



HAL
open science

Physico-Chimie soutenant la biologie. Typologie chimique nationale des cours d'eau

N. Bougon, M. Ferreol

► **To cite this version:**

N. Bougon, M. Ferreol. Physico-Chimie soutenant la biologie. Typologie chimique nationale des cours d'eau. [Rapport de recherche] irstea. 2011, pp.39. hal-02596873

HAL Id: hal-02596873

<https://hal.inrae.fr/hal-02596873>

Submitted on 15 May 2020

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

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

*Partenariat 2010 – Domaine : Qualité des masses d'eau –
Action10 Conditions de référence – état et potentiel écologique des cours d'eau*



Physico-Chimie soutenant la biologie

Typologie chimique nationale des cours d'eau

Rapport d'étape V1

Nolwenn Bougon et Martial Ferréol

Pôle hydroécologie des cours d'eau Cemagref/Onema

Janvier 2011, corrigé janvier 2012

Contexte de programmation et de réalisation

- **Contexte :**

Les règles d'évaluation de l'état écologique utilisent actuellement les valeurs issues du SEQ-EAU. Pour améliorer la pertinence de cette évaluation il est nécessaire de déterminer des valeurs seuils pour les paramètres physico-chimiques en s'appuyant sur des données mesurées disponibles et d'ajuster la classification physico-chimique à la classification biologique, en fonction du contexte typologique.

- **Objectifs généraux du projet**

La mise en relation des paramètres physico-chimiques généraux avec la biologie a pour but : (i) d'ajuster la classification physico-chimique à la classification des éléments de qualité biologique, en fonction du contexte typologique ; et (ii) de rechercher le seuil "protecteur" ; conceptuellement, ce seuil n'est pas très éloigné d'un seuil de très bon état.

En ce qui concerne les paramètres physico-chimiques, nous disposons de longues chroniques de données ainsi que d'une connaissance assez développée des effets que l'on peut observer sur la biologie. En revanche, le cas des toxiques (pesticides et métaux) est plus problématique. En effet, les données et connaissances sont plus récentes, les expériences de terrain peu nombreuses et surtout leurs effets sur la biologie sont plus complexes avec des phénomènes de bioaccumulation, de biodisponibilité, d'effet différé... Les données concernant les bioindicateurs ne révéleront donc pas forcément la présence de ces éléments dès leur apparition dans le milieu. De plus, ces données présentent la particularité d'être intégratives dans le sens où la variabilité des sites est prise en compte ; on y établit ainsi des relations observées et non des relations théoriques.

L'ajustement de la classification de la physico-chimie a pour but de redéfinir des valeurs seuils de bon état pour les paramètres physico-chimiques généraux qui correspondent bien aux valeurs seuils de bon état des éléments de qualité biologique. Cette recherche de seuil est basée sur les données de terrain collectées dans le cadre des réseaux nationaux et doit tenir compte du contraste hydro-chimique et hydrologique des masses d'eau.

Le travail se déroule en trois étapes.

La première étape consiste, à partir de données de sites de référence, à cartographier l'état physico-chimique *in natura* des cours d'eau sur le territoire français métropolitain. Cette cartographie permet ainsi la création d'une typologie physico-chimique des masses d'eau.

La seconde consiste à décliner par types physico-chimiques le seuil de bon état des paramètres physico-chimiques généraux calibrés à partir du seuil de bon état des différents indices biotiques qui seront normalisés par type national.

La troisième étape consiste à définir des seuils "protecteurs" pour les trois éléments suivants : les paramètres physico-chimiques généraux, les pesticides et les métaux ; sur la base de la typologie physico-chimique. Ces seuils seront recherchés dans un premier temps seulement pour les macroinvertébrés.

Ce rapport présente la première étape du travail, la construction de la typologie physico-chimique des masses d'eau.

Les auteurs

Nolwenn Bougon et Martial Ferréol
Pôle hydroécologie des cours d'eau Cemagref/Onema
3 bis quai Chauveau CP 220
69336 LYON cedex 09
FRANCE

Contact : nolwenn.bougon@onema.fr

Les correspondants

Onema : *Yorick Reyjol, DAST, yorick.reyjol@onema.fr*

Droits d'usage :	<i>accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>France métropolitaine</i>
Niveau géographique	<i>national</i>
Niveau de lecture :	<i>Professionnels, experts</i>
Nature de la ressource :	<i>Document</i>

**Physico-chimie soutenant la biologie – Typologie Physico-chimique des cours
d'eau**

Rapport d'étape v0
N. Bougon et M. Ferréol

1. Introduction :	7
2. Exploitation des données	8
2.1. Base de données miroirs	8
2.1.1. Physico-chimie	8
2.1.2. Biologie	8
2.2. Vérification des données de physico-chimie	9
2.2.1. Vérification cohérence / validité du jeu de données physico-chimiques	9
3. Caractérisation physico-chimique des cours d'eau de référence	11
3.1. Détermination de l'échelle spatiale :	11
3.1.1. Hydro-écorégions de niveau 1	11
3.1.2. Typologie Nationale.....	12
3.2. Analyse :	12
3.2.1. Données utilisées	12
3.2.2. Tri et sélection des données	12
3.2.3. Analyses statistiques.....	13
3.3. Résultats et interprétations:	14
3.3.1. Variabilité inter-site vs intra site	14
3.3.2. Caractérisation des médianes des valeurs physico-chimiques par site	15
3.3.3. Première subdivision.....	16
3.3.4. Seconde subdivision et typologie physico-chimique finale	18
3.3.5. Caractérisation des types physico-chimiques	19
3.4. Conclusion :	21
4. Attribution des types chimiques aux sites du réseau national de contrôle de surveillance à partir de l'information sur la typologie nationale.	22
5. Conclusion	26

Physico-chimie soutenant la biologie – Typologie Physico-chimique des cours d'eau

N. Bougon et M. Ferréol

Résumé

La mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE par les états membres impose différentes contraintes et notamment la cartographie de l'état écologique et de l'état chimique actuel de chaque masse d'eau pour les eaux douces de surface (cours d'eau et plans d'eau). L'état écologique, qui correspond à la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques, est déterminé par l'état de chacun des éléments de qualité biologique, physico-chimique et hydromorphologique.

Actuellement, les règles d'évaluation de l'état écologique utilisent les valeurs issues du Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau qui est fondé sur la notion d'altération. Pour améliorer la pertinence de cette évaluation, il apparaît nécessaire de déterminer des valeurs seuils pour les paramètres physico-chimiques en s'appuyant sur des données mesurées disponibles et d'ajuster la classification physico-chimique à la classification biologique, en fonction du contexte typologique.

La première étape consiste à créer une typologie physico-chimique des masses d'eau pour tenir compte du contraste géochimique national. Dans cet objectif, 23 paramètres physico-chimiques généraux mesurés, sur la période de 2003 à 2008, sur 273 sites de référence ont été utilisés.

Six types physico-chimiques ont été définis et caractérisés à partir d'analyses statistiques (ACP, CAH et tests de Kruskal Wallis). Les principaux critères retenus sont la dureté, le positionnement géographique et les concentrations en nutriments.

La typologie physico-chimique pour le Réseau de Référence fut transposée directement au réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) via la typologie nationale. Ensuite, un avis d'expert sur la base de critères spatiaux et géologiques a validé et complété au besoin ces correspondances.

La typologie physico-chimique issue de cette étude est applicable à l'ensemble des sites suivis dans les réseaux nationaux pour lesquels les types nationaux possèdent des sites de référence. Elle représente donc bien le contraste géochimique global des cours d'eau métropolitain ; et devra être prise en compte pour ajuster au mieux la classification physico-chimique à la classification biologique.

Mots clés (thématique et géographique)

Eaux courantes, typologie, référence, physico-chimie, Directive Cadre Européenne sur l'Eau, hydrologie, état écologique, éléments de qualité biologique

Physico-chimie soutenant la biologie – Typologie Physico-chimique des cours d'eau
N. Bougon et M. Ferréol

Abstracts

ABSTRACT

Key words (thematic and geographical area)

Physico-chimie soutenant la biologie – Typologie Physico-chimique des cours d'eau

N. Bougon et M. Ferréol

1. Introduction :

La mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE par les états membres impose différentes contraintes et notamment la cartographie de l'état écologique et de l'état chimique actuel de chaque masse d'eau pour les eaux douces de surface (cours d'eau et plans d'eau).

Selon la DCE, l'état écologique correspond à la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques. L'état écologique des eaux de surface est déterminé par l'état de chacun des éléments de qualité biologique, physico-chimique et hydromorphologique prévus à la partie 1 de l'annexe 1 de l'arrêté du 25 janvier 2010. Les éléments physico-chimiques généraux interviennent essentiellement comme des facteurs explicatifs des conditions biologiques. Pour les éléments de qualité physico-chimique, les limites supérieure et inférieure de la classe « bon » suffisent pour la classification de l'état écologique, puisqu'un état écologique moins que bon est attribué sur la base des éléments biologiques.

Les valeurs seuil pour la classe d'état « bon » et les classes inférieures des éléments physico-chimiques doivent être fixées de manière à respecter les limites de classes établies pour les éléments biologiques. En outre, pour la classe « bon », elles doivent être fixées de manière à permettre le bon fonctionnement de l'écosystème. Actuellement, les règles d'évaluation de l'état écologique utilisent les valeurs issues du Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau (SEQ-Eau)¹ qui est fondé sur la notion d'altération. Pour améliorer la pertinence de cette évaluation, il apparaît nécessaire d'ajuster la classification physico-chimique à la classification biologique.

De plus actuellement, les limites de classes des paramètres physico-chimiques généraux sont uniques pour l'ensemble du territoire métropolitain, sauf quelques cas particuliers (ex : cours d'eau naturellement pauvres en oxygène, acides, froids). Des études ont montré une relation entre la lithologie et la composition chimique des eaux drainant les différents types de roche (e.g. Nisbet et Verneaux, 1970 ; Meybeck, 1986). Ainsi les teneurs en éléments chimiques majeurs et en éléments traces des eaux de surface et des sédiments reflètent la géologie du territoire à l'échelle nationale. Celle-ci est contrastée au plan géochimique et au plan hydrodynamique (Salpeteur et Angel, 2010). La composition chimique des cours d'eau conditionnant la faune qui y réside, le contraste géochimique des cours d'eau doit être pris en compte pour ajuster la classification physico-chimique à la classification biologique.

Pour réaliser cette étude, il convient d'utiliser des données représentatives de la variabilité géochimique naturelle à l'échelle nationale. L'utilisation des données recueillies par les agences de l'eau sur le réseau des sites de référence semble pertinente. Ce réseau de sites de référence, mis en place suite à la circulaire DCE 2004-08, est constitué de 393 sites qui ont été suivis de 2004 à 2007. Un site est défini comme étant site de référence, lorsque les « pressions anthropiques » qui s'exercent sur les milieux sont décrites comme « nulles ou très faibles ».

L'ajustement de la classification physico-chimique à la classification biologique se déroule donc en deux étapes.

¹ Il a été construit en 1991 puis il a été ajusté et complété en 1998 pour tenir compte de la directive 98/83/CE de novembre 1998 sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine ; et complété en 1999/2000 avec notamment l'état physico-chimique de l'eau et avec la prise en compte des mesures de micropolluants sur sédiments et matières en suspension.

La première étape consiste à définir une typologie physico-chimique intégrant le contraste hydro-chimique national. La typologie nationale (Chandesris et al, 2006) tient compte du contraste hydro-chimique et hydrologique, de l'héritage amont ainsi que de la variabilité régionale résiduelle révélée par des données biologiques. 124 types nationaux ont été définis mais 51 types nationaux majeurs représentent 90% du linéaire des cours d'eau. Effectuer l'analyse par types nationaux est une contrainte statistique car le nombre de site de référence par type est trop restreint pour réaliser une analyse statistiquement viable. Il convient donc de créer une typologie physico-chimique regroupant des types nationaux ayant des caractéristiques hydro-chimiques relativement homogènes ce qui permet ainsi le regroupement de données. Dans un objectif opérationnel, le nombre de types physico-chimiques ne doit pas être trop important.

