3,632	159	219	268	358	152	234	335	520
TYX63	1,405	194	254	370	455	180	257	376	553
UBY32	3,822	157	214	276	340	146	216	340	515
VAL38	20,210	103	133	191	240	107	173	281	455
VAL39	16,943	107	139	190	242	106	170	291	464
VAL45	2,017	169	265	313	414	169	248	365	546
VAS87	11,998	117	156	208	260	117	197	298	486
VAU58	3,237	161	210	273	355	159	234	337	517
VEN06	8,600	130	172	210	332	131	206	312	461
VER38	23,761	99	138	181	224	100	158	270	434
VER83	19,822	105	138	182	239	111	174	266	449
VEZ50	11,701	114	158	187	266	120	187	300	466
VFO08	3,739	156	198	263	364	147	226	329	508

VIG36	0,790	227	343	411	541	191	287	393	585
VIL12	6,292	138	192	241	297	133	198	318	503
VIL35	4,136	157	199	290	332	152	223	335	534
VIL42	26,888	102	121	177	217	110	167	270	454
VIL48	21,933	105	131	175	248	105	173	280	479
VIL52	5,497	150	195	244	362	143	207	348	479
VIL66	9,651	121	168	225	274	120	195	318	475
VIN66	15,958	112	141	194	247	113	182	277	472
VIO44	3,830	156	216	252	339	141	223	333	531
VOU39	38,035	91	116	168	201	97	147	249	405
VPR88	18,346	116	142	198	248	107	176	285	466
YRI40	5,160	151	189	244	315	149	218	345	506
AME54	0,693	238	310	433	567	204	271	397	605
ANS69	7,000	142	177	232	304	130	204	322	502
ARD62	1,288	199	249	319	431	178	259	352	572
ARJ40	16,000	109	153	186	242	111	184	275	457
ARM77	1,000	210	298	362	453	178	274	403	599
AUD62	1,736	200	255	309	403	167	263	370	540
BEA53	1,001	221	296	404	516	172	272	392	586
BGP77	5,000	146	185	244	330	144	212	337	498
BIR01	0,645	261	305	427	546	186	281	395	573
BIS55	1,621	190	251	342	410	167	247	377	548
BMM78	7,901	121	185	227	302	134	209	301	488
BOR33	6,450	144	188	233	303	130	201	316	502
BOU27	6,220	138	179	236	320	128	225	330	488
BOU33	7,740	132	174	248	315	127	209	303	492
CAN77c	3,000	170	205	284	367	156	227	333	560
CER95	3,000	159	209	274	361	152	226	354	537
CHA01	0,989	232	274	358	497	184	262	392	583
CHE18	0,999	243	275	365	478	184	261	388	560
DRA69	3,010	171	203	286	355	148	237	338	521
ECL28	3,088	158	226	281	372	152	245	347	531
EDC35	1,045	205	280	365	476	194	259	409	554
EGM55	1,001	217	285	406	485	181	259	386	558
EGR51	1,456	193	264	350	446	165	266	392	592
ESQ78	2,500	184	222	285	372	162	247	379	553
FRA25	1,290	202	260	351	449	173	259	398	573
GBB43	0,986	230	282	375	485	184	258	403	554
GEB69	2,841	170	214	281	346	155	241	354	517
GOR59	0,921	218	274	352	467	186	268	397	581
HER51c	0,796	238	303	416	532	182	265	384	584
HOR52	0,807	227	292	380	485	173	277	402	571
JAB77	4,889	153	188	241	320	142	228	334	497
JOU11	2,627	170	227	283	361	153	228	353	555
LAC55	2,250	173	247	287	386	169	226	357	556

LER27a	12,272	117	148	201	262	123	191	297	481
LET57	1,746	186	249	309	417	174	248	350	533
LIN55	2,070	182	239	301	398	169	252	368	550
MAL90	1,201	206	275	336	447	183	267	395	601
MAR21	0,983	229	303	371	497	194	256	406	612
MEB01	4,000	152	197	259	379	153	224	353	514
MON71	5,591	137	190	235	318	145	220	331	498
MOU01	1,075	208	294	357	470	186	262	371	545
MUN67	5,375	141	204	246	324	138	225	311	528
