

Réseau hydrographique naturel étendu (RHE) construit à partir de la BD Carthage®

Hervé Pella^a, Ton Snelder^a, Nicolas Lamouroux^a, Arnaud Vanderbecq^a, Ude Shankar^b et Crane Rogers^c

Pour répondre aux exigences de la directive cadre sur l'eau et engager une restauration physique raisonnée des milieux aquatiques, les gestionnaires ont besoin d'outils de plus en plus complets, notamment pour l'analyse des caractéristiques hydro-morphologiques des cours d'eau. Comme nous le rappellent les auteurs de cet article, la construction du premier réseau hydrographique national simplifié a permis la modélisation de l'écoulement naturel, la mise en place de différentes typologies de cours d'eau et l'application de modèles écologiques à l'échelle nationale. Ils nous présentent ici le développement et les applications possibles d'un réseau hydrographique étendu plus complet permettant de mieux représenter les cours d'eau de petite taille.

Le présent article fait suite aux travaux présentés en 2006 portant sur la construction d'un réseau hydrographique simplifié à partir de la BD Carthage®¹ (Pella *et al.*, 2006). L'objectif initial de la construction d'un tel réseau était de servir de support pour la mise au point de la typologie requise pour l'application de la DCEE², notamment pour intégrer l'influence du bassin amont. Cette intégration de l'influence amont impose de pouvoir parcourir le réseau. Cela suppose d'avoir un réseau dans lequel les arcs représentant les cours d'eau soient parfaitement jointifs entre eux et bien orientés de l'amont vers l'aval.

Les techniques de parcours de réseau nous permettent alors de déterminer les arcs situés à l'amont ou à l'aval d'un point sur le réseau. On peut aussi calculer la distance totale jusqu'à la mer ou à la prochaine confluence.

La base de données française Carthage® qui regroupe les entités ayant trait à l'hydrographie, ne constitue pas en l'état un réseau dans lequel l'écoulement de l'eau peut être modélisé. Cela est principalement dû à des défauts de connexion des arcs entre eux mais aussi à des problèmes de sens d'écoulement. De plus, 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 représentent une difficulté supplémentaire pour la modélisation de l'écoulement.

La construction du réseau hydrographique simplifié (drain principal naturel) à partir de la BD Carthage® a constitué un premier réseau orienté à l'échelle nationale permettant de modéliser l'écoulement. Ce réseau représente environ 92 800 km de cours d'eau, soit un peu moins du cinquième de la totalité de la BD Carthage® (513 000 km). Il est utilisé par plusieurs projets de recherche dans le domaine de l'eau.

Le drain principal naturel (DP) n'est pas suffisamment dense pour avoir une bonne représentation des cours d'eau français. En effet, il comprend principalement des cours d'eau de moyenne à grande taille au détriment des cours d'eau de tête de bassin. Ce problème de représentativité nous a conduits à développer un réseau hydrographique étendu (RHE) qui prolonge le DP aux cours d'eau de moindre taille. Comme pour la construction du DP, nous nous sommes efforcés de considérer en priorité les arcs naturels de la BD Carthage®.

Un tel réseau permet de répondre à des objectifs d'analyse et de gestion de cours d'eau. Les écosystèmes aquatiques continentaux sont conditionnés par une série de variables environnementales agissant à différentes échelles spatiales emboîtées (Poff, 1997 ; Richard *et al.*, 1997). L'estimation des conditions environnementales et de leurs variations dans un tronçon de cours d'eau donné nécessite donc de pouvoir décrire les caractéristiques de ce tronçon ainsi que les propriétés des bassins versants amont ou aval. Le développement des systèmes d'information géographique

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

2. Directive cadre européenne sur l'eau.

Les contacts

a. Cemagref, UR BELY, Biologie des écosystèmes aquatiques, 3 bis quai Chauveau, CP 220, 69366 Lyon Cedex 09

b. NIWA, National Institute of Water and Atmospheric Research, Christchurch, 10 Kyle Street, Riccarton, Christchurch City, Canterbury 8011, Nouvelle Zélande

c. Onema, Office national de l'eau et des milieux aquatiques, Délégation régionale Rhône-Alpes, Parc de Parilly, Chemin des chasseurs, 69500 Bron

