

Elaboration d'une typologie hydro-géomorphologique de cours d'eau dans l'Euregio Meuse-Rhin.

Hallot E. J. ⁽¹⁾, Schmitt L. ⁽²⁾, Mols J. ⁽¹⁾ et Petit F. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Université de Liège, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale, Allée du 6 août, 2, Bât. B11 - Sart Tilman B 4000 - Liège – Belgique (Eric.Hallot@ulg.ac.be).*

⁽²⁾ *Faculté de Géographie, Histoire, Histoire de l'Art, Tourisme, Université Lumière Lyon2, UMR 5600 CNRS, 5 avenue Pierre Mendès-France 69676 Bron cedex – France.*

River hydro-geomorphologic typology development in the Euregio Maas-Rhine

Résumé: Cet article présente les premiers résultats d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique de cours d'eau appliquée à l'Euregio Meuse-Rhin. Celle-ci est basée sur des analyses multivariées non factorielles (*clusters*) de données uniquement quantitatives extraites automatiquement à partir d'un MNT ou obtenues par mesures de terrains selon un protocole simplifié. La différenciation régionale de variables ouvre la voie à la caractérisation automatique de cours d'eau notamment grâce à la puissance spécifique.

Abstract: This paper shows the first results of a method of river hydro-geomorphological typology applied on the Euregio Maas-Rhine. This is based on non factorial multivariate analysis (*clusters*) of only quantitative data automatically extracted from DEM or obtained by field measurements with a simplified protocol. The regional differentiation of variables allows the automatic characterization of rivers especially with the specific stream power.

1. INTRODUCTION

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), adoptée le 20 juin 2000 (DCE2000/60), définit les termes d'une gestion intégrée de la ressource en eau. Elle demande notamment le maintien et, si besoin, le recouvrement pour 2015, du « bon état écologique » de toutes les masses d'eau de l'Union Européenne. En outre, la DCE encourage une évaluation prévisionnelle de la pertinence, de l'efficacité et de l'efficience des mesures de gestion, ceci à différentes échelles spatiales (Laurans, 2002). Enfin, il est recommandé d'exploiter prioritairement toutes les données et informations disponibles actuellement comme les réseaux de mesures existants ou les mesures et documents antérieurs (CPE, 2000).

Dans le domaine des eaux courantes continentales, la DCE implique une évaluation de la qualité écologique des cours d'eau, pour définir, sur cette base, des programmes de restauration. Bien entendu, l'hydro-géomorphologie, qui est, avec la qualité de l'eau, un compartiment fondamental des biotopes fluviaux (Amoros et Petts, 1993), est directement concernée par ces mesures. Or, les caractéristiques hydro-géomorphologiques des eaux courantes sont par nature extrêmement variées. Les mesures d'évaluation (Demortier *et al.*, 1996 ; Agences de l'Eau, 1999) et de restauration physiques (Brookes et Shield, 1996) sont donc amenées à reposer sur des typologies hydro-géomorphologiques (Kondolf, 1995 ; Wimmer *et al.*, 2000 ; Kondolf *et al.*, 2003). L'élaboration de ces dernières est d'ailleurs explicitement demandée dans la Directive. Plus précisément, dans ce type d'approche, chaque tronçon homogène de cours d'eau est amené à être classé dans un type de référence *naturel* (ou le moins anthropisé possible). Le type de référence constitue le modèle par rapport auquel la qualité du milieu physique du tronçon de cours d'eau considéré est évaluée et qui oriente les opérations de restauration (Kern, 1992 ; Wimmer *et al.*, 2000). Pour pouvoir être utilisées dans ce sens, les typologies à développer doivent donc être suffisamment précises pour permettre d'accéder au fonctionnement hydro-géomorphologique et écologique des cours d'eau. C'est ce niveau fin de perception, pouvant être qualifié de « typologie fonctionnelle » (Malavoi, 2000), que nous retiendrons dans la présente étude.

Sur un plan terminologique, la réalisation d'une typologie d'un ensemble de cours d'eau revient, d'une part, à définir des types de tronçons homogènes dans lesquels il est possible classer tous les cours d'eau pris en compte, et d'autre part à élaborer une méthode de sectorisation permettant d'aboutir à ces types (Schmitt, 2001). Une même rivière peut donc appartenir à différents types tout au long de son cours (Wasson, 1989; Wasson *et al.*, 1993 ; Bernot *et al.*, 1996).

On note, dans la littérature, l'existence d'un grand nombre d'approches de typologie-sectorisation de rivières, ce qui résulte d'objectifs, de contextes géographiques et de principes méthodologiques variés (Schmitt *et al.*, 2000). Plusieurs auteurs ont dégagé les points marquants de ces travaux au travers de synthèses bibliographiques (Wasson, 1989 ; Church, 1992 ; Naiman *et al.*, 1992 ; Kondolf, 1995 ; Schmitt, 1996 ; Montgomery et Buffington, 1998 ; Kondolf *et al.*, 2003...), desquelles nous tirons les éléments permettant d'orienter notre approche. Ainsi, il est clair que, pour l'heure, aucune approche n'a réellement une portée générale (Kondolf *et al.*, 2003). Ceci vaut également pour l'approche de Rosgen (1994, 1996) dont l'intérêt opérationnel a été remis en question par divers auteurs (Miller et Ritter, 1996 ; Kondolf *et al.*, 2001 ; Juracek et Fitzpatrick, 2003 ; Kondolf *et al.*, 2003). Ainsi, l'objet du présent article est d'élaborer une typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle des cours d'eau de l'Euregio Meuse-Rhin et de proposer, sur cette base, des orientations méthodologiques généralisables.

2. ZONE D'ETUDE

La partie étudiée de l'Euregio Meuse – Rhin s'étend sur environ 4500 km². Elle forme un triangle limité au nord-ouest, par la rive droite de la Meuse, au nord-est, par la rive gauche de la Roer et au sud, en Allemagne et en Belgique, par la limite sud du bassin de la Hoëgne et de la Roer. On peut schématiquement y considérer un découpage en quatre régions géographiques différentes :