PPE14	3,025	162	216	278	387	148	225	347	505
RGL69	1,591	185	246	336	471	172	258	389	556
RIV35	2,824	173	219	326	364	162	238	356	517
SDB01	8,000	125	181	224	305	133	202	311	483
TOU27	3,105	162	231	282	354	152	222	342	541
TRA02	2,263	175	236	305	370	152	252	347	551
VAR72	1,037	231	268	353	454	173	252	375	565
VEN27	6,126	138	179	261	322	134	212	302	486
VIG59	1,620	189	274	347	433	167	262	366	569
VSM77	4,000	149	198	258	339	147	225	357	512
VVE70	1,978	184	234	287	378	169	250	373	532

6.3. Seuils physico-chimiques pour la transparence

Transparence de Secchi, valeur médiane (m)

Code Lac	Profondeur moyenne théorique	MBA					MCS				
		TB	B	Mo	Me	Ma	TB	B	Mo	Me	Ma
ABB39	7,119	2,14	1,47	1,15	0,82	1,67	0,97	0,59	0,34		
AIG15	31,598	3,19	2,28	1,73	1,29	2,40	1,33	0,69	0,40		
AIG73	32,188	3,18	2,28	1,70	1,23	2,44	1,32	0,72	0,40		
AIL02	2,088	1,46	1,12	0,81	0,58	1,30	0,79	0,49	0,30		
ALB85	3,099	1,74	1,26	0,93	0,69	1,36	0,84	0,52	0,31		
ALE2B	22,647	2,86	2,14	1,57	1,12	2,12	1,20	0,70	0,39		
ALL01	11,038	2,31	1,65	1,25	0,96	1,92	1,07	0,61	0,37		
ALL04	18,500	2,63	2,03	1,48	1,05	2,24	1,22	0,69	0,38		
ALZ81	9,673	2,07	1,65	1,17	0,86	1,85	1,06	0,61	0,34		
AMA10	4,385	1,77	1,40	0,97	0,69	1,44	0,86	0,53	0,30		
ANG85	4,074	1,71	1,33	1,00	0,71	1,43	0,87	0,52	0,31		
ANN74	41,751	3,32	2,50	1,84	1,32	2,75	1,45	0,79	0,42		
ANT74	6,915	1,99	1,62	1,10	0,83	1,68	1,00	0,58	0,35		
APR85	2,378	1,56	1,12	0,78	0,61	1,29	0,78	0,50	0,29		
ARG19	5,801	1,94	1,40	1,06	0,78	1,58	0,99	0,54	0,33		
ART64	41,057	3,37	2,46	1,90	1,36	2,60	1,45	0,76	0,42		
ARZ35	8,306	2,21	1,63	1,16	0,86	1,75	1,02	0,57	0,35		
AST32	6,188	1,93	1,43	1,04	0,79	1,63	0,97	0,55	0,32		
AUL13	3,816	1,67	1,37	1,01	0,76	1,54	0,91	0,53	0,33		
AUM44	2,012	1,47	1,07	0,87	0,65	1,26	0,81	0,49	0,30		
AUR40	2,000	1,45	1,06	0,79	0,59	1,29	0,79	0,48	0,30		
AVE34	28,202	3,19	2,25	1,61	1,15	2,35	1,28	0,73	0,41		
AYD63	7,462	2,14	1,57	1,08	0,77	1,64	1,00	0,57	0,32		
AYG64	5,704	1,94	1,38	1,03	0,75	1,57	0,93	0,54	0,32		
BAG12	8,695	2,18	1,51	1,17	0,84	1,69	0,96	0,58	0,34		
BAI08	4,806	1,91	1,39	1,04	0,78	1,62	0,94	0,54	0,34		
BAI36	1,004	1,19	0,87	0,69	0,48	1,20	0,74	0,46	0,29		
BAR01	8,000	2,26	1,54	1,16	0,81	1,66	1,00	0,61	0,32		
BAR32	4,149	1,78	1,31	1,01	0,72	1,55	0,92	0,55	0,34		
BAY58	2,791	1,55	1,20	0,90	0,64	1,33	0,81	0,52	0,30		
BCL12	18,907	2,81	2,01	1,41	1,08	2,10	1,23	0,69	0,38		
BDB40	10,597	2,26	1,64	1,22	0,89	1,94	1,07	0,61	0,35		
BEA36	0,990	1,26	0,86	0,65	0,50	1,11	0,70	0,44	0,28		
BEL36	1,003	1,20	0,86	0,65	0,48	1,10	0,70	0,45	0,28		
BEZ41	0,977	1,15	0,85	0,65	0,49	1,17	0,71	0,47	0,28		
BIG36	1,002	1,24	0,93	0,71	0,51	1,10	0,67	0,44	0,27		
BIM13	11,798	2,44	1,74	1,26	0,90	1,94	1,09	0,60	0,36		
BIS40	0,913	1,20	0,84	0,62	0,46	1,12	0,70	0,46	0,27		
BIS73	34,629	3,35	2,29	1,69	1,21	2,51	1,30	0,73	0,41		
BLA40	0,600	1,00	0,74	0,54	0,41	1,07	0,69	0,42	0,26		
BLC19	13,609	2,49	1,87	1,33	1,00	1,90	1,08	0,61	0,35		

BLE65	22,367	2,85	2,07	1,55	1,07	2,24	1,21	0,71	0,38
