

Construction d'un réseau hydrographique simplifié à partir de la BD Carthage®

Hervé Pella, Éric Sauquet et André Chandesris

Les outils pour l'analyse des caractéristiques hydrologiques des cours d'eau existent, mais ne permettent pas leur étude hydro-morphologique à l'échelle nationale. La méthode décrite dans cet article est destinée à faciliter la modélisation des écoulements et d'en étudier les impacts sur le réseau hydrographique national, dans le contexte de la Directive cadre sur l'eau ou bien pour toute étude conduite par exemple pour calculer le contenu d'un bassin amont ou d'un bassin versant, évaluer les impacts des modes d'occupation des sols, et caractériser les pressions anthropiques.

La Directive cadre européenne sur l'eau (DCEE) pose clairement le principe d'une évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques par la mesure d'un écart à des conditions de référence, principalement sur la base de bioindicateurs. La première étape de sa mise en œuvre, en ce qui concerne les eaux de surface continentales, passe par l'établissement d'une typologie permettant la définition des conditions de références biologiques, mais aussi hydro-morphologiques et physico-chimiques. Cette typologie, issue des travaux de régionalisation des écosystèmes aquatiques (Wasson *et al.*, 2004) s'appuie sur un découpage du territoire en hydro-écorégions (Wasson *et al.*, 2002). Un système d'information géographique à l'échelle nationale a été créé pour répondre à cet objectif de régionalisation (Pella *et al.*, 2004).

La base de données (BD) Carthage® regroupe les entités ayant trait à l'hydrographie. Cette base a servi de support pour la mise au point de la typologie finale requise pour l'application de la DCEE, notamment pour intégrer l'influence du bassin amont sur les caractéristiques hydrologiques et hydrochimiques observées dans un tronçon (Chandesris *et al.*, 2006). Cette intégration de l'influence amont impose le parcours du réseau pour permettre la modélisation de l'écoulement dans les arcs de la BD Carthage®.

L'analyse spatiale nécessite d'identifier les arcs amont de chacun des arcs du réseau. Cette analyse est basée sur la connexion des arcs entre

eux et sur la direction des arcs. Un arc est défini par une polyligne constituée d'un nœud amont et d'un nœud aval. La connexion impose que le nœud aval d'un arc coïncide avec le nœud amont de l'arc suivant. La direction d'un arc correspond au sens de saisie ; l'opérateur devant commencer la saisie à l'amont et finir par l'aval. De cette manière, les points constituant l'arc s'enchaînent de l'amont vers l'aval, le sens d'écoulement étant porté par les coordonnées de l'arc. Cette analyse spatiale des arcs amont n'est possible techniquement que si la connexion et la direction des arcs sont correctes.

Or, ces deux conditions ne sont pas complètement satisfaites sur la BD Carthage® version 3.0 (2^e édition). D'autre part, le caractère artificiel d'une partie du réseau hydrographique (portions court-circuitées, canaux, réseaux de drainage...) ainsi que la complexité de l'écoulement naturel en vallées alluviales sous la forme de chenaux multiples, ne permettent pas la modélisation de l'écoulement dans le réseau représenté. Étant donné les problèmes de connexion, de direction des arcs et de complexité de l'écoulement naturel, nous avons décidé de simplifier le réseau hydrographique BD Carthage®.

Ce réseau simplifié devra rendre possible la modélisation de l'écoulement et donc le parcours du réseau amont-aval. En outre, il nous permettra à terme de répondre à diverses questions :

– quelle longueur cumulée de cours d'eau se trouve à l'amont d'un point sur le réseau ?

1. Acronyme de « Base de Données de CARTographie THématique des Agences de l'Eau ».

Les contacts

Cemagref, UR
Hydrologie
hydraulique,
3 bis quai Chauveau,
CP 220, 69366 Lyon
Cedex 09

2. Directions régionales de l'environnement.

– quelle est la distance entre un point sur le réseau et l'exutoire final ?

– quelle est la distance entre deux confluences ?

Les zones hydrographiques représentent les unités géographiques élémentaires d'intégration les plus appropriées et les plus adaptées à notre échelle de travail. La simplification du réseau utilisant l'axe d'écoulement naturel de chacune de ces zones hydrographiques permet de construire un outil de simulation de l'écoulement. La prise en compte de l'influence amont devient alors possible sur cet outil.

Après une brève présentation de la BD Carthage® version 3.0 et de l'information « drain principal » qu'elle contient, nous évoquerons le traitement et l'analyse des informations géographiques pour l'identification du drain principal naturel. À titre d'illustration, deux exemples d'utilisation de ces données seront finalement présentés.

Caractéristiques de la BD Carthage®

Un référentiel...

La BD Carthage® a été créée pour servir de référentiel spatial commun à l'ensemble des services de l'État et établissements publics pour un usage interne de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques superficiels. Sa création et sa mise en œuvre découlent de l'application de la circulaire interministérielle n° 91-50 du 12 février 1991 précisant notamment que « *la gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau rend nécessaire l'échange de nombreuses données entre les services et organismes intéressés, aux échelons départementaux, régionaux et nationaux. L'un des éléments indispensables au bon fonctionnement d'un tel système d'échange d'information est un code de repérage des milieux aquatiques servant de référence commune* ». Le référentiel spatial de l'eau en France est né de la fusion de la codification hydrographique avec le thème hydrographie de la base de données Carto® de l'Institut géographique national (IGN). Cette fusion a conduit à l'élaboration de la BD Carthage®. Cette base est une œuvre de collaboration, au sens de l'article L113-3 du code de la propriété intellectuelle, dont sont co-auteurs et co-proprétaires l'IGN, le ministère chargé de l'environnement et les agences de l'eau.

Ce référentiel géographique identifie sans ambiguïté chaque cours d'eau et chaque plan d'eau sur le territoire métropolitain. La BD Carthage® est un référentiel thématique (ou « métier ») auquel contribuent l'IGN et les acteurs du système d'information sur l'eau (SIE). Les autorités de bassin (agences de l'eau en France métropolitaine, DIREN² dans les départements d'outre-mer) collectent et contrôlent les demandes d'évolution (anomalies et mises à jour). Ils les transmettent à l'IGN tout au long de l'année. Les actions sont coordonnées au sein du SIE, offrant ainsi des garanties de fiabilité du référentiel.