- a. Au Nord, la zone limoneuse des terrasses fluviales quaternaires de la Meuse, avec, en Belgique, le *Pays de Dalhem*. Cette zone très fertile est principalement affectée en cultures sarclées. L'espace s'organise en villages groupés entourés de prés sous vergers dans un paysage d'openfield. La forêt n'y subsiste que sur les versants courts et escarpés des quelques vallées qui entaillent les terrasses ;
- b. Au Sud-est de la zone des terrasses, le *vrai pays de Herve* et le *Mergeland* qui atteint près de 350 mètres d'altitude, est constitué principalement de formations subhorizontales secondaires du Crétacé (craies et argiles à silex) reposant en discordance sur le socle primaire composé essentiellement de grès houiller. Cette région est complètement bocagère avec un habitat dispersé en petits groupes de fermes ;
- c. Le massif de la Vesdre composé des roches du Dévonien moyen et supérieur ainsi que du Carbonifère atteint une altitude de 300 mètres. Ces roches sont plissées selon des axes orientés Sud-ouest Nord-est. On y retrouve des villages groupés entourés de prés et encore des forêts sur les versants des vallées encaissées de la Vesdre et de ses affluents. Des cultures sont encore bien présentes sur les sols bien drainés établis sur les calcaires carbonifères ;
- d. La retombée ardennaise débute au plateau des Hautes Fagnes, culminant à 694 m, jusqu'à la vallée de la Vesdre avec essentiellement des roches du Dévonien inférieur et du Cambro – Ordovicien. Cette région est caractérisée par un relief plus important. Elle est couverte en majeure partie par une forêt de conifères qui date de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle. Celle-ci a été plantée sur d'anciennes landes tourbeuses qui sont encore conservées de nos jours sur les sommets (Hautes Fagnes). Plus bas, des villages groupés entourés de prairies ouvrent le paysage. (Mardaga, 1987, 1989 & 1992 ; Demoulin, 1995; Mols, 2004) ;

Pour plus d'efficacité, nous avons limité notre étude à deux bassins représentatifs à savoir les bassins de Berwinne et de la Vesdre avec son principal affluent, la Hoëgne, constituant une zone d'environ 840 km² (**figure 1**). Les principales caractéristiques de ces bassins sont présentées au **tableau 1**.

3. METHODOLOGIE

3.1. Approche générale

Notre étude se base sur les travaux de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (Agences de l'Eau, 1999) et de Schmitt (Schmitt *et al.*, 2000 ; Schmitt, 2001 ; Schmitt *et al.*, 2001). Toutefois, elle s'en distingue, notamment car elle vise à proposer une méthode typologique simplifiée basée sur des analyses statistiques multivariées fondées uniquement sur des variables quantitatives faciles à acquérir. Notre approche méthodologique, inductive, repose sur des variables collectées, soit à partir de cartes ou d'un modèle numérique de terrain (MNT), soit à partir du terrain en suivant un protocole de mesures rapide (Hallot E., 2004). On exclut les variables qualitatives car elles sont plus difficiles à estimer de manière objective et systématique. En outre, leur utilisation peut poser des problèmes de comparaison, de transposabilité et de reproductibilité de l'étude (NRW, 2002). Ensuite, les traitements statistiques se veulent légers. Ils se basent sur une analyse en *clusters* (classification ascendante hiérarchique) qui nous permet de conserver chaque variable contrairement à une analyse factorielle. Ceci met en évidence des relations entre variables permettant de les différencier en fonction de régions géographiques naturelles et par là même de redéfinir ces dernières via des données quantitatives (Petit *et al.*, 2005), ce qui permettrait de réduire considérablement le nombre de données à acquérir.

Cette méthode s'inscrit donc dans la continuité des travaux de Schmitt et propose des perspectives complémentaires à celles de l'article de Schmitt *et al.* de ce numéro de Mosella.

3.1 Préparation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Préalablement au choix des sites de mesures, un modèle numérique de terrain de la zone a été interpolé grâce à la fonction *topogrid* d'ArcInfo[©] (Esri, 2002; Hutchinson, 1996; Hutchinson & Dowling, 1991). Une représentation du réseau hydrographique topologiquement correcte en a été extraite avec une surface minimale d'apparition du réseau hydrographique d'un kilomètre carré (Tarboton *et al.*, 1991). La précision du MNT est de 10x10 m. Cette méthode d'interpolation n'étant pas "exacte" (contrairement à un TIN¹), l'exactitude du modèle a été estimée en comparant l'altitude de points de base avec la valeur obtenue au même endroit après interpolation. A titre indicatif, la moyenne des Δz est de 0.18 m et la RMSE² de 1,52 m. Ces mesures sont globales et ne tiennent pas compte de la position des points. Le test du χ^2 de Kolmogorov-Smirnov fait apparaître que la distribution de l'erreur n'est pas normale et qu'il subsiste donc une erreur systématique cachée (Gratton, 2002). Cependant, la grande valeur du coefficient de Kurtosis (58) ainsi que le centrage sur l'origine nous indique que la plus grande partie des erreurs est comprise entre - 2 et + 2 mètres, ce qui est majoritairement inférieur aux erreurs sur les données de départ. De plus, les points de plus grandes erreurs sont localisés près du réseau hydrographique. Ceci correspond principalement soit au comblement de "dépressions fermées" (artéfacts dus à l'interpolation) soit à des points isolés volontairement non pris en compte par la fonction *topogrid* afin de répondre à la condition topologique d'écoulement du réseau hydrographique (Esri, 2002).

3.2 Echantillonnage de sites de mesure

La première étape de notre approche a consisté à collecter un jeu de données à partir de sites de mesures échantillonnés sur l'ensemble du réseau hydrographique de la zone d'étude. Un échantillonnage aléatoire uniforme qui garantit l'équiprobabilité de la population mère est requis par l'utilisation de statistiques multivariées (Dumolard *et al.*, 2003), mais la distribution spatiale de toute la population n'est pas uniforme au point de vue de la densité du réseau et de la taille des segments de rivières. C'est pourquoi il convient de stratifier notre tirage en fonction des sous-bassins de taille

¹ Réseau de triangles irréguliers

² Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne

équivalente (distribution spatiale) et d'échantillonner en fonction des ordres de Strahler (1957). A l'intérieur des strates, un tirage aléatoire uniforme est effectué. La taille de l'échantillon a été définie en fonction du travail de L. Schmitt (2001) et sur une estimation du temps nécessaire aux mesures sur le terrain et d'encodage. Une densité de ± 1 point par 18 km^2 et/ou de ± 1 point par 9 km de réseau a été retenue.

De même, il est préférable de ne pas considérer les ordres inférieurs dans ce type d'étude pour des raisons de temps et de taille du cours d'eau (Malavoi, 2000). Par exemple, en Région Wallonne, seuls les cours d'eau ayant un minimum de 10 km^2 de bassin versant sont pris en compte dans le cadre de la mise en œuvre de la DCE 2000/60 (Gérard, 2004). Vu la taille de notre zone d'étude et le niveau de détail espéré, il a été choisi de ne pas prendre en compte les cours d'eau d'ordre 1 et ceux d'ordre 2 drainant un bassin versant inférieur à 2 km^2 .