BLI36	0,671	1,06	0,79	0,59	0,43	1,08	0,69	0,45	0,28
BLI44	1,493	1,30	1,03	0,72	0,55	1,19	0,75	0,46	0,29
BMC16	10,568	2,28	1,76	1,27	0,90	1,88	1,06	0,60	0,34
BMS40	2,834	1,59	1,16	0,87	0,64	1,31	0,85	0,51	0,31
BOR63	1,308	1,32	0,94	0,69	0,52	1,17	0,74	0,45	0,29
BOS22	5,969	2,04	1,51	1,03	0,82	1,52	0,98	0,58	0,33
BOU35	2,876	1,54	1,19	0,87	0,64	1,37	0,86	0,52	0,32
BOU43	16,754	2,61	1,93	1,40	1,00	2,03	1,17	0,62	0,37
BOU63	2,995	1,61	1,13	0,89	0,63	1,34	0,85	0,51	0,30
BOU66	11,506	2,33	1,74	1,29	0,91	1,81	1,09	0,59	0,36
BOU73	82,348	4,10	2,91	2,20	1,57	3,07	1,66	0,87	0,45
BOU88	8,061	2,09	1,53	1,09	0,82	1,71	1,02	0,60	0,35
BOU89	4,984	1,83	1,33	1,02	0,71	1,52	0,95	0,53	0,33
BRA47	5,593	1,88	1,51	1,10	0,77	1,64	0,96	0,58	0,32
BSA58	3,466	1,70	1,26	0,96	0,71	1,42	0,87	0,53	0,31
BSF31	10,329	2,26	1,66	1,18	0,88	1,83	1,11	0,61	0,36
BSJ32	4,103	1,74	1,31	0,98	0,73	1,50	0,89	0,54	0,31
BUJ87	8,597	2,09	1,56	1,08	0,86	1,68	1,02	0,60	0,34
BUL85	8,441	2,22	1,63	1,20	0,92	1,69	1,06	0,60	0,35
CAE35	0,400	0,89	0,68	0,49	0,35	1,01	0,63	0,41	0,26
CAL2B	21,703	2,85	2,08	1,49	1,07	2,28	1,28	0,71	0,39
CAN32	3,028	1,62	1,24	1,00	0,71	1,43	0,84	0,51	0,30
CAR35	0,796	1,10	0,82	0,60	0,45	1,08	0,68	0,45	0,28
CAR66	15,028	2,56	1,85	1,35	0,98	1,97	1,17	0,65	0,37
CAR83	8,633	2,16	1,54	1,15	0,82	1,72	1,01	0,58	0,35
CAS04	30,513	3,06	2,30	1,70	1,20	2,33	1,31	0,72	0,39
CAS63	2,027	1,47	1,13	0,80	0,61	1,24	0,76	0,49	0,30
CAU19	3,408	1,65	1,23	0,93	0,68	1,41	0,85	0,54	0,31
CAZ23	1,986	1,43	1,08	0,79	0,58	1,26	0,79	0,51	0,30
CAZ40	10,328	2,25	1,75	1,22	0,92	1,80	1,04	0,62	0,35
CEB79	7,445	2,02	1,48	1,09	0,80	1,65	0,98	0,57	0,33
CER21	5,875	1,95	1,43	1,08	0,77	1,60	0,90	0,57	0,33
CHA21	7,799	2,17	1,54	1,13	0,83	1,70	0,98	0,55	0,34
CHA23	8,353	2,17	1,54	1,20	0,84	1,73	1,05	0,62	0,35
CHA25	23,842	2,99	2,09	1,56	1,15	2,17	1,23	0,71	0,38
CHA35	2,447	1,63	1,20	0,84	0,66	1,35	0,80	0,51	0,30
CHA38	38,485	3,39	2,52	1,72	1,26	2,52	1,34	0,77	0,40
CHA39	22,061	2,84	2,04	1,51	1,16	2,22	1,23	0,70	0,38
CHA48	4,378	1,86	1,31	1,00	0,69	1,48	0,90	0,55	0,32
CHA52	5,970	1,97	1,46	1,04	0,78	1,54	0,94	0,55	0,32
CHA58	14,301	2,53	1,89	1,30	0,99	1,98	1,12	0,63	0,36
CHA63	3,037	1,64	1,24	0,97	0,69	1,41	0,85	0,50	0,31
CHA86	2,203	1,49	1,10	0,83	0,65	1,32	0,83	0,50	0,30
CHA87	3,622	1,70	1,23	0,94	0,69	1,41	0,86	0,53	0,33

CHE38	10,474	2,33	1,64	1,29	0,92	1,88	1,01	0,60	0,36
CHE73	95,221	4,32	3,17	2,28	1,71	3,29	1,66	0,86	0,45
CHO04	23,594	2,94	2,11	1,49	1,12	2,16	1,25	0,69	0,39
COD2B	13,796	2,51	1,82	1,31	0,96	1,94	1,11	0,63	0,35
COI39	11,613	2,39	1,73	1,27	0,95	1,89	1,07	0,65	0,36
COM23	12,452	2,44	1,77	1,37	0,97	1,99	1,10	0,63	0,37
COR22	4,442	1,76	1,35	0,96	0,74	1,50	0,88	0,57	0,33
COR41	0,365	0,90	0,66	0,49	0,36	1,00	0,66	0,40	0,27
CRA18	1,771	1,43	1,03	0,74	0,55	1,22	0,74	0,48	0,30
CRE89	11,076	2,28	1,73	1,30	0,89	1,90	1,04	0,63	0,35
DEV07	4,821	1,88	1,37	0,99	0,73	1,45	0,90	0,54	0,34
DRE29	7,548	2,17	1,47	1,17	0,82	1,66	1,00	0,58	0,34