La BD Carthage® se décline en neuf grands thèmes dont seuls le réseau hydrographique et le zonage hydrographique sont utilisés dans le présent document.

LES ZONES HYDROGRAPHIQUES

L'ensemble du territoire français est divisé en zones élémentaires appelées zones hydrographiques. Leurs limites s'appuient sur celles des bassins versants topographiques.

Ce découpage hydrographique a été réalisé sous forme de quatre partitions hiérarchisées selon des aires hydrographiques décroissantes : la région (1^{er} ordre), le secteur (2^e ordre), le sous-secteur (3^e ordre) et enfin la zone hydrographique (4^e ordre).

LE RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Les éléments du réseau hydrographique sont identifiés par un code hydrographique défini par les agences de l'eau. Ce code est composé de huit caractères dont :

- les quatre premiers font référence à la zone hydrographique ;
- les trois suivants identifient le tronçon dans la zone hydrographique ;
- le dernier indique le milieu aquatique codifié (cours d'eau, plan d'eau, bras...).

Le principal objectif de la circulaire n° 91-50 était d'effectuer la codification hydrographique sur les principaux cours d'eau dans un délai de trois ans, la codification sur les petits cours d'eau étant réalisée en fonction des besoins. Ces derniers s'expriment de manière différente en France ; ceci explique sans doute pourquoi cette codification des arcs de la BD Carthage® opérée par les agences de l'eau n'est pas

homogène sur l'ensemble du territoire national. À titre d'exemple, on peut souligner que la codification est complète en Loire-Bretagne, mais ne représente que 57 % du linéaire en Rhône-Méditerranée-Corse.

En chiffre...

La France possède un réseau hydrographique développé : plus de 500 000 km de cours d'eau drainent les 550 000 km² du territoire métropolitain. La densité de ce réseau est (en km/km²) assez inégale, passant de 0,5 pour les zones karstiques (Causses, Jura...) à un maximum de 2 pour les zones montagneuses.

BD Carthage® version 3.0 compte 507 013 arcs, ce qui représente une longueur cumulée de 515 785 km de cours d'eau.

CODIFICATION HYDROGRAPHIQUE

Le tableau 1 présente la codification hydrographique de la BD Carthage® version 3.0 par agence de l'eau :

- longueurs cumulées des arcs du réseau hydrographique de la BD Carthage® et pourcentage par rapport au total d'arcs,
- longueurs cumulées des arcs codés et pourcentage par rapport au total d'arcs codés,
- longueurs cumulées des arcs non codés et pourcentage par rapport au total d'arcs non codés.

Les agences de l'eau sont désignées par les initiales de leur nom. Ainsi, AG désigne l'agence Adour-Garonne, AP l'agence Artois-Picardie, LB l'agence Loire-Bretagne, RM l'agence Rhin-

Meuse, RMC l'agence Rhône-Méditerranée et Corse et SN l'agence Seine-Normandie.

Une autre sélection portant sur les arcs naturels du réseau hydrographique de la BD Carthage® (champ Nature = 1) produit une longueur cumulée de 470 135 km sur les 515 785 km au total (soit 91 %). Sur cette nouvelle sélection, 337 024 km de cours d'eau naturels sont codés (soit 65 %) et 133 111 km sont non codés (soit 26 %).

ORDINATION

L'ordre ou le rang est une expression de la dimension longitudinale d'un cours d'eau, en fonction des affluents (nombre et taille) qu'il a rencontrés depuis sa source. Il permet de comparer les cours d'eau de même taille au sein d'un ensemble physiographique homogène. La classification de Strahler est une méthode de détermination du rang d'un cours d'eau qui est simple à mettre en œuvre. Dans cette méthode, tout drain qui n'a pas d'affluent se voit attribuer la valeur 1, deux tronçons de même ordre qui se rejoignent forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un segment qui reçoit un segment d'ordre inférieur conserve le même ordre.

La détermination de l'ordre de Strahler opérée par les agences de l'eau (tableau 2) est réalisée sur la base des arcs codés de la BD Carthage®. Cette codification n'étant pas homogène d'une agence à l'autre, la répartition des ordres de Strahler est par conséquent non homogène à l'échelle nationale. Le rapport portant sur la définition d'une typologie des masses d'eau (Chandesris et al., 2006) contient une analyse détaillée de l'ordination par agence.

Agence	Linéaire total (km)	%	Arcs codés (km)	%	Arcs non codés (km)	%
AG	119 966	23,3	72 126	20,3	47 840	30,3
AP	12 265	2,4	6 724	1,8	5 541	3,7
LB	135 493	26,3	135 493	38,2	0	0
RM	30 058	5,8	20 375	5,7	9 683	6,1
RMC	152 427	29,5	85 977	24,2	66 450	42
SN	55 083	10,7	34 645	9,8	20 438	12,9
Hors agence	10 493	2	0	0	10 493	5
Total	515 785	100	355 340	100	160 445	100

◀ Tableau 1 – Répartition par agence de l'eau des longueurs cumulées des arcs codés et non codés.

► Tableau 2
– Répartition par
agence des longueurs
cumulées (km) par
ordre de Strahler.

Agence	Ordre de Strahler							
	1	2	3	4	5	6	7	8
AG	41 755	13 632	7 167	4 127	2 245	1 116	357	7
AP	3 593	1 499	724	540	25	0	0	0
LB	68 702	26 136	15 320	8 488	5 170	2 332	714	906
RM	10 759	3 240	1 970	959	949	309	0	0
RMC	53 298	15 462	8 583	4 139	2 292	1 087	200	224
SN	16 935	6 983	4 220	1 935	1 302	675	400	0
Total (km)	195 042	66 952	37 984	20 188	11 983	5 519	1 671	1 137