Malgré ces précautions, on remarque que certaines parties du réseau ne comportent pas de site de mesures. Dans ce cas il a été décidé de tirer aléatoirement des sites supplémentaires le long des rivières où le premier tirage n'en avait pas sélectionnés. En pratique, cela revient à réduire la taille des strates de sous-bassins.

En tout, 66 sites de mesures ont été sélectionnés. Parmi ces derniers, 21 n'ont pas été intégrés aux traitements statistiques en raison d'un écoulement non permanent ou d'une dimension trop restreinte. Ils auraient le cas échéant constitué à eux seuls une classe déterminée uniquement par la largeur du lit mineur. L'analyse statistique a donc été réalisée sur 45 sites.

3.4 Variables et traitements statistiques

La sélection des variables est intimement liée aux objectifs de la typologie que l'on veut réaliser. Les premières sont extraites semi-automatiquement du MNT, alors que les suivantes sont mesurées sur le terrain:

Variables extraites semi-automatiquement du MNT

- L'altitude du centre du tronçon (Z) ;
- La superficie du bassin (BV) est une variable fondamentale dont dépend en grande partie l'importance de l'écoulement ;
- Le logarithme de l'ordre de Shreve (LnShr) donne une indication de la dimension du cours d'eau. Il peut être calculé automatiquement. Bien qu'il puisse atteindre des valeurs élevées (d'où l'emploi du logarithme), il est préféré dans ce cas à l'ordre de Strahler car il s'agit d'une variable quantitative (Strahler, 1957; Malavoi, 2000 ; Bravard & Petit, 2000) ;
- La distance à la source (DS) donne implicitement une indication de la dimension du cours d'eau. Le rapport entre la distance à la source et la superficie du bassin versant est aussi utilisé pour donner une indication quant à la forme du bassin versant ;
- L'indice de sinuosité (Sin) constitue une variable de réponse fondamentale (Petit, 1995 ; Rosgen, 1996 ; Schmitt, 2001) ;
- La pente calculée par pas de 1000 m le long du lit mineur (S) est également une variable fondamentale permettant de définir l'énergie de l'écoulement (Corbonnois & Zumstein, 1994 ; Bernot et al, 1996 ; Rosgen, 1996 ; A.E., 1999 ; Schmitt et al., 2001).

Variables mesurées sur le terrain ou dérivées d'autres variables:

- La largeur (w) et la profondeur (d) du lit mineur au niveau du plein bord et le rapport largeur/profondeur qui en est déduit donnent une estimation de la taille et de la forme du lit (Bernot et al, 1996 ; Rosgen, 1996 ; Corbonnois & Zumstein, 1994 ; A.E., 1999 ; Bravard & Petit, 2000 ; Schmitt, 2001) ;

- Le rapport d'encaissement (lit majeur / lit mineur, RE) indique les possibilités de déplacement latéraux du lit mineur et l'occurrence éventuelle de recharge par les versants (Rosgen, 1996 ; Petit, 1995 ; Bravard & Petit, 2000 ; Schmitt, 2001) ;
- Le pourcentage de bancs latéraux (%B) et de berges sapées (%E) sont indicateurs de la dynamique latérale (Malavoi, 2000 ; Schmitt, 2001) ;
- Le nombre d'alternances seuil/mouille (ou de step/pool) rapporté à la longueur du site (SM), la longueur cumulée de tronçons à chenaux multiples rapportée à la longueur totale du site d'étude (exprimée en pourcent, %MC) et la longueur relative d'affleurements rocheux (exprimée en pourcent, %RP) définissent le faciès d'écoulement et caractérisent les différentes dynamiques du cours d'eau ;
- La granulométrie (D_{50} et D_{95}) et l'indice de classement de Folk & Ward (1957) (F&W) sont représentatifs de la compétence des cours d'eau. Ils contrôlent en partie d'autres variables comme le rapport largeur/profondeur et la sinuosité (Rosgen, 1996 ; Bernot et al., 1996 ; Bravard & Petit, 2000 ; Schmitt, 2001) ;
- Le débit à plein bord (Qb) et la puissance spécifique (ω) sont liées à l'énergie du cours d'eau. La puissance spécifique permet de comparer l'énergie de cours d'eau de taille différente (Petit, 1995 ; Bernot et al., 1996 ; Bravard & Petit, 2000 ; Schmitt *et al.*, 2001).

Notons qu'un site de mesures est constitué d'un tronçon de cours d'eau. Pour être représentatif, on considère que sa longueur doit être de l'ordre de 30 à 36 fois la largeur à plein bord du lit mineur (Simonson *et al.*, 1994 ; Malavoi, 2000). On délimite le site entre deux crêtes de seuils ou, dans le cas de cours d'eau à séquences marches-cuvettes (*step-pool*), entre deux marches (Rosgen, 1996). Les tronçons anthropisés sont évités en décalant le site vers l'amont ou sont remplacés par un autre site proche choisi parmi une réserve constituée lors du tirage. Dans un souci de gain de temps et de moyens, les paramètres de terrain ont été estimés selon un protocole ne nécessitant qu'une seule personne et un matériel léger.

Comme indiqué précédemment, ces 22 variables sont standardisées et intégrées à une base de données géographiques (ArcView[©] 9.0). Une analyse en *clusters* (Sanders, 1989) par classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward et distance euclidienne) a été réalisée sur l'ensemble des variables et des sites de mesures sélectionnés (logiciel Statistica[©] 6.0).

4. Résultats et discussion

La **figure 2** présente le résultat de la CAH. Ce dendrogramme nous permet d'individualiser nos types par une série d'emboîtements et leur distance d'agrégation. Dans ce type d'analyse, toutes les variables ont le même poids et leur ordre n'a pas d'importance. Les types sont décris à partir des variables non standardisées notamment à l'aide de box plot (ou boîtes à moustaches, voir **figure 3**). Bien que toutes les variables entrent dans l'analyse, nous ne présentons au **tableau 2** que les variables dont le rôle discriminant est le plus marqué. Elles ne sont pas exclusives et les limites de classes doivent être considérées avec souplesse.

Au premier niveau (dist. agrég. = 80 %) se distinguent nettement trois grands types:

Type 100: Ce type représente des rivières à forte puissance (entre 100 et 450 W/m²) avec une granulométrie élevée et des pentes supérieures à 1%;

Type 200: Ce type définit des rivières plus importantes (BV > 50 km²; DS > 15 km) avec une puissance spécifique généralement inférieure à 100 W/m² et un pente inférieure à 1%;

Type 300: Ce type se distingue du type 100 par une puissance spécifique plus faible (< 100 W/m²) et une granulométrie plus faible.