(SIG) appliqué aux cours d'eau a permis de mettre en relation les variables environnementales avec le tracé des cours d'eau (Snelder et Biggs, 2002). En particulier, la nécessité de prendre en compte l'influence de l'amont a conduit progressivement au développement d'outils et de méthodes appliqués à cette problématique. L'analyse de l'occupation du sol dans le bassin versant d'un tronçon de cours d'eau, l'influence de la distance à la source ou à la mer pour la modélisation des peuplements piscicoles en place ou encore la modélisation de l'écoulement (cumul des débits spécifiques) le long du réseau en sont quelques exemples (Oberdorff *et al.*, 2002a, 2002b).

Après une présentation des principales utilisations du DP, nous évoquerons le traitement et l'analyse des informations géographiques pour la réalisation du RHE. Des exemples d'utilisation du RHE puis l'évaluation de ces caractéristiques seront finalement présentés.

Exemples d'utilisation du réseau de drain principal

Le réseau DP rend possible la modélisation de l'écoulement et donc le parcours du réseau à l'amont et à l'aval. Il permet de répondre à diverses questions comme par exemple :

- quelle longueur cumulée de cours d'eau se trouve à l'amont d'un point sur le réseau ?
- quelle est la distance entre un point sur le réseau et l'exutoire final ?

- quelle est la distance entre deux confluences ?
- quel est le bassin versant d'un arc ?

L'analyse spatiale de réseau nous a permis de calculer un ensemble de variables sur le réseau à l'échelle de la France.

Caractéristiques des bassins et typologies de réseau

Différentes variables environnementales, dont les débits moyens mensuels (Sauquet, 2005, 2006), ont pu être calculées sur l'ensemble du DP (Pella *et al.*, 2006, disponible sur simple demande) afin de décrire les caractéristiques héritées par chaque tronçon de cours d'eau. La simplification la plus importante du DP est réalisée en ne conservant qu'un seul arc entre deux confluences. Les segments ainsi obtenus font en moyenne douze kilomètres de long. Chaque segment est associé à une zone hydrographique et un bassin versant amont (calculé par agrégation des zones hydrographiques amont).

Plusieurs variables environnementales ont été associées au DP (tableau 1) et utilisées pour construire des typologies du réseau national. Ces variables reflètent généralement les caractéristiques des bassins versants amont puis sont rapportées au segment correspondant par simple affectation.

Les données continues comme les variables climatiques se présentent sous la forme d'une grille. Pour chaque segment, nous avons calculé la médiane des cellules de la grille qui se trouvent dans le bassin versant (pondération surfacique).

► Tableau 1 – Description des variables calculées sur le DP.

Description des variables	Maximum	Minimum	Médiane
Climatique			
Température minimale moyenne de l'air en janvier (°C)	8	- 12	- 0,4
Température maximale moyenne de l'air en juillet (°C)	31	13	24
Pluviométrie moyenne annuelle (mm)	2 173	553	942
Topographique			
Superficie du bassin versant (km ²)	118 000	1	273
Pente moyenne du bassin versant (%)	61	0.1	4,5
Densité de drainage du bassin versant (km/km ²)	57	0	1
Altitude moyenne du bassin versant (m)	2 691	2	274
Hydrologique			
Module (m ³ /s)	1 902	0	3

Ainsi, chacun des segments peut être caractérisé par des variables comme la température moyenne minimale de janvier, la température moyenne maximale de juillet ou la pluviométrie annuelle (basées sur des valeurs interannuelles).

À partir des données topographiques deux variables ont été évaluées. La pente a été estimée sur une grille régulière depuis le modèle numérique de terrain au pas de 50 m de l'IGN³ (BD Alti[®]) en utilisant les fonctions standards d'ArcGis⁴. Nous avons également calculé la densité de drainage sur une grille en évaluant, pour chaque cellule de 2,5 km de côté, la longueur des arcs qui s'y trouvent. À partir de ces deux nouvelles grilles de données, et de la même manière que pour les données météorologiques, nous avons calculé pour chaque segment la médiane des cellules. Au final, pour chaque segment du drain principal, un ensemble de variables a été calculé sur le bassin versant correspondant à chaque tronçon.