La seconde étape consiste à décliner par types physico-chimiques les seuils des classes d'état des paramètres physico-chimiques généraux calibrés à partir des différents indices biotiques qui seront normalisés par type national.

Ce rapport présente la première étape du travail, Après une description et une vérification des données, nous présentons les étapes de construction de la typologie physico-chimique des masses d'eau des sites de référence et son application aux sites du réseau de contrôle de surveillance.

2. Exploitation des données

2.1. Base de données miroirs

2.1.1. Physico-chimie

Les données de physico-chimie utilisées dans cette étude sont des données issues de la Base Nationale de Donnée sur l'Eau (BNDE), centralisée à l'OIEau (Office International de l'eau). Cette base comprend les paramètres suivis dans le cadre des réseaux nationaux : les données historiques (depuis 1971), les données du réseau de surveillance (RCS), les données du réseau de référence et les données de réseaux complémentaires des bassins, soit les paramètres physico-chimiques généraux et les toxiques. A ce jour, le Cemagref dispose de données couvrant la période 1971 à 2008, inclus. Cela représente 21 159 029 mesures².

2.1.2. Biologie

Les données d'indicateurs biologiques (macro-invertébrés et diatomées) utilisées pour l'étude sont aussi des données issues des réseaux, récupérées auprès des agences de l'eau et/ou des DREAL. Elles sont centralisées par le Cemagref dans l'attente d'une banque d'informations opérationnelle de niveau national. L'étude est restreinte au compartiment biologique « macro-invertébrés » et « diatomées », car nous disposons, du fait des activités du laboratoire, d'outils d'interprétation par rapport aux traits biologiques. De plus, l'échelle temporelle de réponse des macro-invertébrés et des diatomées à la physico-chimie est optimale dans le cadre de l'étude. Elle est l'ordre de l'année pour les macro-invertébrés et du trimestre pour les diatomées. Le travail sur les diatomées est réalisé en collaboration avec J. Rosebery et S. Morin du Cemagref de Bordeaux.

² A la date du 30/09/2010.

2.2. Vérification des données de physico-chimie

La base de données de physico-chimie du Cemagref présentait un certain nombre d'erreurs liées majoritairement aux différentes phases d'import et de formatage de données et plus sporadiquement à de mauvaises spécifications de champs. Cette étape d'harmonisation et de vérification des données de physico-chimie (repérage et correction des problèmes) est nécessaire et indispensable pour la suite du travail. Du fait de son volume, l'effort de nettoyage de la base entière a nécessité du temps et a constitué la majeure partie du travail de 2009. La base de travail est désormais estimée opérationnelle à 95% (Bougon et Ferréol, 2010).

Ce travail a nécessité la prise de contact avec un correspondant de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse afin d'identifier la source des erreurs, et de savoir quelle validité il est possible d'accorder aux données collectées à la BNDE.

2.2.1. Vérification cohérence / validité du jeu de données physico-chimiques

Une analyse des champs « résultats (données de chimie) » dans le jeu de données physico-chimiques a permis d'affiner le travail de nettoyage de la base. En effet, la première étape de nettoyage de la base peut se faire de façon systématique ; en revanche, l'identification de possibles erreurs de remplissage du champ « résultats » nécessite une analyse des données de chimie. Cela ne peut être effectué de façon systématique car des valeurs peuvent être considérées comme aberrantes (très élevées ou faibles) alors qu'elles sont caractéristiques du système.

Pour vérifier le jeu de données physico-chimiques, l'analyse s'est concentrée sur la période 2003-2008. Deux types majeurs d'analyses ont été effectués : une analyse de la distribution (moyennes, quantiles 90, médianes) et une vérification des balances ioniques par hydro-écorégion. Les hydro-écorégions correspondent à une régionalisation de la typologie des écosystèmes d'eau courante adaptée aux préconisations de la directive cadre européenne sur l'eau. Les hydro-écorégions de niveau 1 ont été identifiées sur des critères combinant le relief, la géologie et le climat.

L'analyse de la distribution a été réalisée sur données couvrant la période 2003-2007. Sur cette période, une sélection a été effectuée sur les sites présentant à la fois des prélèvements biologiques et physico-chimiques. Cette analyse a été réalisée pour les paramètres décrivant la minéralisation (conductivité à 25°C), l'acidification (pH), l'oxygénation (taux de saturation et O₂ dissous) et la température des cours d'eau.

Cette analyse a permis de mettre en évidence des valeurs considérées comme « suspectes » ; par exemple : la présence d'un grand nombre de valeur de pH=0 ; d'autres paramètres correspondant au même prélèvement avaient aussi 0 comme valeur. Ainsi ces valeurs ont été retirées du jeu de données, car 0 correspond ici à une absence de résultat.

La vérification de la balance ionique et la cohérence entre la composition chimique en éléments chimiques majeurs et la conductivité électrique permettent de s'assurer de la qualité et de la fiabilité des données.

Vérification de la balance ionique :

L'analyse de la balance ionique consiste à vérifier l'équilibre entre la charge cationique et anionique d'une solution. Les solutions sont électriquement équilibrées et donc la somme des charges positives (ou cationiques) est égale à la somme des charges négatives (ou anioniques). L'écart relatif permet d'apprécier la qualité des résultats d'analyse. Les paramètres utilisés pour la somme des charges cationiques sont : NH₄⁺, K⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺ et

Na^+ et pour la somme des charges anioniques : HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^- , PO_4^- . La figure 1, représentant la somme des anions (Σ^-) en fonction de la somme des cations (Σ^+) en meq/l, montre un équilibre entre les charges positives et charges négatives mesurées dans les eaux. Les analyses, réalisées par hydro-écorégions, ont donc pris en compte l'essentiel des éléments présents dans l'eau. Cela a été observé pour la majorité des hydro-écorégions.

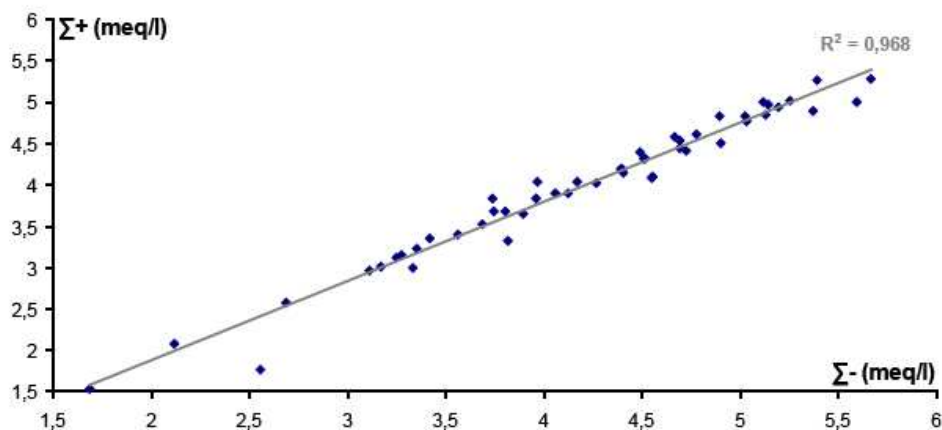


Figure 1. Somme des anions (Σ^-) versus Somme des cations (Σ^+), exemple de l'HER 5, Jura PréAlpes du Nord. Chaque point représente la Σ^- et la Σ^+ pour un site donné, et une date de prélèvement donnée.

Cohérence entre la composition chimique en éléments chimiques majeurs et la conductivité électrique :

La TDS (Total Dissolved Solids) est la somme des concentrations en mg.l^{-1} des anions et des cations mesurés en laboratoire. La conductivité électrique en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ mesurée sur le terrain est fonction de la charge dissoute de l'eau ; une relation quasi linéaire existe entre la conductivité électrique et la TDS calculée à partir des analyses de laboratoire.

La figure 2 présente la TDS en fonction de la conductivité électrique, avec nos données. On observe une bonne corrélation entre ces paramètres ; il n'y a pas de problème majeur lors des analyses ni de problème de mesures de conductivité pour la majorité des hydro-écorégions.

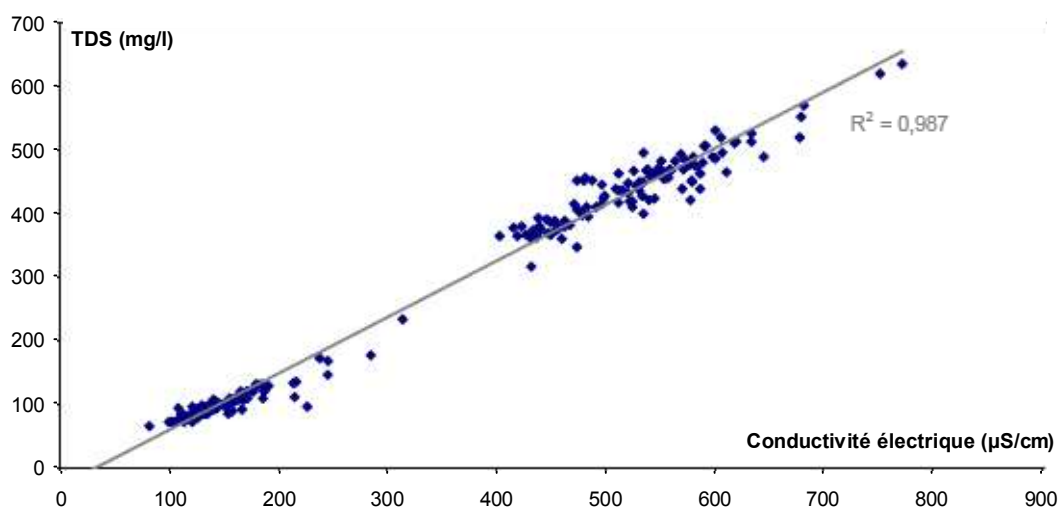


Figure 2. TDS versus la conductivité électrique de l'eau, exemple de l'HER10, Côtes calcaire Est. Chaque point représente la Σ^- et la Σ^+ pour un site donné, et une date de prélèvement donnée.

3. Caractérisation physico-chimique des cours d'eau de référence

3.1. Détermination de l'échelle spatiale :

3.1.1. Hydro-écorégions de niveau 1

Une première approche a consisté à comparer la distribution de la minéralisation (représentée par la conductivité électrique) sur la période 2003-2008, sur les sites de référence par hydro-écorégion en utilisant une représentation en boxplot (figure 3).

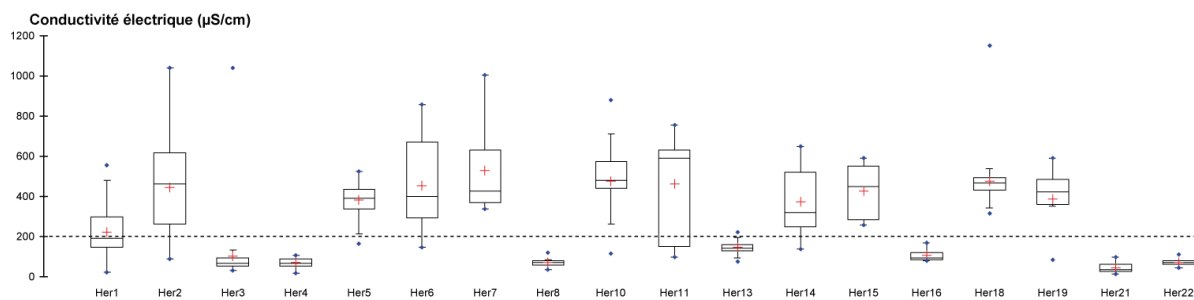


Figure 3 : Distribution de la minéralisation, représentée par la conductivité électrique, des cours d'eau par hydro-écorégion. La ligne en pointillés indique la limite supérieure des hydro-écorégions à faible minéralisation. Les box plot ont été réalisés avec l'ensemble des valeurs de conductivité des sites suivis.

Cette approche permet de mettre en évidence trois regroupements d'hydro-écorégions sur la base de la conductivité électrique : groupe 1, conductivité $<200\mu\text{S/cm}$; groupe 2, conductivité $400-600\mu\text{S/cm}$; et groupe 3, conductivité à variabilité importante.