DUC56	2,359	1,49	1,13	0,83	0,61	1,29	0,80	0,49	0,29
ECH33	3,648	1,70	1,34	0,97	0,69	1,37	0,83	0,52	0,32
EDC23	2,688	1,57	1,14	0,88	0,66	1,36	0,81	0,50	0,30
EDC63	4,325	1,79	1,34	1,05	0,76	1,51	0,89	0,53	0,32
EDG36	1,003	1,19	0,87	0,65	0,48	1,15	0,72	0,44	0,29
EGR45	4,355	1,87	1,32	1,00	0,69	1,47	0,88	0,55	0,33
EGU36	20,673	2,71	2,02	1,49	1,06	2,13	1,19	0,71	0,39
ENC15	24,613	2,90	2,18	1,65	1,16	2,17	1,28	0,70	0,40
ENT13	4,800	1,91	1,34	0,97	0,76	1,53	0,94	0,57	0,32
ENT25	3,348	1,71	1,26	0,92	0,67	1,38	0,86	0,53	0,30
EPT35	2,397	1,67	1,22	0,89	0,72	1,30	0,79	0,50	0,30
ESP04	30,796	3,15	2,26	1,64	1,18	2,25	1,36	0,69	0,39
EST11	9,841	2,26	1,70	1,24	0,89	1,81	1,02	0,61	0,35
ETI39	4,600	1,90	1,29	0,96	0,74	1,43	0,92	0,55	0,33
ETR23	8,577	2,28	1,65	1,23	0,85	1,83	1,03	0,60	0,35
EVJ59	3,353	1,62	1,24	0,92	0,70	1,37	0,85	0,53	0,31
EYC05	9,374	2,26	1,61	1,19	0,87	1,86	1,06	0,60	0,35
FEY19	4,325	1,83	1,36	0,99	0,74	1,49	0,88	0,54	0,33
FIG2B	8,161	2,13	1,59	1,15	0,83	1,73	1,01	0,60	0,34
FIL09	9,394	2,32	1,68	1,24	0,85	1,78	1,02	0,57	0,34
FON36	1,027	1,20	0,88	0,64	0,46	1,13	0,73	0,43	0,30
FOR35	0,864	1,16	0,87	0,64	0,46	1,06	0,71	0,44	0,28
GAB36	1,006	1,22	0,88	0,67	0,49	1,20	0,70	0,46	0,29
GAB64	12,087	2,40	1,82	1,34	0,95	1,87	1,10	0,63	0,36
GAR09	6,906	2,07	1,49	1,08	0,78	1,61	0,94	0,56	0,34
GAS14	4,386	1,79	1,32	0,98	0,75	1,61	0,92	0,53	0,33
GDL44	1,799	1,43	1,02	0,78	0,57	1,25	0,71	0,49	0,29
GEN82	4,696	1,82	1,33	1,03	0,74	1,50	0,91	0,55	0,33
GER88	16,854	2,85	1,90	1,35	1,03	2,00	1,18	0,68	0,38
GIO40	4,381	1,78	1,32	0,99	0,76	1,50	0,88	0,55	0,32
GIR73	67,720	4,13	2,84	2,14	1,59	2,91	1,61	0,82	0,45
GLC39	12,015	2,41	1,72	1,28	0,94	1,90	1,06	0,62	0,37
GON57	3,072	1,65	1,22	0,87	0,66	1,41	0,82	0,51	0,31

GOU03	2,573	1,59	1,15	0,86	0,62	1,40	0,83	0,51	0,31
GOU22	9,884	2,25	1,68	1,21	0,90	1,80	1,05	0,62	0,34
GOU82	7,482	2,21	1,54	1,10	0,81	1,67	0,99	0,58	0,33
GRA15	25,625	3,01	2,13	1,54	1,19	2,24	1,30	0,70	0,39
GRA42	14,143	2,51	1,89	1,34	0,99	2,07	1,18	0,63	0,37
GRA85	5,420	1,91	1,38	1,02	0,70	1,54	0,91	0,55	0,32
GRO21b	9,183	2,21	1,61	1,19	0,83	1,86	1,06	0,62	0,35
GUE22	17,497	2,72	1,99	1,44	1,05	2,04	1,22	0,67	0,36
HAG40	5,299	1,85	1,41	1,03	0,77	1,64	0,97	0,55	0,33
HAR22	1,983	1,45	1,17	0,79	0,61	1,26	0,80	0,47	0,29
HAU19	20,050	2,91	1,96	1,46	1,07	2,15	1,14	0,69	0,39
ILA39	10,868	2,30	1,75	1,32	0,91	1,95	1,08	0,62	0,33
ISS07	98,163	4,53	3,09	2,23	1,65	3,20	1,68	0,86	0,44
JUG22	4,169	1,83	1,47	1,05	0,80	1,42	0,84	0,55	0,31
LAC21	0,995	1,18	0,89	0,64	0,50	1,12	0,71	0,45	0,28
LAC33	3,269	1,67	1,24	0,90	0,64	1,36	0,84	0,51	0,30
LAD16	2,320	1,50	1,10	0,92	0,67	1,24	0,78	0,49	0,30
LAF38	24,669	2,90	2,15	1,53	1,15	2,27	1,25	0,69	0,39
LAN23	1,037	1,19	0,87	0,72	0,50	1,15	0,68	0,45	0,29
LAN66	40,814	3,40	2,45	1,79	1,37	2,65	1,39	0,77	0,42
LAO81	16,336	2,56	1,98	1,46	0,99	2,04	1,19	0,64	0,38
LAR31	5,436	1,87	1,49	1,03	0,79	1,59	0,95	0,54	0,33
LAS15	10,717	2,30	1,74	1,26	0,92	1,75	1,06	0,60	0,35