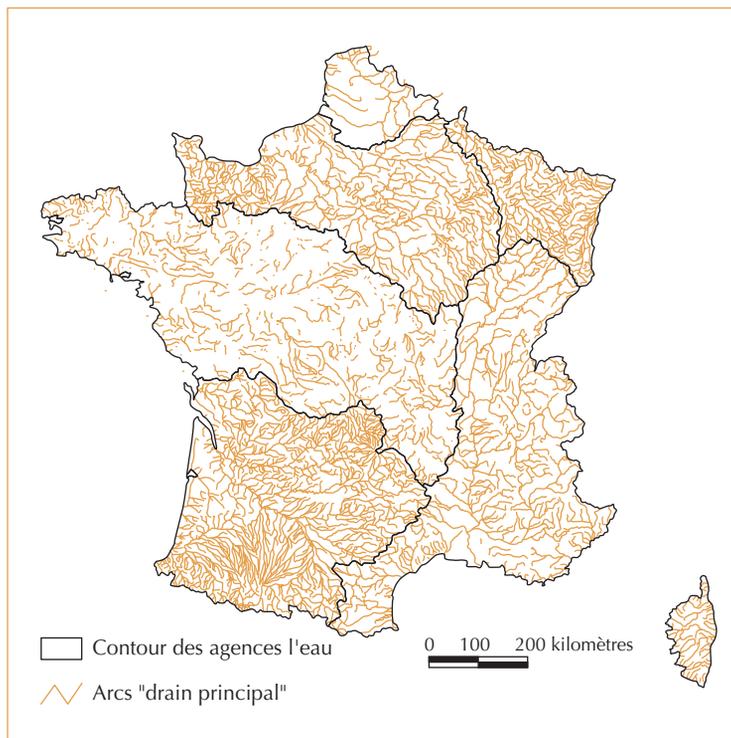
ZONES HYDROGRAPHIQUES

La répartition du nombre et des surfaces des zones hydrographiques (ZH) varie selon les agences (tableau 3).

Information sur le drain principal de la BD Carthage® version 3.0

Le drain principal est défini comme le cours d'eau le plus important d'une zone hydrographique passant par le point exutoire de cette zone. L'extraction brute de l'information drain principal,

▼ Figure 1 – Sélection
des arcs renseignés
« drain principal » (DP)
dans la BD Carthage®
version 3.0
(DP Carthage).



▼ Tableau 3 – Répartition par agence du nombre de ZH, de la surface moyenne des ZH et de la surface totale de l'agence.

Agence	Nombre ZH	Surface ZH moyenne (km ²)	Surface totale (km ²)
AG	1 980	60	118 040
AP	335	59	19 920
LB	1 410	112	156 870
RM	728	43	31 437
RMC	916	143	130 660
SN	988	96	94 881
Total	6 357	86	551 808

en utilisant des relations de jointures entre tables de données relatives au réseau d'une part, et aux zones hydrographiques d'autre part (figure 1), fait apparaître au total 74 831 km de cours d'eau, dont 72 537 km sont naturels.

Le cumul du réseau drain principal de Carthage® rapporté à la superficie couverte par chaque agence indique aussi des différences importantes entre agences de l'eau (tableau 4).

La détermination du drain principal apparaît manquante en Loire-Bretagne et incomplète en Artois-Picardie. Les écarts entre bassins peuvent s'expliquer par des utilisations différentes des champs de la base de données nationale, mais aussi par les diverses méthodes employées pour délimiter les ZH. Cette information apparaît en l'état inexploitable pour le bassin Loire Bretagne, et dans une moindre mesure pour Artois-Picardie.

	Superficie bassin de gestion par agence (km ²)	Drain principal Carthage® (km)	Proportion (%) drain (km)/superficie (km ²)
AG	118 040	24 380	20,7
AP	19 920	1 587	8
LB	156 870	11 319	7,2
RM	31 437	7 067	22,5
RM & C	130 660	15 572	11,9
SN	94 881	14 906	15,7
Total	551 808	74 831	

◀ Tableau 4 – Répartition par agence de la surface totale des bassins de gestion (BG) de chaque agence, de la longueur cumulée du drain principal et du drain cumulé rapporté à la superficie de l'agence.

En ce qui concerne les autres agences de l'eau, le drain principal établi dans la version 3.0 de Carthage® ne correspond pas forcément à l'écoulement naturel, ce qui ne répond pas aux objectifs que nous nous sommes fixés. C'est ce que nous allons montrer dans la section suivante.

Types de problèmes rencontrés sur le drain principal de la BD Carthage® version 3.0

Plusieurs problèmes dans cette détermination du drain principal sont incompatibles avec nos objectifs initiaux : les discontinuités amont-aval, les arcs artificiels et la coexistence de plusieurs drains sur une zone hydrographique.

LES DISCONTINUITÉS AMONT-AVAL (FIGURE 2A)

Sur la zone hydrographique présentée (code V547), la continuité amont-aval pour le drain principal n'est pas respectée. L'arc arrivant à l'exutoire de cette zone n'est pas relié aux arcs situés à l'aval (repéré par un cercle sur la figure). La modélisation

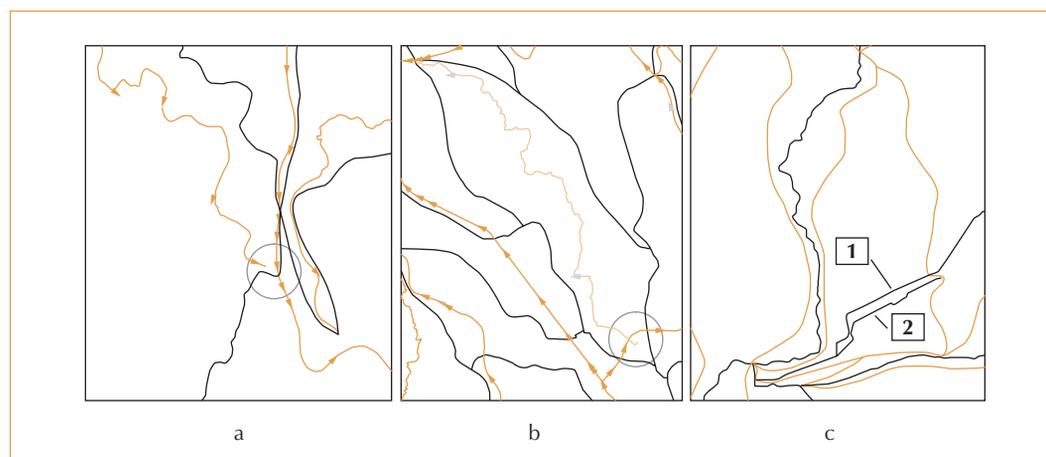
de l'écoulement n'est pas complète dans ce cas puisqu'il y a interruption dans le réseau.

