

Appui scientifique à la mise en oeuvre de la Directive cadre européenne sur l'eau. Typologie des cours d'eau de France métropolitaine

A. Chandesris, J.G. Wasson, H. Pella, Eric Sauquet, N. Mengin

▶ **To cite this version:**

A. Chandesris, J.G. Wasson, H. Pella, Eric Sauquet, N. Mengin. Appui scientifique à la mise en oeuvre de la Directive cadre européenne sur l'eau. Typologie des cours d'eau de France métropolitaine. irstea. 2006, pp.63. hal-02588807

HAL Id: hal-02588807
https://hal.inrae.fr/hal-02588807

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.

Cemagref

Unité de Recherche Biologie des Ecosystèmes Aquatiques
Département Gestion des Milieux Aquatiques
Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative
3 bis quai Chauveau, CP 220
69366 Lyon Cedex 09
Tél. 04 72 20 87 87 - Fax 04 78 47 78 75

Titre : Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau. Typologie des cours d'eau de France métropolitaine

Auteurs : Jean-Gabriel WASSON, André CHANDESRIS, Hervé PELLA, Eric SAUQUET, Nicolas MENGIN

Résumé : En application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), une typologie des cours d'eau fondée sur une régionalisation des écosystèmes aquatiques et sur la taille des rivières a été réalisée. Elle a été construite à partir de données géographiques rassemblées dans un système d'information géographique (SIG).

Les hydro-écorégions, cadre régional de la typologie, ont été définies sur la base de la géologie, du relief et du climat, considérés comme les déterminants primaires du fonctionnement écologique des eaux courantes.

La dimension longitudinale est traduite en 5 classes de taille des cours d'eau, basées sur l'ordination en rangs de Strahler de l'ensemble du réseau hydrographique. Une analyse de la relation entre rang et superficie du bassin versant a permis de préciser le champ de validité de cette donnée.

L'influence des hydro-écorégions de l'amont a été évaluée au travers des variables hydrologiques (débit naturel reconstitué) et hydro-chimiques (teneur en Calcium) pour définir des types de masses d'eau « exogènes » influencées par leur bassin amont.

Le cadre typologique proposé, conforme aux exigences de la DCE, prend en compte l'ensemble des facteurs structurant à large échelle les communautés biologiques aquatiques.

Mots-clés : Eaux courantes, typologie, référence, Hydro-écorégions, invertébrés benthiques, Directive Cadre Européenne sur l'Eau, hydrologie

Keyboards: Streams, rivers, typology, reference, Hydro-ecoregion, benthic invertebrates, Water Framework Directive, hydrology

CONVENTION	PROGRAMME DE RECHERCHE	DATE	DIFFUSION
N° CV 03000102 Signée le 7 août 2003	HYDRECO (LHQ)	Mars 2006	tous publics ■ interne ❒ confidentielle ❒

Table des matières

Préambule **5**

Introduction **7**

1. Classes de taille des cours d'eau **11**

1.1. LES PARAMETRES DISPONIBLES 11
1.2. RANGS DE STRAHLER : BILAN DES DONNEES DISPONIBLES 13
1.3. ANALYSE DE LA RELATION SURFACE DE BASSIN VERSANT - RANGS DE STRAHLER 14
1.3.1. Surface des bassins versants des Zones Hydrographiques *14*
1.3.2. Relations Bassins versants - rangs de Strahler *16*
1.4. CONCLUSION - PROPOSITIONS DE METHODE DE DEFINITION DE CLASSES DE TAILLE 19

2. « Héritages amont » : influence des caractéristiques du bassin versant **21**

2.1. PROBLEMATIQUE 21
2.2. INFLUENCES AMONT SUR L'HYDROCHIMIE 21
2.2.1. Les données utilisées *21*
2.2.2. Caractérisation hydro-chimique des hydro-écorégions *22*
2.2.3. Relations amont-aval exprimées par la concentration en ions calcium *25*
2.2.4. Outil d'aide à la décision – seuils de cours d'eau « exogènes » *29*
2.3. INFLUENCES AMONT SUR L'HYDROLOGIE 30
2.3.1. Données utilisées *30*
2.3.2. Caractérisation hydrologique des hydro-écorégions *31*
2.3.3. Evolution longitudinale de l'influence hydrologique *34*
2.3.4. Approche régionale par seuils de variation de débits *35*
2.4. INTEGRATION DES RELATIONS AMONT-AVAL DANS LA TYPOLOGIE 38

3. Synthèse **39**

3.1. CADRE PHYSIQUE GENERAL DE LA TYPOLOGIE DES MASSES D'EAU 39
3.2. INTEGRATION DE L'INFORMATION « BIOLOGIQUE » 39
3.3. RESULTAT FINAL 40
3.4. LES TYPES « MAJEURS » 42

4. Conclusion **45**

Références bibliographiques **47**

Annexes **45**

Table des illustrations

Figures

Figure 1 - Carte des hydro-écorégions de France métropolitaine (Wasson et al., 2002) 8

Figure 2 – Méthode d'ordination des curs d'eau selon Strahler 13

Figure 3 - Carte du réseau hydrographique ordonné selon méthode de Strahler 13

Figure 5 - Répartition des surfaces de bassins versants en fonction des rangs de Strahler (Quantiles de distribution, largeur proportionnelle à l'effectif). 16

Figure 8 - Schéma de principe du calcul de flux d'ions calcium 25

Figure 9 - Modèle d'évolution de la concentration de calcium en fonction de la proportion en surface de l'HER aval (HER calcaire) sur quatre rivières 26

Figure 10 - Situation des stations du RNDE sur les cours d'eau exogènes 27

Figure 11 - Régressions linéaires des relations : Ca^{++} = f (%BV en HER calcaire) 28

Figure 15 - Schéma de principe de relation amont-aval pour les débits 33

Figure 17 - Carte des cours d'eau « exogènes » influencés par l'hydrologie des cours d'eau des hydro-écorégions amont, selon une approche basée sur la médiane régionale des débits spécifiques .. 38

Figure 18 - Représentation cartographique des types régionaux et de la relation « amont-aval » sur la base du réseau « drain principal » développé par le CEMAGREF. 41

Tableaux

Tableau 1 - Proportion et linéaire des arcs « non codifiés » dans les différentes Agences de l'Eau. 14

Tableau 2 - Distribution en percentile des surfaces des « zones hydrographiques » par bassins 15

Tableau 3 - Répartition des surfaces de bassins versants en fonction des rangs de Strahler 16

Tableau 4 - Répartition des médianes de surface de bassins versants amont de zones hydrographiques en fonction du rang de Strahler et des Bassins 17

Tableau 5 - Répartition des surfaces médianes de bassins versants aux exutoires des zones hydrographiques pour les HER n° 3 et 21 (Massif Central) par rangs de Strahler et Bassins. 18

Tableau 6 - Répartition des bassins versants aux exutoires des zones hydrographiques pour l'HER n° 9 (Tables calcaires) par rangs de Strahler et Bassins. 18

Tableau 7 - Correspondances largeurs et débit moyen annuel selon les classes de taille 20

Tableau 8 - Répartition des concentrations médianes en calcium des stations par HER (mg/l) 24

Tableau 9 - Répartition des débits spécifiques des zones hydro par HER 32

Tableau 10 - Comparaison des débits amont-aval entre hydro-écorégions 33

Tableau 11 - Bassins versants relatifs des hydro-écorégions amont-aval par seuils d'impact 37

Tableau 12 - Tableau récapitulatif des types de masses d'eau avec proposition de codage 43

Tableau 13 - Tableau des types « majeurs » de masses d'eau sélectionnés sur la longueur de cours d'eau 44

Préambule

Ce présent rapport s'intègre dans la réalisation de la convention pluriannuelle d'objectifs n° CV 03000102 passée entre le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et le CEMAGREF pour la période 2003-2005, et concerne le thème « Connaissances et développements pour la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau » ou DCE (2000/60/CE).

Ce thème comprend notamment un domaine de recherche intitulé « Caractérisation et typologie des masses d'eau ; définition des conditions de référence et du bon état écologique ».

Ce point a fait l'objet, dans le cadre de la présente convention et de conventions antérieures CEMAGREF – MEDD (2001 – 2002), des réalisations suivantes :

- Rapport « Définitions des hydro-écorégions françaises - Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des Eaux » (Wasson *et al.,* 2001) ;

- Rapport « 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 » (Wasson *et al.*, 2002) ;

- Plusieurs notes techniques sur l'élaboration conceptuelle et technique de la typologie, issues des discussions du groupe national DCE - Eaux de Surface Continentales (DCE/ESC) produites en 2003 et 2004 ;

- Enfin, la constitution et l'exploitation d'une base de données nationale des résultats de prélèvements d'invertébrés pour la définition des conditions de référence, et du bon état écologique ont été menées en parallèle.

Le présent rapport constitue la synthèse d'une démarche progressive menée en interaction avec le groupe DCE/ESC animé par le MEDD, permettant de finaliser la typologie basée sur les hydro-écorégions, cadre spatial de la mise en œuvre de la DCE.

Introduction

La mise en application de la DCE implique, en première phase, de délimiter des unités élémentaires d'évaluation de l'état écologique, des ***tronçons de cours d'eaux*** ou « masses d'eau », qui sont chacune affectée à un « type » auquel doivent correspondre des conditions de référence.

Deux systèmes de classification sont envisageables pour permettre aux Etats membres de construire une typologie de masses d'eau courante superficielles (cf. annexe 1) :

- un système A, figé, reposant sur des classes aux limites définies *a priori* pour la surface du bassin versant, l'altitude, la géologie, dans le cadre des « écorégions » tirées des travaux d'Illies (1978) sur la biogéographie des invertébrés aquatiques ;

- un système B, ouvert, reposant sur des critères « obligatoires » identiques à ceux du système A, et toute une gamme de paramètres facultatifs complémentaires.

Les deux systèmes s'appuient obligatoirement sur une base spatialisée couplée à une dimension du bassin, puisque parmi les paramètres obligatoires du système B on retrouve les coordonnées géographiques, l'altitude et la géologie.

L'intérêt du « système B » est de permettre une adaptation de la typologie à la réalité du terrain, et aux bases de connaissances disponibles au niveau de l'Etat membre, en particulier, les informations biologiques.

Le choix du « système B » a été analysé dans le premier rapport du ***Cemagref***, (Wasson *et al.*, 2001), proposant une approche par Hydro-écorégions (HER) sur la base de l'expérience acquise dans le bassin de la Loire (*cf. encadré*)

Rappel Principes de définition des hydro-écorégions (Wasson et al., 2002)

La démarche est basée sur une approche descendante dont le principe de base consiste à utiliser pour la classification les facteurs de contrôle globaux plutôt que leurs conséquences au niveau local. A l'échelle du bassin, les déterminants primaires universellement reconnus du fonctionnement écologique des cours d'eau sont la géologie, le relief et le climat. Ce concept s'inspire des théories de contrôle hiérarchique des hydrosystèmes, et repose particulièrement sur l'emboîtement des échelles physiques, du bassin jusqu'au micro-habitat.
On peut résumer comme suit l'enchaînement hiérarchique des facteurs qui déterminent le fonctionnement écologique des cours d'eau (fig. 2) : à l'échelle locale, dans le milieu aquatique, la biodiversité et la productivité des communautés vivantes répondent aux « facteurs-clés » que sont l'habitat physique (hydraulique, substrat), le climat aquatique (lumière, température, gaz dissous, hydrochimie), et les ressources trophiques (production primaire endogène et matière organique exogène) ; toutefois l'influence de l'habitat sur des paramètres essentiels (oxygénation, ressources trophiques) conduit à assigner un rôle prépondérant aux facteurs physiques. A l'échelle du tronçon, la dynamique spatio-temporelle des facteurs-clés dépend du régime hydro-sédimentologique et de la géomorphologie de la vallée ; ces « facteurs de contrôle » définissent la morpho-dynamique fluviale (forme et stabilité du lit), la structure de la végétation rivulaire (qui influe significativement sur le milieu aquatique), et la connectivité du cours d'eau (interactions avec la zone inondable). Finalement, à l'échelle régionale, ces facteurs dépendent de « déterminants primaires » que sont la géologie (nature des roches), le relief (géomophologie) et le climat (températures et précipitations). Les sols et la végétation du bassin interviennent évidemment dans le bilan hydrique et sédimentologique, mais ils sont en dernier ressort déterminés par les caractéristiques géophysiques et climatiques.
Ce cadre conceptuel justifie une régionalisation des écosystèmes d'eau courante à partir des déterminants primaires géophysiques et climatiques, qui permettent de délimiter des « hydro-écorégions ». Les hypothèses de base sont les suivantes : 1) à l'intérieur d'une même région les cours d'eau présenteront des caractéristiques physiques et biologiques similaires et un même gradient d'évolution longitudinale, et 2) les écosystèmes d'eau courante de différentes régions devraient se distinguer sur au moins un paramètre abiotique important, conduisant à des différences significatives et quantifiables au niveau des peuplements. Ceci devrait permettre de définir un nombre limité de types d'écosystèmes dans chaque région.

Sur ce principe, 22 hydro-écorégions ont été définies pour la France métropolitaine (Wasson *et al.*, 2002), constituant la première phase de l'élaboration de la typologie.

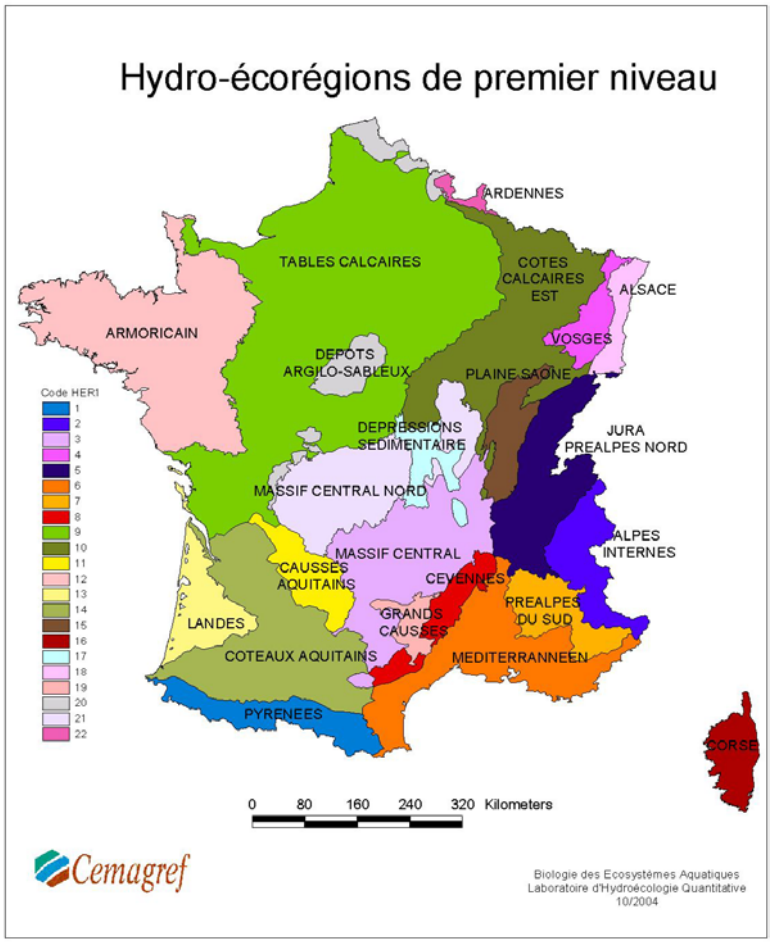


Figure 1 - Carte des hydro-écorégions de France métropolitaine (Wasson et al., 2002)

Principes de la typologie

Les objets à répartir en types sont donc des tronçons de cours d'eaux, et ces types doivent être suffisamment homogènes pour que l'on puisse raisonnablement affecter à tous les éléments d'un même type les même conditions de référence, notamment en termes de peuplements biologiques. Cette typologie constitue donc le point de départ du découpage en « masses d'eaux » naturelles. Elle repose sur la prise en compte des éléments suivants.

1 – Cadre régional

Les **Hydro-écorégions**, expression synthétique des facteurs déterminant la physico-chimie de l'eau, les régimes hydrologiques et sédimentaires, la morphologie du lit et sa dynamique, l'environnement végétal, permettent de délimiter une première « enveloppe de variabilité » des facteurs-clés à l'échelle des tronçons. Ces HER constituent donc le premier niveau de différenciation de la typologie.

2 – Taille des cours d'eau

Le cadre des hydro-écorégions étant défini, la seconde caractéristique à prendre en compte est évidemment la **taille des cours d'eau**, paramètre logiquement obligatoire dans la DCE, dans la mesure où il conditionne très largement la structure physique et le fonctionnement écologique. Il n'est pas nécessaire de revenir longuement sur l'importance évidente de cette *dimension longitudinale*, qui a fait l'objet depuis plus d'un siècle de très nombreux travaux aboutissant à proposer des zonations (Huet, 1949, Illies & Botosaneanu, 1963), ou des typologies longitudinales plus ou moins fonctionnelles (Verneaux, 1976, Vannote *et al.*, 1980 ; cf. revue de Wasson, 1989).

3- « Héritages amont » : influence des caractéristiques du Bassin Versant

Les travaux antérieurs sur la régionalisation du bassin de la Loire, rappelés dans le rapport de phase 1 (Wasson *et al*. 2001), ainsi que les premiers tests de distribution des peuplements de référence d'invertébrés (Wasson *et al*. 2002) et de diatomées (Tison *et al*. 2005), ont montré que le fonctionnement physique et les structures de peuplements aquatiques semblent répondre assez bien aux HER pour les tronçons de cours d'eau « endogènes » et de même taille. On entend par « **endogènes** » des cours d'eau dont la totalité du bassin versant se situe dans une même HER. Nous les opposerons aux tronçons de cours d'eaux « **exogènes** », dont une part significative du bassin amont se situe dans une ou plusieurs HERs différentes.

Dans une HER donnée, les tronçons « exogènes » peuvent être sensiblement influencés par les *caractéristiques héritées des HERs 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. En conséquence, le fonctionnement physique et les structures écologiques des tronçons « exogènes » peuvent être sensiblement différents de ceux des tronçons « endogènes » de même taille. Il est donc indispensable de prendre en compte l'influence des Hydro-écorégions amont sur les cours d'eau situés dans l'HER aval, en différenciant des types « endogènes » et « exogènes ».

4 – Variabilité biologique régionale résiduelle

Enfin, le découpage en HER étant réalisé *a priori* avec une maille assez large pour ne pas multiplier le nombre de types, il est possible qu'une variabilité intra-HER résiduelle, qui se traduit de manière visible dans la structure des peuplements aquatiques, soit encore identifiable au niveau de certaines HER de niveau 2, aux caractéristiques particulières. Dans ce cas, pour coller au plus près de la réalité biologique, il peut s'avérer utile de distinguer dans certaines HER-1 des types au niveau des HER-2.

Le présent rapport étudie ces éléments et propose des méthodes simples pour les prendre en compte dans une typologie opérationnelle et conforme à la DCE.

1. Classes de taille des cours d'eau

Le cadre régionalisé représenté par les Hydro-écorégions doit nécessairement être complété par les informations relatives à la taille du cours d'eau à l'échelle de la masse d'eau. Cette taille est fondée sur des éléments physiques de dimension (géométrie hydraulique, débits, surface du bassin versant…), tout en restant en adéquation avec la zonation longitudinale structurant les communautés biologiques, en particulier les poissons.

Le croisement des classes de tailles avec les HER donne un cadre typologique cohérent, compatible avec le système B tel qu'il est défini dans l'annexe II de la DCE.

L'utilisation de l'ordination selon la méthode de Strahler est apparue comme la méthode la plus pertinente de classement dans le contexte de travail, compte-tenu des informations disponibles. Mais il s'est avéré nécessaire de préciser le lien entre la taille et le rang, notamment au travers de la variable « bassin versant », paramètre commun de dimension cité par la DCE.

1.1. Les paramètres disponibles

Parmi les paramètres quantitatifs susceptibles de permettre une classification de la taille des cours d'eau, on citera en premier lieu la ***surface de bassin versant,*** paramètre obligatoire du système A (DCE annexe II) ; la ***distance à la source*** est également utilisée dans la construction de modèles de distribution des invertébrés (Verneaux,1973) ou des poissons (Oberdorff *et al.*, 2001), couplée à des variables décrivant la géométrie du lit mineur : *largeur, section mouillée à l'étiage*.

Une autre approche consiste à examiner les ***paramètres hydrologiques*** du type : débit moyen annuel, débits moyens mensuels, débits d'étiages ou de crues associés à une fréquence de retour donnée. Mais si les ordres de grandeur de ces résultats sont souvent informatifs, ils n'apportent pas le même type d'information selon la région climatique et selon le « régime hydrologique» aux limites parfois difficiles à fixer et à interpréter.

Les méthodes d'***ordination des cours d'eau*** consistent à classer des portions de cours d'eau en fonction de leur position dans le réseau hydrographique en leur affectant un code numérique, dépendant des confluences. La plus courante et la plus simple à mettre en œuvre est l'**ordination de Strahler (1957)** qui consiste à attribuer le rang 1 aux cours d'eau en tête de bassin, puis, en progressant vers l'aval, chaque cours d'eau recevant un cours d'eau du même rang voit son rang augmenter d'une unité.

Il est apparu que l'ordination de Strahler était l'information la plus homogène, et la plus rapidement mobilisable pour représenter la taille des cours d'eau à l'échelle du territoire national en 2002. Les arguments qui ont justifié ce choix, (encadré 2), sont détaillés dans le rapport « Hydro-écoregions » (Wasson *et al*., 2002 ; Annexe 6).

Rappel : Intérêt de l'ordination de Strahler

L'intérêt de la méthode est de proposer des limites de classes typologiques au niveau de discontinuités « fortes » du réseau hydrographique, correspondant à des changements importants de dimension ; on s'affranchit ainsi de limites de classes fixées *a priori* (telles que les surfaces de bassin versant proposées par le système A), susceptibles d'aboutir à diviser des tronçons homogènes, ou d'occulter des « sauts » quantitatifs importants le long du linéaire.

Cette approche est également cohérente avec des théories robustes décrivant l'organisation longitudinale des communautés biologiques, telles que le système de zonation Rhitron / Potamon (Illies et Botosaneanu, 1963), ou le River Continuum Concept (Vannote *et al*., 1980) ; plus récemment, des modèles fonctionnels s'appuyant sur l'ordination du réseau ont été développé dans le bassin de la Seine (RIVERSTRAHLER, PIREN Seine, Billen *et al*. La Seine en son bassin).