Les autres niveaux d'analyses sont définis suite à l'analyse du dendrogramme. Un second niveau a été choisi à une distance d'agrégation de 40 %. Chaque grand type de subdivise en deux sous-types:

Type 110 et Type 120: Le type 110 se différencie du type 120 par une dimension plus restreinte ($\text{LnShr} < 2.25$), un D_{50} plus important ($> 300 \text{ mm}$) et une altitude moyenne plus élevée ($> 400 \text{ m}$) des cours d'eau;

Type 210 et Type 220: Ces deux types représentent des rivières qui ne se différencient que par leur dimension et donc par les variables qui en dépendent directement (BV, DS, w, LnS);

Type 310 et Type 320 : Le type 310 se différencie du type 320 par la taille plus élevée des cours d'eau mais également par une sinuosité plus marquée (> 1.15), une pente plus faible ($S < 1.8 \%$) et un rapport d'encaissement plus élevé ($\text{RE} > 15$).

Enfin, un dernier niveau d'analyse a été choisi à une distance d'agrégation de 25 % et permet de définir 9 sous-types. Les types 210, 220 et 310 ne se différencient pas à ce niveau et conservent leur numérotation.

Type 111: Rivière à lit rocheux ou à cascades, avec pente ($> 6 \%$) et puissances ($> 400 \text{ W/m}^2$) très élevées et un rapport d'encaissement très faible (< 3);

Type 112: Proche du type 111 mais se caractérise par une pente et une puissance plus faibles ainsi qu'un rapport d'encaissement plus élevé;

Type 121: Rivière avec pente et puissance élevées de plus petite dimension ($w < 8 \text{ m}$). Le classement granulométrique de Folk & Ward est inférieur à 1.4 et comporte moins d'éléments très grossiers ($D_{95} < 700 \text{ mm}$) que les autres de type "100";

Type 122: Rivière avec pente et puissance élevées de plus grande dimension ($w > 8 \text{ m}$) avec un plus mauvais classement ($F & W > 1.4$) et des éléments très grossiers plus nombreux ($D_{95} > 1000$);

Type 321: Ruisseau à lit caillouteux ($D_{50} < 50 \text{ mm}$) à pente moyenne ($1 < S < 4 \%$) situé généralement à une altitude inférieure à 250 m (à l'exception du site 37) avec très peu d'affleurements de roche en place ($< 10 \%$);

Type 322: Ruisseau à lit caillouteux plus grossier ($D_{50} > 50 \text{ mm}$) à pente plus forte ($S > 4 \%$) situé généralement à une altitude supérieure à 250 m avec un pourcentage d'affleurements de roche en place plus élevé ($> 10 \%$).

Au vu des caractères discriminants définissant les types, le réseau a été sectorisé en tronçons homogènes en utilisant les confluences (taille du BV), le gradient longitudinal de la puissance spécifique, les ruptures de pentes et l'altitude. Les tronçons de rivières traversant les zones urbaines ont été considérés comme anthropiques. Ensuite, un type a été attribué à chaque secteur pour l'ensemble du réseau hydrographique de la zone d'étude (**figure 4**).

Les trois grands types individualisés au **premier niveau** d'analyse montrent l'importance de la puissance spécifique (type 100) et de la taille du bassin versant (type 200 et 300). Le type 100 décrit notamment l'ensemble des zones du plateau des Hautes Fagnes ainsi que les rivières à forte pente de la Retombée ardennaise en amont des lacs artificiels de la Gileppe et d'Eupen. Le type 200 décrit l'ensemble de la Vesdre en aval du barrage d'Eupen et les parties aval de la Hoëgne et de la Berwinne. Enfin le type 300 décrit les têtes de bassin et les rivières de taille plus restreinte hormis le plateau des Hautes Fagnes.

C'est au **second niveau** d'analyse que se marquent d'autres différenciations régionales. Le type 110 individualise le plateau des Hautes Fagnes et les secteurs à fortes puissances amorçant la Retombée Ardennaise. Le type 120, quant à lui, décrit des cours d'eau de dimension moyenne de la retombée Ardennaise et les ruisseaux à pente élevée du Massif de la Vesdre.

Comme indiqué, la différenciation du type 200 se fait surtout au niveau de la taille. En effet, le type 210 décrit seulement la partie moyenne et aval de la Vesdre, tandis que le type 220 décrit les parties aval de la Hoëgne (Retombée Ardennaise) et de la Berwinne (Pays de Herve). Ces deux dernières ne se distinguent régionalement qu'à une distance d'agrégation de 14 %. Une différenciation plus précoce aurait été attendue. Cela peut s'expliquer premièrement par le peu de sites de mesures définissant ces types. Ensuite, la non distinction en "berges verticales rafraîchies" et "berges en recul" dans le calcul du pourcentage de berge érodées pourrait être proposée. Un essai de classification sans cette variable ne change en rien les distances d'agrégation, du moins pour ces deux portions de rivière. L'apport de certaines améliorations dans l'évaluation de la dynamique latérale de la rivière, comme le calcul d'un indice pondéré incluant à la fois le pourcentage de berge érodées et les dépôts latéraux, semble nécessaire et plus approprié (Schmitt, 2001).

Le type 310 ne se retrouve que dans le Pays de Herve et dans le Pays de Dalhem. Il représente des rivières de taille moyenne avec une sinuosité et une plaine alluviale plus développées. Bien que ce type ne se subdivise pas au troisième niveau d'analyse, il est intéressant de noter que la partie amont de la Magne (principal affluent provenant du Pays de Herve de la Vesdre) se différencie à un niveau d'agrégation de 21 %. Le type 320 comprend la plupart des ruisseaux dont la puissance spécifique n'excède généralement pas 100 W/m².

Enfin, le **troisième niveau** d'analyse permet de différencier régionalement les types 111 (amorce de la Retombée Ardennaise) et 112 (Plateau des Hautes Fagnes) ainsi que les types 121 (Massif de la Vesdre, à l'exception du site 37) et 122 (Retombée Ardennaise). Enfin le type 322 individualise les ruisseaux en tête de bassin de la partie ardennaise. Leur largeur plus importante peut s'expliquer par des précipitations plus abondantes mais surtout par une granulométrie plus importante et un substrat imperméable. L'affleurement de la roche en place s'explique quant à lui par des différences d'affectation du sol et une couverture en sédiment par rapport au type 321 caractérisant le massif de la Vesdre et le Pays de Herve.

Ces résultats nous montrent qu'il est possible de retrouver un découpage en régions naturelles au travers de variables hydro-morphologiques uniquement quantitatives, soit décrit par un type (le Pays de Herve avec le type 310) ou par une succession de types (Hautes Fagnes et Retombée Ardennaise avec les types 112-111-122).