LES ARCS ARTIFICIELS (FIGURE 2B)

Sur la zone hydrographique présentée (code O598), le canal de Montech est considéré comme le drain principal (repéré par un cercle sur la figure). Une solution qui privilégierait l'écoulement naturel (en brun clair), ne prendrait pas en compte le canal de Montech pour ne considérer que le cours naturel (ruisseau de la Larone).

PLUSIEURS DRAINS PAR ZONE HYDROGRAPHIQUE (FIGURE 2C)

Sur la zone hydrographique présentée (code V610), deux drains coexistent. Le premier (repéré par le chiffre 1 sur la figure) est celui qui assure la continuité amont-aval entre les drains des zones hydrographiques situées à l'amont de celle présentée. Le second (repéré par le chiffre 2 sur la figure) constitue un des autres cours d'eau de la zone hydrographique.



◀ Figure 2 – Types de problèmes rencontrés sur le drain principal de la BD Carthage® (2a : discontinuités amont-aval ; 2b : arcs artificiels ; 2c : plusieurs drains par zone hydrographique).

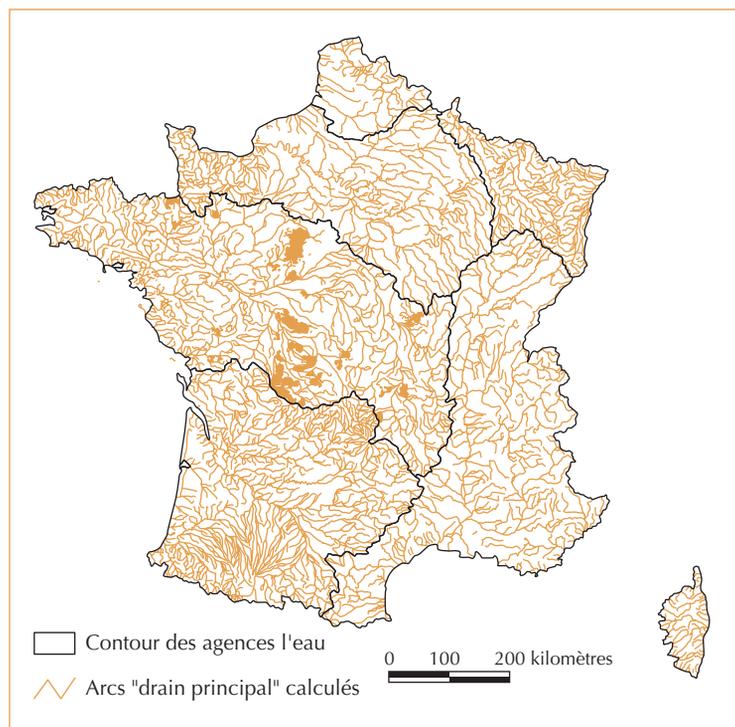
L'information « drain principal » contenue dans la BD Carthage® est intéressante mais ne couvre pas de manière uniforme l'ensemble du territoire national. Le manque de continuité amont-aval sur ce réseau drain principal ne permet pas la modélisation de l'écoulement. De plus, les arcs du réseau drain principal Carthage® ne sont pas forcément les arcs naturels. Cette couche ne peut donc pas être utilisée en l'état pour répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés.

Traitement et résultats

Étant donné les problèmes préalablement listés, nous avons décidé de créer une nouvelle couche simplifiée à partir de la BD Carthage® en ne considérant qu'un seul drain principal pour chacune des zones hydrographiques. Le travail a été initié sur la base des cours d'eau codés et naturels. Nous avons eu parfois recours à des arcs « artificiels » pour assurer la continuité amont-aval sur le réseau. L'objectif est d'obtenir un réseau hydrographique simplifié dont les arcs sont parfaitement jointifs et bien orientés de l'amont vers l'aval.

La création de ce réseau simplifié rend possible la modélisation de l'écoulement et donc

▼ Figure 3 – Résultat de la sélection des arcs du drain principal sur la base du réseau hydrographique codifié par un traitement automatisé.



le parcours du réseau amont-aval. Nous nous sommes attachés à conserver la compatibilité totale avec la BD Carthage®, référentiel utilisé par l'ensemble des partenaires en charge de la gestion des eaux.

Traitement automatique

La recherche du drain principal a été automatisée grâce à un programme écrit en Avenue (langage de l'outil de traitement ArcView). Les deux couches d'informations géographiques utilisées pour ce traitement sont issues de la BD Carthage® version 3.0. Il s'agit d'une part des zones hydrographiques (Zhycov), et d'autre part, d'une sélection des arcs du réseau portant un code hydrographique.

L'algorithme consiste, pour chaque ZH, à sélectionner les arcs contenus dans la ZH, puis à répertorier les différents codes hydrographiques des arcs sélectionnés. Sur la base de la liste des codes hydrographiques, le cours d'eau de plus grande longueur (ou du rang de Strahler le plus grand) qui arrive à l'exutoire de la ZH est alors retenu. Enfin, tous les arcs partageant ce même code au sein de la zone hydrographique considérée sont alors sélectionnés. Le résultat du traitement (figure 3) comprend 206 103 km de cours d'eau.

Ce traitement automatique aboutit à un certain nombre de discontinuités amont-aval et un problème de codage hydrographique en Loire-Bretagne, entraînant des « surdensités » localisées du réseau hydrographique.

Drain principal vérifié

Sur la base de ce premier traitement, une vérification du drain principal a été faite pour l'ensemble des zones hydrographiques (figure 4). Cette vérification a porté sur la recherche et la résolution des discontinuités amont-aval, sur la simplification de l'écoulement en zone alluviale et enfin sur la correction du sens d'écoulement des arcs. Compte tenu de la complexité originelle du réseau hydrographique, et même si quelques opérations de recherche ont pu être automatisées, cette opération a été essentiellement manuelle ; elle constitue la partie la plus longue du traitement. Par la suite, nous évoquerons le drain principal de la BD Carthage® version 3.0 par le terme « DP Carthage » et le drain principal que nous avons sélectionné sera appelé « DP Cemagref ».