LAT10	8,768	2,23	1,58	1,15	0,87	1,77	0,99	0,58	0,35
LAU38	29,240	3,00	2,27	1,64	1,18	2,32	1,37	0,72	0,41
LAV16	8,246	2,14	1,56	1,15	0,82	1,76	1,03	0,58	0,35
LAV23	9,580	2,25	1,69	1,23	0,91	1,83	1,04	0,61	0,35
LAV43	19,888	2,76	1,97	1,46	1,13	2,09	1,17	0,67	0,37
LDC21	3,237	1,64	1,22	0,87	0,64	1,39	0,88	0,50	0,31
LDC25	8,596	2,25	1,64	1,23	0,92	1,74	1,01	0,58	0,34
LDC51	7,775	2,09	1,51	1,16	0,81	1,77	1,03	0,56	0,35
LDC63	27,090	2,99	2,18	1,69	1,17	2,43	1,28	0,73	0,39
LEJ85	3,490	1,71	1,23	0,90	0,65	1,41	0,83	0,54	0,31
LEM74	154,213	5,14	3,49	2,52	1,89	3,73	1,89	0,94	0,49
LEM85	6,361	1,94	1,50	1,09	0,76	1,60	0,95	0,57	0,35
LEO40	0,778	1,10	0,78	0,59	0,44	1,12	0,69	0,45	0,27
LES24	8,326	2,11	1,58	1,13	0,89	1,84	1,05	0,59	0,33
LGA36	0,934	1,19	0,91	0,68	0,51	1,14	0,68	0,44	0,27
LGM27	0,288	0,88	0,61	0,42	0,32	1,07	0,66	0,40	0,26
LGM39	11,511	2,35	1,76	1,31	0,93	1,89	1,06	0,62	0,36
LIE52	5,842	1,96	1,38	1,08	0,79	1,59	0,96	0,53	0,32
LKW68	16,850	2,52	1,94	1,40	1,03	2,03	1,15	0,67	0,38
LLI66	4,374	1,78	1,31	0,98	0,70	1,51	0,85	0,51	0,32
LNC04	12,900	2,46	1,78	1,29	0,97	1,90	1,07	0,62	0,35
LON88	13,271	2,49	1,84	1,27	1,00	1,90	1,13	0,66	0,37

LOU37	1,021	1,17	0,87	0,63	0,48	1,16	0,71	0,46	0,29
LOU64	12,878	2,43	1,80	1,26	0,96	1,84	1,06	0,65	0,35
LPC38	6,624	2,09	1,46	1,12	0,77	1,69	0,97	0,57	0,32
LRO39	7,681	2,08	1,55	1,12	0,83	1,66	0,98	0,60	0,34
LSF43	0,987	1,14	0,86	0,63	0,46	1,11	0,68	0,46	0,27
LSG81	18,189	2,65	1,92	1,34	1,03	2,18	1,22	0,71	0,38
LUN32	11,229	2,41	1,68	1,28	0,93	1,81	1,08	0,60	0,34
MAD55	3,345	1,68	1,30	0,91	0,68	1,39	0,87	0,52	0,31
MAR35	1,012	1,18	0,95	0,67	0,50	1,12	0,73	0,46	0,28
MAT66	9,376	2,19	1,66	1,15	0,85	1,74	1,01	0,60	0,35
MAU12	20,359	2,80	2,10	1,52	1,07	2,15	1,23	0,70	0,39
MIC68	9,793	2,31	1,63	1,19	0,88	1,87	1,06	0,58	0,36
MIE32	5,572	1,93	1,54	1,07	0,79	1,59	0,96	0,55	0,32
MON38	53,331	3,61	2,60	2,07	1,40	2,81	1,52	0,83	0,42
MON63	7,822	2,13	1,54	1,17	0,82	1,80	0,99	0,58	0,34
MON74	12,074	2,35	1,83	1,27	0,97	1,94	1,10	0,61	0,36
MOU52	9,100	2,22	1,60	1,19	0,86	1,75	1,04	0,62	0,35
MUS35	1,336	1,30	0,97	0,71	0,53	1,19	0,75	0,46	0,27
NAG09	52,624	3,80	2,60	2,07	1,43	2,70	1,48	0,80	0,42
NAN01	30,300	2,99	2,24	1,62	1,15	2,36	1,27	0,72	0,38
NAU48	18,118	2,70	1,95	1,42	1,00	2,04	1,16	0,68	0,38
NAU48bis	18,118	2,65	1,96	1,48	1,04	2,22	1,23	0,66	0,38
NAU48ter	18,118	2,66	1,94	1,50	1,05	2,05	1,16	0,66	0,38
NDC38	20,457	2,83	2,07	1,47	1,03	2,21	1,23	0,68	0,39
NEG06	12,900	2,53	1,81	1,36	0,96	2,02	1,10	0,66	0,35
NOY56	1,713	1,45	1,06	0,77	0,52	1,18	0,74	0,49	0,29
ORE65	16,142	2,64	1,99	1,38	1,04	2,04	1,15	0,67	0,37
ORX40	0,571	1,04	0,74	0,55	0,38	1,03	0,67	0,43	0,27
OSP2A	7,219	2,14	1,59	1,08	0,82	1,66	0,95	0,57	0,33
OUE35	1,929	1,39	1,06	0,77	0,62	1,26	0,79	0,48	0,29
PAI35	1,713	1,39	1,03	0,76	0,57	1,25	0,75	0,47	0,28
PAL07	20,725	2,76	2,10	1,50	1,07	2,16	1,22	0,65	0,38
PAL38	27,410	3,20	2,30	1,59	1,19	2,24	1,27	0,73	0,40
PAN21	6,860	2,06	1,46	1,07	0,78	1,72	1,00	0,58	0,33