L'ordination de Strahler prend en compte la structure et la densité du réseau, variables selon la situation géographique. En effet, la densité de drainage reflète la quantité d'eau transportée en surface pendant les périodes de forts débits, résultante du bilan hydrique et de la perméabilité des roches, c'est l'un des indices les plus signifiants en termes de processus hydrologiques au niveau du bassin (Gregory & Walling, 1973)[1]. Ces deux facteurs varient fortement selon les HER, et la densité du réseau reflète ces variations.

Des tronçons de même rang peuvent donc avoir, selon les régions, des bassins versants sensiblement différents, compensés par la lame d'eau écoulée. Aussi des cours d'eau de même rang dans différentes HER auront *a priori* des dimensions relativement comparables.

Une analyse des relations rangs de Strahler et dimension des cours d'eau, effectuée sur le bassin de la Loire (Souchon *et al*., 2000), montre qu'à rang égal, la distance à la source est nettement plus élevée dans l'HER Tables Calcaires par rapport aux autres régions. En revanche, la largeur moyenne du lit, qui reflète mieux la dimension du cours d'eau, est équivalente à rang égal dans le Massif Armoricain, les Tables Calcaires et le Massif Central nord (Limousin), ce qui montre bien que les différences géologiques sont compensées par l'ordination. L'ordre de grandeur des largeurs de cours d'eau pour le bassin de la Loire est de :

- 0,5 à 2 m pour le rang 1
- 2 à 4 m pour le rang 2
- 4 à 8 m pour le rang 3
- 8 à 12 m pour le rang 4
- 18 à 20 m pour le rang 5

En conséquence, il n'y a pas de raison *a priori* pour établir une typologie des rangs différente selon les HER. *A contrario*, l'utilisation des surfaces de bassin versant nécessiterait d'établir des limites de classes différenciées en fonction des HER pour identifier des cours d'eau de dimensions comparables.



Figure 2 - Méthode d'ordination des cours d'eau selon Strahler (1957)

Cependant, il faut apporter quelques précisions importantes :

❖ L'ordination reflète assez bien les débits liquides et solides transportés en hautes eaux, mais ne préjuge en rien de la variabilité hydrologique saisonnière, qui est une caractéristique des HER. Autrement dit, il est normal que des cours d'eau de même rang aient des débits de module ou d'étiage assez différents selon les régions traversées par leurs bassins.

❖ En revanche, les épisodes de hautes eaux sont ceux qui structurent la morphologie du cours d'eau, en particulier la section à plein bord et les faciès morpho-dynamiques. Mais la structure morphologique qui en résulte dépend aussi d'autres paramètres comme la pente, qui conditionne l'énergie du cours d'eau, et la nature des sédiments transportés, fonction de la géologie du bassin. Ces deux facteurs sont bien pris en compte par les HER. De ce fait, le couplage HER x rang est supposé avoir une signification réelle en terme de morpho-dynamique et d'habitat aquatique.

❖ L'ordination reflète également une structure géomorphologique des massifs, qui peut être notablement compliquée par des accidents tels que de grandes failles, des plissements, des épandages éluviaux qui imposent aux vallées des structures particulières. Dans certains cas, les confluences principales qui déterminent les changements de rang peuvent être très éloignées ou au contraire très rapprochées. Ces particularités géomorphologiques peuvent générer quelques situations où l'ordination paraît donner des résultats atypiques quant à la dimension réelle des cours d'eau.

❖ Du fait de ces variations d'origine géomorphologique, la relation entre rang et capacité de transport doit être abordée de manière statistique, ce qui suppose une certaine gamme de variabilité à l'intérieur de chaque classe de rang. Néanmoins, à une échelle nationale et pour un objectif de typologie, cette relation est suffisamment robuste pour être utilisée.

[1] Gregory K.J. & Walling D.E. 1973. *Drainage basin form and process*, Edward Arnold, London.

1.2. Rangs de Strahler : bilan des données disponibles

L'ordination selon la méthode de Strahler a donc été retenue pour établir une classification typologique de dimension des cours d'eau.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE, l'ensemble du réseau hydrographique a donc fait l'objet d'une ordination au niveau de chaque bassin par les Agences de l'Eau. Le référentiel BD Carthage®, théoriquement commun et homogène au niveau du territoire national, a été utilisé comme support de travail commun. Mais à l'assemblage final du résultat des travaux de chaque bassin, des différences significatives sont apparues, suivant plus les limites des bassins que celles des régions naturelles (Figure 3).

L'explication tient au fait que, pour des raisons techniques, l'ordination a été effectuée dans chaque bassin sur le réseau « codifié », c'est-à-dire sur les « arcs » du réseau BD Carthage représentant les cours d'eau auxquels a été attribué un « code hydro ». Or, si la quasi-totalité du réseau a été codifiée dans le bassin Loire Bretagne, la proportion des arcs non codifiés varie de 32% à 52% du linéaire total pour les autres bassins (Tableau 1).

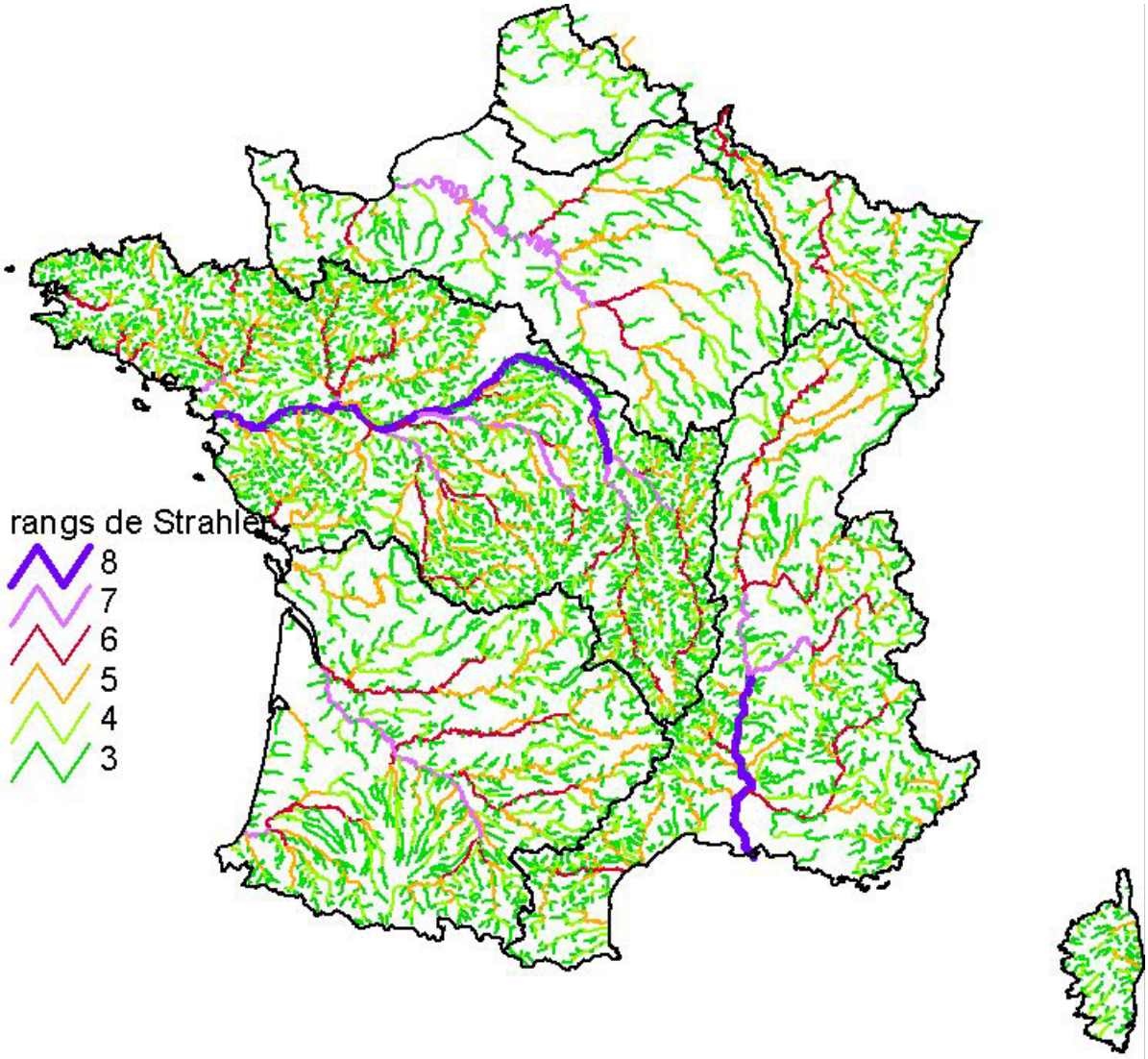


Figure 3 - Carte du réseau hydrographique ordonné selon méthode de Strahler

	Réseau total		Réseau non codifié	
Agence	Nb arcs total	Linéaire total (km)	Linéaire Total (km)	% linéaire
LB	133 278	135 494	22	**0,02**
RMC	160 548	152 380	66 845	**43,9**
RM	29 949	29 874	9 693	**32,4**
AG	117 258	120 023	48 444	**40,4**
SN	44 425	55 768	20 756	**37,2**
AP	10 965	11 477	6 066	**52,8**
Total	**496 423**	**505 016**		

Tableau 1 - Proportion et linéaire des arcs « non codifiés » dans les différentes Agences de l'Eau.
Source : BD CARTHAGE® V3 IGN. Des différences minimes peuvent exister avec les BD CARTHAGE des différentes Agences en fonction des corrections qui auraient pu être apportées récemment à celles-ci.

Ce biais posait donc un réel problème pour établir une classification homogène basée sur les rangs de Strahler à l'échelle nationale. Dans la mesure où aucune autre donnée exhaustive et homogène représentant la taille des cours d'eau n'était disponible, alors que l'ordination de Strahler était mobilisable à l'échelle du territoire, une analyse plus poussée des relations entre rangs et surfaces de bassins versants a été réalisée, pour tenter de corriger le biais lié à la proportion du réseau codifié (et ordonné) entre les bassins.

1.3. Analyse de la relation surface de bassin versant - rangs de Strahler

1.3.1. Surface des bassins versants des Zones Hydrographiques

Aspects techniques

Le calcul des bassins versants mobilise un temps traitement assez long ; pour analyser statistiquement les relations entre surface de bassin versant et rang de Strahler, il convient de choisir un ensemble de points du réseau où les données sont facilement mobilisables et les calculs de surface restent faciles et vérifiables.

Les 6 357 «zones hydrographiques» (ou ZH) définies à l'échelle nationale dans la BD Carthage®, correspondant à l'unité de gestion élémentaire pour les Agences de Bassin, répondent assez bien à cette contrainte technique. La partie du réseau BD Carthage® constituant le drain principal de chaque «zone hydro» a donc été extraite, et son sens d'écoulement corrigé et validé, afin de pouvoir reconstituer le chaînage amont-aval des ZH, et calculer les surfaces de bassins versants amont de chaque ZH. Le rang de Strahler du cours d'eau à l'exutoire de chaque ZH est donc utilisé pour établir des relations entre rang et avec les surface de bassin versant en fonction des bassins et des hydro-écorégions.

Une première analyse de la structure spatiale de cette information apparaît nécessaire, car un examen rapide montre de nettes différences inter bassins dans la taille des ZH, ce qui pourrait biaiser la relation étudiée. La surface élémentaire des ZH présente effectivement des différences significatives d'un bassin à l'autre (Tableau 2 et Figure 4).

Bassin	10%	25%	Median	75%	90%	Nombre
AG	17	33	51	75	107	1980
AP	0	0	2	42	179	335
LB	38	67	101	144	191	1413
RM	14	26	40	58	74	728
RMC	57	84	122	172	247	913
SN	15	34	65	134	219	988

Tableau 2 - Distribution en percentile des surfaces (km^2) des « zones hydrographiques » par bassins
AG = Adour Garonne ; AP = Artois Picardie ; LB = Loire Bretagne ; RM = Rhin Meuse ; SN = Seine Normandie

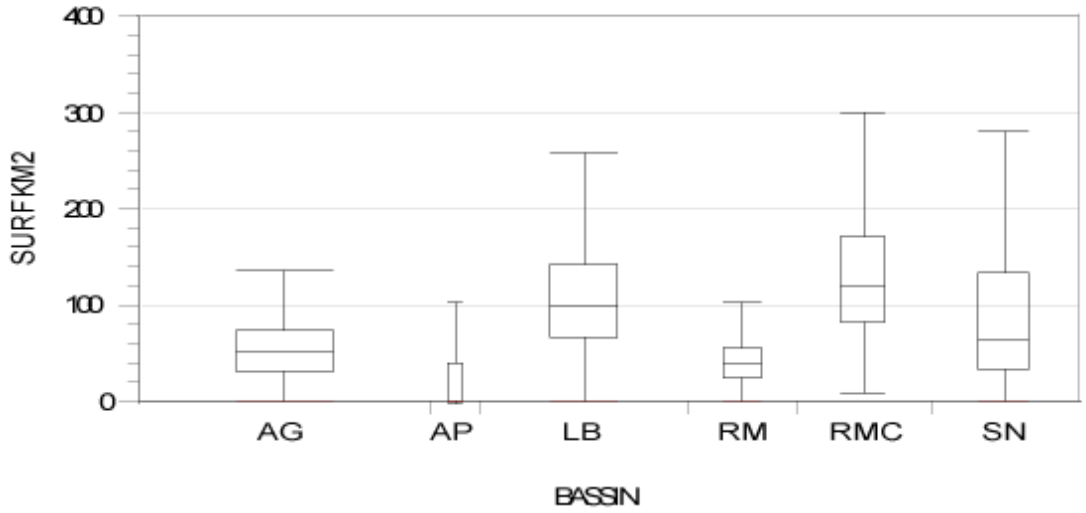


Figure 4 - Répartition des surfaces des « zones hydrographiques » par bassin

Conséquences de cette distribution :

- la validité de l'analyse de la surface du bassin versant en fonction du rang ne peut valablement descendre en dessous d'une ***valeur « plancher » de 150 à 200 km^2*** en Loire-Bretagne, Seine Normandie, Rhône Méditerranée Corse, correspondant au seuil de dimension élémentaire de l'objet étudié ;

- en Adour Garonne, Rhin Meuse et Artois Picardie, il est envisageable de descendre à un seuil de surface inférieur, ce qui peut permettre des comparaisons pour des rangs plus faibles.

1.3.2. Relations Bassins versants - rangs de Strahler

Répartition globale des surfaces de bassins versants en fonction des rangs de Strahler

Une première analyse globale a été effectuée pour l'ensemble des points exutoires des zones hydro. Les distributions de surface de bassin versant montrent logiquement une progression de type exponentielle (Tableau 3 et Figure 5).

Strahler	10%	25%	Mediane	75%	90%	nombre
1	5	26	51	117	309	256
2	29	41	65	115	215	949
3	49	76	122	211	376	1732
4	101	157	302	544	942	1572
5	290	569	1 157	2 370	4 532	1019
6	1 224	2 628	5 091	9 303	14 739	533
7	4 003	11 307	16 219	49 961	63 087	168
8	471	35 722	56 635	84 904	111 801	68

Tableau 3 - Répartition des surfaces(km²) de bassins versants en fonction des rangs de Strahler

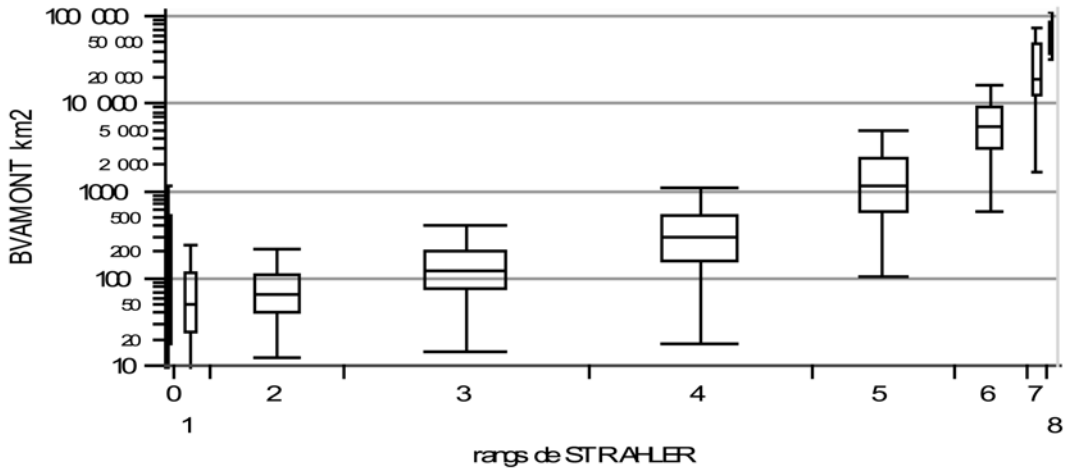


Figure 5 - Répartition des surfaces de bassins versants en fonction des rangs de Strahler (Quantiles de distribution, largeur proportionnelle à l'effectif). La partie inférieure des « moustaches » correspond en partie à des artefacts dus au traitement SIG ; le quantile 10 % du Tableau 2 est plus informatif.

Cette progression exponentielle est cohérente avec celle du « système A » de la DCE, dont les limites de classes sont 10, 100, 1 000, 10 000 km^2. Mais ces classes ne correspondent pas aux changements de rangs : les valeurs médianes des surfaces de BV pour les rangs 3 et 5 correspondent aux limites 100 et 1000 km^2. Le classement par rang est donc plus discriminant que celui du système A, qui *a contrario* présentera souvent l'inconvénient de séparer artificiellement dans des classes distinctes des milieux qui naturellement ont des dimensions comparables.

Observations :

- Du fait de leur surface minimale identifiée précédemment, très peu de ZH ont des exutoires de rang 1 à 3 ; le nombre de points n'est donc pas représentatif de la longueur cumulée de ces cours d'eau qui représentent pourtant près de 80 % du linéaire total ;

- La progressivité des valeurs n'est donc pas représentative pour les rangs < 3 ; la progression de type exponentiel est nette pour les rangs > 4 (médiane et quantiles 25-75) ;

Sur cette base, une première approche grossière de classification, en fixant des limites de classes au niveau des quantiles 75 du rang inférieur et 25 du rang supérieur, pourrait donner les résultats suivant :

- Limite entre rangs 3 et 4 : 200 km²
- Limite entre rangs 4 et 5 : 550 km²
- Limite entre rangs 5 et 6 : 2 500 km²
- Limite rangs > 6 : 10 000 km²

Mais ces résultats préliminaires doivent être discutés au vu des différences d'ordination du réseau hydrographique selon les bassins (Figure 3).

Relations entre rangs et surface de bassin versant par Grands Bassins hydrographiques

La correspondance entre rangs de Strahler et surfaces de bassins versants amont par grands bassins hydrographiques donne les résultats suivants.

Strahler	AP	AG	RM	RMC	SN	LB
3	252	106	104	148	199	91
4	489	411	389	309	629	163
5	1 338	1 811	1 762	1 194	3 037	580
6		6 761	7 425	6 545	9 507	2 728
7		34 740		27 686	64 953	12 889
8				63 706		38 454

Tableau 4 - Répartition des valeurs médianes de surface (km²) de bassins versants amont des zones hydrographiques en fonction du rang de Strahler et des Bassins Hydrographiques. Les rangs inférieurs à 3 ne sont pas pris en compte pour les raisons évoquées ci-dessus. (AP Artois Picardie ; AG Adour Garonne ; RM Rhin Meuse ; RMC Rhône Méditerranée Corse ; SN Seine Normandie ; LB Loire Bretagne)

En première observation, quatre groupes se distinguent nettement :
- un groupe assez cohérent de valeurs pour Adour Garonne, Rhône Méditerranée Corse et Rhin Meuse ;
- des valeurs plus faibles pour Loire Bretagne ;
- des valeurs plus élevées en Seine Normandie ;
- une progression non comparable (confirmée par une distribution en quantiles atypiques) en Artois Picardie.

Une première interprétation peut être proposée :
- La différence entre les valeurs observées sur Loire Bretagne et le groupe de bassins à valeurs intermédiaires est lié à la différence de la méthode utilisée pour l'ordination fondée sur la codification des cours d'eau (Tableau 1).
- Les valeurs plus élevées dans le bassin Seine Normandie méritent une analyse plus fine, car liée à la géologie des hydro-écorégions concernées.
- Le mode de découpage en zones hydrographiques (visible par un simple examen de la carte des ZH) sur le bassin Artois Picardie est en réalité très particulier du fait de l'interconnexion du réseau hydrographique avec de nombreux canaux artificiels, et il ne permet pas de prendre en compte, de façon pertinente, les surfaces de bassins versants amonts rapportés aux rangs de Strahler. Ce bassin sera donc exclu des analyses suivantes.

Mis à part le cas d'Artois Picardie, les distributions des surfaces restent cohérentes en ce qui concerne les ordres de grandeur et la progressivité, mais méritent une investigation plus poussée pour comprendre et quantifier les décalages observés entre les grands bassins.

Une approche plus fine consiste à examiner les disparités en fonction de la géologie dominante du sous-sol, car le lien avec la densité et la ramification du réseau est *a priori* assez fort.

Relations entre rangs et surface de bassin versant sur massif granitique

En prenant l'hypothèse d'une influence du type d'HER sur le lien entre rang et surface de bassin versant (lié à la densité de drainage), nous nous proposons d'examiner l'effet lié aux Grands Bassins hydrographiques dans des HER aux caractéristiques géologiques similaires (Massif Central Nord et Massif Central Sud) (Tableau 5).

Bassin	Rang 3	nombre	Rang 4	nombre	Rang 5	nombre	Rang 6	nombre
AG	94	175	453	120	2 106	54	4 463	16
RMC	152	7	369	6			*886*	*1*
SN	197	4	415	3				
LB	*80*	*46*	163	136	567	87	2 388	57

Tableau 5 - Répartition des surfaces médianes (km²) de bassins versants aux exutoires des zones hydrographiques par rangs de Strahler et Grands Bassins pour les HER n° 3 et 21 (Massif Central)

La répartition des valeurs médianes de surface de bassin amont par rang confirme un décalage d'un rang environ pour Loire Bretagne: les valeurs observées en Loire Bretagne correspondent à celle du rang inférieur dans les autres bassins. En complément, il convient de noter que la répartition des valeurs du premier au troisième quartile confirme le décalage systématique d'un rang entre Loire Bretagne et les autres bassins (Annexe 2).