On peut ainsi caractériser trois groupes déjà mis en évidence dans le cadre de travaux antérieurs sur la définition des hydro-écorégions françaises métropolitaines (Wasson et al., 2002) et les travaux de Meybeck (1986).

Les limites de classe ont été appréciées sur la base de ces travaux et des résultats issus des données réseaux. Elles sont plus facilement identifiables en considérant les hydro-écorégions séparément. On peut ainsi définir une limite entre les groupes 1 et 2 autour d'une conductivité à $180\mu\text{S/cm}$, et entre les groupes 2 et 3 à une conductivité aux alentours de $500\mu\text{S/cm}$.

Le groupe 1 est caractérisé majoritairement par des roches métamorphiques (gneiss, granites), des roches détritiques non carbonatées, et des roches volcaniques.

Les groupes 2 et 3 sont caractérisés majoritairement par des roches détritiques carbonatées et calcaires.

Cependant, certaines hydro-écorégions, de fait de leur hétérogénéité correspondent à plusieurs groupes. En effet, au sein d'une hydro-écorégion donnée, les tronçons de cours d'eau peuvent être influencés par des caractéristiques héritées des hydro-écorégions du bassin amont, notamment en ce qui concerne la physico-chimie de l'eau, le régime hydrologique, la nature des sédiments transportés, et donc la dynamique fluviale (Chandesris et al, 2006). On parle alors de tronçons « exogènes ». L'échelle de travail doit

prendre en compte ce caractère. Par conséquent, l'échelle de l'hydro-écorégion n'est pas la plus pertinente dans le cadre de notre étude.

3.1.2. *Typologie Nationale*

La typologie nationale repose sur les principes suivant lesquels des tronçons de cours d'eau doivent être suffisamment homogènes pour que l'on puisse raisonnablement affecter à tous les éléments d'un même type les mêmes conditions de référence, notamment en termes de peuplements biologiques (Chandesris et al, 2006). Cette typologie constitue donc le point de départ du découpage en « masses d'eaux » naturelles. Elle repose sur la prise en compte du cadre régional (les hydro-écorégions), de la taille des cours d'eau, de l'« héritage amont » (caractère « exogène ») et de la variabilité biologique régionale résiduelle. Le tableau de synthèse est présenté en annexe 1.

3.2. **Analyse :**

Afin d'affiner le travail réalisé à l'échelle de l'hydro-écorégion, une analyse similaire a été effectuée à l'échelle de la typologie nationale.

3.2.1. *Données utilisées*

L'analyse est construite sur la base d'une sélection de paramètres physico-chimiques généraux (30 paramètres³) à partir de sites de référence « conformes » et « intermédiaires » (Mengin et al, 2009) pour lesquels la typologie nationale a été renseignée. Le suivi des sites de référence par les Agences de l'eau a été réalisé sur la période 2004-2007 ; pour les besoins de l'analyse nous avons élargi la fenêtre temporelle sur la période 2003-2008.

Pour caractériser la physico-chimie naturelle des cours d'eau, nous avons choisi d'analyser sans *a priori* le maximum de paramètres physico-chimiques suivis dans les réseaux de surveillance. Les paramètres sont décrits en annexe 2.

3.2.2. *Tri et sélection des données*

Seules les mesures faites sur le support « eau » ont été utilisées. Les valeurs vraiment aberrantes de certains paramètres ont été éliminées du jeu de données.

Une transformation logarithmique a été appliquée sur l'ensemble des valeurs de certaines variables physico-chimiques. La distribution des variables transformées étant plus symétrique, les données deviennent exploitables par des méthodes se basant sur l'hypothèse de normalité. Les données disponibles par site et par variable présentent une forte variabilité de chroniques, nous avons choisi d'utiliser la médiane comme statistique synthétique pour chaque couple site/variable. La valeur médiane permet d'atténuer l'influence perturbatrice des valeurs extrêmes enregistrées lors de circonstances exceptionnelles.

Deux autres tris, sur l'occurrence des mesures par variables et les variables mesurées par site, ont été opérés. Parmi les 30 variables, seules celles mesurées dans au moins 90 % des sites ont été conservées. Parmi les 289 sites, ceux ayant au moins une valeur manquante parmi les variables triées ont aussi été éliminés. Suite à ces opérations de tris, 23 variables et 273 sites ont été conservés. Les 23 variables utilisées dans la suite de l'analyse sont : titre alcalimétrique complet, bicarbonates, azote Kjeldahl, dureté totale, température de l'eau, pH, conductivité, matières en suspension (MES), oxygène dissous, taux de saturation en O₂,

³ Carbone organique, azote global, orthophosphates, fer, sodium, calcium, magnésium, potassium, titre alcalimétrique complet, dureté, silicates, nitrates, nitrites, sulfates, chlorures, ammonium, bicarbonates, azote Kjeldahl, DCO, DBO₅, taux de saturation en O₂, oxygène dissous, MES, conductivité, pH, température de l'eau, carbonates, silice, température de l'air, phosphore total

DBO5 à 20°C, chlorures, sulfates, nitrates, potassium, magnésium, calcium, sodium, orthophosphates, carbone organique, ammonium, nitrites, phosphore total.

3.2.3. *Analyses statistiques*

Trois méthodes ont principalement été utilisées pour cette étude.

La première méthode utilisée est l'analyse en composantes principales normée (ACP) sur l'ensemble des données triées. L'ACP est une projection de données dans un nombre réduit de dimensions orthogonales les unes aux autres. Elle permet de représenter les principales tendances de variabilité des données et donc par extension leur principales structures. Dans cette étude, l'ACP est normée. Cela signifie que la représentation des variables sur les axes factoriels affiche une synthèse graphique de la matrice de corrélation linéaire et leur norme totale est toujours de un (Dolédec et Chessel, 1991; Lebart et al, 1995). Donc les variables projetées sur chaque plan factoriel se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon unitaire. Plus une variable est projetée vers le bord du cercle, plus l'information portée par ce dernier est importante dans le plan de l'ACP étudié. Par ailleurs, deux variables bien représentées et proches l'une de l'autre sont corrélées positivement tandis que deux variables qui s'opposent sont corrélées négativement. Une orthogonalité entre deux variables traduit l'absence de corrélation linéaire.

La seconde méthode est la classification ascendante hiérarchique (CAH). Cette méthode a été utilisée pour regrouper des sites ayant des caractéristiques physico-chimiques similaires. La CAH consiste à agréger progressivement les variables selon leur ressemblance, mesurée à l'aide d'un indice de similarité ou de dissimilarité. La CAH s'applique sur une matrice des distances Euclidiennes, qui dans cette étude est une matrice de distance mesurée entre les sites d'après les valeurs des variables physico-chimiques qui leurs sont associées. Ensuite, les valeurs de distance sont classées dans une arborescence par le critère d'agrégation de Ward. C'est un critère classique dont le principe consiste à détecter un saut remarquable dans les niveaux d'agrégation des classes d'objets. Le nombre de groupes est déterminé graphiquement à partir de la longueur relative des branches de l'arbre. Enfin, ce critère est adapté à une représentation simultanée avec les représentations graphiques des ordinations comme les ACP (Legendre et Legendre, 1998). La superposition des résultats du classement sur le plan de l'ACP pour les sites permet ainsi de détecter des objets mal représentés qui peuvent être proches dans le plan de l'ordination, mais loin dans l'espace (Tomassone et al, 1993).

La troisième méthode est plutôt un procédé de caractérisation et concerne la relation entre les variables et la typologie physico-chimique développée dans cette étude. Les types définis sont analysés, dans un premier temps, sur l'ensemble des plans précédemment identifiés par l'ACP. Ensuite, les gammes de variables au sein de chaque type sont comparées par le test de Kruskal-Wallis, qui effectue une méthode non-paramétrique pour tester l'hypothèse d'égalité des médianes par groupe d'une population. Une p-value inférieure à 0,05 indique que la médiane d'au moins un des groupes est significativement différente des autres. Afin d'accompagner au mieux les résultats de ce test, les distributions de chaque variable par type sont également comparées avec une analyse graphique en « boîte à moustache » afin de détecter celles qui discriminent au mieux chaque type.

3.3. Résultats et interprétations:

3.3.1. Variabilité inter-site vs intra site

L'utilisation de la médiane des valeurs d'une variable mesurée pour chaque site nécessite de vérifier l'absence d'effet temporel dans ses chroniques. Les effets « saison » et « année » pour chaque site ont donc été testés par une analyse en composante principale.

Pour chacun de ces deux cas, la médiane des valeurs par variable physico-chimique a été calculée pour chaque couple site/saison ou site/année. La variabilité liée aux effets « saison » et « année » correspond à la variabilité intra-site (figures 4A et 5A) ou intra-période temporelle, soit la saison (figure 4B) et l'année (figure 5B). La variabilité est représentée par la taille des ellipses. L'ellipse représente les relevés de physico-chimie pour un site ou une période donnée (saison ou année); ainsi plus les ellipses sont grandes, chevauchantes et centrées sur l'origine, moins l'effet du critère de regroupement est marqué. A l'inverse, plus les ellipses sont petites, bien séparées les unes des autres et leur centre respectif éloigné de l'origine, plus l'effet concerné est structurant.

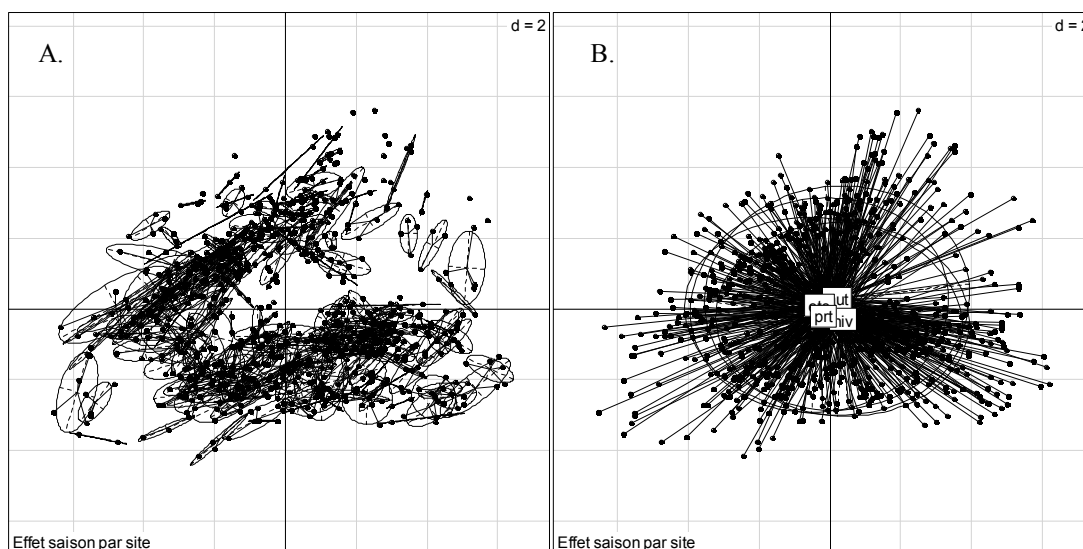


Figure 4. Projection des couples site/saison sur le plan de l'ACP. Les points sont regroupés selon leur site respectif (A) ou leur saison (B).