PAN58	15,270	2,56	1,87	1,32	1,04	2,02	1,14	0,64	0,38
PAR12	15,575	2,60	1,90	1,38	1,04	2,01	1,15	0,64	0,39
PAR40	7,559	2,00	1,52	1,12	0,81	1,79	1,00	0,59	0,34
PAR54	2,152	1,54	1,07	0,80	0,61	1,26	0,76	0,47	0,31
PAV63	50,832	3,73	2,70	1,95	1,48	2,62	1,45	0,78	0,42
PDF44	1,586	1,40	1,02	0,73	0,58	1,18	0,75	0,49	0,29
PDH35	2,865	1,66	1,20	0,88	0,64	1,42	0,81	0,50	0,30
PET38	10,775	2,32	1,73	1,25	0,94	1,73	1,05	0,61	0,35
PIE36	1,003	1,21	0,92	0,67	0,53	1,09	0,69	0,45	0,29
PIN49	2,645	1,60	1,14	0,84	0,64	1,26	0,79	0,52	0,30
PIR03	6,394	2,00	1,43	1,06	0,77	1,68	0,97	0,56	0,33

POI44	0,980	1,17	0,86	0,65	0,48	1,19	0,71	0,45	0,28
PON21	8,967	2,16	1,52	1,21	0,85	1,72	1,06	0,59	0,35
PON22	2,547	1,49	1,14	0,83	0,63	1,26	0,82	0,48	0,31
POU31	6,529	2,10	1,38	1,07	0,80	1,60	0,97	0,57	0,35
POU43	6,908	1,97	1,58	1,05	0,81	1,69	1,01	0,57	0,35
PRA03	12,918	2,40	1,72	1,26	0,95	1,93	1,07	0,64	0,34
PRA33	1,075	1,21	0,88	0,66	0,51	1,10	0,74	0,47	0,29
PRA66	4,975	1,87	1,44	1,06	0,73	1,52	0,91	0,54	0,32
PRO44	2,009	1,42	1,08	0,79	0,58	1,27	0,76	0,50	0,30
PUI18	3,261	1,70	1,26	0,94	0,72	1,38	0,83	0,50	0,31
PUY48	24,216	2,94	2,14	1,57	1,14	2,20	1,22	0,69	0,40
PUY66	11,121	2,38	1,67	1,24	0,91	1,87	1,08	0,61	0,35
QUE63	12,730	2,46	1,83	1,32	0,93	1,92	1,12	0,65	0,35
QUI04	11,676	2,38	1,72	1,28	0,92	1,95	1,06	0,60	0,35
RAB61	7,164	2,05	1,51	1,11	0,78	1,61	1,01	0,55	0,35
RAM23	1,290	1,27	0,95	0,67	0,47	1,23	0,72	0,46	0,29
RAV34	11,144	2,45	1,71	1,23	0,91	1,81	1,08	0,58	0,33
RBO63	45,225	3,44	2,46	1,88	1,37	2,65	1,46	0,84	0,42
RCB01	8,418	2,15	1,59	1,17	0,87	1,68	1,07	0,57	0,36
RCE35	7,283	2,16	1,51	1,08	0,82	1,68	0,97	0,58	0,33
RCM01	6,481	2,00	1,44	1,09	0,79	1,59	0,95	0,57	0,34
RCS70	12,769	2,47	1,81	1,29	0,93	1,85	1,04	0,61	0,34
RDC23	8,945	2,25	1,62	1,17	0,83	1,71	0,97	0,63	0,33
RDV35	5,596	1,90	1,44	1,04	0,80	1,52	0,93	0,55	0,32
REA13	1,628	1,35	1,03	0,77	0,56	1,22	0,77	0,48	0,29
REM25	9,878	2,31	1,64	1,17	0,91	1,83	1,02	0,61	0,36
RFB63	19,608	2,81	1,96	1,42	1,03	2,01	1,24	0,70	0,38
RGM38	59,665	3,74	2,82	1,99	1,45	2,75	1,53	0,81	0,44
RIN53	2,249	1,53	1,09	0,84	0,62	1,28	0,83	0,50	0,29
RKU22	3,911	1,77	1,35	0,97	0,72	1,39	0,88	0,53	0,32
RLB11	9,001	2,16	1,61	1,13	0,82	1,68	1,04	0,60	0,34
RMC73	51,132	3,79	2,60	1,89	1,42	2,68	1,48	0,78	0,42
RMN29	2,988	1,61	1,15	0,86	0,63	1,36	0,84	0,51	0,31
RMP85	5,166	1,84	1,39	0,98	0,72	1,45	0,91	0,55	0,33
RMR49	4,032	1,74	1,21	0,93	0,69	1,43	0,85	0,52	0,32
ROC85	4,236	1,85	1,30	1,00	0,75	1,56	0,91	0,54	0,33
ROP22	5,934	1,96	1,44	1,03	0,76	1,56	0,94	0,55	0,33
ROS73	67,116	3,77	2,80	1,97	1,47	2,90	1,68	0,82	0,45
ROU21	1,003	1,21	0,88	0,64	0,50	1,10	0,73	0,47	0,29
RPR71	8,809	2,26	1,61	1,17	0,83	1,65	1,03	0,58	0,35
RST35	8,444	2,11	1,50	1,11	0,85	1,69	1,00	0,58	0,35
RSV34	5,655	2,01	1,39	1,02	0,75	1,62	0,96	0,54	0,32
RTN71	6,206	2,08	1,43	1,05	0,74	1,58	0,93	0,56	0,34
RTV71	3,976	1,75	1,26	0,95	0,69	1,50	0,89	0,52	0,31
RVH22	7,123	1,98	1,51	1,08	0,78	1,58	0,98	0,56	0,32