En considérant le cas du Massif Armoricain (HER n° 12), partagé entre Loire Bretagne et Seine Normandie, on obtient des valeurs en apparence moins décalées, mais le grand nombre de cours d'eau de rangs faibles (3 et 4), le nombre limité de valeurs, ainsi qu'une différence du simple au double de la surface moyenne des zones hydrographiques (localisé à la Normandie) rend la comparaison impossible, cet ensemble de facteurs contribuant à « gommer » la visibilité du décalage existant.

Relations entre rangs et surface de bassin versant sur secteur calcaire

Un examen des valeurs obtenues sur les Tables calcaires (HER n° 9) concernant trois bassins différents permet de préciser les différences d'ordination existantes en zone « sédimentaire » (Tableau 6).

Bassin	Rang 3	nombre	Rang 4	nombre	Rang 5	nombre	Rang 6	nombre
AG	272	35	726	23	5 267	24	-	-
AP	253	55	532	75	-	-	-	-
RM	226	2	-	-	-	-	-	-
SN	220	179	760	108	3 621	84	10 852	46
LB	*119*	*51*	225	90	1 035	105	3 374	52

Tableau 6 - Répartition des surfaces (km²) de bassins versants aux exutoires des zones hydrographiques pour l'HER n° 9 (Tables calcaires) par rangs de Strahler et bassins

La répartition des médianes de surfaces de bassin amont des exutoires des zones hydro confirme le décalage d'un rang environ entre Loire Bretagne et les autres bassins. Comme pour les massifs granitiques, il convient de noter que la répartition des quantiles (25 % et 75%) confirme le décalage systématique entre Loire Bretagne et les autres bassins (Annexe 3).

On remarque aussi que le « décalage » observé dans la comparaison globale des Grands Bassins hydrographiques (Tableau 4) pour le bassin Seine Normandie, dont les surfaces par rang apparaissaient supérieures aux autres bassins, est ici pratiquement gommé.

Ceci confirme que le décalage observé en Seine Normandie est en fait lié à la géologie (reflétée par l'hydro-écorégion), en l'occurrence au caractère perméable des secteurs à dominante calcaire. L'ordination du bassin Seine Normandie est donc comparable à celle des autres bassins, excepté Loire Bretagne.

1.4. Conclusion - Propositions de méthode de définition de classes de taille

L'analyse globale de l'ordination permet de mettre en évidence les points suivants :

- la surface de bassin versant amont en fonction du rang de Strahler suit une **progression de même nature (exponentielle)** que les propositions du **système A** (100, 1 000, 10 000, 100 000), mais les paramètres de la progression sont variables selon la nature géologique du bassin versant ;
- le classement fondé sur l'ordination de Strahler contribue à différencier un **nombre de classes de cours d'eau plus important ;**
- un **décalage d'un rang environ existe entre le bassin Loire Bretagne**, où la totalité du réseau a été codifiée et ordonnée, **et les autres bassins** où une partie seulement du réseau est ordonnée, quel que soit la géologie de la région concernée.

Le classement des cours d'eau pourrait donc suivre les critères suivants en fonction de l'ordination existante (Tableau 7).

Classe de Taille	Très petit	Petit	Moyen	Grand	Très Grand
Rangs : bassin Loire Bretagne	**1, 2, 3**	**4**	**5**	**6**	**7, 8**
Rangs : Autres bassins	**1, 2**	**3**	**4**	**5**	**6, 7**
Surface de BV (km²) zone cristalline, imperméable	< 100	[100 –250]	[250 – 800]	[1 300 – 3 700]	> 3 700
Surface de BV (km²) zone calcaire perméable	< 150	[150 – 400]	[400 – 1 500]	[2 200 – 7 000]	> 7 500

Tableau 7 – Proposition de classes de tailles pour les cours d'eau en fonction des rangs de Strahler actuellement disponibles et des surfaces de bassins versants

Cette proposition générale, valable sur l'ensemble du territoire métropolitain, ne doit pas masquer certaines exceptions ou particularités locales. En particulier, les *cours d'eau à fonctionnement karstique*, dont la dimension n'est pas directement dépendante du bassin versant topographique, nécessitent une expertise adaptée.

Des exceptions locales, liées à des configurations particulières du réseau hydrographique, peuvent également s'insérer dans ce schéma général, qui ne peut prendre en compte toutes les situations.

Le « juge de paix » pourra être, dans ces cas particuliers, la prise en compte d'éléments comparatifs de type géométrique (largeur à plein bord, profondeur du cours d'eau) ou hydrologique (débit moyen annuel par exemple), pour lesquels il est possible de proposer des ordres de grandeurs dans le Tableau 8.

Classe de Taille	**Très petit**	**Petit**	**Moyen**	**Grand**	**Très Grands**
Largeur (m)	< 8	8 –12	18 – 20		
Débits moyens annuels (m3/s) (CE *endogènes* à l'HER)					
HER de plaine atlantique (9, 12, 10)	< 1.3	[0.9 – 1.7]	[2.8 - 11]	[12 – 50]	> 30
HER Montagnes (1, 2, 4)	< 1.8	[1.7 – 4]	[5 – 14]	[15 – 60]	> 60
HER Méditerranée (6 et 14)	< 0.7	[0.4 – 1.5]	[1.1 – 3.3]	[2.5 – 7]	

Tableau 8 - Correspondances largeurs et débit moyen annuel selon les classes de taille
Les largeurs ont été mesurées sur un jeu de données de 191 tronçons de rivières dans le bassin Loire Bretagne (HER 12, 21, 9) (Souchon *et al.,* 2000). La distribution des débits moyens annuels naturels reconstitués (Sauquet, 2005) a été analysée par groupes d'HER (cf annexe 7) ; l'intervalle proposé correspond aux percentiles 25 - 75 des valeurs observées par groupe d'HER.

2. « Héritages amont » : influence des caractéristiques du bassin versant

Le classement typologique ainsi proposé ne prend pas en compte la caractéristique principale des cours d'eau : *ils s'écoulent vers l'aval* et transfèrent par là-même des « caractéristiques » issues des facteurs prédominants des hydro-écorégions de leur bassin amont dans l'hydro-écorégion aval où ils se situent.

Il apparaît donc indispensable de préciser cet « héritage amont » et d'identifier le cas échéant les types de masses d'eau susceptibles de se différencier en raison de l'influence des HER amont.

2.1. Problématique

Les cours d'eau que nous qualifions d'« exogènes » transportent une « information » différente provenant de l'HER amont (géologie, climat, relief), qui se « dilue » progressivement jusqu'à devenir négligeable en ce qui concerne son influence sur le fonctionnement de l'écosystème aquatique.

La prise en compte de cet héritage dans la typologie nécessite de disposer de traceurs quantifiables pour évaluer l'importance de l'information transportée, et son évolution relative sur le linéaire du cours d'eau. Quelques données, disponibles actuellement, permettent d'apporter des éléments objectifs d'évaluation et de quantification, afin de contribuer aux choix d'affectation de ces cours d'eau en types « endogènes » ou « exogènes ».

Pour procéder à cette évaluation, il convient de disposer de données :

- exprimant l'influence des déterminants du fonctionnement des écosystèmes (géologie, relief, climat) qui conditionnent l'hydrologie et l'hydrochimie,
- non influencées de manière significative par des altérations d'origine anthropique,
- réparties de façon homogène et suffisamment dense sur l'ensemble étudié (territoire national) pour analyser les effets sur les différents types de cours d'eau.

L'évaluation des « héritages amont » s'est donc appuyée sur deux facteurs intégrateurs :

- la **chimie de l'eau**, dépendante de la lithologie, en utilisant comme traceur l'ion Calcium,
- l'**hydrologie**, résultat de l'influence combinée du climat et du relief, sur la base du débit moyen annuel naturel.

2.2. Influences amont sur l'hydrochimie

2.2.1. Les données utilisées

Parmi les informations disponibles, la base de données de suivi de qualité du RNDE (Réseau National de Données sur l'Eau, communiquée par F. MOATAR, Faculté de Tours) constitue un capital important d'informations sur de nombreux points du territoire (2 702 stations) pour des dates de prélèvement allant de 1969 à 2000.

La concentration en Calcium constitue une information assez peu dépendante des pressions anthropiques (Blanchard, 2003) et exprime relativement bien les caractéristiques chimiques d'une partie des hydro-écorégions « amont » (Massif Central Sud et Nord, Vosges) dont la nature géologique est homogène et nettement différenciée .

Parmi les éléments majeurs dissous dans les eaux courantes naturelles**,** l'ion calcium constitue un excellent « traceur » pour plusieurs raisons :

- il constitue un *élément essentiel du fonctionnement de l'écosystème* par sa contribution majeure à l'équilibre Calcium Carbonates (régulation du pH, alimentation en carbone des végétaux, régulation du métabolisme bactérien) (*cf*. Annexe 4);

- il résulte de la dissolution de roches calcaires, et, à ce titre, présente *une répartition régionale bien marquée* en lien avec la lithologie ;

- il est *peu influencé par les activités humaines* (rejets, occupations de sols) ;

La Silice dissoute varie dans des proportions différentes et présente l'inconvénient d'être facilement abondante dans la craie, roche par ailleurs carbonatée. Les autres ions majeurs résultant de la dissolution de roches (Na^+, Mg^{++}, K^+, Cl^-, …) ne présentent pas de liens évidents avec la lithologie, et leurs concentrations ne sont donc pas facilement modélisables (Blanchard, 2003).

De la base de données du RNDE (108 347 enregistrements pour 2 045 stations géoréférencées) ont été extraites toutes les concentrations en Calcium inférieures à 400 mg/l, valeur retenue comme limite naturelle. Ensuite, la valeur médiane des concentrations en Ca^{++} (mg/l) a été calculée pour chaque station.

Le bassin versant de chaque station de mesure a été délimité sous SIG (logiciels Arcview® et Arcinfo®), et la surface relative des HER situées à l'amont a été calculée pour chacun de ces bassins versants (Pella, 2004).

2.2.2. Caractérisation hydro-chimique des hydro-écorégions

Dans chaque hydro-écorégion ont été sélectionnées les stations « endogènes », dont le bassin versant amont est entièrement compris dans l'HER de situation (742 stations). Ensuite, la répartition en quantiles de la distribution de ces concentrations médianes en Ca^{++} a été calculée pour chaque HER (Figure 7 et Tableau 9 ; données détaillées en Annexe 5).

Cette distribution de valeurs médianes de concentration en Calcium, visualisée sur la Figure 6, permet d'identifier trois groupes d'hydro-écorégions :

- un ensemble d'HER caractérisées par leur faible concentration en ion calcium (< 40 mg/l), (Pyrénées, Massif Central Sud et Nord, Vosges, Cévennes, Massif Armoricain, Landes, Corse, Ardennes) ;

- un groupe d'HER caractérisées par une variabilité importante des concentrations (Alpes internes, Côteaux Aquitains, Alsace) ;

- les HER aux eaux franchement calcaires (> 60 mg/l), (Méditerranéen, Tables Calcaires, Côtes calcaires Est, Jura Préalpes du Nord, Causses Aquitains).

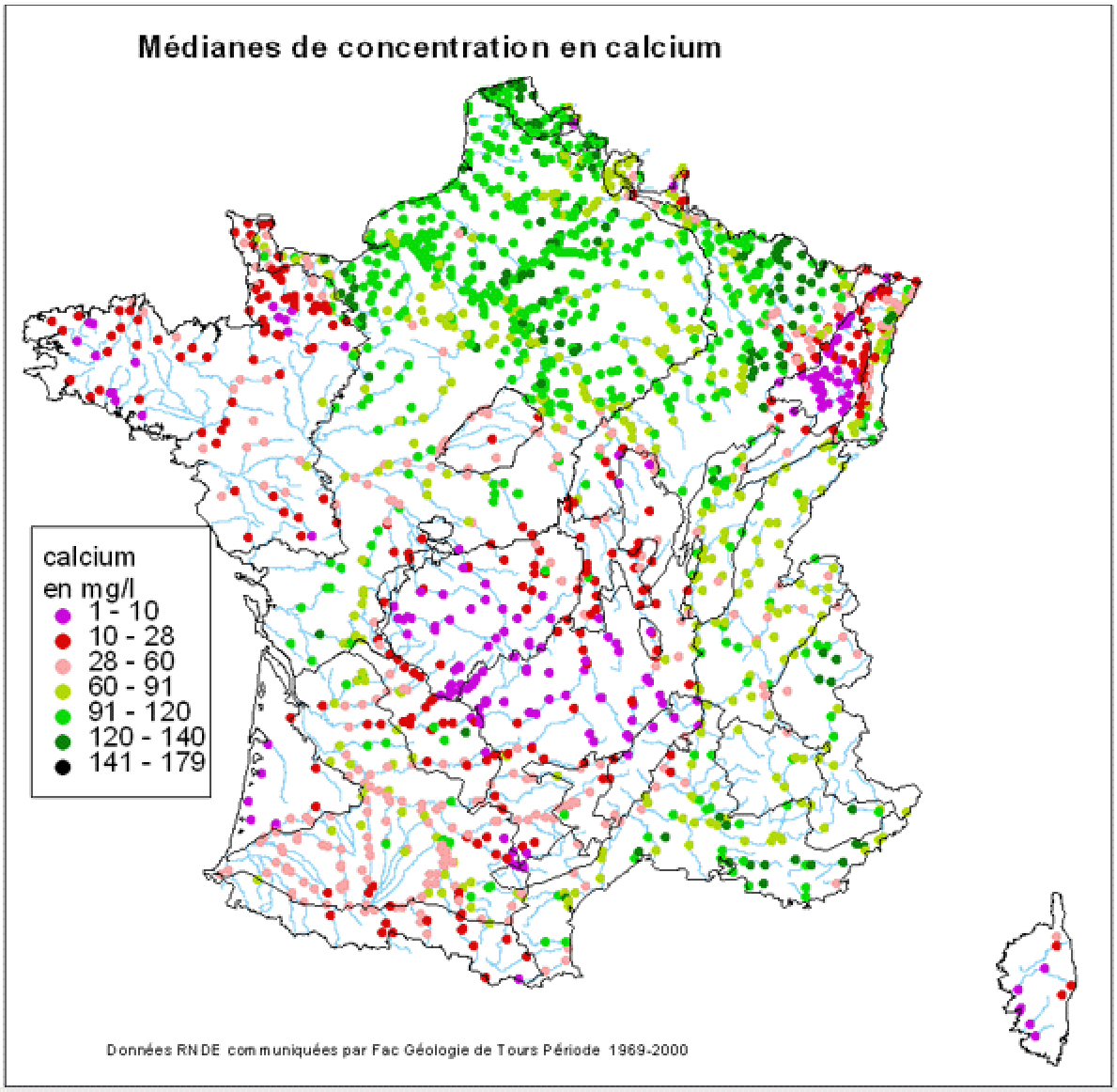


Figure 6 - Cartes des concentrations en Calcium (médianes sur période 1969 – 2000)

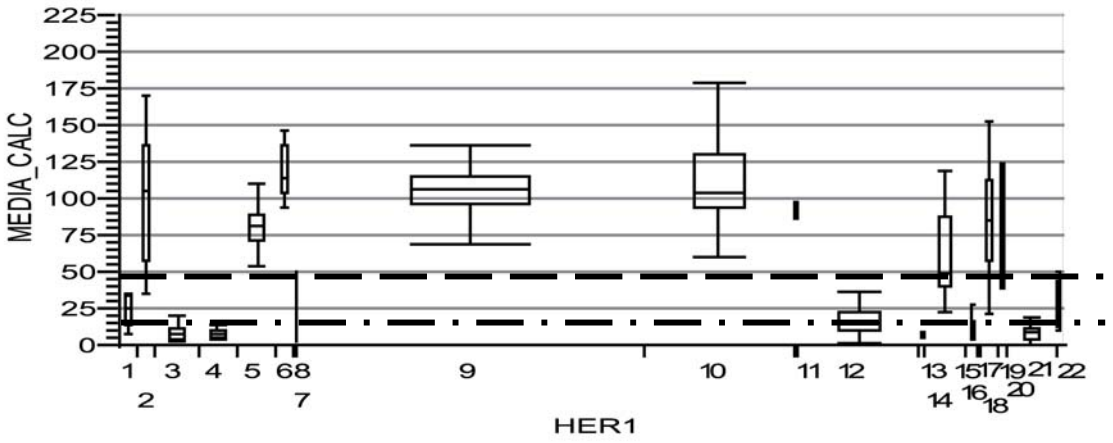


Figure 7 - Distribution des médianes de concentrations en calcium par station du RNB
Les HER correspondent au tableau figurant en Annexe 5

Les quantiles correspondent à 25 %, 75%, et maximum hors points atypiques
Largeur des boîtes proportionnelles au nombre de stations par HER

HER	Nom de l'hydro-écorégion	25%	Median	75%	Nbre
1	PYRENEES	15	26	34	15
2	ALPES INTERNES	58	106	137	15
3	MASSIF CENTRAL	5	8	12.5	33
4	VOSGES	6	8	11	31
5	JURA-PREALPES DU NORD	72.25	81.5	89.75	30
6	MEDITERRANEEN	104.25	115	137.25	14
7	PREALPES DU SUD	75	75	75	1
8	CEVENNES	3	27	51	2
9	TABLES CALCAIRES	97	107	116	272
10	COTES CALCAIRES EST	94	104	131	119
11	CAUSSES AQUITAINS	87	90	98	3
12	ARMORICAIN	11	16	23	95
13	LANDES	6	7	9	5
14	COTEAUX AQUITAINS	41	49	88	31
15	PLAINE SAONE	73	73	73	1
16	CORSE	6	9.5	16.75	10
17	DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	31	31	31	1
18	ALSACE	57.75	86	113.5	14
19	GRANDS CAUSSES	103	103	103	1
20	DEPOTS ARGILO SABLEUX	39	94.5	122.75	6
21	MASSIF CENTRAL NORD	5	9	12	39
22	ARDENNES	13.75	23	44.25	4

Tableau 9 - Répartition des concentrations médianes en calcium des stations par HER (mg/l)

2.2.3. Relations amont-aval exprimées par la concentration en ions calcium

Il apparaît donc envisageable d'examiner les relations amont-aval entre des groupes d'HER nettement différenciés, en excluant celles dont la variabilité sur la concentration en calcium est très importante. Sont donc exclus les cours d'eau provenant des HER Alpes Internes et Jura Préalpes du Nord, et ceux arrivant dans les Coteaux Aquitains, l'Alsace et les Dépôts Argilo-Sableux.

Les différentes analyses ci-après ne concernent que la relation amont-aval pour des cours d'eaux provenant d'une HER à faible concentration en calcium et situés dans une HER à forte concentration (calcaire). Le cas inverse reste limité à quelques situations particulières (Tables Calcaires vers Massif Armoricain,...) qui pourront être examinées au cas par cas, selon l'existence de données disponibles.

a) Modélisation de la concentration en calcium par le calcul des flux

La concentration en calcium est un paramètre conservatif (à pH < 8.3) qui, dans les conditions habituelles des eaux naturelles, reste directement dépendant des conditions de dilution ; il est donc possible d'envisager des relations simples du type :

$$C_{totale} = ((C_{HERamont} \times Q_{HERamont}) + (C_{HERaval} \times Q_{HERaval}))/Q$$

(Avec C = concentration en Ca^{++} ; Q = Débit moyen annuel)

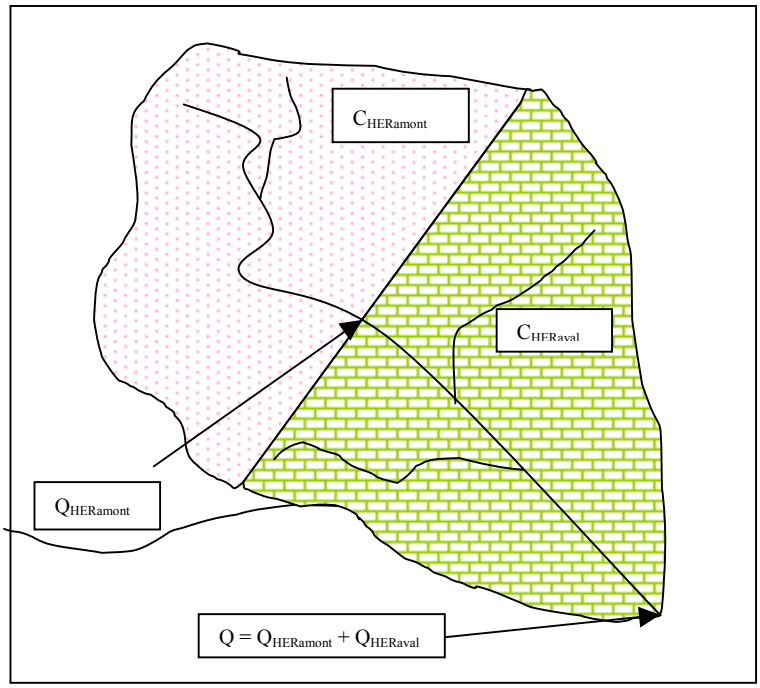


Figure 8 - Schéma de principe du calcul de flux d'ions calcium

Dans le cas de relations simples (une HER amont, une HER aval), les données résultant des surfaces relatives de bassins versants, de l'extrapolation spatiale des données de la banque HYDRO, et des distributions de valeurs de concentration en calcium par HER permettent de réaliser des simulations.

Les données nécessaires pour construire le modèle de concentration sont :

- la concentration en calcium de l'HER amont (pauvre en Ca^{++}),
- le débit spécifique à l'exutoire de l'HER amont,
- le débit spécifique au point modélisé,
- les surfaces relatives des HER amont (pauvre en Ca^{++}) et HER aval (calcaire) dans le bassin versant du point modélisé.

Les résultats obtenus par le calcul (Ccalcth) sur quatre rivières (Figure 9) montrent une assez bonne corrélation avec les valeurs médianes observées sur les stations (Ccalcobs) ; le raisonnement fondé sur la conservation de flux semble donc assez bien vérifié pour le calcium. Si l'évolution est assez linéaire dans la majeure partie des cas, il arrive (cas du Cher) que la combinaison surfaces relatives x débits relatifs des affluents donnent des relations non linéaires, mais vérifiées par l'observation.