Comparaison du DP Carthage et du DP Cemagref

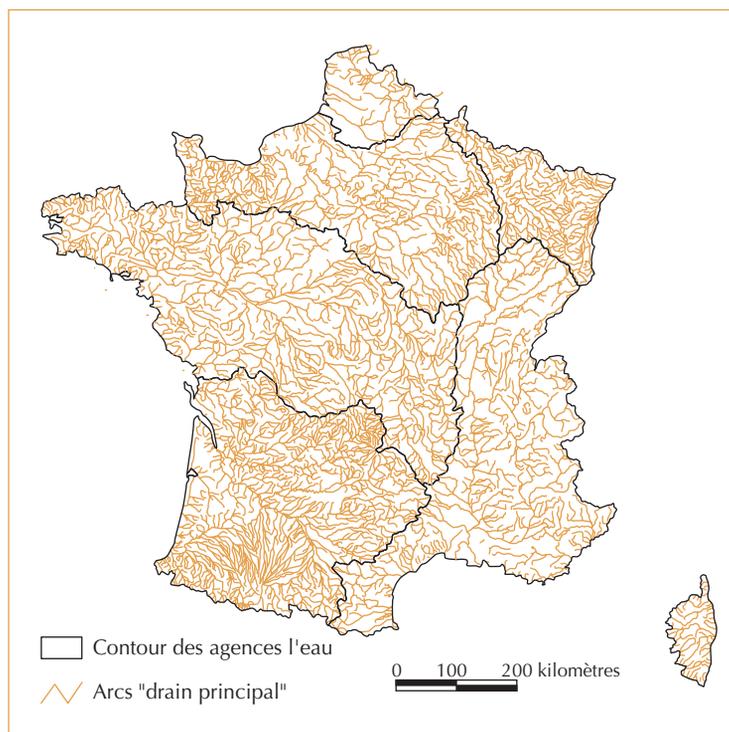
PAR RAPPORT AU LINÉAIRE TOTAL

Étant donné que la méthode mise en œuvre ne prend en compte qu'un seul drain principal par zone hydrographique (sauf cas exceptionnel, principalement pour assurer la continuité amont-aval) et qu'un plus grand nombre de ZH ont un drain (96 % pour le DP Cemagref contre 86 % pour le DP Carthage), la situation s'équilibre ainsi : le linéaire total du DP Cemagref est équivalent au DP Carthage en AG, RM, RMC et SN (tableau 5). La détermination du DP Carthage en Loire-Bretagne n'étant pas correcte, le linéaire proposé par notre méthode est bien plus important.

EN PROPORTION D'ARCS NATURELS

Pour la majorité des agences (96 % en moyenne), la proportion d'arcs codés naturels est plus importante par la méthode « Cemagref » se rapprochant ainsi des objectifs de modélisation de l'écoulement dans le réseau naturel. Le plus faible pourcentage d'arcs naturels en Artois-Picardie est dû à l'existence de nombreuses rivières canalisées.

En conclusion, la définition des drains principaux selon la méthodologie proposée par le Cemagref correspond bien aux objectifs de simplification de la BD Carthage® pour ne conserver qu'un drain par zone hydrographique dans le but de modéliser l'écoulement naturel. Le résultat de cette simplification est encore perfectible ; ainsi, en vallées alluviales, lorsque l'écoulement naturel est complexe sous la forme d'un tressage important, le choix du drain principal reste subjectif.



▲ Figure 4 – Résultat de la vérification des arcs du drain principal sur la base du réseau hydrographique codifié : DP Cemagref.

▼ Tableau 5 – Répartition par agence :

- du DP Carthage cumulé,
- du pourcentage du DP Carthage cumulé par rapport au DP Carthage total,
- du pourcentage du DP Carthage cumulé par rapport au linéaire codifié total,
- du DP Cemagref cumulé,
- du pourcentage du DP Cemagref cumulé par rapport au DP Carthage total,
- du pourcentage du DP Cemagref cumulé par rapport au linéaire codifié total.

	DP Carthage (km)	% DP Carthage	% Linéaire total	DP Cemagref (km)	% DP Cemagref	% Linéaire total
AG	24 380	32,6	6,9	24 327	27,1	6,8
AP	1 587	2,1	0,4	1 919	2,2	0,5
LB	11 319	15,1	3,2	24 005	27,1	6,8
RM	7 067	9,5	2	7 031	8	2
RMC	15 572	20,8	4,4	15 903	18	4,5
SN	14 906	19,9	4,2	15 236	17,2	4,3
Total	74 831	100	21,1	88 421	100	24,9

Sur la figure 4, la densité du réseau de drains apparaît différente d'un bassin à l'autre. Cela est lié aux méthodes de délimitation des zones hydrographiques dont la surface moyenne varie selon les bassins (tableau 3). Néanmoins, le résultat à l'échelle de la France est homogène, il permet donc un traitement hydrologique national.

Le DP Cemagref est une extraction des arcs de la BD Carthage®. Les quelque 94 400 arcs que compte le DP Cemagref peuvent être agrégés ou découpés en fonction d'un objectif. L'agrégation la plus importante est réalisée en ne conservant qu'un seul arc entre deux confluences. Dans ce cas, les 94 400 arcs de départ sont agrégés en 8 500 arcs. L'intégration sur le réseau DP Cemagref de paramètres calculés ou disponibles à partir d'objets surfaciques (commune, ZH, contexte piscicole...) est simplifiée par cette possibilité.

Beaucoup de données étant disponibles à l'échelle de la zone hydrographique, un calage entre cette dernière et le linéaire DP Cemagref s'est révélé indispensable.

À partir du DP Cemagref, une nouvelle couche a été générée par une simplification basée sur le code hydrographique de la BD Carthage®. Ainsi, la couverture obtenue ne compte qu'un seul arc par cours d'eau élémentaire identifié par la codification Carthage®. Cette nouvelle couche croisée avec celle des zones hydrographiques ne comporte plus en règle générale qu'un seul arc par zone hydrographique. Enfin, une topologie a été générée pour corriger les éventuels problèmes de connexion et pour permettre le parcours

du réseau à l'amont et à l'aval. La modélisation de l'écoulement s'appuie complètement sur cette topologie.

À partir du DP Cemagref qui est une extraction des arcs de la BD Carthage®, deux nouvelles couches géographiques ont été créées par agrégation et découpage. La première appelée DP unitaire ne comporte qu'un seul arc entre deux confluences, c'est le niveau d'agrégation maximum. La seconde appelée DP_Zh est issue d'un découpage par les zones hydrographiques. C'est en fonction de l'objectif de modélisation que la couche est choisie.