SAL34	14,146	2,44	1,82	1,35	0,99	2,04	1,14	0,65	0,38
SAU36	0,947	1,18	0,89	0,68	0,51	1,13	0,71	0,47	0,29
SAU38	34,149	3,29	2,33	1,77	1,27	2,41	1,33	0,73	0,39
SCA83	16,321	2,69	1,92	1,41	1,00	2,06	1,19	0,65	0,38
SCR04	34,883	3,16	2,31	1,66	1,25	2,49	1,39	0,74	0,42
SEC15	24,461	2,98	2,11	1,65	1,13	2,20	1,26	0,68	0,39
SEI10	9,572	2,24	1,66	1,20	0,83	1,86	1,06	0,60	0,36
SER63	9,915	2,27	1,79	1,19	0,88	1,77	1,09	0,59	0,36
SET58	6,596	2,02	1,54	1,07	0,78	1,62	0,92	0,56	0,35
SFP53	4,211	1,80	1,33	1,01	0,73	1,52	0,89	0,52	0,31
SID18	7,474	2,10	1,55	1,07	0,81	1,63	0,94	0,56	0,33
SIL85	7,520	2,08	1,55	1,14	0,80	1,69	0,99	0,58	0,34
SMI29	3,001	1,60	1,25	0,88	0,65	1,39	0,83	0,51	0,30
SOR71	5,358	1,89	1,44	1,03	0,73	1,59	0,92	0,54	0,33
SOU09	34,606	3,14	2,45	1,69	1,26	2,41	1,36	0,72	0,40
SOU40	0,596	1,02	0,76	0,58	0,44	1,07	0,71	0,43	0,28
SPA87	6,976	2,03	1,52	1,18	0,78	1,62	0,99	0,59	0,32
SPC38	26,119	3,01	2,19	1,57	1,17	2,22	1,25	0,72	0,39
SPO04	46,262	3,44	2,58	1,91	1,37	2,62	1,36	0,79	0,40
SPO25	23,528	2,87	2,16	1,64	1,15	2,12	1,27	0,72	0,39
STO57	3,038	1,57	1,25	0,90	0,67	1,37	0,86	0,51	0,31
SUD41	1,008	1,17	0,92	0,66	0,44	1,18	0,71	0,49	0,28
SYL01	13,253	2,35	1,80	1,29	0,94	1,97	1,17	0,67	0,37
TAI40	3,583	1,72	1,29	0,92	0,68	1,44	0,90	0,53	0,32
TAZ63	38,950	3,46	2,59	1,81	1,30	2,46	1,31	0,79	0,42
TOL2A	48,066	3,54	2,67	1,96	1,43	2,66	1,45	0,79	0,43
TOR82	4,232	1,84	1,39	0,94	0,75	1,48	0,92	0,56	0,32
TOU79	11,055	2,31	1,72	1,22	0,97	1,90	1,11	0,64	0,36
TRE19	8,731	2,13	1,57	1,13	0,89	1,74	1,07	0,59	0,33
TRE35	1,863	1,45	0,98	0,77	0,54	1,23	0,77	0,49	0,30
TRI19	7,668	2,20	1,53	1,12	0,83	1,70	1,01	0,60	0,33
TSC32	5,837	1,95	1,41	1,06	0,80	1,58	0,94	0,55	0,33
TUI45	3,632	1,71	1,31	0,94	0,67	1,45	0,84	0,53	0,32
TYX63	1,405	1,26	0,97	0,72	0,51	1,16	0,74	0,46	0,29
UBY32	3,822	1,73	1,34	0,94	0,68	1,41	0,89	0,53	0,32
VAL38	20,210	2,75	2,02	1,47	1,08	2,15	1,23	0,66	0,38
VAL39	16,943	2,67	2,01	1,39	1,09	2,09	1,12	0,66	0,37
VAL45	2,017	1,42	1,05	0,73	0,61	1,27	0,78	0,49	0,29
VAS87	11,998	2,40	1,74	1,28	0,93	1,88	1,10	0,64	0,36
VAU58	3,237	1,68	1,19	0,85	0,68	1,39	0,83	0,51	0,31
VEN06	8,600	2,13	1,60	1,17	0,89	1,78	1,03	0,57	0,34
VER38	23,761	2,95	2,11	1,58	1,11	2,35	1,32	0,69	0,40
VER83	19,822	2,66	1,96	1,43	1,08	2,10	1,31	0,67	0,39
VEZ50	11,701	2,37	1,68	1,30	0,93	1,92	1,08	0,61	0,35
VFO08	3,739	1,74	1,30	0,99	0,74	1,40	0,86	0,55	0,31

VIG36	0,790	1,11	0,81	0,58	0,43	1,10	0,68	0,42	0,28
VIL12	6,292	2,02	1,42	1,09	0,83	1,66	0,99	0,58	0,34
VIL35	4,136	1,71	1,26	0,97	0,70	1,52	0,92	0,54	0,32
VIL42	26,888	2,97	2,22	1,63	1,16	2,32	1,22	0,72	0,40
VIL48	21,933	2,84	2,13	1,61	1,07	2,10	1,19	0,71	0,39
VIL52	5,497	1,86	1,39	1,06	0,74	1,57	0,96	0,55	0,33
VIL66	9,651	2,27	1,63	1,20	0,88	1,71	1,02	0,61	0,36
VIN66	15,958	2,58	1,82	1,37	1,02	2,08	1,18	0,66	0,37
VIO44	3,830	1,74	1,24	0,98	0,70	1,41	0,85	0,50	0,32
VOU39	38,035	3,31	2,54	1,76	1,32	2,57	1,42	0,75	0,41
VPR88	18,346	2,73	1,95	1,49	1,09	2,12	1,25	0,67	0,36