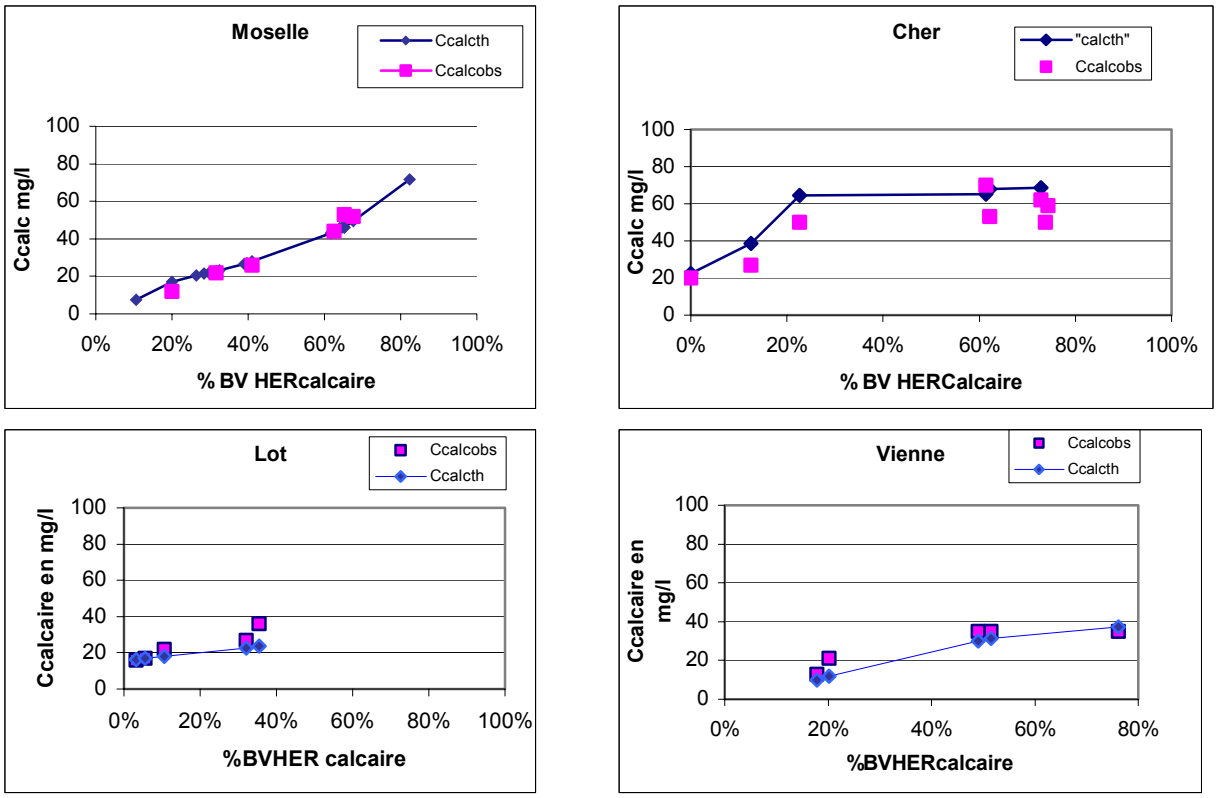


Figure 9 - Modèle d'évolution de la concentration de calcium en fonction de la proportion en surface de l'HER aval (HER calcaire) sur quatre rivières

En revanche, ce type de calcul s'avère très rapidement complexe pour les grands cours d'eau qui ont une succession d'affluents aux débits relatifs parfois différents, et/ou traversant plusieurs hydro-écorégions, ce qui fait varier les concentrations initiales et nécessite des combinaisons de données et de formules rapidement complexes. Il n'apparaît donc pas possible d'utiliser ce type de modèle pour généraliser une simulation de concentration en calcium dans les cours d'eau.

b) Modélisation statistique de l'évolution longitudinale de la concentration en calcium

Une généralisation a donc été recherchée à partir d'une approche plus simple basée sur les caractéristiques régionales. À partir des concentrations mesurées sur les cours d'eau « exogènes », il est possible de rechercher une relation entre la concentration en calcium et la proportion d'HER calcaire dans le bassin versant du point considéré, du type :

$$C\ calcium = f(\%\ BV_{HER\ calcaire})$$

On a donc recherché des stations situées dans une HER franchement calcaire, mais dont le bassin amont traverse une ou deux HER à faible concentration en calcium (*cf.* § 2.2.2.) ; ce tri permet de sélectionner 186 stations (Figure 10).

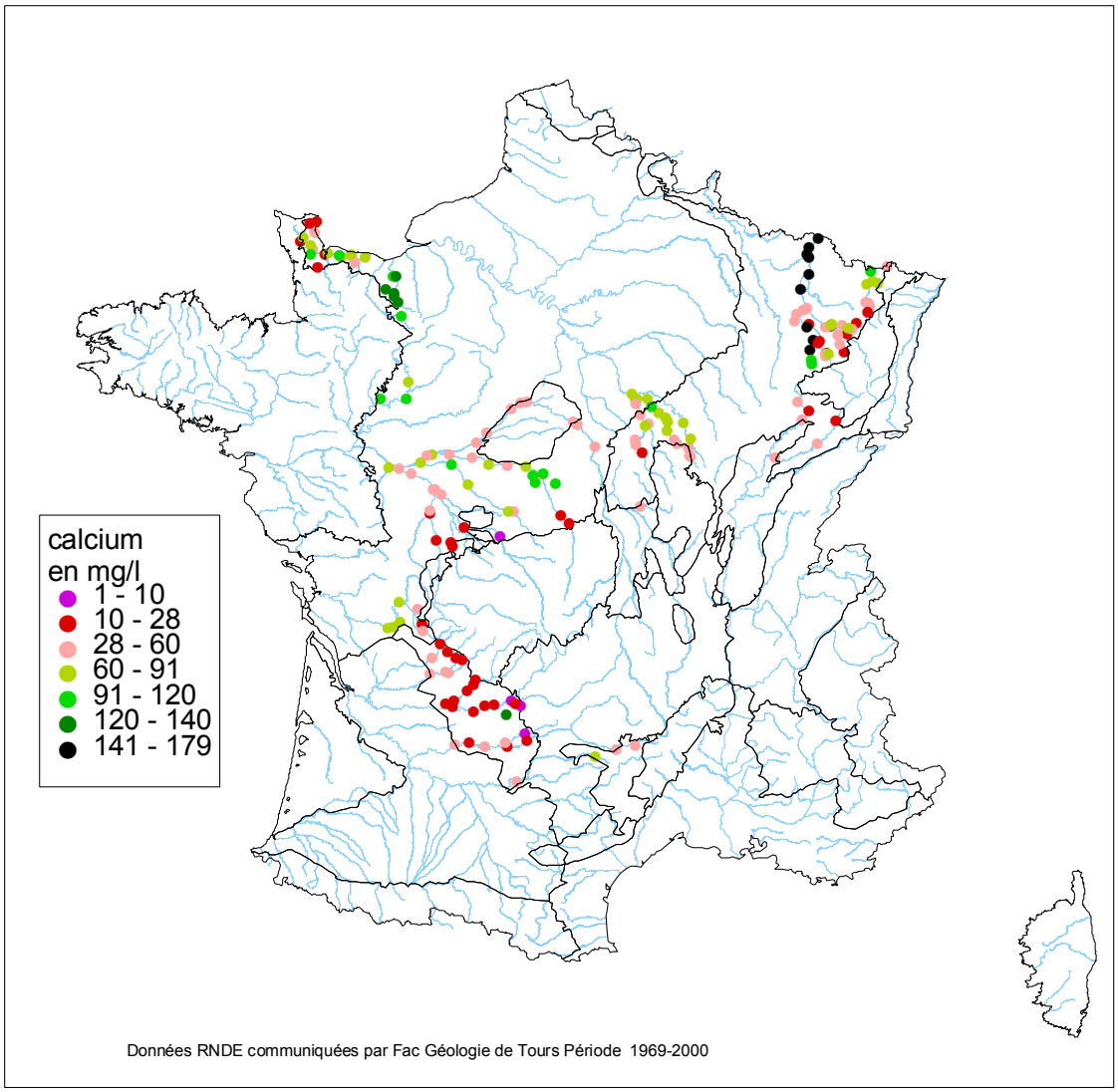


Figure 10 - Situation des stations du RNDE sur les cours d'eau exogènes

Sur cet ensemble de stations, on a recherché à partir d'une régression linéaire simple la corrélation entre la concentration en Ca^{++} et le pourcentage de bassin versant situé dans l'HER aval calcaire (Figure 11).

Les stations avec des concentrations en Ca^{++} supérieures à 140 mg/l forment un groupe particulier dans le nuage de points, et correspondent à une situation spatiale et géologique assez particulière (couches géologiques du Trias supérieur en Lorraine) ; elles ont été éliminées par la suite de l'analyse. Les stations pour lesquelles le nombre d'hydro-écorégions dans le bassin versant amont est supérieur à 4 ont également été éliminées.

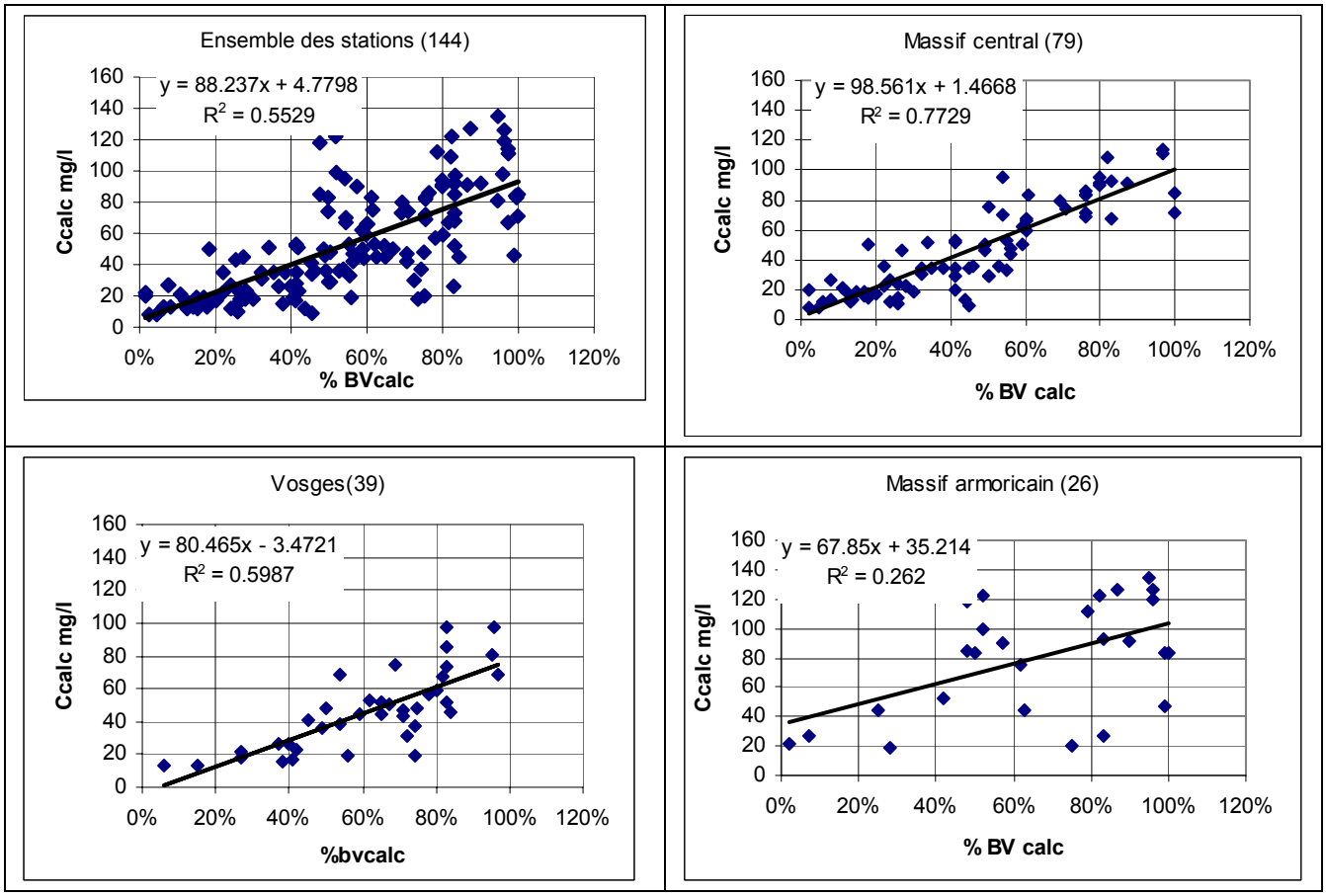


Figure 11 - Régressions linéaires des relations : Ca^{++} = f (%BV en HER calcaire)

Une première régression linéaire effectuée sur l'ensemble des stations retenues (n = 144) donne un résultat peu satisfaisant (r^2 = 0.55), mais une amélioration des relations est obtenue en scindant l'ensemble des stations en trois groupes géographiques correspondant aux cours d'eaux qui proviennent des Vosges, du Massif Central et du Massif Armoricain. Cette amélioration s'explique notamment par les différences de lithologie locale entre régions, ainsi que les différences de conditions d'écoulement (débits moyens annuels) qui ont une incidence significative sur le résultat.

On constate que le résultat est moins satisfaisant pour le Massif Armoricain, ce qui est explicable par les variations importantes de la lithologie locale en limite de l'hydro-écorégion Tables Calcaires, passant du grès du Trias (pauvre en calcium) au massif de craie de la région de Caen.

2.2.4. Outil d'aide à la décision – seuils de cours d'eau « exogènes »

Le but de ces analyses est de déterminer jusqu'à quelle limite un tronçon de cours d'eau issu d'une hydro-écorégion différente de celle dans laquelle il se situe peut être considéré comme influencé par l'HER amont.

En ce qui concerne l'hydrochimie, pour les cours d'eau situés en hydro-écorégion calcaire et provenant d'une hydro-écorégion non calcaire, le raisonnement suivant est proposé :

> au vu des concentrations en calcium observées sur les cours d'eau « endogènes » dans les différents groupes d'hydro-écorégions (Figure 7), on considère que ***l'influence de l'amont n'est plus perceptible pour une concentration supérieure à 60 mg/l de*** Ca^{++}.

Les équations issues des régressions linéaires nous donnent un seuil maximal, en pourcentage de bassin versant aval de type calcaire au point considéré, de l'ordre de :

- 63 % pour le modèle intégrant toutes les stations ;
- 59 % pour les cours d'eau issus du « Massif Central » ;
- 79 % pour les cours d'eau issus des « Vosges ».

Pour les cours d'eau exogènes du Massif Armoricain, il n'apparaît pas pertinent de définir un seuil, compte tenu du faible pouvoir explicatif de la régression linéaire obtenue. Ces résultats sont assez cohérents avec les résultats observés par cours d'eau (Figure 9).
Ces seuils peuvent constituer un premier outil de définition de la limite aval des cours d'eau « exogènes » au regard de l'hydrochimie, que nous proposons de traduire par la représentation cartographique suivante (Figure 12).

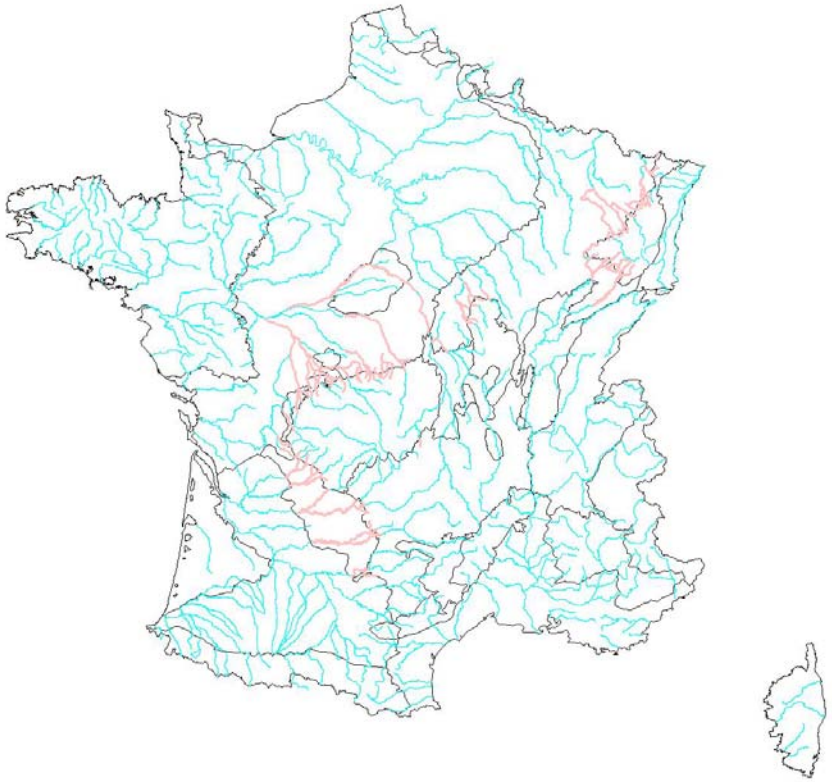


Figure 12 - Carte des cours d'eau « exogènes » sur la base de la concentration en calcium inférieure à 60 mg/l évaluée selon un modèle régionalisé (Massif Armoricain exclu)
Seules les relations d'HER à faibles concentrations vers des HER à fortes concentrations sont représentées. Ont été exclues de l'analyse les hydro-écorégions présentant une forte variabilité sur ce paramètre (Alpes, Alsace, Coteaux Aquitains, Dépôts Argilo-Sableux) ou dont le nombre de stations est insuffisant (Préalpes du Sud, Cévennes, Causses Aquitains, Landes, Dépressions sédimentaires, Grands Causses, Ardennes).

Ces premiers résultats sont à compléter en utilisant les données hydrologiques.

2.3. Influences amont sur l'hydrologie

2.3.1. Données utilisées

La Banque Nationale de Données Hydrométriques (Banque HYDRO) rassemble les mesures hydrométriques effectuées sur l'ensemble du territoire, avec des durées d'enregistrements permettant d'effectuer des analyses sur de longues périodes. Grâce aux résultats récents d'extrapolation spatiale de ces données (Sauquet, 2005), il est possible de connaître la lame d'eau annuelle moyenne générée par chaque zone hydro, ce que l'on peut traduire par un débit naturel (module annuel) reconstitué à l'exutoire de chacune des zones hydro.

Le résultat de ce modèle peut être illustré par la carte des écoulements annuels moyens rapportés à la surface de bassin versant, ou débit moyen annuel spécifique (Figure 13). On peut constater une certaine similitude avec la carte des précipitations annuelles moyennant quelques variations locales.

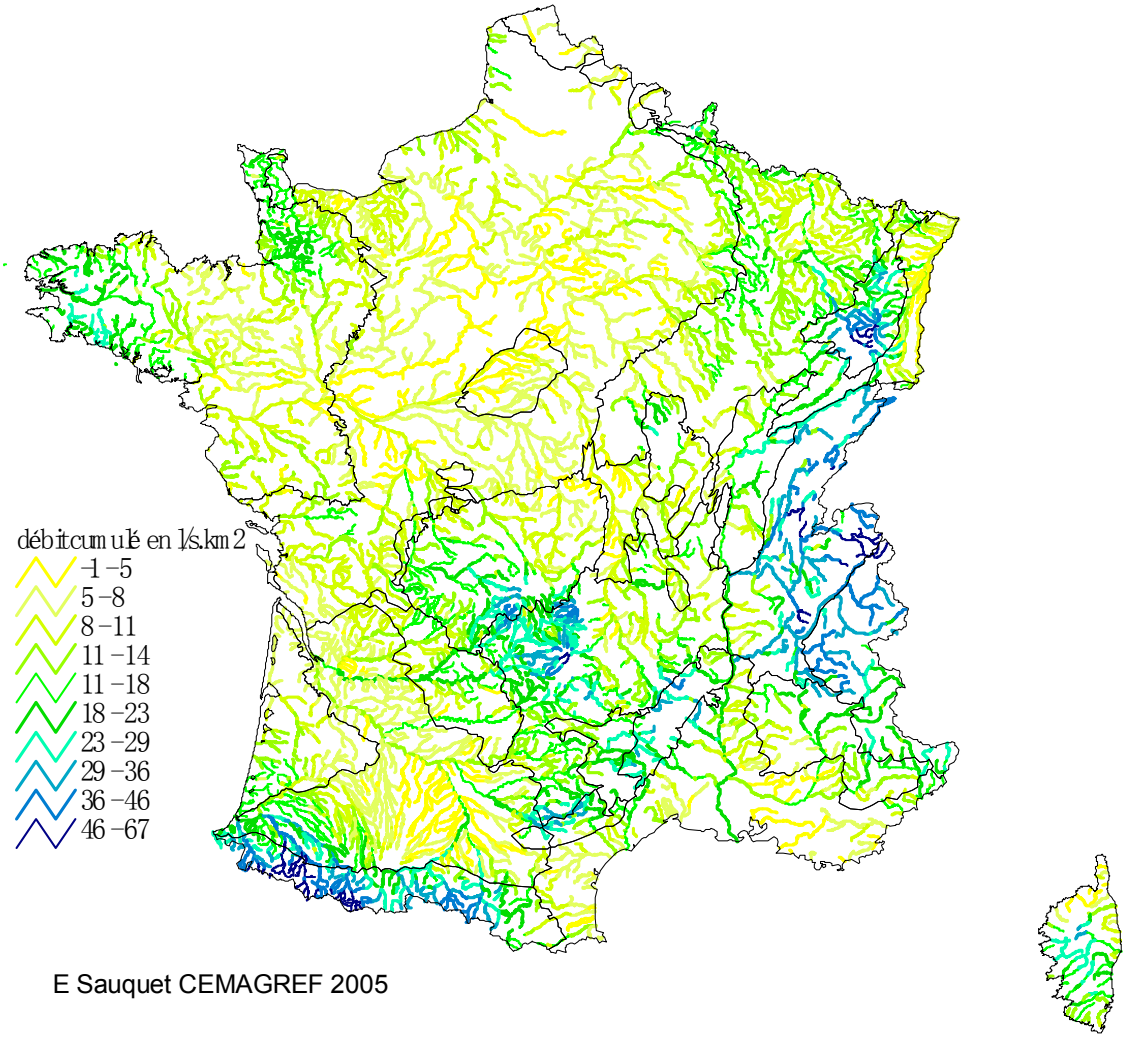


Figure 13 - Carte des écoulements moyens annuels naturels (l/s/km^2). D'après Sauquet (2005)

Ne disposant que des données d'écoulements moyens, mais extrapolées de manière homogène à l'ensemble du territoire national, nous nous proposons de les utiliser pour évaluer l'influence des hydro-écorégions amont sur les hydro-écorégions aval, au risque de sous évaluer les incidences liées aux phénomènes hydrologiques plus variables, et donc plus complexes à obtenir à cette échelle (crues, étiages, écoulements saisonniers).