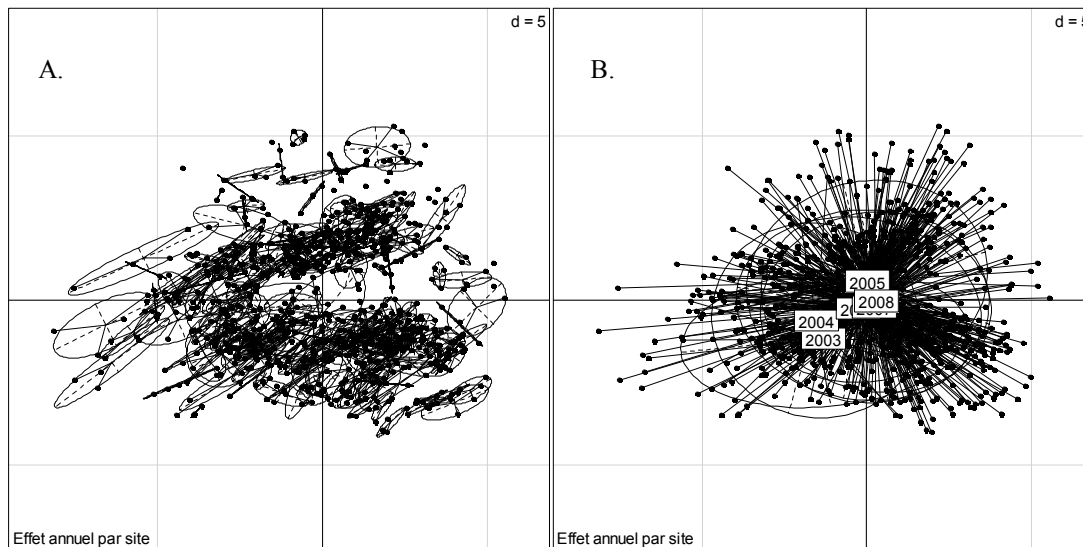


Figure 5. Projection des couples site/année sur le plan de l'ACP. Les points sont regroupés selon leur site respectif (A) ou leur année (B).

Ainsi, les analyses en composantes principales montrent que l'effet saison (figure 4) et l'effet année (figure 5) sont peu marqués et peu significatifs. Les points par site sont toujours bien plus proches entre eux que selon le critère temporel considéré. Ces analyses montrent que l'utilisation de la médiane de toute la chronique par variable et par site n'occultera pas d'éventuel effet temporel.

De plus, les années 2003 et 2004 semblent se différencier des autres années (figure 5). Cela peut s'expliquer par la mise en place du réseau national de suivi de cours d'eau pour la recherche de sites de référence en 2005. Les sites suivis en 2003 et 2004 sont des sites dits de 'référence par défaut' qui ont été conservés et validés comme sites de référence. Ainsi la différenciation des années 2003/2004 avec les autres années est liée au nombre de sites suivis.

3.3.2. *Caractérisation des médianes des valeurs physico-chimiques par site*

L'analyse en composantes principales faite sur les valeurs médianes de physico-chimie (figure 6) différencie distinctement les variables « nutriments », température et matières en suspension des paramètres caractérisant la dureté et l'acidité (sulfate et pH) de l'eau.

Les variables caractérisant la dureté et l'acidification sont distribuées le long de l'axe 1 et les variables caractérisant de « nutriments » et la température de l'eau sur l'axe 2. La température de l'eau est négativement corrélée au taux de saturation en oxygène (et concentration en oxygène dissous). Cette relation est bien connue, et a été largement décrite dans la bibliographie. Les eaux les plus oxygénées sont aussi les plus froides.

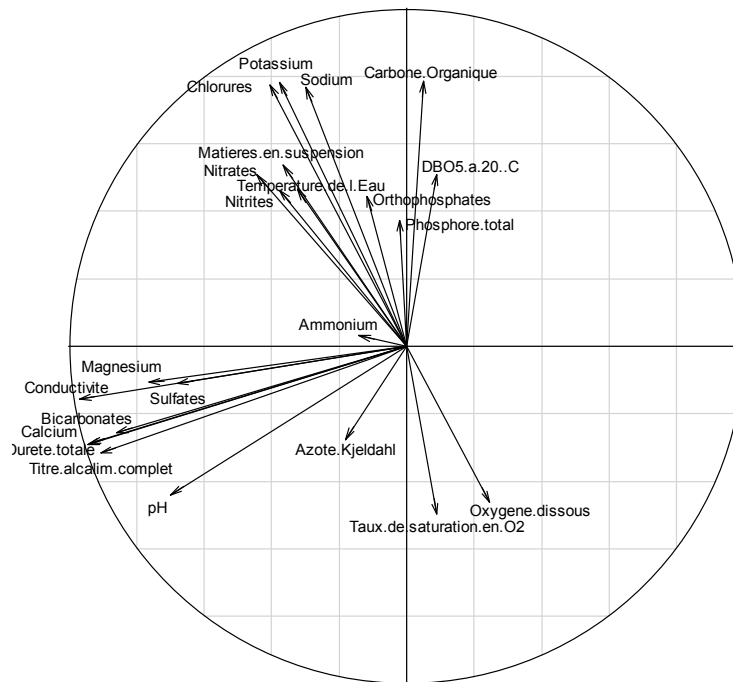


Figure 6. Projection des variables physico-chimiques sur un cercle des corrélations issu du premier plan d'une analyse en composantes principales faite sur les valeurs médianes des variables physico-chimie par site.

3.3.3. Première subdivision

La projection des sites par hydroécocorégion (figure 7) fait apparaître deux groupes distincts :

- i. un groupe réunissant les hydroécocorégions : Massif Central Sud (3), Vosges (4), Cévennes (8), Massif Armoricain (12), Landes (13), Corse (16), Dépression sédimentaires (17), dépôts Argilo-Sableux (20) et Massif central nord (21); et
- ii. un groupe réunissant les Hydroécocorégions : Pyrénées (1), Alpes (2), Jura (5), Méditerranée (6), Préalpes (7), Tables Calcaires (9), Cotes Calcaires de l'Est (10), Causses Aquitains (11), Coteaux Aquitains (14), Plaine de Saône (15), Alsace (18) et Grands Causses (19).

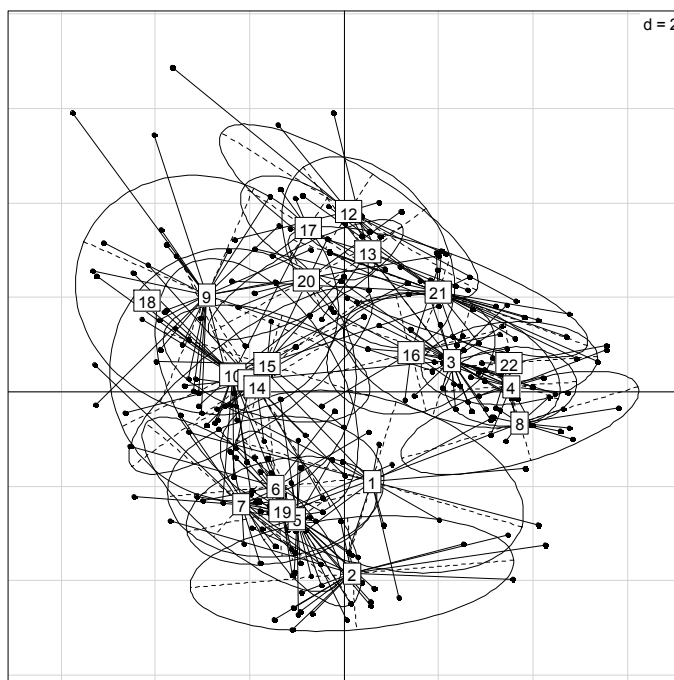


Figure 7. Projection des sites sur le plan de l'ACP et regroupés par hydroécocorégion.

Cette différenciation en deux groupes est confirmée par la méthode de Classification hiérarchique ascendante (figure 8).

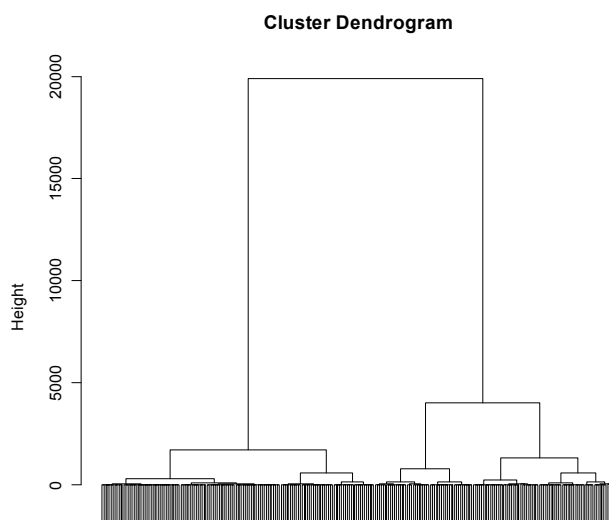


Figure 8. Classification Hiérarchique Ascendante, selon la méthode de Ward, sur la matrice des distances Euclidiennes entre les sites d'après les valeurs médianes de physico-chimie.

Ainsi ce premier découpage montre que les cours d'eau en France sont majoritairement structurés par la dureté de l'eau. On distingue ainsi :

- un groupe d'eaux dures/calcaires *i.e.* avec des conductivités élevées regroupant les HER Pyrénées (1), Alpes (2), Jura (5), Méditerranée (6), Préalpes (7), Tables Calcaires (9), Côtes

Calcaires de l'Est (10), Causses Aquitains (11), Coteaux Aquitains (14), Plaine de Saône (15), Alsace (18) et Grands Causses (19) ;

- et un groupe d'eaux douces/métamorphiques *i.e.* avec des conductivités plus faibles regroupant les HER : Massif Central Sud (3), Vosges (4), Cévennes (8), Massif Armoricaïn (12), Landes (13), Corse (16), Dépression sédimentaires (17), dépôts Argilo-Sableux (20) et Massif central nord (21).

Il est à noter que la forte corrélation existant entre plusieurs variables liées à la dureté de l'eau explique la prédominance de ce critère. Mais cette dernière persiste en triant ces variables. Par contre, en les conservant comme cela est fait, on maximise l'efficacité de l'allocation dichotomique de chaque site dans ces deux groupes.

3.3.4. *Seconde subdivision et typologie physico-chimique finale*

Pour déterminer si d'autres variables structurent le jeu de données, l'effet de la conductivité ainsi que celui des variables qui lui sont fortement corrélés (TAC, dureté totale, bicarbonates et magnésium) a été éliminé tout en travaillant par sous-groupe. Le calcium et le magnésium ont été conservés comme « étalons internes » de l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Il reste donc les variables suivantes : le calcium, l'azote Kjeldahl, la température de l'eau, le pH, les matières en suspension, l'oxygène dissous, le taux de saturation en O₂, la DBO₅ à 20°C, les chlorures, les sulfates, les nitrates, le potassium, le magnésium, le sodium, les orthophosphates, le carbone organique, l'ammonium, les nitrites, le phosphore total.

Ces variables ont été triées par sous-groupe selon la procédure suivante :

Une analyse en composantes principales sur variables instrumentales orthogonales est réalisée séparément sur les deux « sous-jeux » de données. Il s'agit d'une ACP utilisant les variables mentionnées ci-dessus auxquelles on a soustrait l'effet des quatre variables liées à la dureté de l'eau (conductivité, TAC, dureté totale et bicarbonates). Les variables respectivement les plus influentes dans les deux analyses ont alors été retenues (d'après leurs inerties relatives dans les deux premiers axes propres).

Les variables retenues dans le sous-groupe des eaux dures sont : la DBO₅ à 20°C, le potassium, l'azote Kjeldahl, les orthophosphates, les nitrites, les chlorures, l'oxygène dissous et le pH.

Les variables retenues dans le sous-groupe des eaux douces sont : le carbone organique, le potassium, l'azote Kjeldahl, les orthophosphates, les chlorures, les nitrites et l'oxygène dissous.

Enfin, des classifications hiérarchiques ascendantes paramétrées comme précédemment ont été appliquées sur ces deux « sous-jeux » de données et ont permis de distinguer à chaque fois un découpage en trois classes (représentés sur la figure 9).