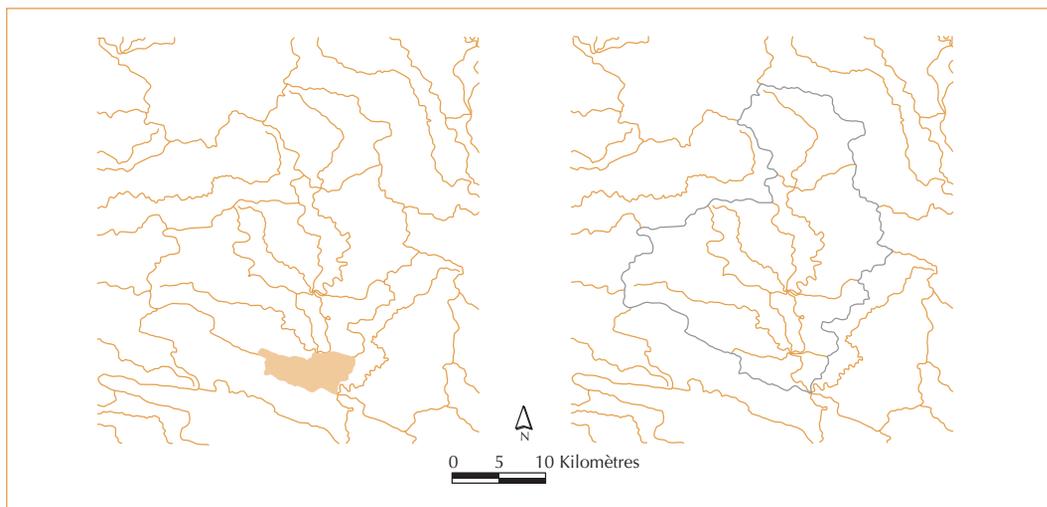
Deux exemples d'utilisation

Les deux exemples présentés ici sont des résultats directs de l'utilisation possible du DP Cemagref.

Calcul des bassins amont des zones hydrographiques

Ce premier exemple utilise les relations amont-aval pour calculer le bassin amont de chacune des zones hydrographiques. Pour chaque zone hydrographique, le traitement consiste à identifier le drain principal correspondant et à remonter le réseau à partir de ce dernier. Une fois que les arcs situés à l'amont sont repérés, une sélection des zones hydrographiques qui croisent les arcs amont est opérée. Le regroupement des zones hydrographiques sélectionnées permet d'obtenir le polygone correspondant au bassin amont de la zone hydrographique considérée (figure 5).

► Figure 5 – Exemple de délimitation du bassin amont (en gris à droite) d'une zone hydrographique (en brun à gauche).



Ce calcul de bassin amont a été réalisé systématiquement pour chacune des zones hydrographiques. La couche résultante a la même structure que la couche des zones hydrographiques. Ainsi, la correspondance entre une ZH et son bassin amont est directe.

Ce type de calcul permet de procéder à l'analyse du contenu du bassin amont. Par exemple, l'étude de la répartition des types d'occupation de sols (disponibles à partir de la base CORINE Land Cover) devient possible à l'amont de toute zone hydrographique, ouvrant ainsi des perspectives d'analyses dans les relations entre états des systèmes aquatiques (station d'échantillonnage biologique).

Une autre application rendue possible par l'utilisation du bassin amont est le calcul automatisé de bassin versant en tout point du territoire (Pella et al., 2004). Ainsi, la caractérisation des pressions anthropiques dans le bassin versant d'un cours d'eau et la mise en évidence des liens avec l'état des milieux aquatiques, préalables indispensables à la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau (établissement de références, atteintes du bon état, mises en relation avec les pressions) sont désormais facilitées avec une approche géographique.

Modélisation hydrologique

Ce deuxième exemple est le résultat du cumul des débits de l'amont vers l'aval pour chacun des arcs du drain principal à partir de données hydrologiques modélisées à l'échelle de la zone hydrographique.

La donnée d'origine est constituée par la lame d'eau annuelle naturelle reconstituée en mm/an pour chacune des zones hydrographiques de la BD Carthage® (Sauquet, 2005). La méthode employée est inspirée du « krigage à dérive externe ». Le travail d'interpolation s'est appuyé sur plus de 900 stations au régime peu influencé, disposant d'au moins 17 ans de données sur la période de référence 1981-2000 (extraites de la banque HYDRO).

L'application a été réalisée sur la base d'un découpage en dix grandes unités hydrographiques sur lesquelles la procédure de régionalisation a été mise en œuvre.

Pour chaque grande unité hydrographique, nous avons tout d'abord calculé le débit généré entre stations de mesure ou par une station lorsqu'elle se situe en tête de bassin, exprimé en hauteur d'eau (mm/an) pour se dégager des