Une validation consistant en la comparaison d'un autre échantillon d'une vingtaine de sites de mesures sélectionnés simultanément à l'échantillon original est en cours de réalisation. Les premiers éléments de validation sont positifs et les discordances n'apparaissent quasi-exclusivement qu'entre types voisins à la limite de régions différentes.

5. Perspectives

Cette analyse en *clusters* nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de types caractérisant le réseau hydrographique de la zone d'étude avec d'une part un protocole de mesures de terrain simplifié, habituellement grand consommateur en temps et en personnel technique, et d'autre part un minimum de traitements statistiques. L'objectif suivant sera de tester cette méthode à l'échelle de la Région Wallonne (17.000 km²). La structure emboîtée sera très utile car elle permettra de proposer un nombre de types optimum, en fonction de l'échelle, tout en permettant une analyse plus fine dans les sous-régions.

Il est clair que des améliorations comme la réduction du nombre de variables (celle directement liée la taille du BV par exemple) sont à apporter à la méthode.

Certaines variables comme les pentes, le rapport d'encaissement, l'altitude et surtout la puissance spécifique (Bernot *et al.*, 1996; Petit *et al.*, 1996; Petit *et al.*, 2000; Malavoi, 2000; Schmitt *et al.*, 2001; Petit *et al.*, 2005) sont plus discriminantes que d'autres. L'intérêt serait donc de pouvoir les extraire ou tout au moins les estimer semi-automatiquement à partir d'un MNT avec comme objectif de réduire les procédures d'acquisition de données de terrain, mais également de définir une typologie

uniquement à partir de données existantes comme demandé dans la Directive Cadre sur l'Eau (CPE, 2000).

Petit *et al.* (2005) mettent en évidence, à partir de 38 stations hydrométriques de l'Ardenne belge (rivière à lit caillouteux sur substrat imperméable), des différenciations régionales de variables et propose deux relations³ liant, d'une part le Qb à la superficie du bassin versant et, d'autre part, la largeur du lit mineur à la superficie du bassin versant. Grâce à de telles relations, il est possible d'obtenir, dans ce cas pour l'Ardenne, une estimation de la puissance spécifique pour tout le réseau hydrographique à partir de la superficie du bassin versant et de la pente longitudinale, toutes deux extraites d'un MNT. Une bonne corrélation est d'ailleurs observée ($R^2 : 0,8 - n = 20$) entre les puissances spécifiques calculées dans les sites de mesures ardennais et estimées par les équations proposées par Petit *et al* (2005). Cela ne constitue qu'une première étape et l'établissement de telles formules pour d'autres régions naturelles s'avère nécessaires dans le cadre par exemple de la réalisation d'une typologie à l'échelle régionale ou dans l'élaboration d'une sectorisation automatique du réseau hydrographique.

Enfin, grâce à une méthode, utilisant un MNT, inspirée de la simulation des écoulements dans un bassin versant (Petit S., 2000 ; Esri, 2002), il est possible de quantifier au niveau de chaque segment de rivière des variables qualitatives relatives à la portion de bassin versant drainée par ces segments (Hallot, 2004; Hallot, 2005). Des variables comme la géologie, la pédologie ou même l'évolution de l'affectation du sol peuvent donc être quantifiée et intégrée à ce type d'analyse statistique automatiquement tout en répondant aux impératifs de la DCE2000/60 d'utiliser au maximum les sets de données existants.

Remerciements

Cette recherche a été financée dans le cadre du projet Interreg III « Wege des Wassers » subsidié par le FEDER et la Région Wallonne (DCENN). De nombreux documents ont été très aimablement mis à notre disposition par le DCENN (Direction des Cours d'Eau Non Navigables de la Région Wallonne).

Références

- Agences de l'Eau, 1999. *Les outils d'évaluation de la qualité des cours d'eau (S.E.Q.), Principes généraux*, Les études des Agences de l'Eau n°72, 11 p.
- Amoros C. & Petts G. E. (Eds), 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, Paris, 300 p.
- Bernot V., Calland V., Bravard J.-P. & Foussadier R.; 1996. *La sectorisation longitudinale du Vidourle (Gard-Hérault), une méthode appliquée à la gestion environnementale d'un espace fluvial méditerranéen*, Revue de Géographie de Lyon, Vol. 71, 4/96, 323-339.
- Bravard J.P. & Petit F., 2000. *Les cours d'eau. Dynamique du système fluviale*, Armand Colin, 222 p.
- Brookes A. & Shields F. D. (Eds), 1996. *River channel restoration, Guiding principles for sustainable projects*, John Wiley & Sons, 433 p.
- Church M., 1992. *Channel morphology and typology*. In. Calow P. & Petts G.E. (Eds), *The rivers handbook, Hydrological and ecological principles*, Volume 1, Blackwell Scientific Publications, 126-143.

³ $Qb = 0,128 A^{0,981} (R^2 = 0,961)$
 $w = 1,032 A^{0,489} (R^2 = 0,924)$

- Conseil du Parlement Européen, 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*, Off. Journal L327(22/12/2000), 73 p.
- Corbonnois J. & Zumstein, 1994. *Proposition de typologie des cours d'eau. Application au réseau hydrographique du Nord-Est la France (bassin de la Moselle)*, Revue de Géographie Alpine, n°2, 15-24.
- Demortier G., Goetghebeur P. & Aquascop, 1996. *Outil d'évaluation de la qualité du milieu physique des cours d'eau - Synthèse*. Agence de l'Eau Rhin-Meuse, AQUASCOP, 78 p.
- Demoulin A., 1995 (Ed) *L'Ardenne, essai de géographie physique*, Hommage au Professeur A. Pissart, Département de Géographie Physique et Quaternaire, Université de Liège, 238 pp.
- Dumolard P., Dubus N. & Charleux L., 2003. *Les statistiques en géographie*, collection « Atouts Géographie », Ed. Belin, Paris, 239 p.
- Esri, 2002. *ArcDoc Version 8.3*, Aide du logiciel ArcInfo[®] 8.3, Esri.
- Folk R.L. & Ward W.C., 1957. *Brazos river bar: a study of significance of grain size parameters*, J. Sediment. Petrol. 27, 3-26.
- Gérard P., 2004. *La qualité hydromorphologique des eaux de surface dans le contexte de la Directive Cadre sur l'Eau*, communication au colloque « Monitoring et gestion physique des cours d'eau wallons », organisé par l'Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels et par la Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, 26/10/2004.
- Gratton Y., 2002. *Le Krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale*, Les articles de l'IAG, http://iag.asso.fr/articles/krigeage_juillet2002.htm, dernière consultation le 25/09/04.
- Hallot E., 2004, *Recherches méthodologiques en vue d'une typologie de cours d'eau dans l'Euregio Meuse Rhin*, mémoire de DEA, Université de Liège, inédit, 61p. + annexes.
- Hallot, E., Mols, J., Petit, F., 2005. *Research on a hydro-geomorphological typology of rivers in the Euregio Maas-Rhine (Belgium, The Netherlands and Germany)*, poster presented at the Vienna EGU 2005 annual meeting - Z104 - EGU05-A-03576.
- Hutchinson, M. & Dowling, T. 1991. *A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia*, Hydrological Processes 5, 45-58.
- Hutchinson, M. 1996. *A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models*. In Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM, January 21-26, 1996. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/hutchinson_michael_dem/local.html, dernière consultation le 20/09/04.
- Juracek K.E. & Fitzpatrick F.A., 2003. *Limitations and implications of stream classification*, Journal of the American Water Resources Association, 39, 3, 659-670.
- Kern K., 1992. *Restoration of lowland rivers : the German experience*. In. Carling P.A. & Petts G.E. (Eds), *Lowland floodplain rivers. Geomorphological perspectives*. John Wiley & Sons, 279-297.
- Kondolf G.M., 1995. *Cases studies and reviews. Geomorphological stream channel classification in aquatic habitat restoration: uses and limitations*, Aquatic Conservation, Marine and Freshwater Ecosystems, 5, 127-141.