2.3.2. Caractérisation hydrologique des hydro-écorégions

Selon le même raisonnement que celui adopté pour l'hydrochimie, nous proposons dans un premier temps de caractériser les hydro-écorégions les unes par rapport aux autres. Une analyse statistique de la répartition en quantiles de distribution des débits reconstitués pour les cours d'eau « endogènes » (dont le bassin versant amont est entièrement compris dans l'hydro-écorégion de situation) permet également d'identifier trois groupes distincts (Figure 14 et Tableau 10 ; données détaillées en Annexe 6) :

- les HER caractérisées par une hydrologie abondante, avec un débit spécifique médian > 20 l/s.km2 et 75 % des valeurs > 14 l/s.km2, même s'il existe une grande variabilité spatiale des valeurs (Pyrénées, Alpes, Vosges, Jura-Préalpes du Nord, Cévennes) ;

- les HER aux débits assez soutenus, compris entre 10 et 20 l/s. (Massif Central, Préalpes du Sud, Côtes Calcaires Est, Causses Aquitains, Massif Armoricain, Landes, Ardennes, Corse) ;

- les HER aux débits faibles avec un débit spécifique médian < 7 l/s (Méditerranée, Tables Calcaires, Coteaux Aquitains, Dépressions sédimentaires, Alsace, Dépôts Argilo-sableux).

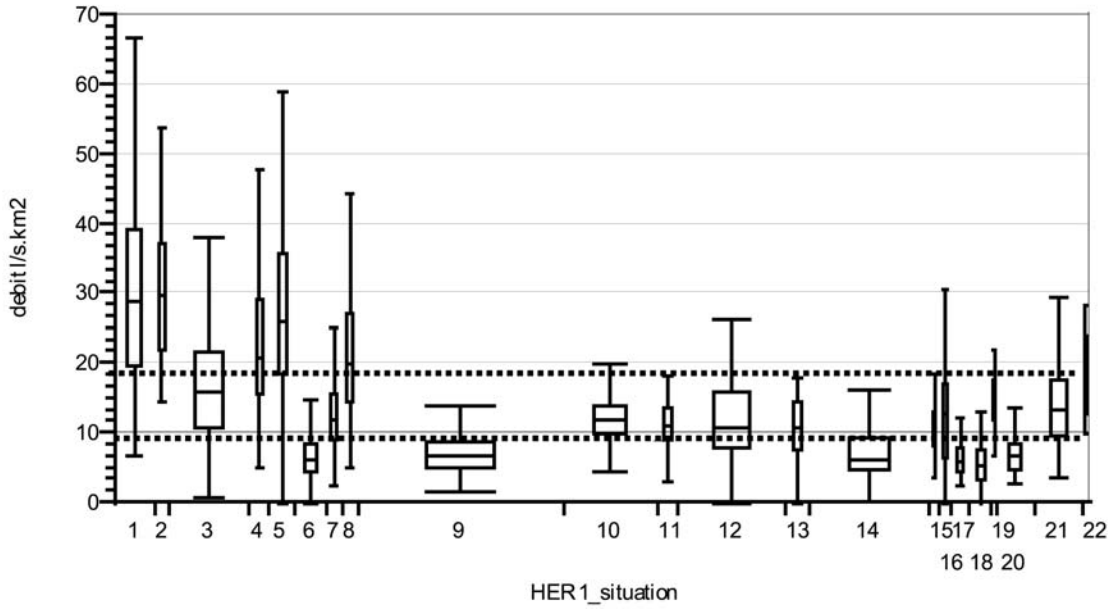


Figure 14 - Distribution des débits par hydro-écorégion pour les cours d'eaux endogènes. Les quantiles correspondent à 25 %, 50%, 75%, et maximum hors points atypiques. Largeur des boîtes proportionnelle au nombre de stations par HER.

HER	Nom de l'hydro-écorégion	25%	Median	75%	Nbre de zones hydro
2	ALPES INTERNES	22	30	37	94
1	PYRENEES	20	29	39	265
5	JURA-PREALPES DU NORD	18	26	36	166
4	VOSGES	16	21	29	132
8	CEVENNES	14	20	27	106
22	ARDENNES	13	20	24	30
3	MASSIF CENTRAL SUD	11	16	22	521
19	GRANDS CAUSSES	12	14	18	39
21	MASSIF CENTRAL NORD	10	13	18	321
16	CORSE	7	13	17	80
10	COTES CALCAIRES EST	10	12	14	612
7	PREALPES DU SUD	9	12	16	101
15	PLAINE SAONE	8	11	13	66
11	CAUSSES AQUITAINS	9	11	14	136
12	ARMORICAIN	8	11	16	693
13	LANDES	8	11	14	157
9	TABLES CALCAIRES	5	7	9	1340
20	DEPOTS ARGILO SABLEUX	5	7	8	236
6	MEDITERRANEEN	4	6	9	205
14	COTEAUX AQUITAINS	5	6	9	785
17	DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	5	6	8	113
18	ALSACE	3	5	8	149

Tableau10 - Répartition des débits spécifiques (l/s/km²) des zones hydro par HER

A partir de ce regroupement, il est possible d'établir des relations d'HER amont à HER aval en les quantifiant sur la base de la différence d'hydraulicité constatée, l'HER amont ayant toujours un débit spécifique supérieur à celui de l'HER aval.

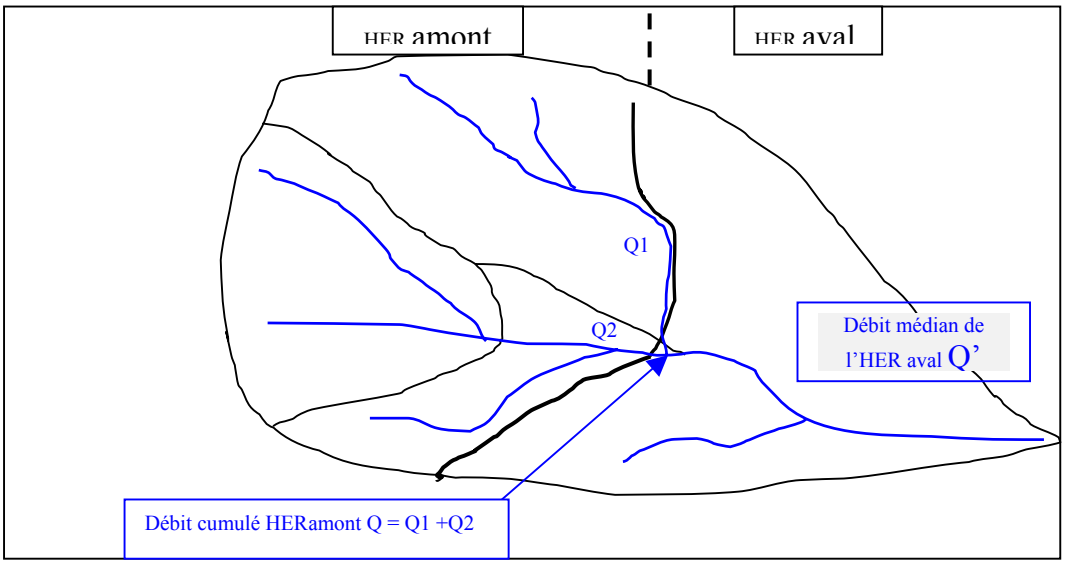


Figure 15 - Schéma de principe de relation amont-aval pour les débits

HER amont	HER aval	débit cumulé HER amont Q	débit médian HER aval Q'	Différence ΔQ
Alpes	Région Méditerranéenne	34	6	28
Jura Préalpes Nord	Région Méditerranéenne	33	6	27
Pyrénées	Coteaux aquitains	32	6	26
Pyrénées	Région Méditerranéenne	32	6	26
Alpes	Préalpes du Sud	34	12	22
Jura Préalpes Nord	Plaine de Saône	33	11	22
Vosges	Alsace	25	5	20
Cévennes	Région Méditerranéenne	21	6	15
Vosges	Plaine de Saône	25	11	14
Vosges	Côtes Calcaire Est	25	12	13
Massif Central Sud	Dépressions sédimentaires	18	6	12
Massif Central Sud	Coteaux Aquitains	18	6	12
Massif Central Nord	Tables calcaires	18	7	11
Alpes	Jura Préalpes Nord	34	26	8
Préalpes du Sud	Région Méditerranéenne	14	6	8
Limousin Morvan	Coteaux Aquitains	14	6	8
Causses Aquitains	Coteaux Aquitains	14	6	8
Limousin Morvan	Tables calcaires	14	7	7
Massif Central Sud	Causses Aquitains	18	11	7
Côtes Calcaire Est	Tables calcaires	13	7	6
Cévennes	Massif Central Sud	21	16	5
Massif Central Sud	Limousin Morvan	18	13	5
Massif armoricain	Tables calcaires	11	7	4
Limousin Morvan	Causses Aquitains	14	11	3

Tableau 11 - Comparaison des débits amont-aval entre hydro-écorégions (en l/s/km²)

Débit cumulé HER amont : médiane des débits spécifiques cumulés des zones hydro situées en amont de la limite d'hydro-écorégion.
Débit médian aval : médiane des débits spécifiques de l'ensemble des zones hydro de l'HER aval.

On peut constater que les écarts amont-aval sont variables selon les configurations géographiques. Les écarts les plus marqués, dans la partie supérieure du Tableau 11 (> 20 l/s/km^2), sont logiquement observés entre des régions à forte et faible hydraulicité, par exemple sur les cours d'eaux en région Méditerranéenne alimentés par les Alpes internes. Les écarts moyens (entre 10 et 15 l/s/km^2, partie centrale du Tableau 11), correspondent à des relations entre régions d'hydraulicité forte à moyenne (ex. : Vosges vers Cotes Calcaires Est), ou moyenne à faible (ex. : Massif Central Nord vers Tables Calcaires). Enfin les écarts faibles correspondent à des relations entre HER d'hydraulicité sensiblement équivalente.

Ces écarts de débits spécifiques représentent une première étape d'évaluation de l'incidence des hydro-écorégions amont sur le fonctionnement des cours d'eau « exogènes » en aval. Il convient maintenant de s'intéresser à un moyen permettant à la fois de comparer cette influence d'un cours d'eau (ou d'un type de masse d'eau) à l'autre, et d'évaluer cette influence sur une dimension longitudinale.

2.3.3. Evolution longitudinale de l'influence hydrologique

La description de l'influence hydrologique repose sur une évaluation de l'hydraulicité de la zone amont, à plus fort débit, et de la zone aval influencée par le débit provenant d'une HER amont.

- ✓ L'utilisation du débit cumulé à l'exutoire de l'hydro-écorégion apparaît logique pour quantifier l'hydrologie provenant de la zone amont.

- ✓ Pour l'aval, en revanche, nous nous intéressons aux débits produits localement au niveau des zones hydro traversées, pour ne pas prendre en compte les débits influencés par l'amont.

Le choix existe entre l'utilisation d'un débit « local », correspondant à celui produit par la zone hydro de situation, ou une approche « régionale », basée sur la médiane des débits de l'ensemble des zones hydro de l'HER aval.

Approche locale

Le débit « local » de la zone hydro de situation permet d'identifier des situations particulières de certains cours d'eau car les hydro-écorégions ne sont pas parfaitement homogènes du point de vue hydrologique. Mais ce choix nécessite de garder la possibilité de « lisser » ces valeurs pour interpréter la situation de chaque cours d'eau « exogène ».

En suivant ce raisonnement, la quantification de l'influence hydrologique de l'amont sur l'aval pourrait être représentée par la carte de « l'influence hydrologique locale » (Figure 16). Sur cette carte, les cours d'eau « exogènes » sont définis par la différence de débit spécifique :

Qcumulé amont – Qlocal aval (en l/s/km²).

Cette approche présente l'inconvénient de restituer la variabilité locale des situations ; dans les zones à faible écoulement, le Bassin Parisien par exemple, l'influence relative de l'amont apparaît surévaluée. Néanmoins des grandes tendances spatiales se dessinent selon les différentes relations décrites dans le Tableau 11.

Pour identifier les types « exogènes » dans le cadre de la typologie requise pour la DCE, une proposition plus robuste, basée sur une approche régionale et l'identification de seuils de différence de débits, peut s'avérer suffisante.

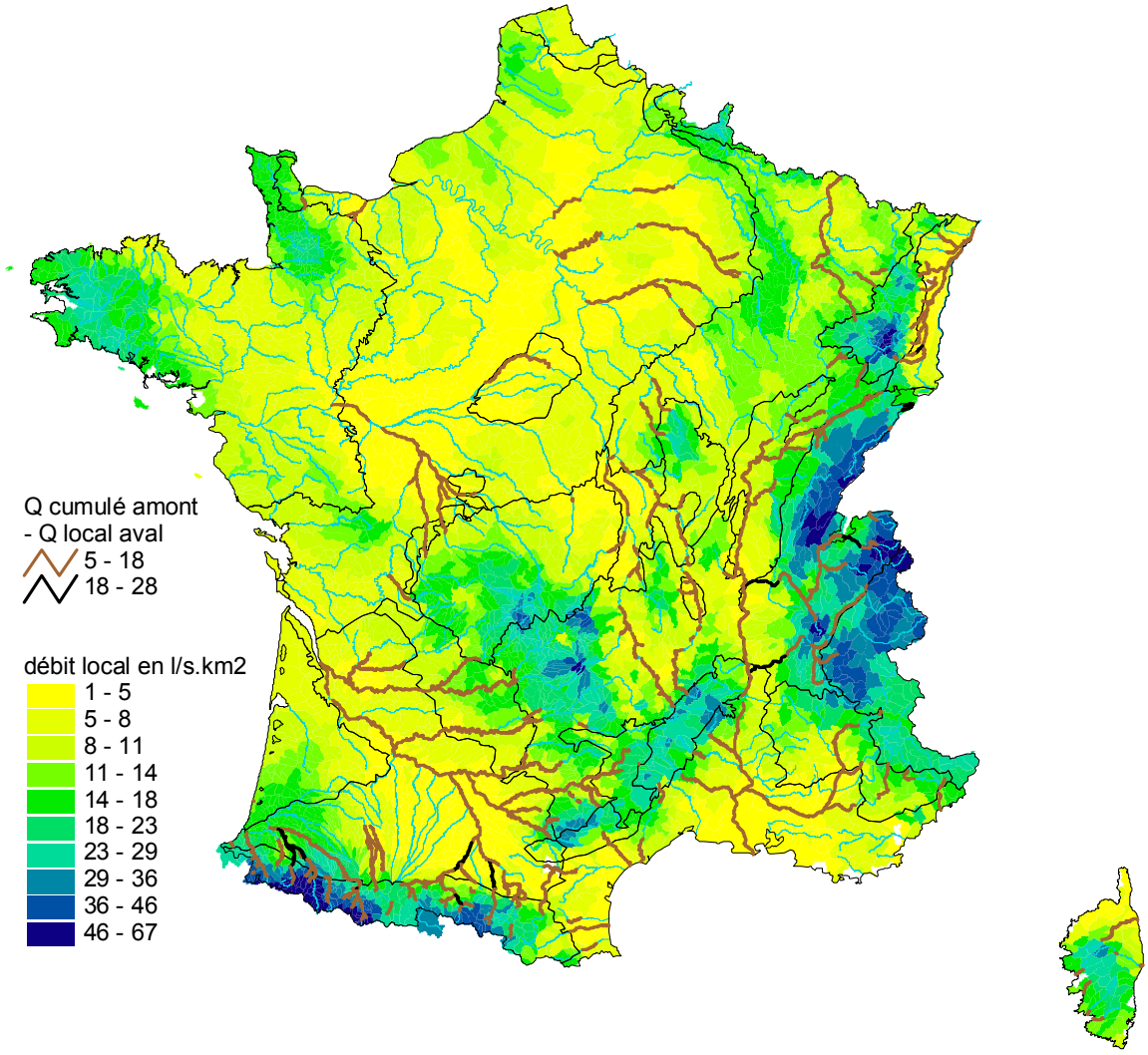


Figure 16 - Carte de définition des cours d'eau « exogènes » selon une approche « locale » : différences entre débits spécifiques provenant de l'amont et la production « locale » de la zone hydrographique.

2.3.4. Approche régionale par seuils de variation de débits

Il ressort de l'analyse ci-dessus deux types de relations amont-aval :

- les cours d'eau issus de zones à forte production d'eau (Alpes, Pyrénées, Vosges, Jura), susceptibles d'associer un transport solide au volume d'eau transféré à l'aval ;

- les cours d'eau issus de zones à production d'eau sensiblement supérieure à celles des régions qu'ils traversent, mais dont les différences en termes de débit relatif sont moins marquées.

Nous proposons de fixer des seuils en comparant les débits théoriques obtenus par relation HER amont – HER aval de la manière suivante :

a) La différence ($\Delta Q_.$) entre le débit spécifique à l'exutoire de l'HER amont et le débit spécifique médian de l'HER aval (Tableau 10) représente la part de quantité d'eau « supplémentaire » due à l'HER amont. Ce débit supplémentaire est donc égal à :

$$Q_{suppl} = \Delta Q_. \times S_{bv\ HER\ amont}$$

$S_{bv\ HER\ amont}$: surface de bassin versant comprise dans l'HER amont

b) Le débit « théorique » médian de l'HER aval, si l'influence amont n'existait pas (i.e. débit d'un cours d'eau endogène de même surface de BV) est :

$$Q_{theor\ aval} = Q' \times S_{bv\ tot}$$

Q' : débit local spécifique de l'hydro-écorégion aval (Tableau 10)
$S_{bv\ tot}$: surface totale de bassin versant du point considéré

A partir de ces relations, il est possible de quantifier l'influence hydrologique de l'amont sur l'aval. Nous proposons de retenir deux seuils, correspondant à une influence hydrologique forte ou moyenne :

- Si la quantité d'eau « supplémentaire » (Q_{supp}) représente ***plus de 200 % du débit « théorique » aval*** ($Q_{theoraval}$), on considère que l'HER amont a une ***influence forte***.
- Si la quantité d'eau « supplémentaire » (Q_{supp}) représente ***plus de 50 % du débit « théorique » aval*** ($Q_{theoraval}$), on considère que l'HER amont a une ***influence moyenne***.
- En dessous de 50%, la variabilité interne des débits de l'HER aval ne permet pas de discerner une influence provenant de l'amont.

Ces deux seuils peuvent se traduire par la proportion de bassin versant de l'HER amont nécessaire pour influencer de manière significative (moyenne ou forte) le tronçon « exogène » dans l'HER aval (Tableau 11). Cette méthode permet de relativiser des différences relativement élevées en valeur absolue, mais en réalité peu perceptibles pour les cours d'eau à forts débits.

Par exemple, pour la relation Alpes internes vers Préalpes du Nord, la différence est de 8 l/s/km², mais pour des débits moyens annuels respectivement de 34 et 26 l/s/km² ; il faut donc atteindre une proportion de 84 % de surface de bassin versant dans l'HER Alpes internes pour considérer un impact moyen dans l'HER Préalpes du Nord.

De plus, le lissage obtenu par l'utilisation des médianes par hydro-écorégion permet d'obtenir des résultats par grands tronçons de cours d'eau. Mais en contrepartie, les HER n'étant pas parfaitement homogènes du point de vue hydrologique, cette évaluation fondée sur les médianes de débits issues d'un modèle d'écoulement aboutit à masquer la variabilité locale.

Néanmoins, malgré sa robustesse et sa simplicité, cette approche régionale donne des résultats globalement cohérents avec ceux de l'approche locale, et nous l'avons retenue pour définir les cours d'eaux « exogènes » sur le compartiment hydrologie. Les résultats sont visualisés sur la carte de la Figure 17.

HER amont	HER aval	% BV dans l'HER amont pour une **influence forte** (Q_{suppl} > 200 % $Q_{theor\ aval}$)	% BV dans l'HER amont pour une **influence moyenne** (Q_{suppl} >50 % et <200 % du $Q_{theor\ aval}$)
Alpes	Région Méditerranéenne	45	11
Jura Préalpes Nord	Région Méditerranéenne	47	12
Pyrénées	Coteaux aquitains	47	12
Pyrénées	Région Méditerranéenne	49	12
Alpes	Préalpes du Sud		27
Jura Préalpes Nord	Plaine de Saône		26
Vosges	Alsace	56	14
Cévennes	Région Méditerranéenne	85	21
Vosges	Plaine de Saône		42
Vosges	Côtes Calcaire Est		47
Massif Central Nord	Dépressions sédimentaires		25
Massif Central Sud	Coteaux Aquitains		27
Massif Central Nord	Tables calcaires		32
Alpes	Jura Préalpes Nord		84
Préalpes du Sud	Région Méditerranéenne		41
Limousin Morvan	Coteaux Aquitains		38
Causses Aquitains	Coteaux Aquitains		39
Limousin Morvan	Tables calcaires		47
Massif Central Sud	Causses Aquitains		84
Côtes Calcaire Est	Tables calcaires		55
Massif armoricain	Tables calcaires		79

Tableau 12 – Proportions de bassin versant dans l'HER amont (à forte hydraulicité)nécessaire pour observer une influence forte moyenne ou moyenne sur les cours d'eaux « exogènes » dans l'HER aval (à hydraulicité plus faible)
- l'ordre et les couleurs des lignes correspondent à la hiérarchisation des relations par la valeur absolue de la différence de débit spécifique amont-aval (Tableau 10),
- les valeurs en % correspondent à la proportion minimale de surface d'HER amont dans le bassin versant pour avoir une influence hydrologique forte ou moyenne,
- plus ce chiffre est élevé, plus l'influence de l'HER amont sera limitée sur l'HER aval.
- les cours d'eau « exogènes » cartographiés (Figure 16) sont ceux dont la valeur relative de BV de l'HER amont est supérieure au seuil indiqué dans le tableau.