La typologie des cours d'eau peut-être envisagée de plusieurs manières. Il est possible d'utiliser un cadre géographique fixe tel que des régions définies préalablement. Dans ce cas, les cours d'eau d'une même région ont le même type général. La typologie de réseau (figure 1) a l'avantage de pouvoir s'ajuster aux objectifs définis par le choix des variables prises en compte. Dans ce cas, les

cours d'eau sont regroupés par une analyse de variables environnementales.

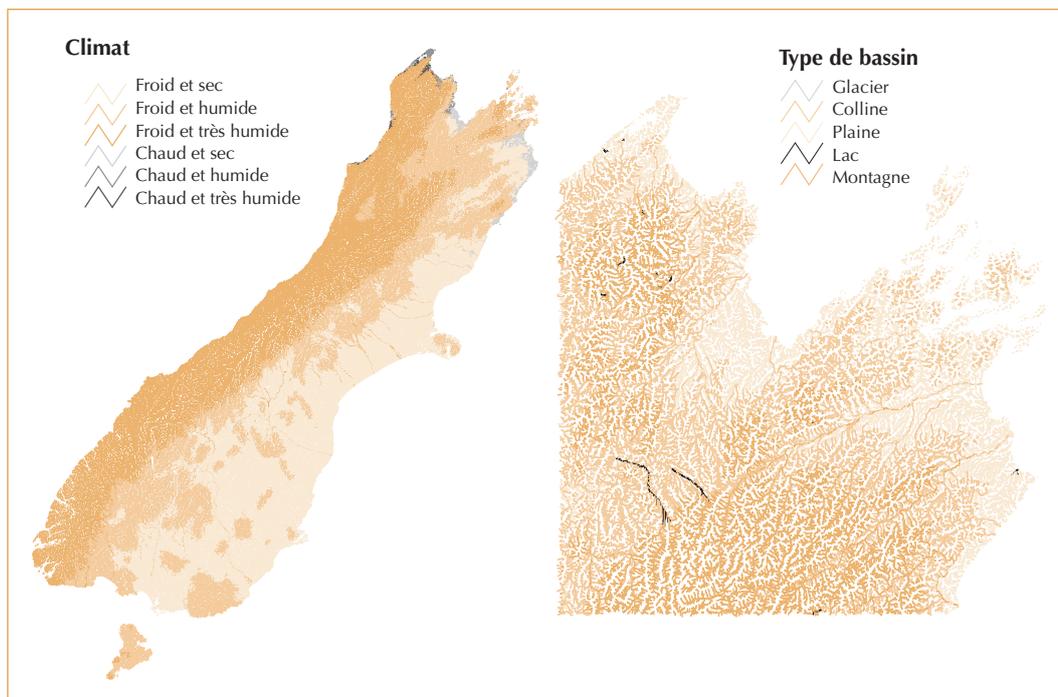
Une première typologie multivariée générale des cours d'eau français a été réalisée à partir de ces données (Snelder *et al.*, 2008), à l'image des travaux de Snelder *et al.* (2002, 2004, 2005), en lien avec le NIWA⁵, le ministère chargé de l'environnement et les agences de l'eau de Nouvelle-Zélande. La typologie néo-zélandaise nommée *River Environment Classification* (REC) a pour vocation de permettre l'inventaire des ressources et la gestion des cours d'eau. Elle doit également offrir un cadre pour l'évaluation des études d'impacts, pour la définition des plans de gestion, pour le développement des programmes de suivi ainsi que pour l'interprétation des données de terrain. Le REC a été utilisé pour classer toutes les rivières de Nouvelle Zélande au 150 000^e. Le linéaire total de cours d'eau ainsi classé est de 426 000 km pour une superficie de 267 000 km².

La typologie française (Snelder *et al.*, 2008), comme le REC, est basée sur une analyse de type « réseau » des variables environnementales citées ci-avant. Le support géographique utilisé pour cette classification multivariée est le DP. Par rapport à une typologie fixe de type « écorégions » (Wasson *et al.*, 2002), la typologie de réseau (figure 1) a l'avantage de pouvoir s'ajuster aux objectifs choisis

3. Institut géographique national.

4. Ensemble de logiciels de système d'information géographique.

5. *National Institute of Water and Atmospheric Research.*



◀ Figure 1 – Cartographie du REC en classifications successives basée sur (a) le climat, et (b) le type de bassin versant à la source (Snelder *et al.*, 2002).