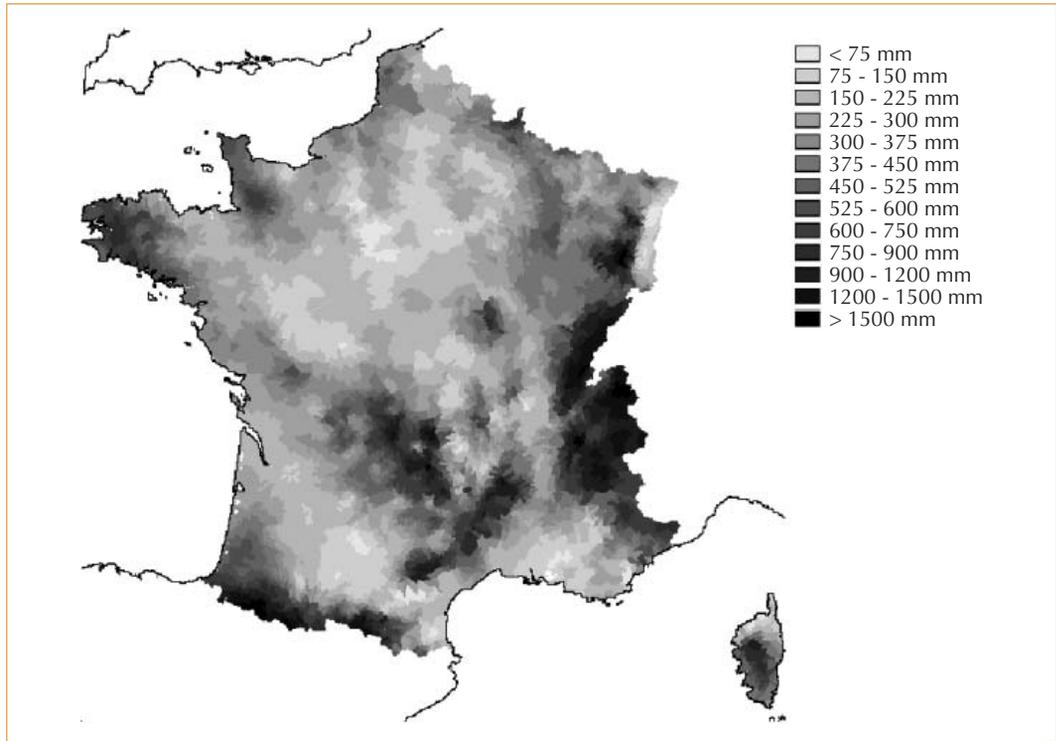
effets d'échelle (Sauquet, 2006). Ceci constitue l'échantillon d'observations *qaobs* sur lesquelles s'appuie le schéma d'interpolation. Un modèle de variogramme a ensuite été ajusté aux données. Il résume les corrélations entre bassins selon la distance qui les sépare. Les lames d'eau estimées sur chaque zone hydrographique sont finalement obtenues par pondération des *qaobs*. Les valeurs des poids sont conditionnées par le variogramme, et donc implicitement par la proximité aux bassins mesurés. Un traitement spécifique a été envisagé pour exploiter, lorsqu'au sein d'une grande unité hydrographique, un lien fort entre altitude moyenne et lame d'eau *qaobs* a pu être identifié.

La répartition spatiale proposée sur la figure 6 semble relativement cohérente avec notre connaissance du domaine. Les zones d'abondance se situent dans les secteurs de haute montagne, par nature les plus arrosés. Les valeurs faibles sont localisées dans la Beauce (influence marquée du souterrain), dans l'Est de la France (plaine alluviale du Rhin soumise à l'effet de fœhn) et dans les plaines du Sud de la France sujettes à une évaporation accrue (climat méditerranéen) et à des prélèvements importants et diffus pour l'irrigation (présence de cultures fortes consommatrices d'eau).

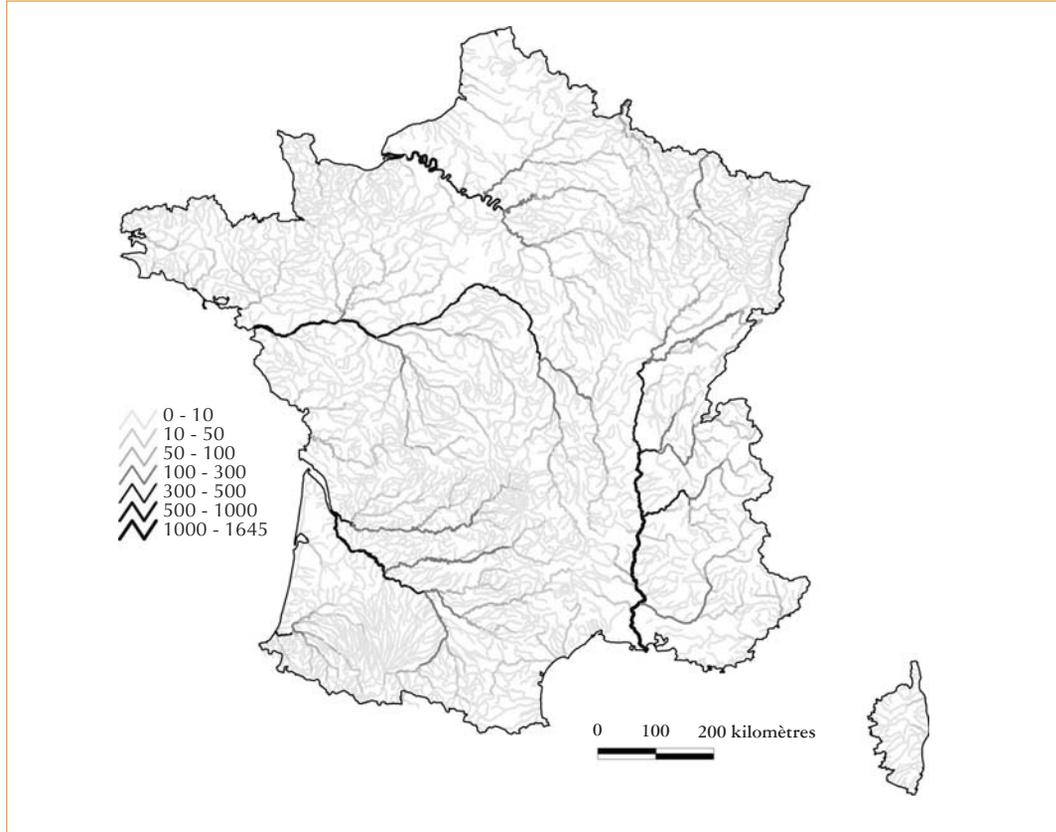
La classe « 150-225 mm » est la plus représentée. Les deux classes de lames d'eau les plus élevées sont marginales et couvrent moins de 1 % du territoire. Globalement, la lame d'eau équivalente pour la France est de 370 mm. Ce chiffre est cohérent avec les 900 mm précipités annuellement et la répartition annuelle entre écoulement de surface et évaporation (respectivement 40 % et 60 % des apports annuels).

L'intégration de ces données disponibles à la zone hydrographique est réalisée à partir de la couche découpée par ces entités (DP_Zh). Étant donné que cette couche ne compte généralement qu'un seul arc par ZH, l'affectation de la lame d'eau annuelle naturelle à l'arc correspondant à la ZH est directe. Une fois cette affectation réalisée, la prise en compte du bassin versant permet de calculer le débit annuel correspondant pour chaque arc. Grâce au lien topologique créé entre les arcs du réseau simplifié, il est possible d'effectuer le calcul automatique des débits en cumulant de l'amont vers l'aval du réseau les débits élémentaires des zones hydrographiques. On peut donc obtenir à large échelle une représentation spatiale des débits moyens annuels (figure 7).