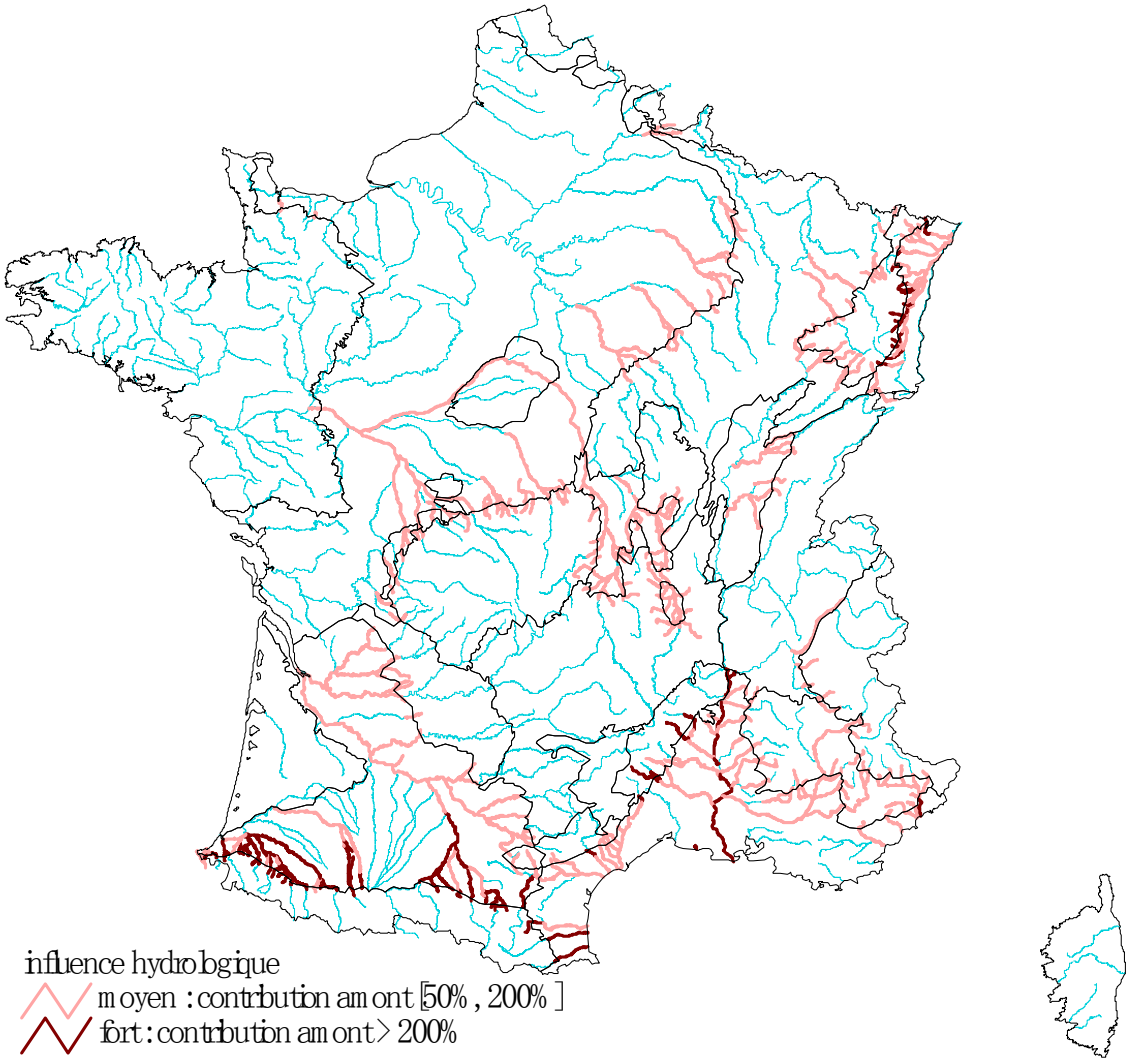


Figure 17 - Carte des cours d'eau « exogènes » influencés par l'hydrologie des cours d'eau des hydro-écorégions amont, selon une approche basée sur la médiane régionale des débits spécifiques

2.4. Intégration des relations amont-aval dans la typologie

Cette étude des relations amont-aval sur le réseau hydrographique, au travers de paramètres hydrochimiques et hydrologiques, permet d'identifier l'ordres de grandeur des influences amont sur le fonctionnement de l'écosystème aquatique au niveau d'un tronçon, et par là d'identifier les types de cours d'eau « exogènes » dans une hydro-écorégion donnée.

Compte tenu de la nature complémentaire de ces paramètres, il est proposé de retenir le caractère « exogène » dès lors que le cours d'eau est influencé pour l'un ou l'autre.

Le cumul de ces informations, projeté sur carte, donne une idée de la répartition à l'échelle nationale de ces « types » supplémentaires (Figure 18), qui, dans la majeure partie, correspondent aux cours d'eau situés en région de plaine et issus de hautes ou moyennes montagnes.

3. Synthèse

3.1. Cadre physique général de la typologie des masses d'eau

Le cadre typologique national proposé au niveau de la France intègre finalement trois types d'informations différentes :

- le cadre régional défini par les hydro-écorégions, au nombre de 22 ;
- la dimension longitudinale qui conditionne la taille du cours d'eau, exprimée par le rang de Strahler, et traduite en cinq classes de taille différentes ;
- le caractère « exogène » de certains cours d'eau soumis à l'influence d'une hydro-écorégion située à l'amont, et dont les caractéristiques liées à l'hydrochimie et/ou à l'hydrologie sont différentes.

Ainsi pour chaque hydro-écorégion, les masses d'eau seront affectées à l'une des cinq classes de taille (très petit, petit, moyen, grand, très grand), puis on identifiera, en fonction des éléments cartographiques (Figure 18), l'appartenance éventuelle à un type exogène.

Ce schéma général ne peut pas exclure un certain nombre de configurations particulières qui devront être appréciées au niveau local.

Enfin certains cours d'eau de rang très élevé (8 ou 9) constituent à l'échelle de la France un type particulier à eux seul, compte tenu de leur dimension et de leurs caractéristiques propres, différentes selon l'héritage apporté par leur bassin versant. Nous proposons de retenir dans cette catégorie le type « très grands fleuves alpins » d'une part, représentés par le Rhône et le Rhin, et le type « Loire », d'autre part.

3.2. Intégration de l'information « biologique »

Une première analyse des données disponibles en 2002, issues de stations de référence échantillonnées par le CEMAGREF, avait permis de confirmer la cohérence de l'approche régionale avec les assemblages et la structure des communautés d'invertébrés (Wasson *et al*., 2002).

Les données hydrobiologiques (indices IBGN) provenant des réseaux nationaux et complémentaires de bassin (3 662 stations entre 1992 et 2002) ont permis de compléter ces premières informations, notamment à partir des notes IBGN relevées sur des stations de « référence ». Ces stations ont été identifiées comme telles en fonction de leur très faible niveau de pressions anthropiques, selon plusieurs méthodes détaillées dans le rapport « Détermination des valeurs de référence de l'IBGN et propositions de valeurs limites du Bon état» (Wasson *et al*., 2004).

Ces données présentant une bonne couverture spatiale à l'échelle du territoire métropolitain ont permis de confirmer la cohérence régionale des valeurs IBGN et de ses métriques, groupe faunistique indicateur et richesse faunistique.

À partir de cette information, la typologie physique a été affinée selon deux directions :

- D'une part, une simplification par le regroupement *a priori*, dans certaines HER, de classes de taille de cours pour lesquels les différences sur la note IBGN ne sont pas perceptibles ;
- D'autre part, la prise en compte d'une variabilité résiduelle à l'intérieur de certaines HER de niveau 1, en isolant des sous-types correspondant à des HER de niveau 2 aux caractéristiques particulières.

Ces sous-types de niveau HER-2, dont l'existence a été confirmée par les experts locaux, sont :

- le Centre-Sud, à différencier de l'Ouest-Nord-Est, dans l'HER « Massif Armoricain » ;
- l'HER-2 « Haute Normandie–Picardie » dans le grand ensemble « Tables Calcaires » ;
- l'HER-2 « Haute Loire cévenole » dans le massif des « Cévennes » ;
- la « Plaine d'Aléria », dans l'HER « Corse ».

Il est important de signaler que, **si la base physique de la typologie est maintenant stabilisée, l'intégration des informations biologiques est encore provisoire** puisqu'elle n'intègre pas les données du nouveau réseau de référence mis en place en 2005. Au vu des données en cours d'acquisition, on pourra envisager si nécessaire, une révision de la typologie à l'horizon 2008. **Cette révision devrait aller le plus possible dans le sens d'une simplification**, notamment par regroupement de types à chaque fois que l'information biologique ne confirmera pas la distinction établie *a priori* sur la base physique.

3.3. Résultat final

La combinaison du cadre des hydro-écorégions (complété par les sous-types « biologiques »), des classes de taille existantes, et des types « exogènes », aboutit au tableau de synthèse final comprenant 124 types au niveau de la France métropolitaine.

L'ensemble des types identifiés est récapitulé dans le Tableau 13.

Une proposition de codification a été élaborée pour rendre compte de la manière la plus explicite possible : l'identification de l'HER-1 de situation, la classe de taille concernée, et éventuellement le sous-type au niveau HER-2 ou le type « exogène ».

La codification repose sur l'organisation suivante en chaîne de caractères :

[taille cours d'eau][HER1 de situation]-[sous-type HER2 éventuel]/[HER1 amont]

- La Taille est exprimée par les codes :

TP = très petit, **P** = petit, **M** = moyen, **G** = grand, **TG** = très grand.

Ces caractères peuvent être combinés lorsque des classes de taille ont été regroupées,

par exemple : **PM** = petit et moyen , etc.

- L'HER de niveau 1 est codifiée par son numéro initial ;

en cas de regroupement avec une autre HER-1, on ajoute le numéro de l'HER associée séparé par un tiret : [HER1]-[HER1].

- Un éventuel sous-type de niveau HER-2 est codifié par A et/ou B.
- Les types « exogènes » sont indiqués par le numéro de la (ou des) HER-1 amont, séparé par un /.

Exemple de codifications :

- **P21** : petits cours d'eau (P) du Massif Central Nord (21) ;
- **TP 12-A** : très petits cours d'eau (TP) du Massif Armoricain (12) pour le sous type A (Centre et Sud, HER2 N° 58 et 117) ;
- **M14/3-11** : cours d'eau moyen (M) des Coteaux Aquitains (14), type « exogène » influencés par les Causses Aquitains (11) et le Massif Central Sud (3) ;
- **M15-17/3-21** concerne les masses d'eau de cours d'eau moyen (M) des Dépressions Sédimentaires (17) et de la Plaine de Saône (15) type « exogène » influencé par le Massif Central Nord (21) et le Massif Central Sud (3) ;
- **TTGA et TTGL** désignent respectivement les très grands fleuves Alpins (Rhin, Rhône) et la Loire.

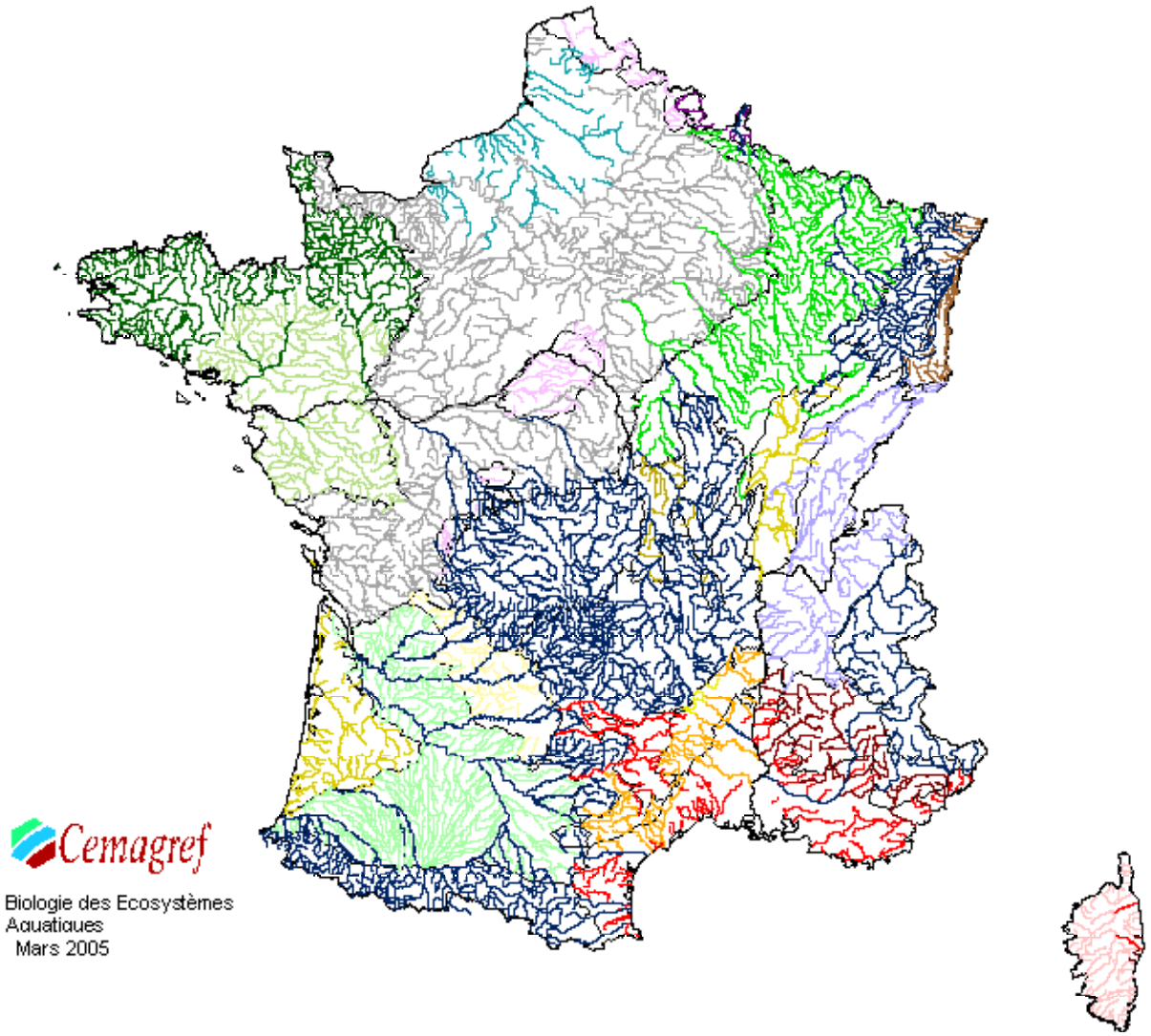


Figure 18 - Représentation cartographique des types régionaux et de la relation « amont-aval » sur la base du réseau « drain principal » développé par le CEMAGREF.

Les couleurs correspondent aux différents types régionaux (lignes du Tableau 13), et, pour les cours d'eau exogènes, la couleur retenue correspond à celle de l'hydro-écorégion amont.

3.4. Les types « majeurs »

Le nombre assez important de types obtenus (124) peut apparaître comme une difficulté dans le cadre d'une approche opérationnelle de gestion environnementale (mise en place de réseaux de mesures, définitions d'objectifs, identification et mise en œuvre d'actions de restauration, etc.). Mais s'agissant d'un processus de classification qui pourra être révisé sur la base de l'information biologique, et compte tenu de l'échelle européenne de cette approche, il n'apparaît pas souhaitable de trop simplifier *a priori* une information susceptible de s'avérer pertinente (cas de cours d'eau très particuliers, ou type peu représenté en France, mais présent à l'échelle européenne).

En revanche, il convient de souligner que les 10 HER-1 les plus étendues (sur 22) représentent à elles seules plus de 80 % de la superficie du territoire métropolitain, ce que signifie qu'une grande majorité du linéaire des cours d'eau s'apparente à un nombre de types relativement réduit que l'on peut en première estimation évaluer à une cinquantaine environ (Tableau 13).

A titre de comparaison, un essai d'application du « système A » de la DCE, sur la base des zones hydrographiques, aboutissait à 73 types en France métropolitaine (SIEE, 2001).

La typologie proposée ici est donc plus précise que celle du système A, notamment par une discrimination longitudinale plus élevée (5 classes de taille au lieu de 4), et un meilleur ajustement aux caractéristiques géologiques et climatiques ; rappelons que le système A ne considère que deux classes de géologie, et ne comporte pas de région Méditerranéenne pour la France. Mais le nombre de types « majeurs » de notre typologie reste du même ordre que celui qui résulterait d'une application minimaliste du système A.

			Types nationaux et leur codification				
		Rangs (bassin Loire-Bretagne)	**8, 7**	**6**	**5**	**4**	**3, 2, 1**
		Rangs (autres bassins)	**8, 7, 6**	**5**	**4**	**3**	**2, 1**
Hydroécorégions de niveau 1		**Cas général, cours d'eau exogène de l'HER de niveau 1 indiquée ou HER de niveau 2**	**Très Grands**	**Grands**	**Moyens**	**Petits**	**Très Petits**
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)		G21	M21		
21	MASSIF CENTRAL NORD	Cas général				P21	TP21
3	MASSIF CENTRAL SUD	Cas général		G3	M3	P3	TP3
		Exogène de l'HER 19 (Grands Causses)			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					
		Exogène de l'HER 5 (Jura)		G15/5	MP15/5		
		Cas général	TG15		MP15		TP15
		Exogène de l'HER 10 (Côtes Calcaires Est)	TG10-15/4				
5	JURA / PRE-ALPES DU NORD	Cas général		G5	M5	P5	TP5
		Exogène de l'HER 2 (Alpes Internes)	TG5/2	GM5/2			
TTGA	FLEUVES ALPINS	Cas général	TTGA				
2	ALPES INTERNES	Cas général		G2	MP2		TP2
7	PRE-ALPES DU SUD	Cas général		GMP7			TP7
		Exogène de l'HER 2 (Alpes Internes)	TG6-7/2	GM7/2			
6	MEDITERRANEE	Exogène de l'HER 2 ou 7		GM6/2-7			
		Exogène de l'HER 7 (Pré-Alpes du Sud)		GM6/2-7			
		Exogène de l'HER 8 (Cévennes)	TG6/1-8	GM6/8			
		Exogène de l'HER 1 (Pyrénées)		GM6/1			
		Cas général		G6	MP6		TP6
8	CEVENNES	Cas général		GM8		PTP8	
		A-her2 n°70			M8-A	PTP8-A	
16	CORSE	A-her2 n°22		G16	M16-A	PTP16-A	
		B-her2 n°88			M16-B	PTP16-B	
19	GRANDS CAUSSES	Cas général				P19	
		Exogène de l'HER 8 (Cévennes)		GM19/8			
11	CAUSSES AQUITAINS	Cas général				P11	TP11
		Exogène de l'HER 3 (MCN) et/ou 21 (MCS)	TG11/3-21	G11/3-21	M11/3-21	P11/3-21	
14	COTEAUX AQUITAINS	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		
		Cas général		GM14		P14	TP14
		Exogène de l'HER 1 (Pyrénées)	TG14/1	G14/1	M14/1	P14/1	
13	LANDES	Cas général			M13	P13	TP13
1	PYRENEES	Cas général		G1	M1	P1	TP1
12	ARMORICAIN	A-Centre-Sud (her2 n° 58 et 117)		G12	M12-A	P12-A	TP12-A
		B-Ouest-Nord Est (her2 n° 55, 59 et 118)			M12-B	P12-B	TP12-B
TTGL	LA LOIRE	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 (dans l'her2 n°40)		G9/10	M9/10		
		Exogène de l'HER 21 (Massif Central Nord)	TG9/21	G9-10/21	M9-10/21		
10	COTES CALCAIRES EST	Exogène de l'HER 21 (Massif Central Nord)					
		Cas général	TG10-15/4	G10	M10	P10	TP10
		Exogène de l'HER 4 (Vosges)		G10/4	M10/4		
4	VOSGES	Cas général			M4	P4	TP4
22	ARDENNES	Exogène de l'HER 10 (Côtes Calcaires Est)	TG22/10				
		Cas général		GM22		P22	TP22
18	ALSACE	Cas général			MP18		TP18
		Exogène de l'HER 4 (Vosges)		G18/4	M18/4	P18/4	

Cemagref
Biologie des Ecosystèmes Aquatiques
Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative
Mars 2005

Tableau 13 - Tableau récapitulatif des types de masses d'eau avec proposition de codage

HER1	Nom HER1	type (exogène de ou HER2)	TG	G	M	P	TP	
20	DEPOTS ARGILO SABLEUX	type général						1
3-21	MASSIF CENTRAL	type général						4
15	PLAINE SAONE	type général						1
5	JURA-PREALPES DU NORD	type général						3
TTGA	FLEUVES ALPINS	type général						1
2	ALPES INTERNES	type général						2
7	PREALPES DU SUD	type général						2
6/2-7	MEDITERRANEE	2-AlpInt et 7-PAlpSud						1
6	MEDITERRANEE	type général						2
8-6/8	CEVENNES	type général (*)						2
16	CORSE	A-her2 22						2
19	GRANDS CAUSSES	type général						1
11	CAUSSES AQUITAINS	type général						1
14/3-21-8-11	COTEAUX AQUITAINS	MC (3 ou 8) et calcaire (11 ou 19)						1
14	COTEAUX AQUITAINS	type général						3
13	LANDES	type général						2
1-14/1	PYRENEES	type général (*)						3
12	ARMORICAIN	type général						4
TTGL	LA LOIRE	type général						1
9	TABLES CALCAIRES	type général						5
9-10/21	TABLES CALCAIRES	21-MCNord						1
10	COTES CALCAIRES EST	type général						4
10-15/4	COTES CALCAIRES EST	4-Vosges						1
4	VOSGES	type général						1
18	ALSACE	type général						2
								51
	(*) le type exogène dans l'HER aval est assimilé au type amont							

Tableau 14 - Tableau des types « majeurs » de masses d'eau

4. Conclusion

L'élaboration de la typologie des masses d'eau courantes s'intègre dans une cadre régionalisé, basé sur les Hydro-écorégions.

Cette régionalisation est complétée par une classification en 5 catégories de la taille de cours d'eau, s'appuyant sur l'ordination en rangs de Strahler. La prise en compte de l'influence amont sur les caractéristiques hydro-chimiques et hydrologiques, ainsi que d'une variabilité régionale résiduelle révélée par les données biologiques, aboutit à une typologie déclinée en 124 types. Mais 51 types majeurs représentent 90% du linéaire des cours d'eau.

Cette typologie est conforme aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau, car elle reprend tous les éléments obligatoires visés à l'annexe II, et aboutit à une discrimination des types plus détaillée et nettement plus adaptée au terrain que celle du « système A » proposé par défaut.

La typologie a été construite, dans les délais requis, à partir des données disponibles tant géographiques que biologiques. Les nouvelles informations sur les peuplements aquatiques (invertébrés, poissons, diatomées, macrophytes), en cours d'acquisition sur le réseau de référence mis en place en 2005, devraient permettre de procéder ultérieurement à des ajustements dans un sens de simplification, tout en assurant la meilleure adéquation possible à la réalité du fonctionnement écologique et aux contraintes opérationnelles.