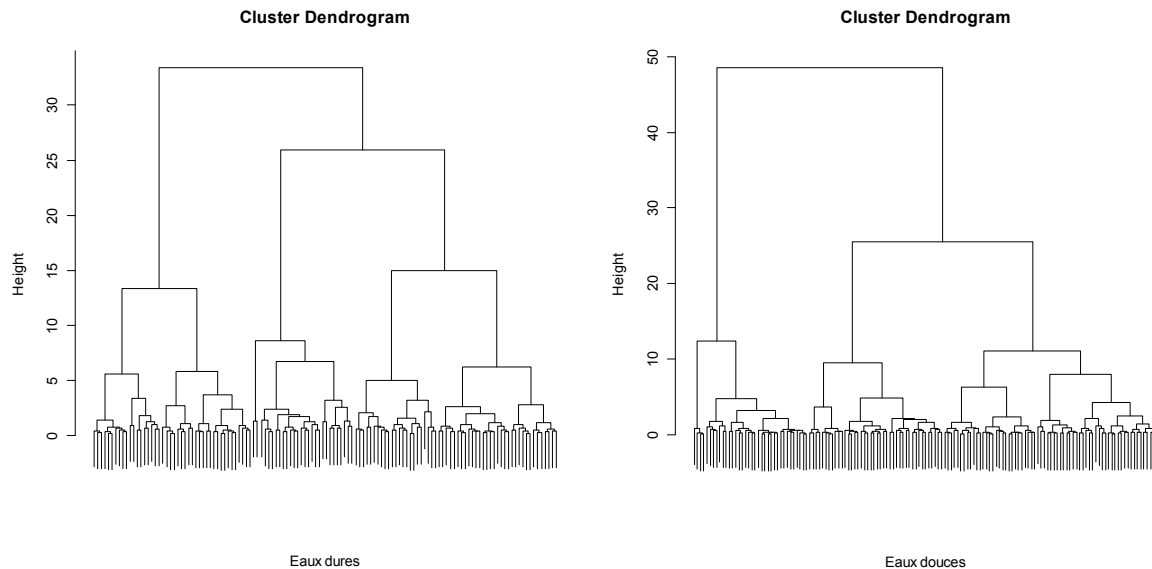


Figure 9. Classification hiérarchique ascendante, selon la méthode de Ward, sur les valeurs médianes des sélections de variables physico-chimiques par sous groupe de dureté, *i.e.* H : eaux dures et S : eaux douces.

3.3.5. Caractérisation des types physico-chimiques

Des tests de Kruskal-Wallis ont été effectués pour les 30 variables de départ afin de comparer les médianes par type physico-chimique. Hormis pour la D.C.O. et l'ammonium (p -value respectives 0.078 et 0.355), tous les tests indiquent une différence significative pour au moins un des types (p -value < 0.05).

Le tableau 1 présente les valeurs médianes pour chaque sous-groupe de variables utilisé pour réaliser la typologie physico-chimique des cours d'eau métropolitains. En couplant ces résultats avec la projection des sites sur le plan de l'ACP (figure 10), on retrouve la distinction typologique. Il est donc aisé de reprendre la projection des variables physico-chimiques (figure 6) pour caractériser les six types.

Chacune des sous-classes se différencie, entre autres, par la localisation géographique des sites. Les sites de haute altitude sont retrouvés en H1 et en S1 ; alors que ceux de basse altitude seront en H3 et S3. En H2 et en S2 sont regroupés les sites à relief peu marqué. La variable discriminante entre les sites en H2 et en H3 ne semble pas être l'altitude, les valeurs médianes d'altitude sont similaires (figure 11). Les valeurs médianes de physico-chimie sont bien différenciées (tests de Kruskal-Wallis ; tableau 1). En complément des tests de Kruskal-Wallis, les distributions par types physico-chimiques présentées en annexe 3 pour les 30 variables permettent de mieux les discriminer.

En définitive, les sites de basse altitude sont caractérisés par des concentrations en nutriments plus élevées, plus riches en chlorures, en silice et en matières en suspension et moins bien oxygénés. Les sites de haute altitude sont caractérisés par des eaux mieux oxygénées, pauvres en nutriments et une conductivité plus faible (charge organique et minérale plus faible).

Tableau 1. Valeurs médianes de paramètres physico-chimiques par types physico-chimiques.

types	Conductivité (µS/cm)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	Mg ⁺⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	MES (mg/kg)	Cl ⁻ (mg/L)	pH	T°C l'eau	Saturation en O ₂ (%)	Corg (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	NKJ (mg/L)	
Eaux dures	H1	474	73.5	9.0	4	4.4	8.1	8	9	96	1	0.03	0.02	2.2	0.05	1
	H2	531	91.4	5.8	6.9	7	18	8	11.3	96	2.4	0.10	0.05	14.3	0.05	1
	H3	591	104	5.5	10.6	10	29	8	12.5	90.6	3.4	0.13	0.08	20.6	0.06	1
Eaux douces	S1	109	7.8	2.0	4.3	2	5	8	9.1	97	1.5	0.06	0.03	2.2	0.05	1
	S2	115	8.1	2.4	9.7	5.8	8.7	7	12	95	3.9	0.07	0.03	5.3	0.05	1
	S3	221	16	4.5	10.3	8	18.7	7	12.1	93.4	4.5	0.08	0.05	17.4	0.05	0.8

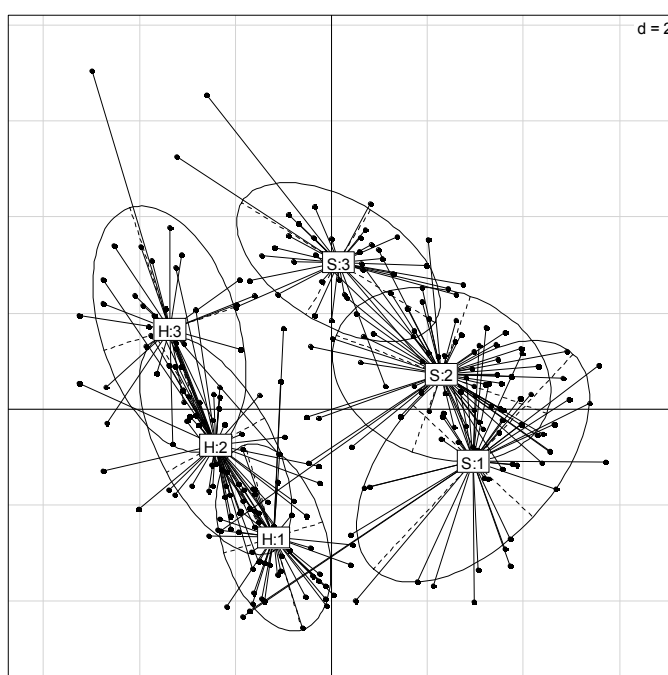


Figure 10. Distribution des sites par sous-groupe de dureté (H : eaux dures et S : eaux douces) sur l'ACP réalisée sur tous les sites.

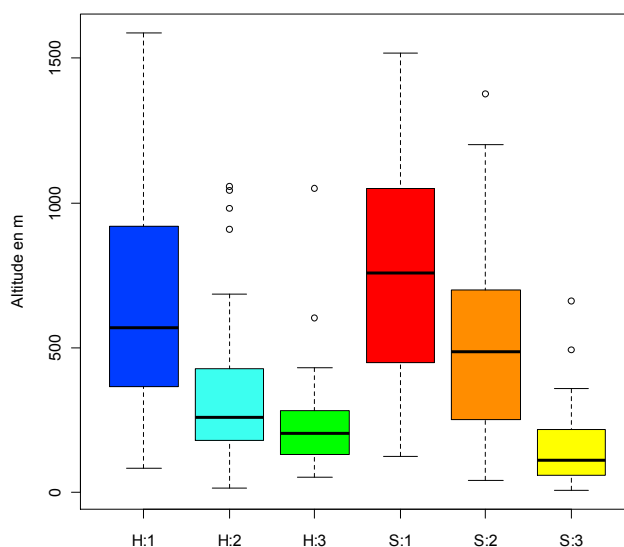
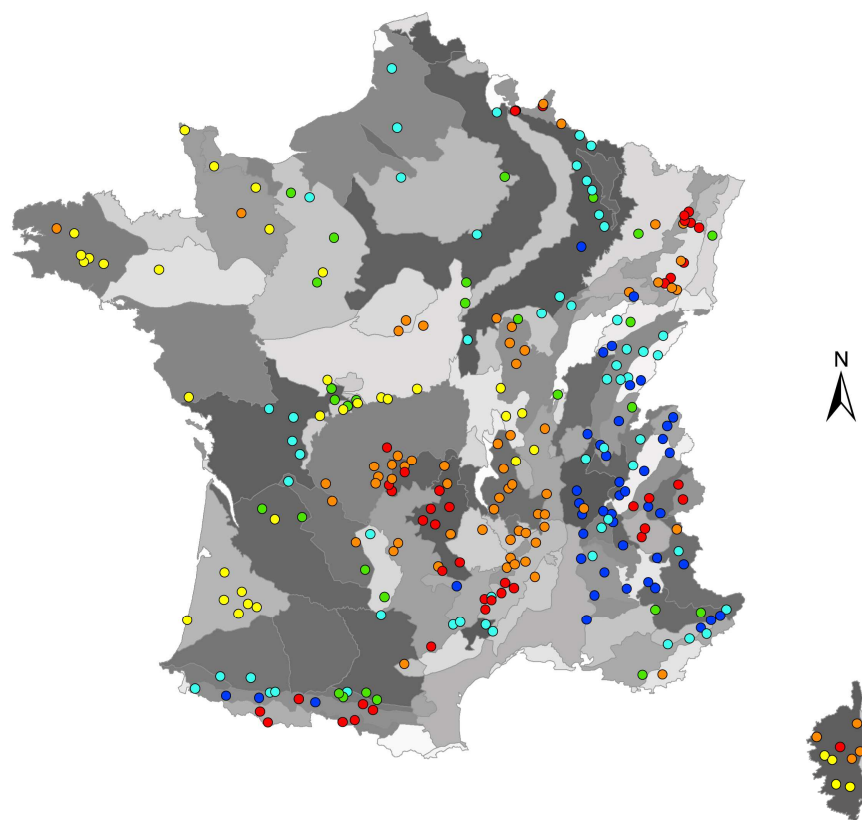


Figure 11. Distribution des altitudes des sites par sous-groupe suivant leur typologie physico-chimique (H : eaux dures et S : eaux douces) sur l'ACP réalisée sur tous les sites.

3.4. Conclusion :

La typologie physico-chimique est basée sur les données issues des sites de référence « conformes » et « intermédiaires ». Le paramètre le plus discriminant est la concentration en calcium dans les eaux ; un découpage net se fait entre les eaux dites 'dures' et les eaux 'douces'. Au sein de ces deux groupes, des sous-groupes sont définis selon le gradient de trophie et l'altitude.

On a ainsi pu caractériser six types physico-chimiques distincts suivant leur dureté, leur positionnement géographique et leur concentration en nutriments (figure 12). Ces six groupes à caractéristiques physico-chimiques similaires nous serviront par la suite à redéfinir la limite de classe de bon état pour les paramètres physico-chimiques généraux. Pour établir le lien avec les sites du réseau de contrôle de référence, la typologie nationale est utilisée. A chaque site du réseau de référence, utilisé pour construire la typologie physico-chimique, et du réseau de contrôle de surveillance (RCS) un de 124 types nationaux a été attribué. Un type physico-chimique est un regroupement de différents types nationaux.



Types Physico-chimiques

Eaux dures		Eaux douces	
● H1-Hautes altitudes	● S1-Hautes altitudes	● S2-Intermédiaires	● S3-Basses altitudes
● H2-Intermédiaires			
● H3-Basses altitudes			

Figure 12. Représentation de la typologie physico-chimique sur les sites du réseau de référence.

4. Attribution des types chimiques aux sites du réseau national de contrôle de surveillance à partir de l'information sur la typologie nationale.

La correspondance entre les types nationaux des sites de référence utilisés pour construire la typologie chimique et ceux des sites du réseau de contrôle de surveillance (RCS) est effectuée en utilisant la typologie nationale comme clé d'entrée. On affecte à chaque type national le type physico-chimique correspondant. Pour les types nationaux (en particulier les types nationaux grands cours d'eau) ne possédant pas de sites de référence, aucun type physico-chimique n'a pu être attribué.

La démarche adoptée se déroule en deux étapes :

- la première étape consiste à effectuer un lien direct entre la typologie nationale et la typologie chimique à partir des sites de référence,
- la seconde étape consiste, à partir d'un avis d'expert, à confirmer ou modifier ces liens directs sur la base de critères spatiaux et géologiques.