- Kondolf G.M., Montgomery D.R., Piegay H. & Schmitt L., 2003. *Geomorphic classification of rivers and streams*, In. Kondolf G.M. & Piegay H. (Eds), *Tools in fluvial geomorphology*. John Wiley & Sons, 169-202.
- Kondolf G.M., Smeltzer M.W. & Railsback S. 2001. *Design and performance of a channel reconstruction project in a coastal California gravel-bed stream*. Environmental Management 28, 761-776.
- Laurans M., 2002. *La mise en place de la Directive Cadre dans la gestion des bassins versants internationaux en Europe*, Synthèse technique, ENGREF, Montpellier, 14 p.
- Malavoi J.R., 2000. *Typologie et sectorisation des cours d'eau du bassin Loire-Bretagne*. Agence de l'eau Loire - Bretagne, 79 p.
- Mardaga P., 1987, (Ed). *Pays de Herve*, collection « Architecture rurale de Wallonie », Liège, 227 p.
- Mardaga P., 1989, (Ed). *Condroz*, collection « Architecture rurale de Wallonie », Liège, 280 p.
- Mardaga P., 1992, (Ed). *Ardenne herbagère*, collection « Architecture rurale de Wallonie », Liège, 300 p.
- Miller J.R. & Ritter J.B., 1996. *Discussion, An examination of the Rosgen classification of natural rivers*, Catena, 27, 295-299.
- Mols J., 2004. *Dynamique fluviale en réponse aux changements d'affectation du sol des bassins versants de l'Euregio Meuse Rhin*, mémoire de DEA, Université de Liège, 55p.
- Montgomery D.R. & Buffington J.M., 1998. *Channel processes, classification, and response*, In. Naiman R.J. & Bilby R.E. (Eds), *River ecology and management. Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*, Springer, 13-42.
- Naiman R.J., Lonzarich D.G., Beechie T.J. & Ralph S.C., 1992. *General principles of classification and the assessment of conservation potential rivers*. In. Boon P.J., Calow P. & Petts G.E. (Eds), *River Conservation and Management*, John Wiley & Sons, 93-123.
- NRW, 2002. *Water quality monitoring in North Rhine-Westphalia*, North Rhine-Westphalia Länder, 85 p.
- Petit F., 1995. *Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises*, In Demoulin A., 1995 (Ed). *L'Ardenne, essai de géographie physique*, Hommage au Professeur A. Pissart, Département de Géographie Physique et Quaternaire, Université de Liège, 194-223.
- Petit F., Hallot E., Houbrechts G. & Mols J., 2005. *Évaluation des puissances spécifiques de rivières de Moyenne et de Haute Belgique*, Bulletin de la Société Géographique de Liège, (in press).
- Petit F., Pauquet A. & Pissart A., 1996. *Fréquence et importance du charriage dans des rivières à charge de fond caillouteuse*, Géomorphologie : Relief, processus, environnement, 2/1996, 3-12.
- Petit F., Perpinien G. & Deroanne C., 2000. *Détermination des puissances spécifiques critiques dans des rivières à charge de fond caillouteuse*, Revue Géographique de l'Est, 40, 59-65.
- Petit S., 2000. *Analyse quantitative du réseau hydrographique de la Meuse : Exploitation d'un modèle numérique de terrain*, Mémoire de licence en sciences géographiques, Université de Liège, 78 p. + annexes.
- Rosgen D., 1994. *A classification of natural rivers*, Catena 22, 169-199.
- Rosgen D., 1996. *Applied River Morphology*, Wildland Hydrology, Pasoga Springs, Colorado, 390 p.

- Sanders L., 1989. *L'analyse statistique des données en Géographie*, Aliade Reclus, Montpellier, 267 p.
- Schmitt L., 1996. *Approche bibliographique pour une typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau*, Mémoire de DEA, UFR de Géographie - Université Louis Pasteur, Strasbourg 1, 108 p.
- Schmitt L., 2001. *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle des cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 216 pp. + annexes.
- Schmitt L., Maire G. & Humbert J., 2000. *Typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau : vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud-occidental du fossé rhénan*, Géocarrefour, 75, 347 – 363.
- Schmitt L., Nobelis P., Maire G & Humbert J., 2004. *Une typologie hydro-géomorphologique de cours d'eau comme cadre de gestion : Application à l'Alsace et perspectives de transposition*, Communication au colloque : Spatialisation et Cartographie en Hydrologie, CEGUM, Metz 8-10 septembre 2004.
- Simonson T.D., Lyons J. & Kanehl P.D., 1994. *Quantifying fish habitat in streams: transect spacing, sample size, and a proposed framework*. North American Journal of Fisheries Management, 14, 607-615.
- Strahler A., 1957. *Quantitative analysis of watershed geomorphology*, Transactions, American Geophysical Union, 38, 6, pp. 913-920.
- Tarboton D., bras R. & Rodriguez-Iturbe I., 1991. *On the extraction of channel networks from Digital Elevation Model data*, Hydrological Processes, 5, Special issue n°1, 81-100.
- Wasson J., 1989. *Eléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes : revue critique de quelques approches existantes*, Bull. Ecol. 20, 2, 109-127.
- Wasson J., Béthemont J., Degorge J., Dupuis B & Joliveau T., 1993. *Approche écosystémique du bassin de la Loire : Eléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion*. Rapport final. Cemagref, Groupement de Lyon et Université Jean Monnet St Etienne, CRENAM, CNRS U.R.A. 260, 113 p. + annexes.
- Wimmer R., Chovanec A., Moog O., Fink M.H. And Gruber D., 2000. *Abiotic stream classification as a basis for a surveillance monitoring network in Austria in accordance with the EU Water Framework Directive*. Acta hydrochim. Hydrobiol., 28, 4, 177-184.