► Figure 6 – Carte des écoulements annuels moyens sur la période 1981-2000.



► Figure 7 – Représentation sur le DP Cemagref des débits moyens annuels en m³/s, d'après les données de Sauquet (2005).



Toute donnée hydrologique élémentaire disponible à l'échelle de la zone hydrographique (écoulements saisonniers, étiages...) est transférable de la même manière sur un réseau hydrographique.

Conclusion

La simplification du réseau hydrographique de la BD Carthage® version 3.0, utilisant le support du thème zones hydrographiques a été effectué par une succession de traitements informatiques, reposant sur la base de choix compatibles avec les objectifs assignés pour la réalisation d'outils de mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau.

La complexité des bases de données décrivant l'existant et l'hétérogénéité de ces données ont rendu nécessaire une intervention « manuelle » en complément des traitements informatiques. Cette vérification manuelle est une opération longue qui entraîne une part de subjectivité dans le choix final du drain principal.

Le résultat obtenu sera amélioré par une densification de ce réseau permettant la prise en compte de cours d'eau de dimensions plus modestes et par la correction de certains tracés. Néanmoins, ce réseau DP Cemagref permet dès à présent d'envisager des applications à large échelle, non

seulement dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'eau, mais aussi dans toute étude prospective pour laquelle il sera nécessaire de modéliser des écoulements et d'en étudier les impacts sur le réseau hydrographique national. Cette démarche pour l'obtention d'un réseau hydrographique simplifié est un préalable à la mise en œuvre de tout type de modélisation. Elle est complètement compatible avec les approches telles que PEGASE³.

Ce réseau simplifié va être utilisé pour l'analyse du contexte physique dans lequel évolue l'anguille sur le bassin versant Garonne-Gironde-Dordogne. Les différents linéaires de cours d'eau sont déclinés selon la distance à la mer, le nombre d'obstacles à franchir depuis la mer, le nombre de confluences ; autant de paramètres dont l'approche automatisée est possible à partir d'un réseau correctement orienté.

Des développements en cours, nécessitant le recours à des données précises (modèle numérique de terrain...) permettront de déterminer les caractéristiques physiques des tronçons de manière à permettre une extrapolation spatiale des modèles d'habitat poisson développés par Lamouroux et Capra (2002) et Lamouroux et Souchon (2002). □

3. Le modèle PEGASE consiste en deux modules de simulation principaux. Un module décrit la réponse du système des rivières, c'est-à-dire des débits en de nombreux points d'intérêt dans le bassin, à des pluies journalières sur tout le bassin de la Seine en amont de Paris. Le ruissellement est généré dans les bassins amont et latéraux et propagé dans les rivières principales du système. L'autre module simule l'exploitation des réservoirs et optimise les lâchés pour atteindre des objectifs en différents points cibles.

Remerciements

Le soutien de la Banque Hydro par la mise à disposition des données hydrologiques a permis la modélisation hydrologique. Nous remercions François-Xavier Prunayre de l'Office international de l'eau ainsi que Laurent Gasnier de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse pour leurs conseils.

Résumé

Pour aider les acteurs de la gestion de l'eau à répondre aux objectifs de « bon état écologique » des cours d'eau requis par la Directive cadre européenne sur l'eau, il est essentiel de modéliser l'écoulement dans le réseau hydrographique. En effet, la classification des cours d'eau nécessite l'analyse de leurs relations amont-aval. La BD Carthage® en l'état ne permet pas cette modélisation. Pour répondre à cet objectif, il nous a fallu élaborer une version simplifiée, qualifiée de « drain principal naturel » à partir de la BD Carthage®.

Abstract

To help public organisations in charge of aquatic management to achieve objectives of "good ecological status" of water bodies required by the European Water Framework Directive (WFD), it is essential to model flow in the hydrographical network. Indeed, the classification of water bodies requires the analysis of upstream-downstream relations. In its present state flow cannot be modelled in the DB Carthage® leading us to simplify the initial data base.

Bibliographie

Convention BD Carthage® version 3.0 n° 8361 signée entre l'IGN et le ministère chargé de l'environnement.

Notice d'utilisation de la BD Carthage® version 3.0.

Sur le site du Sandre : <http://sandre.eaufrance.fr/> en suivant les rubriques « Référentiels de l'eau » et « L'hydrographie : BD Carthage® ».

Information géographique et cours d'eau : la BD Carthage®. Fiche du CNIG n° 81 – 2005.

Sur le site du CNIG : <http://www.cnig.gouv.fr> en suivant les rubriques « Les productions du CNIG » et « Fiches maîtrise d'ouvrages ».

CHANDESRIS, A., WASSON, J.-G., PELLA, H., SAUQUET, E., MENGIN, N., 2006, *Typologie des cours d'eau de France métropolitaine. Appui scientifique à la mise en oeuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau*, rapport Cemagref-MEDD, Lyon. 62 p.

LAMOUREUX, N., CAPRA, H., 2002, Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations, *Freshwater Biology*, 47 (8), p. 1543-1556.

LAMOUREUX, N., SOUCHON, Y., 2002, Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams, *Freshwater Biology*, n° 47, p. 1531-1542.

PELLA, H., CHANDESRIS, A., WASSON, J.-G., 2004, Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de Directive Cadre Européenne sur l'Eau, *Ingénieries-EAT*, n° 40, p. 11-20.

SAUQUET, E., 2005, *Cartographie des écoulements annuels moyens en France*, rapport, Cemagref-MEDD, Lyon, 40 p.

SAUQUET, E., 2006, Mapping mean annual river discharges: geostatistical developments for incorporating river network dependencies, *Journal of Hydrology* (sous presse).

WASSON, J.-G., CHANDESRIS, A., PELLA, H., BLANC, L., 2004, Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par hydro-écorégion, *Ingénieries-EAT*, n° 40, p. 3-10.

WASSON, J.-G., CHANDESRIS, A., PELLA, H., 2002, *Définition des hydro-écorégions de France métropolitaine. Approche régionale de typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés*, rapport Cemagref Lyon BEA/LHQ et MATE/DE, 190 p.