La mise en œuvre de ce cadre typologique dans les Districts sera probablement aussi l'occasion d'un retour d'expérience permettant de procéder à des ajustements en fonction de la réalité de terrain.

Le cadre ainsi construit devient un outil opérationnel, permettant non seulement de répondre aux exigences de la DCE, mais aussi d'analyser dans un cadre géographique cohérent les mécanismes fins de dégradation des écosystèmes aquatiques, pour proposer des actions de restauration adaptées à l'échelle des districts.

Références bibliographiques

Billen, G., Garnier, J. and Hanset, P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: the Riverstrahler model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*. **289**: 119-137.

Blanchard, C. (2003). Utilisation d'un Système d'Information Géographique à l'étude de la variabilité spatio-temporelle des éléments majeurs dissous en relation avec la lithologie des bassins versants. Mémoire de DEA, Université de Tours, Université d'Orléans, 40 p.

Gregory, K.J. and Walling D.E. 1973. Drainage basin form and process: a geomorphological approach. Arnold, E. (ed.), London. 456 p.

Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweiz. Z. Hydrol.* **11**(3-4): 332-351.

Illies, J. and Botosaneanu, L. (1963). Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique. *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. **12**: 1-57.

Illies, J. (1978). Limnaufauna Europaea, a checklist of the animals inhabiting European inland waters, with accounts of their distribution and ecology (except protozoa). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York. 532 p.

Oberdorff, T., Pont, D., Hugueny, B. and Chessel, D. (2001). A probalistic model characterizing fish assemblages of French rivers: a framework for environmental assessment. Freshwater Biology. **46**(3): 399-415.

Pella, H., Chandesris, A. and Wasson, J.G. (2004). Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de la Directive Cadre européenne sur l'eau. Ingénieries - Eau Agriculture Territoires. **40**: 11-20.

Pella, H., Chandesris, A. and Wasson, J.G. (soumis). Simplification de la BD Carthage® pour la modélisation de l'écoulement des cours d'eau. Ingénieries - Eau Agriculture Territoires.

Sauquet, E. (2005). Cartographie des écoulements annuels moyens en France. Note de synthèse. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 39 p.

Sauquet, E. (submitted). Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies. Journal of Hydrology.

SIEE, Strategis and Cemagref. (2002). Définition d'un réseau national de stations ou tronçons de référence. Rapport final, Tome 1 - Méthodologie. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Agences de l'Eau Adour-Garonne. 94 p.

Souchon, Y., Andriamahefa, H., Cohen, P., Breil, P., Pella, H., Lamouroux, N., Malavoi, J.R. and Wasson, J.G. (2000). Régionalisation de l'habitat aquatique dans le bassin de la Loire. Synthèse, Agence de l'eau Loire Bretagne, Cemagref Lyon BEA/LHQ, 291 p.

Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union. **38**(6): 913-920.

Tison, J., Park, Y.S., Coste, M., Wasson, J.G., Ector, L., Rimet, F. and Delmas, F. (2005). Typology of diatom communities and the influence of hydro-ecoregions: A study on the French hydrosystem scale. *Water Research*. **39**(14): 3177-3188.

Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing, C.E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. **37**: 130-137.

Wasson, J.G. (1989). Eléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes: 1. Revue critique de quelques approches existantes. *Bulletin d'Ecologie*. **20**(2): 109-127.

Wasson, J.G., Chandesris, A., Pella, H. and Souchon, Y. (2001). Définition des hydroécorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive cadre pour la gestion des eaux. Rapport de phase I, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Cemagref Lyon BEA/LHQ, Lyon. 68 p.

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.

Wasson, J.G., Chandesris, A., Pella, H., Blanc, L., Villeneuve, B. and Mengin, N. (2004). Détermination des valeurs de référence de l'IBGN et propositions de valeurs limites du "Bon Etat". Document de travail version 2, Cemagref Lyon BEA/LHQ, Valorez, Zone Atelier Bassin du Rhône, Lyon. 69 p + annexes.

Annexe 1 Extraits de l'annexe II de la Directive Européenne 2000/60/CE du parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau – Caractérisation des masses d'eaux de surface

ANNEXE II

1. EAUX DE SURFACE

1.1. Caractérisation des types de masses d'eau de surface

Les États membres déterminent l'emplacement et les limites des masses d'eau de surface et effectuent une première caractérisation de toutes ces masses conformément à la méthode décrite ci-après. Les États membres peuvent regrouper des masses d'eau de surface pour les besoins de la première caractérisation.

i) Les masses d'eau de surface à l'intérieur d'un district hydrographique sont définies comme relevant de l'une des catégories recensées ci-après d'eaux de surface: rivières, lacs, eaux de transition ou eaux côtières, ou comme des masses d'eau de surface artificielles ou des masses d'eau de surface fortement modifiées.

ii) Pour chaque catégorie d'eau de surface, les masses à l'intérieur du district hydrographique sont réparties en types. Ces types sont définis à l'aide d'un des systèmes, A ou B, définis au point 1.2.

iii) Si le système A est utilisé, les masses d'eau de surface à l'intérieur du district hydrographique sont d'abord réparties en écorégions conformément aux zones géographiques définies au point 1.2 et indiquées sur la carte correspondante à l'annexe XI. Les masses d'eau à l'intérieur de chaque écorégion sont alors réparties en types de masses d'eau de surface conformément aux descripteurs indiqués dans les tableaux du système A.

iv) Si le système B est utilisé, les États membres doivent arriver au moins au même degré de détail que dans le système A. En conséquence, les masses d'eau de surface à l'intérieur du district hydrographique sont réparties en types selon les valeurs des descripteurs obligatoires et autres descripteurs ou combinaisons de descripteurs facultatifs nécessaires pour garantir que des conditions de référence biologique caractéristiques puissent être valablement induites.

v) Pour les masses d'eau de surface artificielles et fortement modifiées, la répartition est effectuée conformément aux descripteurs applicables à celle des catégories d'eau de surface qui ressemble le plus à la masse d'eau fortement modifiée ou artificielle.

vi) Les États membres remettent à la Commission une ou plusieurs cartes (au format GIS) de l'emplacement géographique des types avec un degré de détail conforme à celui requis pour le système A.

1.2. Écorégions et types de masses d'eau de surface

1.2.1. Rivières

Système A

Typologie fixe	Descripteurs
Écorégion	Écorégions indiquées sur la carte A de l'annexe XI
Type	Typologie de l'altitude plaine: <200 m moyenne: de 200 à 800 m élevée: >800 m
	Typologie de la dimension fondée sur la zone de captage petite: de 10 à 100 km moyenne: >100 à 1 000 grande: >1 000 à 10 000 t très grande: >10 000
	Géologie calcaire siliceux organique

Système B

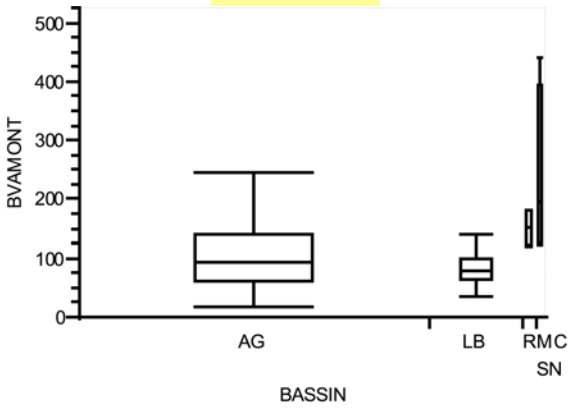
Caractérisation alternative	Facteurs physiques et chimiques qui déterminent les caractéristiques de la rivière ou du tronçon de rivière et, donc, la structure et la composition de la population biologique
Facteurs obligatoires	Altitude Latitude Longitude Géologie Dimension
Facteurs facultatifs	Distance depuis la source de la rivière Énergie du flux (en fonction du flux et de la pente) Largeur moyenne de l'eau Profondeur moyenne de l'eau Pente moyenne de l'eau Forme du lit principal de la rivière Catégorie de débit de la rivière Forme de la vallée Transport de solides Capacité de neutralisation de l'acide Composition moyenne du substrat Chlorure Limites des températures de l'air Température moyenne de l'air Précipitations

1.2.2. Lacs
(p.m.)

1.2.3. Eaux de transition
(p.m.)

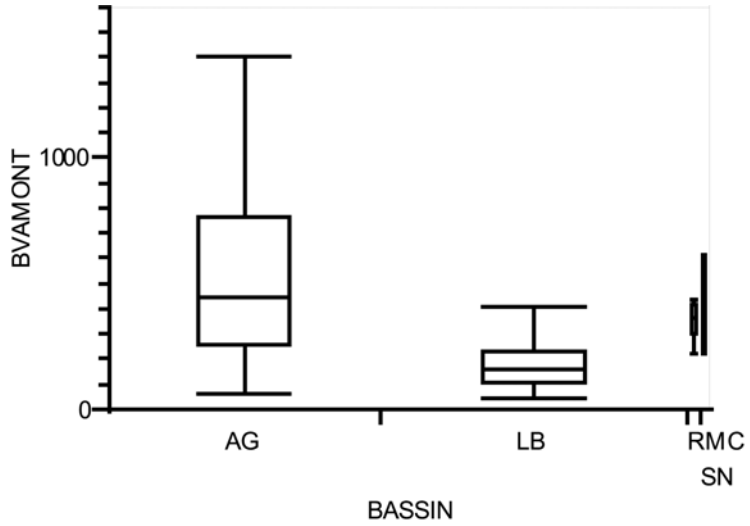
Annexe 2 Répartition des surfaces de bassins versants (km²) des exutoires de zones hydrographiques dans le Massif Central (HER 3 et 21) Analyse par rangs de Strahler et bassins

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	20	44	62	94	140	190	511	175
LB	*37*	*48*	*66*	*80*	*101*	*120*	*171*	*46*
RMC	120	120	124	152	182	326	326	7
SN	123	123	127	197	396	443	443	4



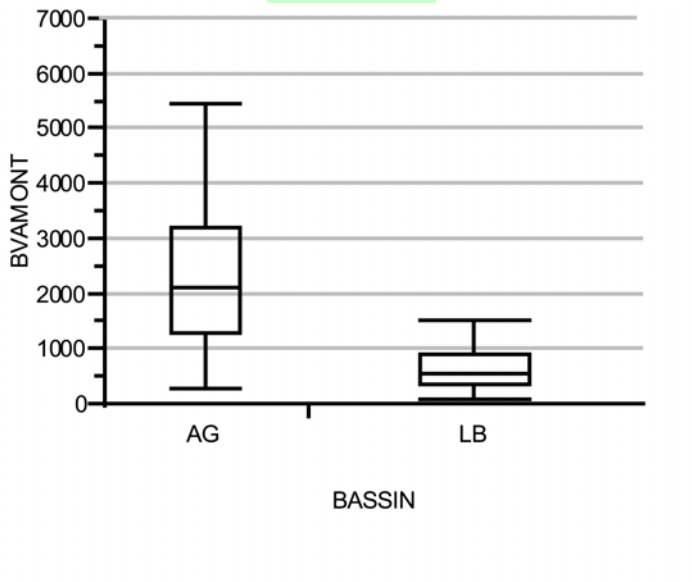
Rangs 3

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	70	181	265	453	767	935	1 560	120
LB	51	78	115	163	237	351	547	136
RMC	230	230	307	369	422	438	438	6
SN	229	229	229	415	616	616	616	3



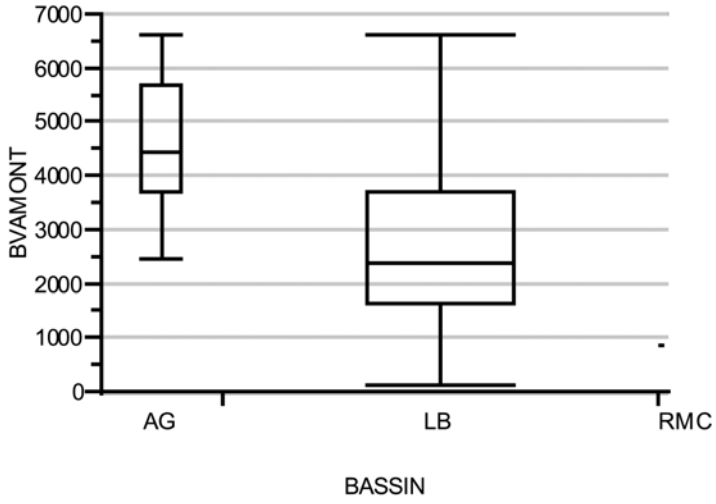
Rangs 4

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	284	544	1 287	2 106	3 196	4 467	6 639	54
LB	91	253	353	567	909	1 247	2 293	87



Rangs 5

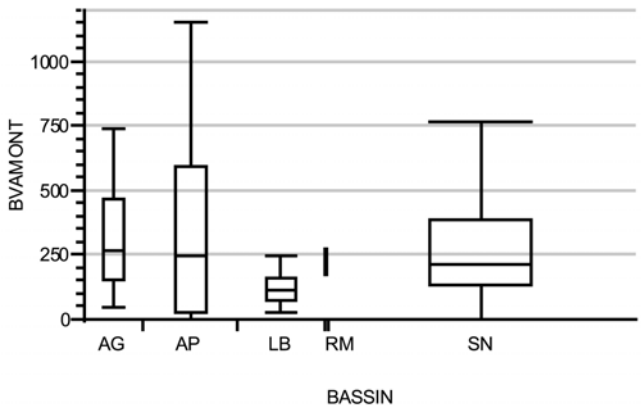
bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	2482.67	2573.985	3727.428	4463.295	5689.672	6499.742	6649.08	16
LB	154.35	1057.962	1637.635	2387.69	3699.995	5015.508	6629.57	57
RMC	*885.87*	*885.87*	*885.87*	*885.87*	*885.87*	*885.87*	*885.87*	*1*



Rangs 6

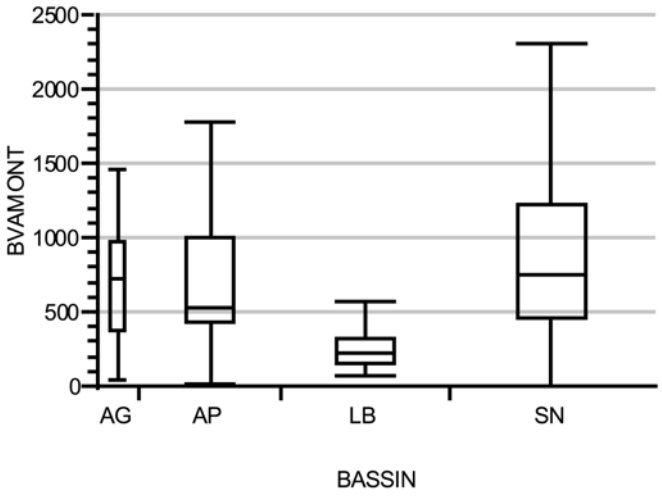
Annexe 3 Répartition des surfaces (km²) de bassins versants des exutoires de zones hydrographiques dans les Tables Calcaires (HER n° 9) Analyse par rangs de Strahler et bassins

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	47	71	154	272	468	718	1 098	35
AP	0	10	29	253	593	1 059	6 588	55
LB	28	52	74	119	164	207	531	51
RM	174	174	174	226	279	279	279	2
SN	0	80	136	220	389	757	1 679	179



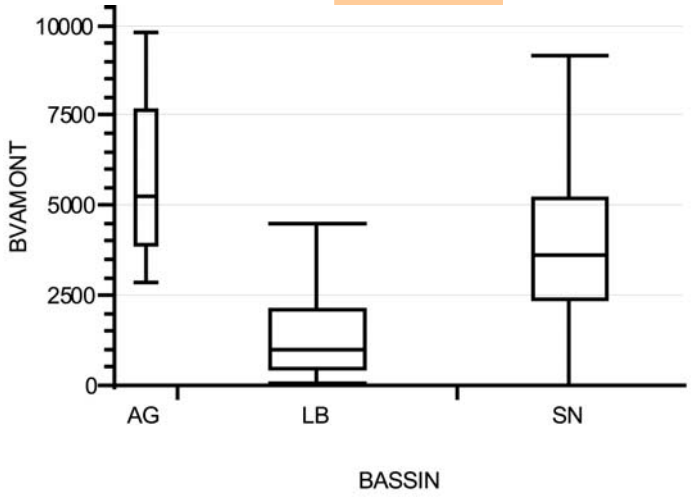
Rangs 3

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	48	146	385	726	984	1 339	1 460	23
AP	21	110	439	532	1 004	4 081	5 913	75
LB	75	105	153	225	331	512	825	90
SN	7	277	469	760	1 229	2 211	3 973	108



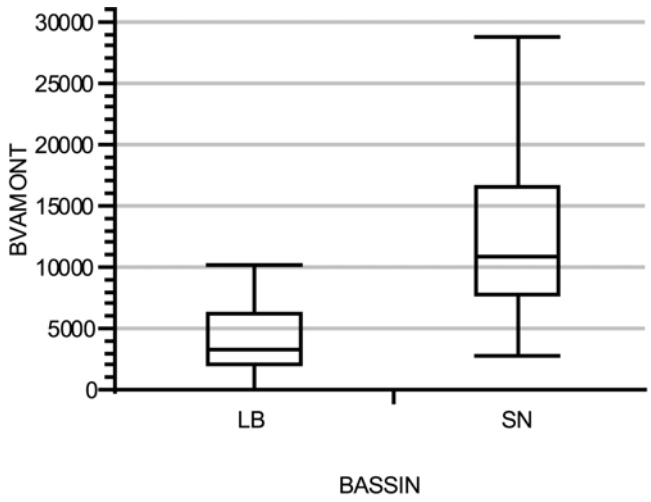
Rangs 4

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
AG	2 862	3 287	3 918	5 267	7 699	9 573	9 855	24
LB	109	273	514	1 035	2 154	7 033	8 296	105
SN	5	668	2 433	3 621	5 209	8 930	10 362	84



Rangs 5

bassin	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	nombre
LB	146	1 307	2 209	3 374	6 261	10 021	22 167	52
SN	2 869	5 726	7 862	10 852	16 589	26 337	30 824	46



Rangs 6

Annexe 4 Calcium, Calcaire et chimie de l'eau – Rappels de chimie appliquée

Unités

Les unités employées sont soit :

- **mg/l** concentration en masse par volume.
- **mmole/l** unités utilisées pour étudier les réactions chimiques, 1 mole correspond à une quantité donnée de molécules : 1 mole de Ca =40 g, 1 mole de CaCO3 = 100 g, 40 mg/l de Calcium = 1mmole/l de Ca.
- **meq/l** unités utilisées pour les solutions ioniques, un équivalent correspondant à une quantité de charges électriques (permet les calculs sur la base des balances ioniques) :

  pour le **calcium Ca^{++}** **1meq/l** = 1 mmole/l : 2 = 40 mg/l : 2 **= 20 mg/l de Ca^{++}**

  pour le Sodium Na+ 1 meq/l = 1 mmole/l = 23 mg/l
- **° f** (degré français) **1 °f =** 0.2 meq/l **= 4mg/l de Ca^{++}** soit 10 mg/l de CaCO3

  cette unité est utilisée en eau potable et eaux industrielles,

Calcium et calcaire

Le Calcium (Ca) est un élément majeur des eaux courantes.

Il se rencontre soit sous forme soluble (ionique, Ca^{++}), soit sous forme solide, insoluble en carbonate de Calcium $CaCO_3$, composant principal de la roche calcaire.

La concentration en ion Calcium varie de 1 à 200 mg/l en eau douce, et 400 mg/l en eau de mer.

Dans l'eau, la présence de Calcium dépend de l'équilibre chimique suivant :

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2\,HCO_3^-$$

(solide) (dissous)

La présence d'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- et d' acide carbonique H_2CO_3 dans l'eau est elle même gouvernée par les équilibres chimiques suivants :

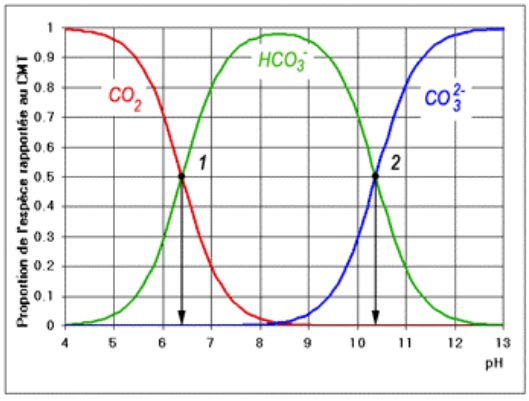
$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

Le déplacement de cet équilibre dépend du pH de l'eau (concentration en H^+) et de la pression partielle en CO_2.

L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- se dissocie selon l'équation suivante :

$$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$$

Le déplacement de cet équilibre dépend du pH de l'eau (concentration en H^+).



Proportion relative des différentes espèces carbonées dans de l'eau à 20° C en fonction du pH

Alcalinité de l'eau

L'alcalinité de l'eau est une mesure de la capacité de l'eau à absorber des protons H^+ pour arriver à un état de référence. Cet état de référence correspond à la possibilité de négliger certaines espèces devant d'autres.

Pour le ***TAC (titre alcalimétrique complet)***, on définit comme état de référence : "HCO_3^- et CO_3^{2-} en quantité négligeable devant CO_2", le pH de neutralisation est 4,5 ;

Pour le TA (titre alcalimétrique simple), on définit comme état de référence : " CO_2 en quantité négligeable devant HCO_3^- et CO_3^{2-} ", le pH de neutralisation est 8.3.

$$TAC = [OH^-] + [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] \quad \text{en meq/l}$$

$$TA = [OH^-] + ½ \times [CO_3^{2-}] \quad \text{en meq/l}$$

Pour des pH inférieurs à 8,3, le TA est nul et le TAC se résume aux ions HCO_3^-.

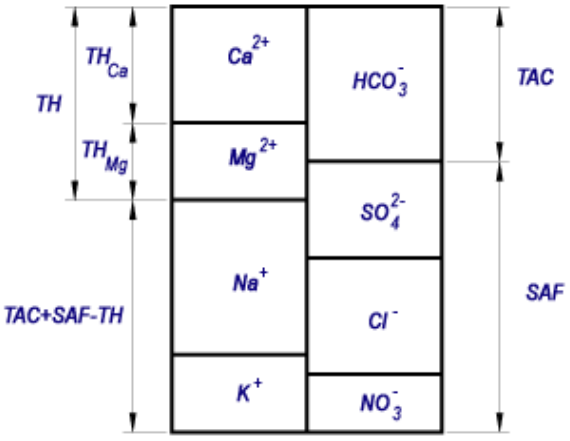
Dureté de l'eau

Quantifiée par le ***TH (titre hydrotimétrique total)*** qui est la concentration en ions alcalino-terreux

$$TH = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] \text{ en meq/l}$$

Notion mobilisée pour mesurer l'importance de la consommation de savon, car lorsque l'eau est « dure », les acides gras du savon neutralisent le Calcium et le Magnésium dissous dans l'eau avant de pouvoir agir comme détergents : un m^3 d'une eau de «dureté» de 20 °f précipite environ 2 kg de savon.