Lorsque les critères géographiques ne permettent pas de discriminer l'appartenance d'un type national à différents types physico-chimique, le type physico-chimique dominant et représentatif de l'HER a été choisi.

La difficulté de l'analyse en lien direct réside dans la définition du site de référence. Les sites les moins impactés par des pressions peuvent être localisés en périphérie des hydro-écorégions et ne sont alors que peu représentatifs chimiquement de celle-ci. L'analyse sur les critères géographiques est essentielle et indispensable.

Pour les sites de référence qui ne sont pas assez représentatifs de l'hydroécorégion considérée et/ou pour lesquels il y a peu de données, des données de concentration en calcium, en silice et de conductivité des sites du RCS pour l'hydroécorégion considérée ont été utilisées :

- cela a été le cas pour les types nationaux, P et TP 14 ainsi que pour TP5,
- pour le type G2, le site de référence est un cas particulier et n'est pas représentatif de l'hydroécorégion Alpes internes ; son type physico-chimique a été validé à partir des concentrations en calcium, en silice et de conductivité des sites du RCS,
- pour le type G9/10-21, le site de référence est plus caractéristique de G9 que de G 10-21. On ne tient pas compte du site de référence et on attribue le type physico-chimique selon son caractère exogène.
- pour le type M10, le site de référence est un site très atypique par rapport au M10. Il présente des caractéristiques plus proches des Vosges que de la Marne (cours d'eau la Lanterne). On ne tient pas compte du site de référence et on attribue le type physico-chimique selon les sites du réseau de contrôle de surveillance.

Un sous-découpage par hydroécorégion de niveau 2 a été effectué pour certaines typologies nationales pour une meilleure prise en compte des caractéristiques spatiales et géologiques :

- pour les types nationaux MP2 et TP2 dans l'HER de niveau 1 n°2, on distingue les sites à dominance eau de glacier (Her de niveau 2 n°10 et 12) des autres sites (Her de niveau 2 n°107 et 9),

- pour le type national P3 dans l'HER de niveau 1 n°2, on distingue les sites de l'Her de niveau 2 n°91 (volcanisme) des autres sites,
- pour le type national M5 dans l'HER de niveau 1 n°5, on distingue les sites à dominance géologiques Jurassienne (Her de niveau 2 n°2, 3 et 5) des sites à dominance géologiques préAlpes du Nord (Her de niveau 2 n°6, 79 et 80),
- pour le type national MP6 dans l'HER de niveau 1 n°6, la particularité géologique du massif de l'Estérel est prise en compte (HER de niveau 2 n°108),
- pour le type national TP9, les eaux sont majoritairement dures (H). Mais il existe aussi des eaux plus douces (S) ; ex : sites 4090802 et 4091327 qui sont en périphérie qui dépendent du socle *i.e.* de HER 21 ; et les sites 4068483 et 4108290 : ils sont sur des particularités géologiques *i.e.* présence de patch d'argiles, qui influencent les résultats des analyses biologiques.

La correspondance entre la typologie physico-chimique et la typologie nationale est présentée dans les tableaux 2 et 3. Le tableau complet avec les commentaires est présenté en annexe 4.

Tableau 2. Correspondance entre la typologie physico-chimique et la typologie nationale.

	Typologie chimique	Typologie nationale
Eaux dures	H1 Hautes altitudes	P5
		TP5
		GMP7
		TP7
		TP15
	H2 Altitudes intermédiaires	G2
		G5
		MP6
		TP6
		G9
		M9
		P9-A
		G10
		M10
		P10
TP10		
TP11		
G14/1		
P14/1		
MP15		
MP15/5		
P19		
H3 Basses Altitudes	GM7/2	
	P9	
	P14	
	TP14	
	TP18	

	Typologie chimique	Typologie nationale
Eaux douces	S1 Hautes altitudes	M1
		TP2
		M4
		TP4
		PTP8
		PTP8-A
		PTP16-A
		P22
		TP22
		S2 Altitudes intermédiaires
	P3	
	TP3	
	P4	
	GM8	
	G10/4	
	G11/3-21	
	M11/3-21	
	G16	
	M16-A	
	TP17	
	G21	
	M21	
	P21	
	TP21	
	S3 Basses Altitudes	G9-10/21
		M9-10/21
		M12-B
		P12-A
		P12-B
		TP12-A
TP12-B		
M13		
P13		
TP13		
M15-17/3-21		
P17		
P17/3-21		
GM19/8		

Tableau 3. Correspondance entre la typologie physico-chimique et la typologie nationale, prise en compte des hydroécorégions de niveau 2.

Typologie nationale	Typologie chimique	Commentaire(s)	Typologie nationale	Typologie chimique	Commentaire(s)
P1		Problématique car les couches géologiques sont perpendiculaires aux surfaces des HER2	P5	H1	
P1:67	H2		P5:2	H2	
P1:77	H2		P5:3	H2	
P1:95	S1		P5:5	H2	
P1:96	S1		P5:11	H2	
TP1	H1		P5:76	H2	
TP1:94	S1		TP5	H1	
TP1:95	S1		TP5:2	H2	
TP1:96	S1		TP5:3	H2	
MP2		eau de glacier	MP6	H2	Cas particulier du massif de l'Esterel.
MP2:9	H1		MP6:108	S3	
MP2:107	H1		TP6	H2	Cas particulier du massif de l'Esterel.
MP2:10	S1		TP6:108	S3	
MP2:12	S1		P9	H3	
TP2	S1	eau de glacier	P9:41	S3	
TP2:9	H1		P9:92	S3	
TP2:107	H1		TP9		
TP2:10	S1		TP9:36	H3	
TP2:12	S1		TP9:54	H3	
P3	S2	<i>tous en S2 sauf HER2 91</i>	TP9:97	H3	
P3:91	S1		TP9:41	S3	Cas particulier
M5		dominance Jura	TP9:92	S3	Cas particulier
M5:2	H2		P20		
M5:3	H2		P20:28	S2	
M5:5	H2		P20:42	S2	
M5:11	H2		P20:31	H2	
M5:76	H2		P20:33	H2	
M5:6	H1		P20:39	H2	
M5:79	H1		P20:119	H2	
M5:80	H1	dominance Pré-Alpes du Nord			

Les types nationaux sans site de référence et sans type physico-chimique représentent 8 % du linéaire total des masses d'eau DCE, soit 17 813 km sur un total de 218 053 km. Les plus grands cours d'eau sont majoritaires parmi ces exceptions.

La liste des 49 types non attribués à un type physico-chimique est la suivante:

G1, G12, G14/3, G17/3-21, G18/4, G3, G3/19-8, G6, G9/10, GM14, GM20, GM20/9, GM5/2, GM6/1, GM6/2-7, GM6/8, M10/4, M12-A, M14/1, M14/3-11, M14/3-8, M16-B, M18/4, M3/19, M3/8, M8-A, M9-A, M9/10, MP18, P11, P11/3-21, P18/4, PTP16-B, TG10-15/4, TG11/3-21, TG14/1, TG14/3-11, TG15, TG17/3-21, TG22/10, TG5/2, TG6-7/2, TG6/1-8, TG9, TG9/21, TP17/3-21, TP20, TTGA, TTGL.

Conclusion.

L'application de la typologie physico-chimique à l'ensemble des sites du réseau de contrôle de surveillance est présentée sur la figure 14. Cette représentation cartographique reflète bien les grands ensembles géologiques français. Les massifs anciens (massif armoricain, les Vosges et le massif central) sont caractérisés par une eau douce alors que les massifs plus récents (Alpes et Pyrénées) par des mélanges d'eaux dures et d'eaux douces. Le bassin de Paris est caractérisé par des eaux globalement dures. Le bassin aquitain présente un mélange d'eaux dures et d'eaux douces, ces dernières étant localisées dans les Landes.

La typologie physico-chimique issue de cette étude tient compte du contraste géochimique global des cours d'eau métropolitains. La prochaine étape consiste à décliner par types physico-chimiques les seuils des classes d'état des paramètres physico-chimiques généraux calibrés à partir des différents indices biotiques qui seront normalisés par types nationaux.

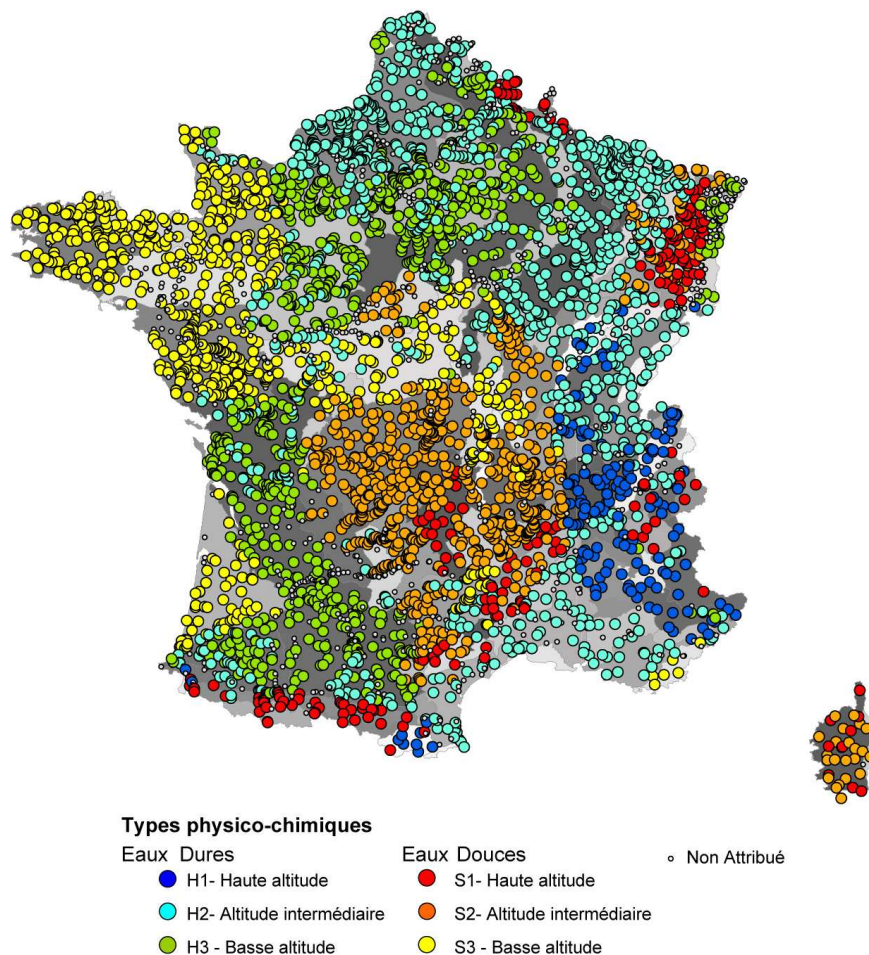


Figure 13. Représentation de la typologie physico-chimique sur l'ensemble des sites du réseau de contrôle de surveillance. (non attribué : types nationaux sans sites de référence)

Livrables et jalons

Cette note constitue une première partie du travail sur le lien entre la physico-chimie et la biologie (problématique générale : pressions/état écologique). L'étape suivante consistera à décliner par types physico-chimiques généraux un choix de valeurs seuils pour les règles d'évaluation, ainsi que d'indicateurs physico-chimiques au niveau éléments de qualité.