Tableau 1 :

| | Bassin versant (km²) | Altitude source (m) | Altitude confluence (m) | Longueur (km) | Pente moyenne (%) | Q_b* (m³/s) | D₅₀* (mm) |
|-------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| Berwinne (à Dalhem*) | 128 | 270 | 53 | 27,5 | 7,9 | 16 | 50 |
| Vesdre (à Chaudfontaine*) | 710 | 605 | 70 | 72,5 | 7,3 | > 160 | 90 |
| Hoëgne (à Theux*) | 207 | 570 | 135 | 29 | 15 | > 40 | 60 |

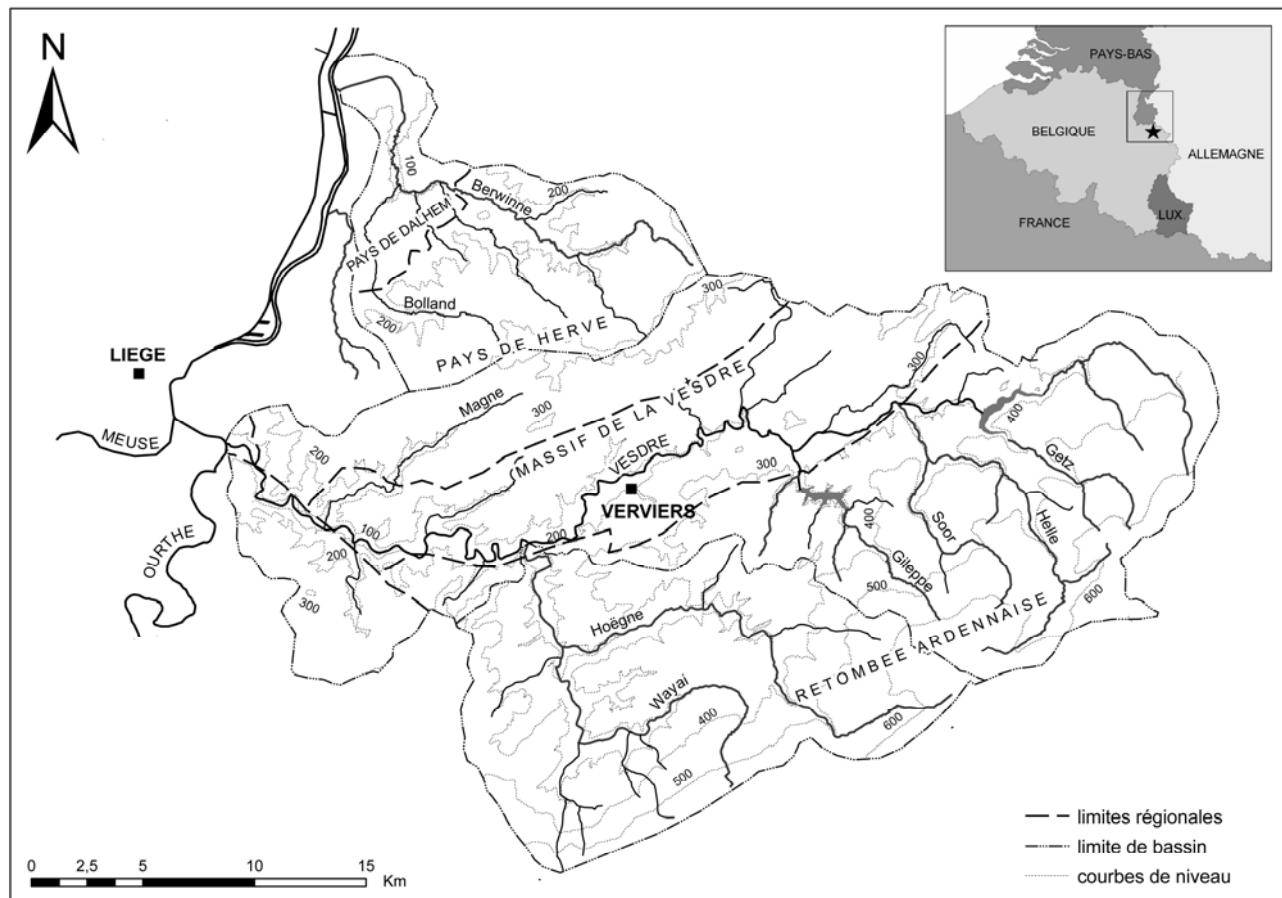
Principales caractéristiques des bassins versants étudiés.

Tableau 2 :

| | | | | | |
|-----|---|-----|---|-----|--|
| 100 | BV < 50 km ² DS < 15 km 100 < ω < 450 W/m ² D_{50} > 100 mm D_{95} > 500 mm S > 1 % | 110 | LnShr < 2.25 D_{50} > 300 mm Z > 400 m | 111 | ω > 400 W/m ² S > 6 % RE < 3 |
| | | | | 112 | 100 < ω < 400 W/m ² 1 < S < 6 % RE > 3 |
| | | 120 | LnShr > 2.25 D_{50} < 300 mm Z < 400 m | 121 | 100 < ω < 400 W/m ² 1 < S < 6 % w < 8 m D_{95} < 700 mm F&W < 1.4 Z < 300 m |
| 200 | BV > 50 km ² DS > 15 km ω < 100 W/m ² D_{50} < 100 mm D_{95} < 500 mm S < 1 % | 210 | BV > 250 km ² DS > 45 km w > 20 m LnS > 5 | | |
| | | 220 | 50 < BV < 250 km ² DS < 45 km w < 20 m LnS < 5 | | |
| 300 | BV < 50 km ² DS < 15 km ω < 100 W/m ² D_{50} < 100 mm D_{95} < 500 mm S > 1 % | 310 | 10 < BV < 50 km ² LnShr > 2 RE > 15 Sin > 1.15 1 < S < 1.8 % | | |
| | | 320 | BV < 10 km ² LnShr < 2 RE < 15 Sin < 1.15 S > 1.8 % | 321 | D_{50} < 50 mm 1 < S < 4 % Z < 200 %RP < 10 % |
| | | | | 322 | D_{50} > 50 mm S > 4 % Z > 200 %RP > 10 % |

Variables les plus discriminantes. Elles ne sont pas exclusives et les limites de classes doivent être considérées avec souplesse.