Ces différentes grandeurs sont résumées sur la représentation de la composition de l'eau dite de Stabler (les concentrations sont en °F ou meq/l) pour une eau à pH neutre, 20°C



Annexe 5 Tableaux de résultats de l'analyse statistique des valeurs médianes de concentration en Calcium par stations du RNB dont le bassin versant amont est inclus strictement dans une hydro-écorégion (valeurs en mg/l).

HER	nom_HER1	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	Nbre
1	PYRENEES	8	9.2	15	26	34	35.4	36	15
2	ALPES INTERNES	36	43.8	58	106	137	158.4	171	15
3	MASSIF CENTRAL	3	4	5	8	12.5	49	73	33
4	VOSGES	4	5	6	8	11	12.8	20	31
5	JURA-PREALPES NORD	55	63.3	72.25	81.5	89.75	110.2	119	30
6	MEDITERRANEEN	42	68.5	104.25	115	137.25	146	147	14
7	PREALPES DU SUD	75	75	75	75	75	75	75	1
8	CEVENNES	3	3	3	27	51	51	51	2
9	TABLES CALCAIRES	29	85	97	107	116	126	205	272
10	COTES CALCAIRES EST	61	86	94	104	131	178	324	119
11	CAUSSES AQUITAINS	87	87	87	90	98	98	98	3
12	ARMORICAIN	2	8.6	11	16	23	32.8	76	95
13	LANDES	6	6	6	7	9	10	10	5
14	COTEAUX AQUITAINS	23	35	41	49	88	102	120	31
15	PLAINE SAONE	73	73	73	73	73	73	73	1
16	CORSE	5	5.1	6	9.5	16.75	32.5	33	10
17	DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	31	31	31	31	31	31	31	1
18	ALSACE	22	38	57.75	86	113.5	142	153	14
19	GRANDS CAUSSES	103	103	103	103	103	103	103	1
20	DEPOTS ARGILO-SABLEUX	39	39	39	94.5	122.75	125	125	6
21	MASSIF CENTRAL NORD	1	3	5	9	12	29	113	39
22	ARDENNES	11	11	13.75	23	44.25	51	51	4

Annexe 6 Tableau de résultats de l'analyse statistique des valeurs médianes de débits spécifiques (l/s/km²) par zone hydro de la BD Carthage® dont le bassin versant amont est inclus strictement dans une seule hydro-écorégion.

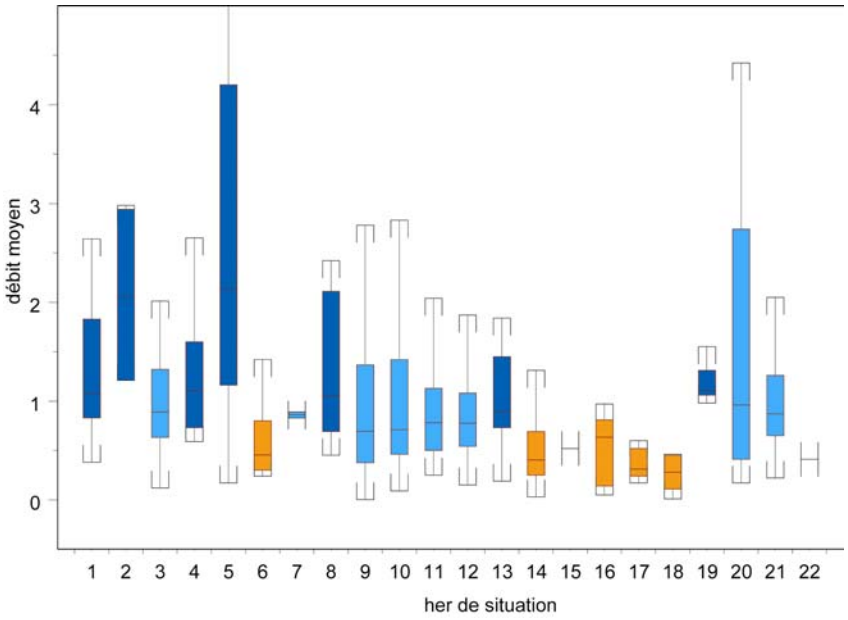
HER_situation	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum	Nbre de zhyd
1	13	20	29	39	49	67	265
2	20	22	30	37	40	54	94
3	8	11	16	22	27	51	521
4	11	16	21	29	40	54	132
5	10	18	26	36	46	62	166
6	3	4	6	9	12	19	205
7	6	9	12	16	22	33	101
8	10	14	20	27	30	44	106
9	4	5	7	9	11	18	1340
10	8	10	12	14	16	23	612
11	7	9	11	14	15	18	136
12	6	8	11	16	19	26	693
13	7	8	11	14	16	18	157
14	3	5	6	9	16	41	785
15	7	8	11	13	17	27	66
16	2	7	13	17	24	31	80
17	3	5	6	8	10	14	113
18	2	3	5	8	10	19	149
19	11	12	14	18	21	22	39
20	4	5	7	8	11	14	236
21	7	10	13	18	23	41	321
22	11	13	20	24	26	28	30

Annexe 7 Analyse de la relation taille de cours d'eau – débits spécifiques

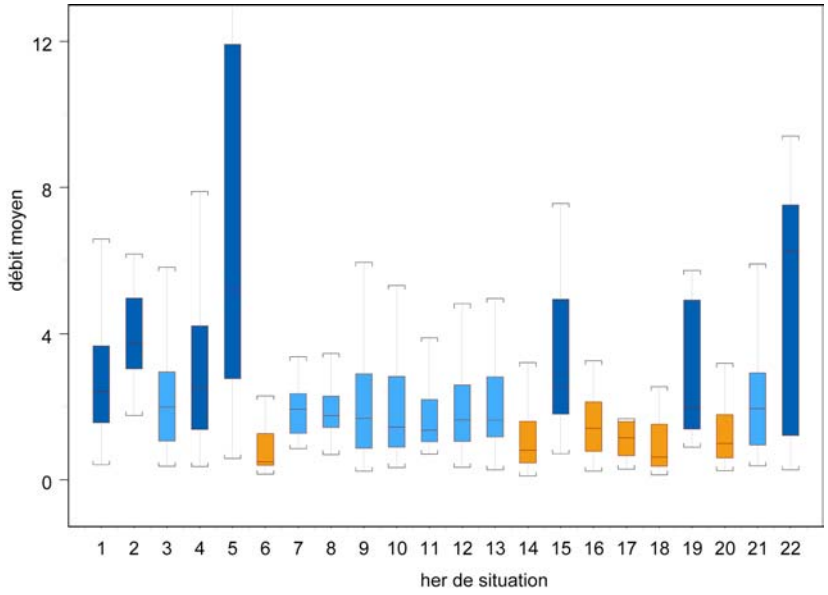
Les valeurs d'écoulements moyens annuels exprimées en l/s (Sauquet, 2005) sont disponibles au niveau de chaque zone hydro ; une étude de corrélation avec la taille du cours d'eau est donc possible.

Les données ont été sélectionnées sur la base suivante : cours d'eau strictement « endogène » (dont le bassin versant amont est totalement inclus dans une même HER), rang de Strahler ≥ 1 (élimination des artefacts de l'ordination), valeurs aberrantes supprimées (liées au découpage de la zone hydro et à l'affectation du drain principal de celle-ci). Le jeu de données résultant de ce tri est de 4 676 valeurs de débits qu'il est possible d'associer à des rangs de Strahler.

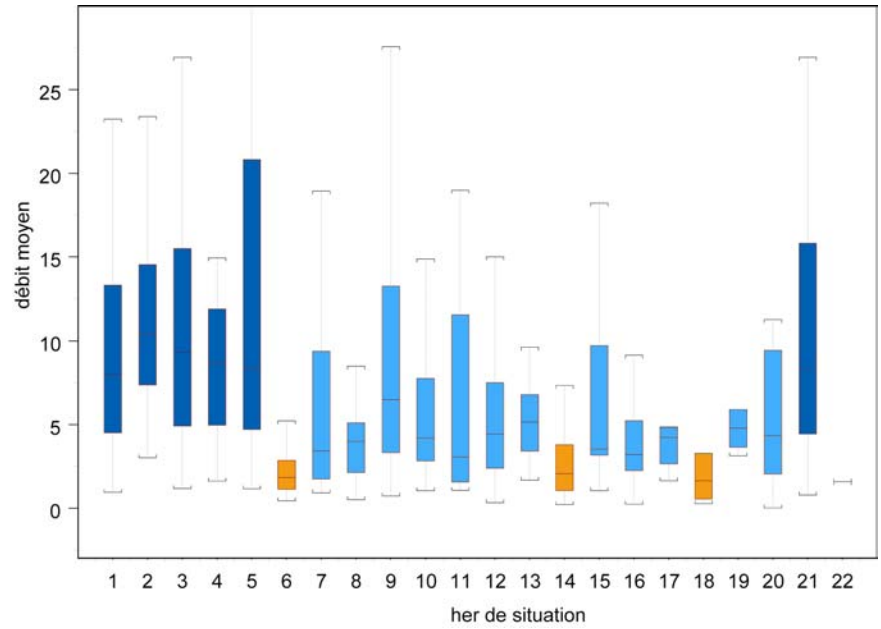
Une analyse de répartition en quantile par classe de taille a été effectuée, et les groupes à valeur significativement différentes (test de Kruskal Wallis) sont représentés avec des couleurs différentes. Le résultat obtenu est présenté sur les graphiques suivants :



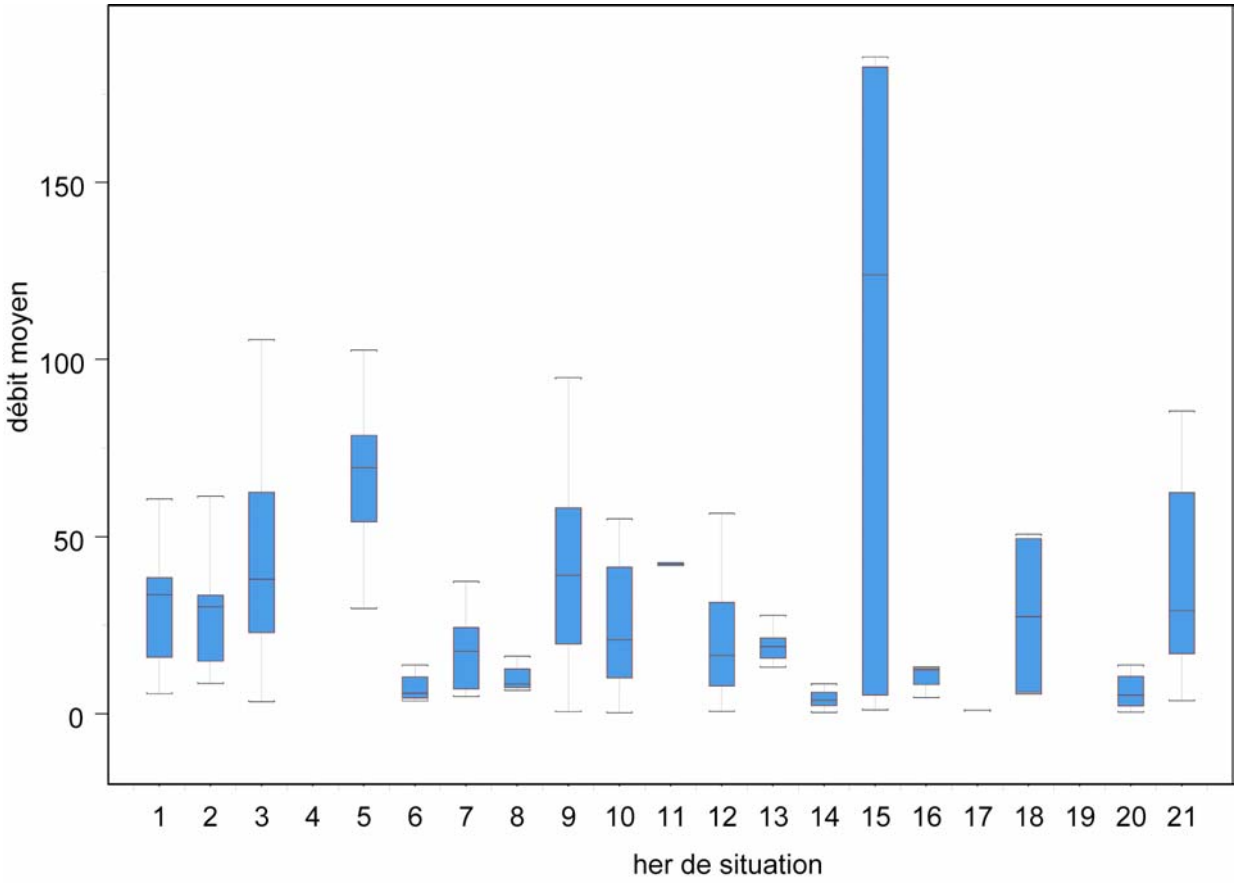
Répartition des débits par HER pour la classe de taille Très Petits Cours d'Eau



Répartition des débits par HER pour la classe de taille Petits Cours d'Eau



Répartition des débits par HER pour la classe de taille Moyens Cours d'Eau



Répartition des débits par HER pour la classe de taille Grands Cours d'Eau

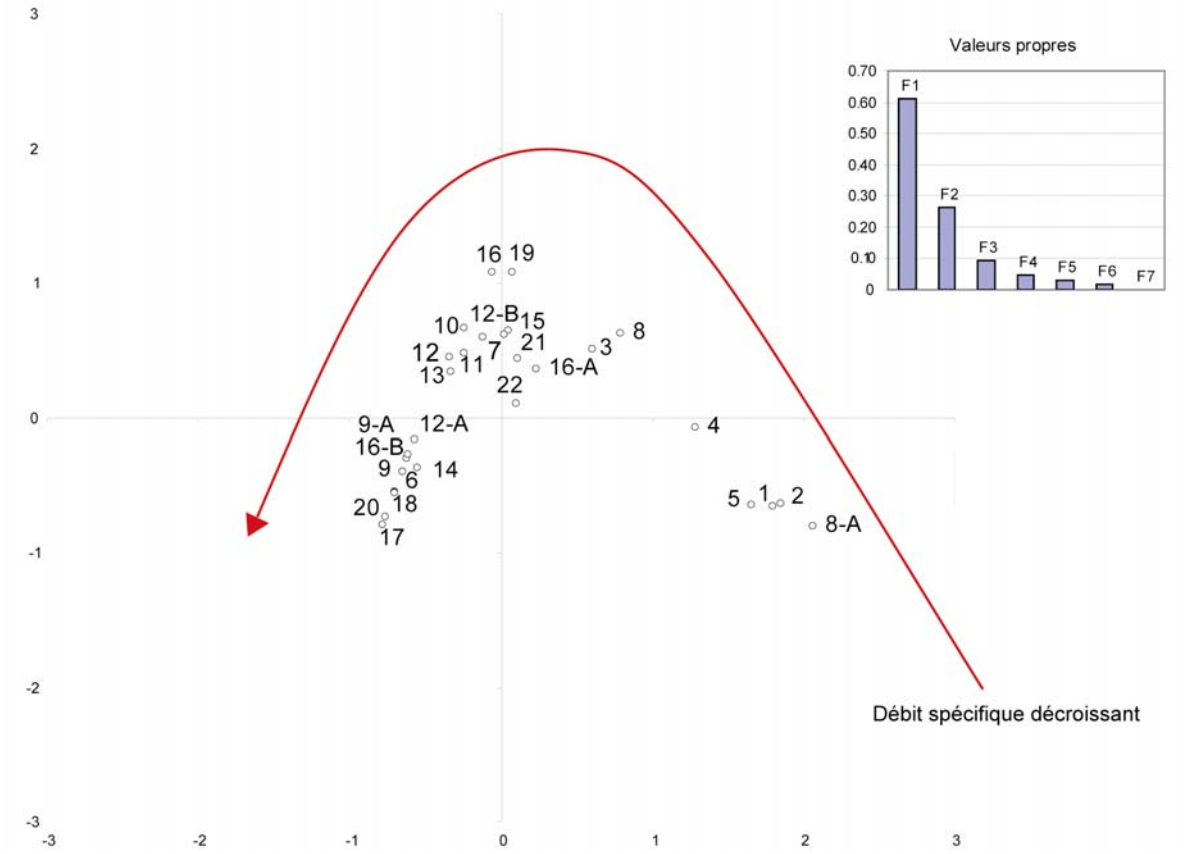
Annexe 8 : Analyse des débits spécifiques et positionnement amont/aval des cours d'eau

Une analyse factorielle des correspondances a été effectuée en associant à chaque type de cours d'eau (défini par : HER, classes de taille, type « endogène » ou « exogène ») **les débits spécifiques médians** par type, afin d'obtenir une représentation des différences existantes entre les régions, toutes classes de taille confondues.

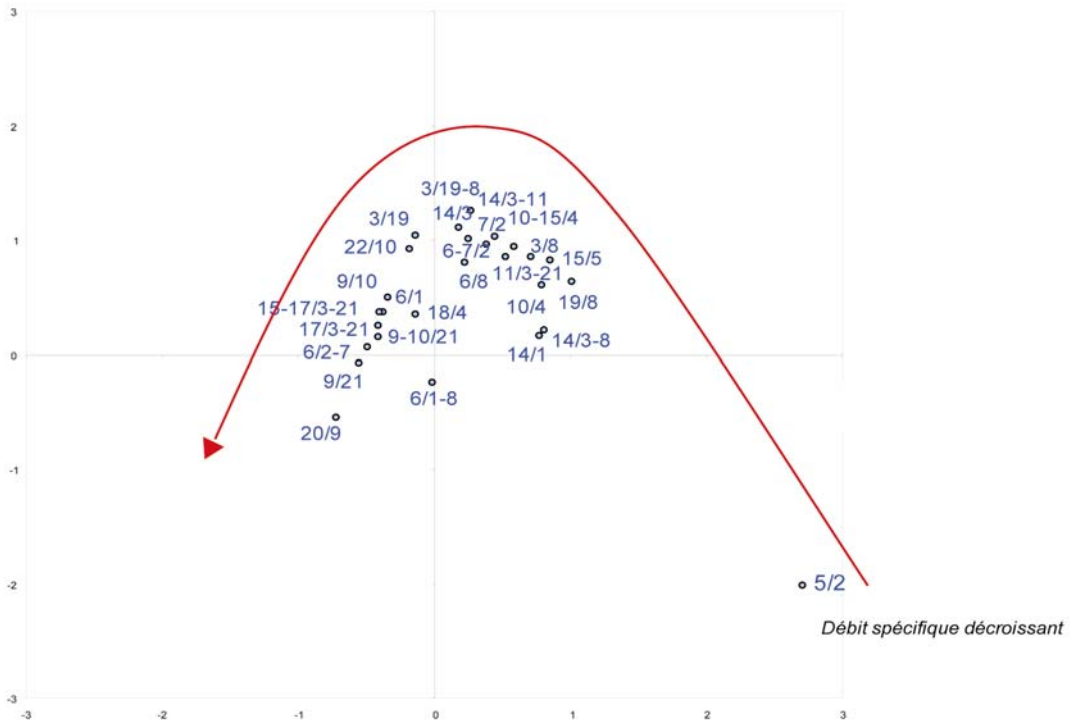
Les valeurs correspondant aux types endogènes ont été utilisées comme variables principales, celles des types exogènes comme variables supplémentaires.

La projection sur les deux premiers axes donnent les résultats suivants :

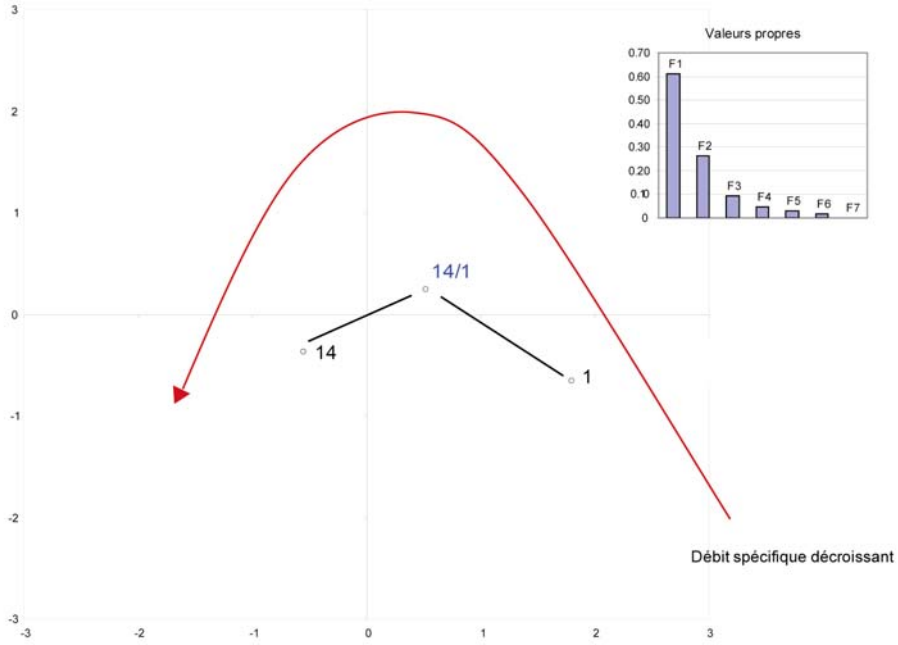
Pour les types endogènes :



les types « exogènes se projettent ainsi :



L'examen attentif du lien entre type « régional amont », type « exogène », et type « régional aval », c'est-à-dire la succession logique de ces types dans le réseau hydrographique, suit le type de cheminement représenté dans la figure suivante :



Les types se répartissent suivant le gradient de débit spécifique décroissant. On trouve tout d'abord le type « régional amont » avec un fort débit spécifique (HER1 dans l'exemple ci-dessus), le type « exogène » (HER 14 exo de 1 ci-dessus) se situe de façon intermédiaire entre son type amont et son type aval et enfin, le type « régional aval » (HER14 dans l'exemple) se trouve dans la zone de faible débit spécifique du gradient.