Bibliographie :

- Bougon, N. and Ferréol, M. (2009). Rapport d'avancement sur la Physico-chimie soutenant la biologie. Action 18, domaine QME.
- Chandesris, A., Wasson, J.G. et al. (2006). Typologie des cours d'eau de France métropolitaine. Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau. Lyon, Cemagref, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable : 62 p.
- Dolédec, S., and, Chessel, D. (1991). Recent developments in linear ordination methods for environmental Sciences. *Advances in Ecology*, 1, 133-155.
- Lebart, L., Morineau, A., and Piron, M. (1995). Statistique exploratoire multidimensionnelle. Dunod, Paris.
- Legendre, P. and Legendre, L. (1998). Numerical ecology, 2nd English edition. Elsevier Science BV, Amsterdam. 853 pp
- Mengin, N., Bougon, N., Chandesris, A., Oraison, F., Souchon, Y., Valette, L. and Villeneuve, B. (2009). Réseau de référence des eaux douces de surface – cours d'eau Rapport V0 Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon MAEP-LHQ, 63 p
- Meybeck M. (1986) Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. *Bulletin de la Société Géologique de France* 39 : 3-77
- Nisbet M. and Verneaux, J. (1970). Composantes chimiques des eaux courantes. *Annales de Limnologie* 6 : 161-190.
- Salpeteur, I. and Angel, J.M. (2010). Valeurs de référence pour les teneurs en éléments traces dans les eaux de rivières et les sédiments, obtenues en France dans le cadre du nouvel Atlas géochimique européen (I). *Environnement, Risques & Santé*. 9 : 121-35
- Tomassone, R., Dervin, C. and Masson, J.P. (1993). Biometrie: modelisation de phénomènes biologiques. Masson, Paris
- Wasson, J.G., Chandesris, A., Pella, H. and Blanc, L. (2002). Définition des Hydro-écorégions françaises métropolitaines. Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Rapport, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Cemagref Lyon BEA/LHQ, 190 p
- Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement. NOR: DEVO1001032A
- Circulaire DE/ MAGE/BEMA 04/n° 18 (n° DCE 2004/08) relative à la constitution et la mise en œuvre du réseau de sites de référence pour les eaux douces de surface (cours d'eau et plans d'eau) en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Liste des annexes

- Annexe 1 : Tableau des types nationaux pour les cours d'eau de France métropolitaine (issu de la circulaire DCE 2005-11)
- Annexe 2 : Liste des paramètres physico-chimiques généraux
- Annexe 3 : Distributions par types physico-chimiques des valeurs pour les différentes variables utilisées dans cette étude
- Annexe 4 : Tableaux de synthèse (avec commentaires) de la correspondance entre la typologie physico-chimique et la typologie nationale

ANNEXE 1

Tableau des types nationaux pour les cours d'eau de France métropolitaine (issu de la circulaire DCE 2005-11). A une case correspond un type de masses d'eau présentant des caractéristiques similaires avec une classe de taille, une unité géographique de situation et une particularité locale ou l'influence éventuelle d'une hydro-écorégion amont.

version 07/09/09

			Types nationaux et leur codification					
			8, 7	6	5	4	3, 2, 1	
			Rangs (bassin Loire-Bretagne)					
			Rangs (autres bassins)					
			8, 7, 6	5	4	3	2, 1	
Hydroécorégions de niveau 1			Très Grands	Grands	Moyens	Petits	Très Petits	
Cas général ou cours d'eau exogène de l'HER de niveau 1 indiquée ou HER de niveau 2								
20	DEPOTS ARGILO SABLEUX	Cas général		GM20		P20	TP20	
		Exogène de l'HER 9 (Tables Calcaires)		GM20/9				
		Exogène de l'HER 21 (Massif Central Nord)						
21	MASSIF CENTRAL NORD	Cas général		G21	M21	P21	TP21	
		Exogène de l'HER 19 (Grands Causses)		G3	M3	P3	TP3	
3	MASSIF CENTRAL SUD	Cas général		M3/19				
		Exogène de l'HER 8 (Cévennes)		M3/8				
		Exogène de l'HER 19 ou 8		G3/19-8				
17	DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	Cas général			M17	P17	TP17	
		Exogène de l'HER 3 ou 21 (M.Cent.S ou N)	TG17/3-21	G17/3-21	M15-17/3-21		P17/3-21	TP17/3-21
15	PLAINE SAONE	Exogène de l'HER 3 ou 21		G15/5	MP15/5			
		Exogène de l'HER 5 (Jura / Prê-Alpes du Nord)						
		Cas général	TG15	MP15		TP15		
5	JURA / PRE-ALPES DU NORD	Exogène de l'HER 4 (Vosges)	TG10-15/4					
		Cas général		G5	M5	P5	TP5	
TTGA	FLEUVES ALPINS	Exogène de l'HER 2 (Alpes Internes)	TG5/2	GM5/2				
2	ALPES INTERNES	Cas général	TTGA					
7	PRE-ALPES DU SUD	Cas général		G2	MP2		TP2	
		Exogène de l'HER 2 (Alpes Internes)		GMP7		TP7		
6	MEDITERRANEE	Exogène de l'HER 2 (Alpes Internes)	TG6-7/2	GM7/2				
		Exogène de l'HER 2 ou 7						
		Exogène de l'HER 7 (Prê-Alpes du Sud)		GM6/2-7				
		Exogène de l'HER 8 (Cévennes)	TG6/1-8	GM6/8				
8	CEVENNES	Exogène de l'HER 1 (Pyrénées)		GM6/1				
		Cas général		G6	MP6		TP6	
		Cas général		GM8		PTP8		
16	CORSE	A-her2 n°70		M8-A		PTP8-A		
		A-her2 n°22		G16	M16-A		PTP16-A	
19	GRANDS CAUSSES	B-her2 n°88		M16-B		PTP16-B		
		Cas général		GM19/8		P19		
11	CAUSSES AQUITAINS	Exogène de l'HER 8 (Cévennes)						
		Cas général				P11	TP11	
14	COTEAUX AQUITAINS	Exogène de l'HER 3 (MCN) et/ou 21 (MCS)	TG11/3-21	G11/3-21	M11/3-21	P11/3-21		
		Exogène des HER 3, 8, 11 ou 19	TG14/3-11	G14/3	M14/3-11			
		Exogène de l'HER 3 (MCN) ou 8 (Cév.)		M14/3-8				
13	LANDES	Cas général		GM14		P14	TP14	
		Exogène de l'HER 1 (Pyrénées)	TG14/1	G14/1	M14/1	P14/1		
1	PYRENEES	Cas général		M13		P13	TP13	
12	ARMORICAIN	Cas général		G1	M1	P1	TP1	
		A-Centre-Sud (her2 n° 58 et 117)		G12		M12-A	P12-A	TP12-A
TTGL	LA LOIRE	B-Ouest-Nord Est (her2 n° 55, 59 et 118)		M12-B		P12-B		
		Cas général	TTGL					
9	TABLES CALCAIRES	A-her2 n°57		M9-A		P9-A		
		Cas général	TG9	G9	M9		P9	TP9
		Exogène de l'HER 10		G9/10		M9/10		
10	COTES CALCAIRES EST	Exogène de l'HER 21 (Massif Central Nord)	TG9/21	G9-10/21	M9-10/21			
		Exogène de l'HER 21 (Massif Central Nord)						
4	VOSGES	Cas général	TG10-15/4	G10	M10	P10	TP10	
		Exogène de l'HER 4 (Vosges)		G10/4	M10/4			
22	ARDENNES	Cas général		M4		P4	TP4	
		Exogène de l'HER 10 (Côtes Calcaires Est)	TG22/10					
18	ALSACE	Cas général		GM22		P22	TP22	
		Exogène de l'HER 4 (Vosges)		MP18		TP18		
				G18/4	M18/4	P18/4		

ANNEXE 2

Paramètres physico-chimiques

Les paramètres sélectionnés sont les paramètres de suivi de la qualité des eaux :

- Calcium : Le calcium est l'un des éléments constitutifs majoritaire des roches carbonatées (calcaires, calcaires marneux, dolomies et craies ; il est aussi relativement abondant dans certaines roches ignées⁴ (ou magmatiques). Dans les eaux naturelles, la forme prédominante du calcium est l'ion Ca^{++} .

- Magnésium : le magnésium se retrouve dans différents types de roches dont les principales sont : les roches ignées (minéraux ferromagnésium), d'altération et sédimentaires (dolomite, magnésite). Dans les eaux naturelles, la forme dissoute Mg^{++} est prédominante. Dans les roches ignées et roches d'altération, la mise en solution du magnésium est plus difficile que pour les roches carbonatées. Les concentrations dans les eaux circulant à travers ce type de lithologie est généralement plus faible.

- Sodium : le sodium est présent principalement dans les roches ignées et plus précisément dans certains minéraux comme les feldspaths. Dans les roches sédimentaires, il est moins abondant mais les minéraux auxquels il s'incorpore peuvent être très solubles. Dans les eaux naturelles, le sodium est principalement présent sous la forme Na^+ .

- Potassium : le potassium est présent principalement dans les roches ignées et les argiles. Le potassium est généralement peu concentré dans les eaux naturelles. La concentration peut être influencée par des facteurs biologiques comme les végétaux.

- Bicarbonate : les bicarbonates, ou hydrogénocarbonates, sont issus de la dissolution des roches carbonatées et de l'action combinée du CO_2 présent dans les eaux de pluies. Les roches carbonatées sont des roches sédimentaires composées d'une grande proportion de carbonate ; souvent du carbonate de calcium (CaCO_3). Les eaux de surface traversant des formations de craie et des massifs de calcaire seront enrichies en bicarbonates. Les hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes représentent l'alcalinité totale d'une eau.

- Titre Alcalimétrique Complet (TAC) : Le titre alcalimétrique complet est la grandeur utilisée pour mesurer le taux d'hydroxydes, de carbonates et de bicarbonates d'une eau. Le TAC exprime l'alcalinité totale de l'eau et son unité est le degré français (°f). L'alcalinité est la mesure du pouvoir tampon d'une eau, c'est-à-dire de sa capacité à résister à un accroissement ou à un abaissement du pH.

- Dureté totale : La dureté de l'eau est l'indicateur de la minéralisation d'une eau. Elle est surtout due aux ions calcium et magnésium. La dureté s'exprime en mg/L de CaCO_3 ou en degré français (symbole : °f) en France ; 1 degré français correspond à 10^{-4} mol/L soit 4 milligrammes de calcium ou 2,4 milligrammes de magnésium par litre d'eau.

⁴ Roches ignées ou roches magmatiques se forment quand un magma se refroidit et se solidifie, avec ou sans cristallisation complète des minéraux le composant. Cette solidification peut se produire : en profondeur, cas des roches magmatiques plutoniques (dites « intrusives ») ; ou à la surface, cas des roches magmatiques volcaniques (dites « extrusives » ou « effusives »). Les roches plutoniques sont présentes dans la plupart des massifs montagneux mais ne sont affleurantes que dans les anciens massifs, après leur démantèlement (Massif armoricain, Massif central). Une des roches plutoniques couramment rencontrées est le granite. Les roches volcaniques sont des roches ignées d'origine volcanique. Une des roches volcaniques couramment rencontrées est le basalte.

- pH : Le pH signifie potentiel d'hydrogène. Le pH est la mesure de son niveau d'acidité. Il se rapporte aux ions d'hydrogène présents dans l'eau (H^+). Plus couramment, le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Ainsi, dans un milieu aqueux à 25 °C, une solution avec un pH : inférieur à 7 est acide ; supérieur à 7 est basique ; et égal à 7 est neutre.

- Chlorure : la principale source de chlorure est l'apport atmosphérique. Les pluies à proximité des côtes sont riches en chlorure. Certaines roches sédimentaires, plus spécifiquement les évaporites, sont une source importante de chlorures pour les eaux naturelles. L'ion Cl^- est la forme prédominante dans les eaux naturelles de surface. La concentration dans les eaux courantes sera donc variable selon la localisation géographique. Ils participent peu aux processus biologiques.

- Sulfate : L'ion sulfate est la forme prépondérante dans les eaux naturelles. Il est lié à l'oxydation de minéraux riches en soufre qui sont présents dans tous les types de lithologie (calcaire, sable, socle) ; au lessivage de formations évaporitiques (dissolution du gypse) ; ou à l'oxydation de sulfures dans les précipitations atmosphériques (pluie acide).

- Silice : le silicium est un élément essentiel de la croûte terrestre. Il constitue un élément essentiel de nombreux minéraux dans les roches ignées, les grès et les argiles. Il est en revanche peu présent dans les roches carbonatées.

- Carbone organique : le carbone organique est le carbone présent dans les matières organiques dissoutes et en suspension dans les eaux. La charge organique d'une eau est indiquée par la mesure en carbone organique totale (COT) qui comprend le carbone organique particulaire (COP) et dissous (COD). L'effet principal de la présence de matière organique dans les eaux est la consommation d'oxygène induite par sa dégradation.