YRI40	5,160	1,88	1,38	1,01	0,75	1,57	0,93	0,55	0,33
AME54	0,693	1,03	0,79	0,60	0,41	1,01	0,69	0,43	0,26
ANS69	7,000	1,99	1,50	1,08	0,83	1,64	0,98	0,57	0,33
ARD62	1,288	1,29	1,00	0,76	0,56	1,23	0,75	0,45	0,30
ARJ40	16,000	2,63	1,96	1,41	0,99	2,14	1,18	0,65	0,38
ARM77	1,000	1,18	0,94	0,67	0,51	1,14	0,74	0,46	0,27
AUD62	1,736	1,44	1,05	0,77	0,58	1,24	0,77	0,48	0,30
BEA53	1,001	1,19	0,89	0,64	0,47	1,21	0,75	0,45	0,28
BGP77	5,000	1,86	1,35	0,99	0,72	1,55	0,90	0,55	0,32
BIR01	0,645	1,04	0,76	0,58	0,41	1,10	0,66	0,44	0,27
BIS55	1,621	1,39	1,03	0,78	0,55	1,24	0,77	0,47	0,29
BMM78	7,901	2,13	1,56	1,12	0,82	1,75	1,00	0,56	0,34
BOR33	6,450	2,00	1,49	1,07	0,79	1,61	1,01	0,57	0,33
BOU27	6,220	2,06	1,51	1,13	0,79	1,54	0,93	0,58	0,32
BOU33	7,740	2,15	1,66	1,12	0,81	1,65	0,98	0,57	0,35
CAN77c	3,000	1,62	1,17	0,90	0,64	1,34	0,85	0,50	0,31
CER95	3,000	1,69	1,19	0,90	0,68	1,38	0,85	0,49	0,30
CHA01	0,989	1,19	0,86	0,64	0,51	1,08	0,70	0,44	0,28
CHE18	0,999	1,21	0,88	0,65	0,50	1,11	0,74	0,46	0,28
DRA69	3,010	1,62	1,31	0,92	0,71	1,41	0,85	0,49	0,31
ECL28	3,088	1,59	1,23	0,83	0,66	1,38	0,84	0,51	0,32
EDC35	1,045	1,18	0,85	0,64	0,48	1,14	0,74	0,47	0,29
EGM55	1,001	1,19	0,88	0,66	0,50	1,09	0,72	0,45	0,29
EGR51	1,456	1,33	0,98	0,71	0,51	1,16	0,75	0,45	0,29
ESQ78	2,500	1,57	1,21	0,86	0,64	1,30	0,82	0,50	0,31
FRA25	1,290	1,28	0,99	0,71	0,55	1,13	0,74	0,46	0,29
GBB43	0,986	1,24	0,87	0,66	0,47	1,11	0,72	0,45	0,28
GEB69	2,841	1,64	1,18	0,92	0,64	1,30	0,85	0,52	0,31
GOR59	0,921	1,21	0,92	0,65	0,52	1,12	0,71	0,45	0,29
HER51c	0,796	1,12	0,85	0,61	0,44	1,11	0,69	0,43	0,27
HOR52	0,807	1,14	0,84	0,60	0,47	1,08	0,71	0,45	0,28
JAB77	4,889	1,86	1,40	1,02	0,75	1,55	0,89	0,55	0,32
JOU11	2,627	1,57	1,15	0,87	0,67	1,32	0,85	0,51	0,31
LAC55	2,250	1,53	1,15	0,86	0,63	1,25	0,78	0,48	0,30

LER27a	12,272	2,40	1,79	1,29	0,98	1,88	1,09	0,62	0,37
LET57	1,746	1,40	1,06	0,80	0,59	1,30	0,78	0,50	0,29
LIN55	2,070	1,47	1,08	0,77	0,58	1,29	0,77	0,50	0,28
MAL90	1,201	1,29	0,93	0,72	0,53	1,14	0,75	0,44	0,29
MAR21	0,983	1,16	0,84	0,66	0,48	1,11	0,72	0,46	0,28
MEB01	4,000	1,78	1,29	0,97	0,74	1,45	0,89	0,55	0,32
MON71	5,591	1,91	1,45	1,06	0,81	1,58	0,94	0,55	0,32
MOU01	1,075	1,22	0,88	0,68	0,50	1,14	0,72	0,45	0,28
MUN67	5,375	1,84	1,41	0,99	0,78	1,55	0,94	0,54	0,33
PPE14	3,025	1,66	1,21	0,87	0,68	1,34	0,86	0,53	0,31
RGL69	1,591	1,37	1,02	0,76	0,58	1,21	0,75	0,47	0,29
RIV35	2,824	1,55	1,13	0,87	0,66	1,39	0,82	0,50	0,30
SDB01	8,000	2,20	1,54	1,09	0,82	1,72	0,98	0,58	0,34
TOU27	3,105	1,64	1,27	0,87	0,62	1,39	0,86	0,52	0,31
TRA02	2,263	1,50	1,15	0,81	0,63	1,28	0,80	0,48	0,29
VAR72	1,037	1,18	0,89	0,66	0,49	1,17	0,73	0,44	0,29
VEN27	6,126	1,96	1,38	1,05	0,78	1,66	0,99	0,57	0,34
VIG59	1,620	1,41	1,00	0,71	0,55	1,19	0,74	0,46	0,28
VSM77	4,000	1,72	1,27	0,97	0,71	1,50	0,88	0,51	0,32
VVE70	1,978	1,50	1,10	0,85	0,62	1,23	0,74	0,48	0,29

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea
Parc de Tourvoie
BP 44,
92163 Antony cedex
01 40 96 61 21
www.irstea.fr