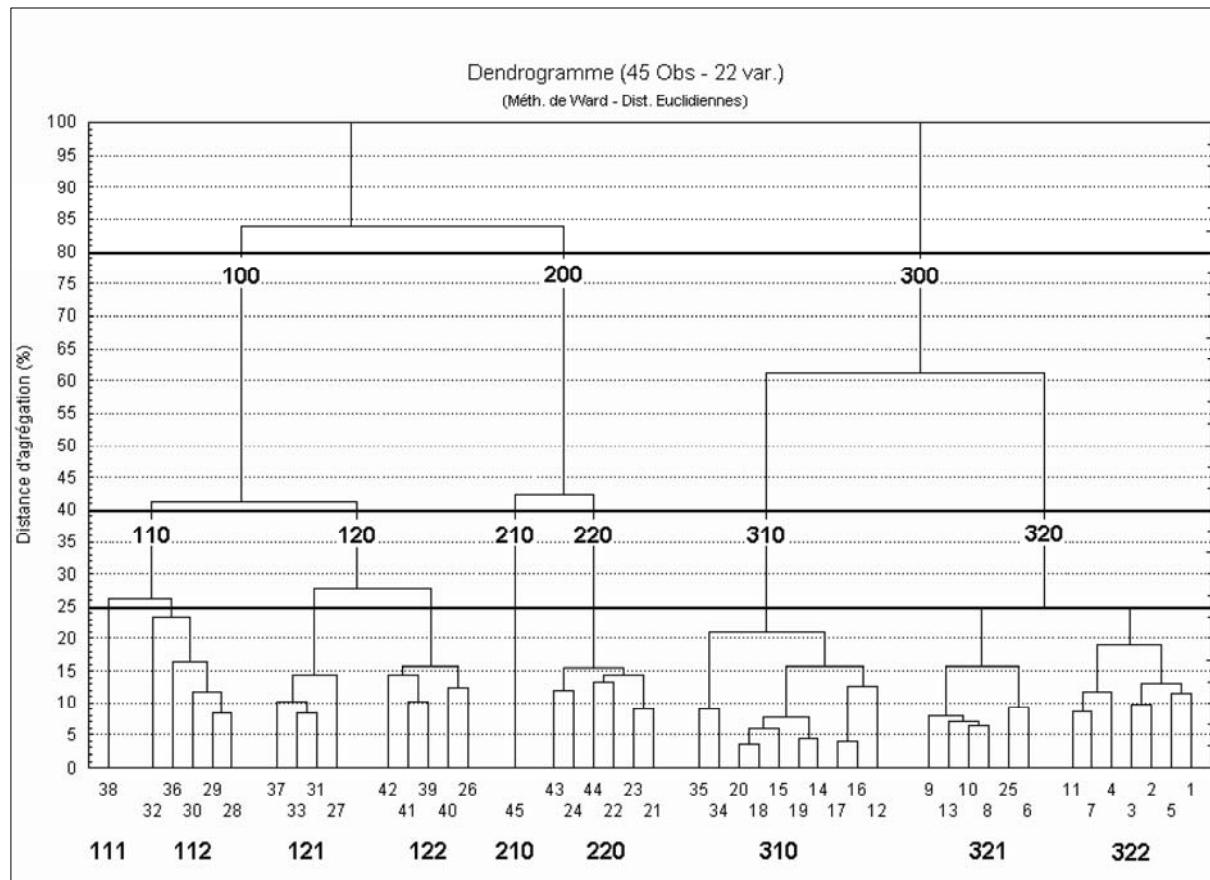
Figure 1



Bassin de le Vesdre et de la Berwinne.

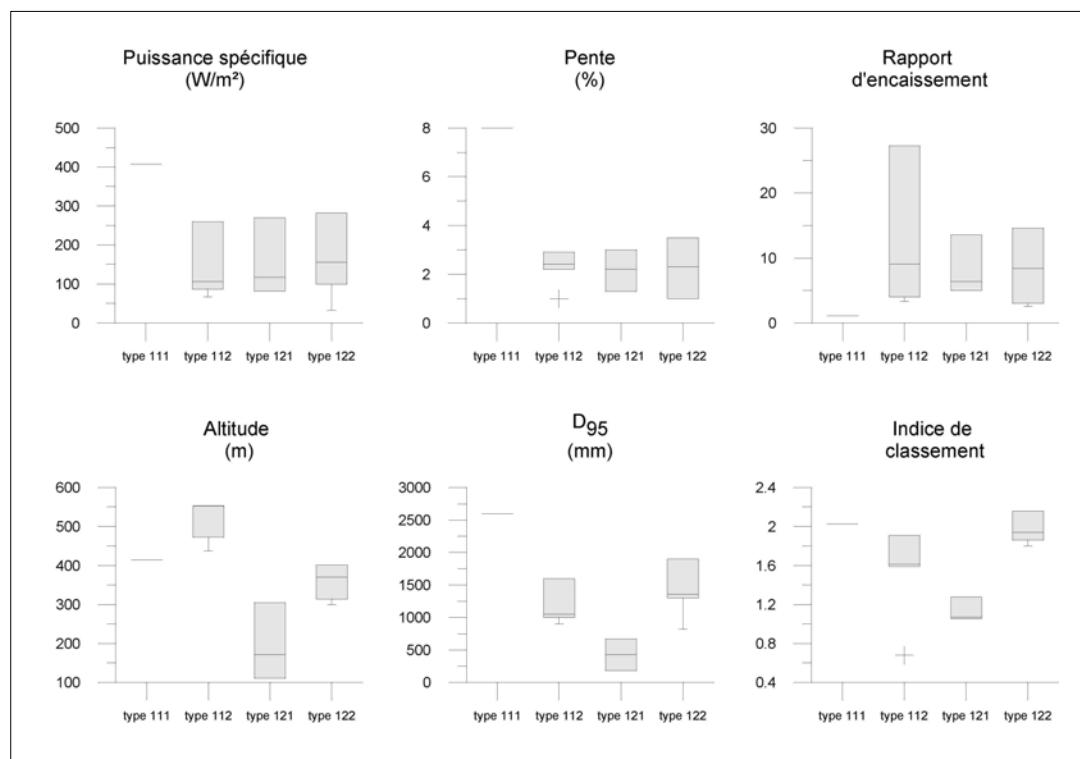
En encart: En encadré, localisation de l'Euregio Meuse-Rhin

Figure 2



Classification ascendante hiérarchique (méthode de Ward et distance euclidienne) basée sur 45 sites et 22 variables (Statistica[©] 6.0). Les trois niveaux d'analyses ont été placés respectivement à 80, 40 et 25 %.

Figure 3



Variabilité des caractères hydro-géomorphologiques les plus discriminants des types 111 à 122.

Figure 4

Application des types au réseau hydrographique de la zone d'étude.