- DCO (demande chimique en oxygène) : La DCO est la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables existantes dans l'eau par processus chimique. La mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau, quelque soit leur origine organique ou minérale.

- DBO5 (demande biochimique en oxygène à 5 jours) : La DBO5 est la quantité d'oxygène consommée par les matières organiques. Elle a pour but de reproduire l'autoépuration naturelle. Elle permet d'évaluer les matières biodégradables présentes dans les eaux. Cette mesure demande 5 jours pour conduire à un résultat.

- L'ammonium (NH_4^+) : L'ion ammonium correspond à la forme réduite de l'azote, c'est un élément nutritif pour les végétaux. Ce composé azoté est caractéristique des eaux résiduaires où il est associé à l'azote organique. Dans des conditions d'oxygénation normale, cet élément est oxydé en nitrites puis en nitrates.

- Azote Kjeldahl (NK) : L'azote Kjeldahl mesure l'azote organique et l'azote ammoniacal. C'est une valeur importante pour la protection du milieu aquatique car sa transformation détruit l'équilibre biologique à l'aval du rejet.

- Nitrates (NO_3^-) : L'ion nitrate est la forme finale de l'oxydation de l'azote, les nitrates sont des éléments nutritifs pour les végétaux. Les sources naturelles de nitrate sont les pluies et les interactions avec le sol et la végétation, principalement ; alors que les sources anthropiques sont essentiellement liées aux lessivages des engrais, et aux rejets domestiques et industriels. Les teneurs dans les eaux sont dépendantes des processus biogéochimiques qui constituent le cycle de l'azote.

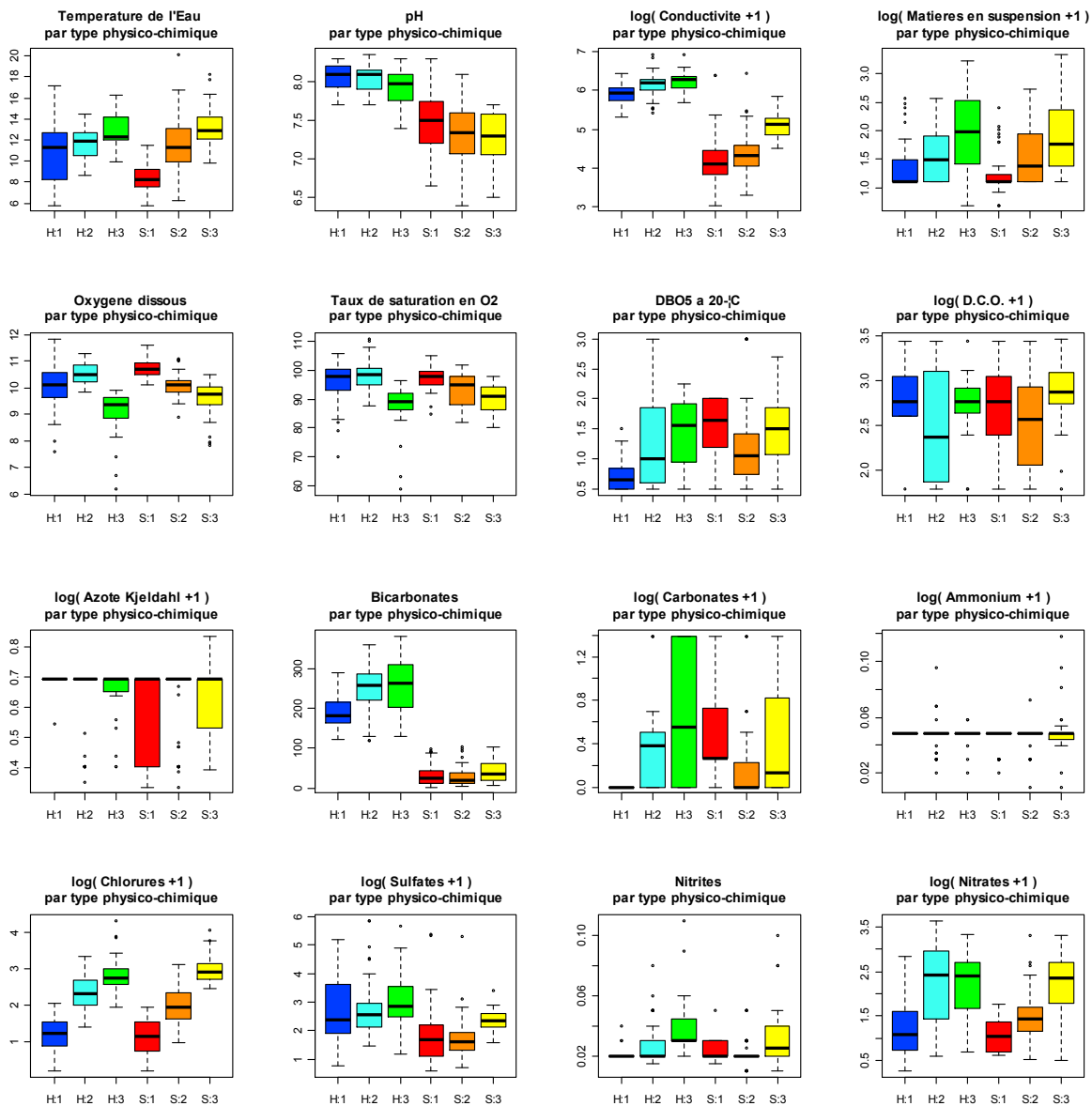
- Phosphore total : le phosphore dans les eaux naturelles vient principalement du drainage des terres agricoles, de l'utilisation des détergents ainsi que des eaux usées provenant de déchets humains ou domestiques. Le phosphore se trouve principalement sous la forme de phosphates dans les eaux naturelles.

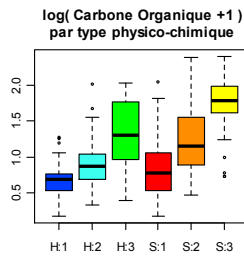
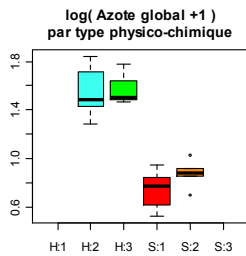
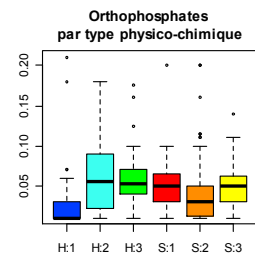
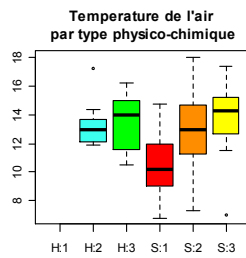
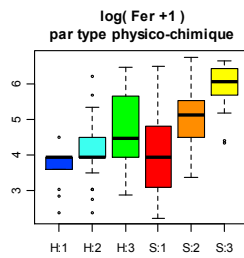
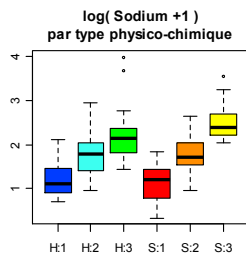
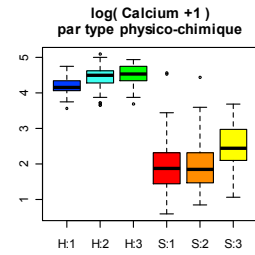
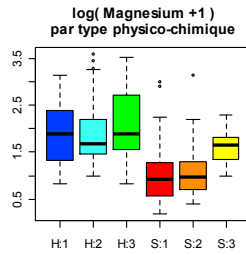
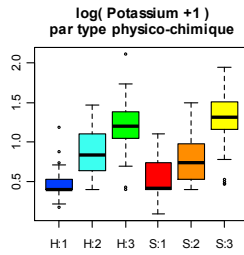
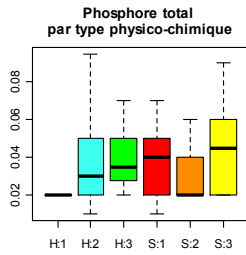
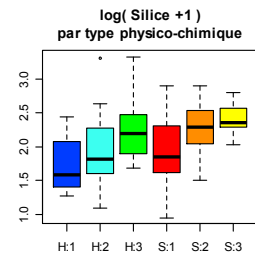
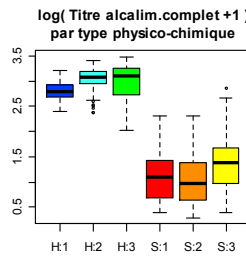
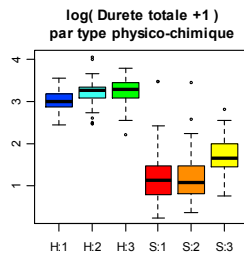
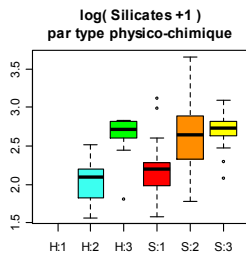
- Orthophosphates : Ils représentent la forme minérale la plus prépondérante du phosphore dans l'eau. Le phosphore existe sous deux formes principales : le phosphore minéral ou le phosphore organique. Le phosphore est le principal facteur de l'eutrophisation en eau douce.

- Matières en suspension (MES) : ces particules minérales ou organiques sont présentes dans les eaux naturelles ou polluées. Les MES comprennent les matières décantables et les colloïdes, mais pas les matières dissoutes. Elles comportent souvent dans les cours d'eau des particules de nature argilo-humique provenant de l'érosion des sols, mais également bien d'autres constituants, en particulier d'origine organique. Elles représentent la cause essentielle de la turbidité de l'eau.

ANNEXE 3

Distributions par types physico-chimiques des valeurs pour les différentes variables utilisées dans cette étude. Certaines données ont été transformées par leur logarithme plus une unité.





ANNEXE 4.

Tableaux de synthèse (avec commentaires) de la correspondance entre la typologie physico-chimique et la typologie nationale.

	Typologie chimique	Typologie nationale	Commentaire(s)
Eaux dures	H1 Hautes altitudes	P5	<i>les HER2 non H1 sont 11, 2, 5, 76</i>
		TP5	<i>les HER2 non H1 sont 2 et 3</i>
		GMP7	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		TP7	
		TP15	
	H2 Altitudes intermédiaire	G2	
		G5	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER; cas particulier massif de l'Esterel
		MP6	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		TP6	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		G9	
		M9	
		P9-A	
		G10	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		M10	Site de référence pas représentatif, attribution du type d'après le RCS
		P10	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		TP10	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		TP11	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		G14/1	
		P14/1	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		MP15	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
	MP15/5		
	P19	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER	
	P20	<i>certaines HER2 sont douces (28,42)</i>	
	H3 Basses Altitudes	GM7/2	
		P9	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		P14	
		TP14	prise en compte de la physico-chimie des sites du RCS
		TP18	

	Typologie chimique	Typologie nationale	Commentaire(s)	
Eaux douces	S1 Hautes altitudes	M1	<i>Pour l'HER2 101, deux sites en S et un site en H ; pour l' HER2 107, il y a un site en S qui est très loin des 3 autres.</i>	
		TP2		
		M4		
		TP4		
		PTP8		Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		PTP8-A		Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		PTP16-A		Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
		P22		
		TP22		Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER
	S2 Altitudes intermédiaire	M3	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER	
		TP3		
		P4		
		GM8		
		G10/4	<i>certaines HER2 sont dures (25, 53, 81)</i>	
		G11/3-21		
		M11/3-21		
		G16		
		M16-A		
		TP17		
		G21		
		M21	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER	
P21	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER			
TP21	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER			
S3 Basses Altitudes	G9-10/21	prise en compte de la physico-chimie des sites du RCS		
	M9-10/21			
	M12-B			
	P12-A			
	P12-B			
	TP12-A			
	TP12-B	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER		
	M13			
	P13			
	TP13	Type Physico-chimique dominant et/ou représentatif de l'HER		
M15-17/3-21				
P17				
P17/3-21				
GM19/8	<i>l'HER2 115 du site est dure mais les autres sont plus douces.</i>			

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

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