6. En écologie, une guilda est un ensemble d'espèces appartenant à un même groupe taxonomique ou fonctionnel qui exploite une ressource commune.

par le choix des variables prises en compte. Elle a également l'avantage de limiter les choix subjectifs. À l'échelle de la France, le pouvoir explicatif d'une typologie par écorégions (Wasson *et al.*, 2002) ou d'une typologie de réseau générale basée sur les mêmes variables sont néanmoins comparables, qu'il s'agisse d'expliquer des structures spatiales de données de qualité d'eau, hydrologiques ou biologiques (Snelder *et al.*, 2008). Ceci est probablement lié à la force des structures spatiales observées, une grille carrée régulière ayant également un pouvoir explicatif comparable (Snelder *et al.*, 2008). En Nouvelle Zélande en revanche, la typologie de réseau s'avère plus performante (Snelder *et al.*, 2004, 2005).

Variables d'entrée de modèles écologiques

La généralisation des variables environnementales à l'échelle du réseau contribue à décrire les caractéristiques environnementales des réseaux de suivi nationaux. Cela permet également la mise à disposition des variables d'entrée de différents modèles écologiques. Ainsi ont pu être appliqués sur le DP des modèles de présence/absence des espèces de poissons à l'échelle nationale (Oberdorff *et al.*, 2001), qui sont également les modèles de base de l'« indice poisson rivière » actuel (Oberdorff *et al.*, 2002a, 2002b). Ces modèles estiment la probabilité de présence théorique de chaque espèce de poissons en tout point du réseau et en l'absence de perturbation. Les modèles théoriques de peuplement de poissons en place requièrent entre autres variables d'entrées l'altitude moyenne, la température moyenne de janvier et de juillet sur le bassin versant du segment mais aussi la distance à la source et enfin la région à laquelle appartient le segment.

De façon complémentaire, les variables dérivées sur le DP ont pu servir de variables d'entrée aux modèles de géométrie hydraulique (Leopold et Maddock, 1953) et aux modèles d'habitat généralisés (Lamouroux et Capra, 2002 ; Lamouroux et Souchon, 2002). Les modèles de géométrie hydraulique sont des modèles très généraux (Park, 1977 ; Lamouroux *et al.*, 2008a) qui estiment les lois largeur-débit et hauteur-débit pour les tronçons du réseau. Ils traduisent ainsi l'information hydrologique (Sauquet, 2006) en information hydraulique, plus pertinente pour décrire l'habitat physique des espèces aquatiques. La pente des tronçons, les débits et les surfaces de bassins versants sont les variables d'entrée principales

de ces modèles. Les modèles d'habitat généralisés proviennent de l'analyse de sensibilité des modèles d'habitat classiques (couplages de modèles hydrauliques et de modèles de préférence biologiques). Ils permettent d'estimer des valeurs de débit caractéristiques (limitantes, optimum...) pour l'habitat hydraulique de différentes espèces ou guildes⁶ de poissons et d'invertébrés, sachant la géométrie hydraulique des cours d'eau. Ces débits sont comparés aux débits actuels observés.

Ces différents types de modèles sont en cours de couplage sur une plate-forme de modèles (Lamouroux *et al.*, 2008b) dans le but d'aider à la définition des plans de gestion des cours d'eau à l'échelle nationale (figure 2). Les incertitudes associées à une estimation sur un arc, non présentées ici, sont très fortes (supérieures à 100 % dans bien des cas) ; c'est plutôt à une échelle agrégée de sous-bassin que la plate-forme permet d'identifier des types de cours d'eau de sensibilités différentes en ce qui concerne la modification des débits. Par-delà la généralisation des modèles d'habitat, ce projet vise à explorer le potentiel d'une plate-forme de données et modèles écologiques modulaires, connectés sur SIG, sur la base du DP sur lequel ont été calculées les variables d'entrée.

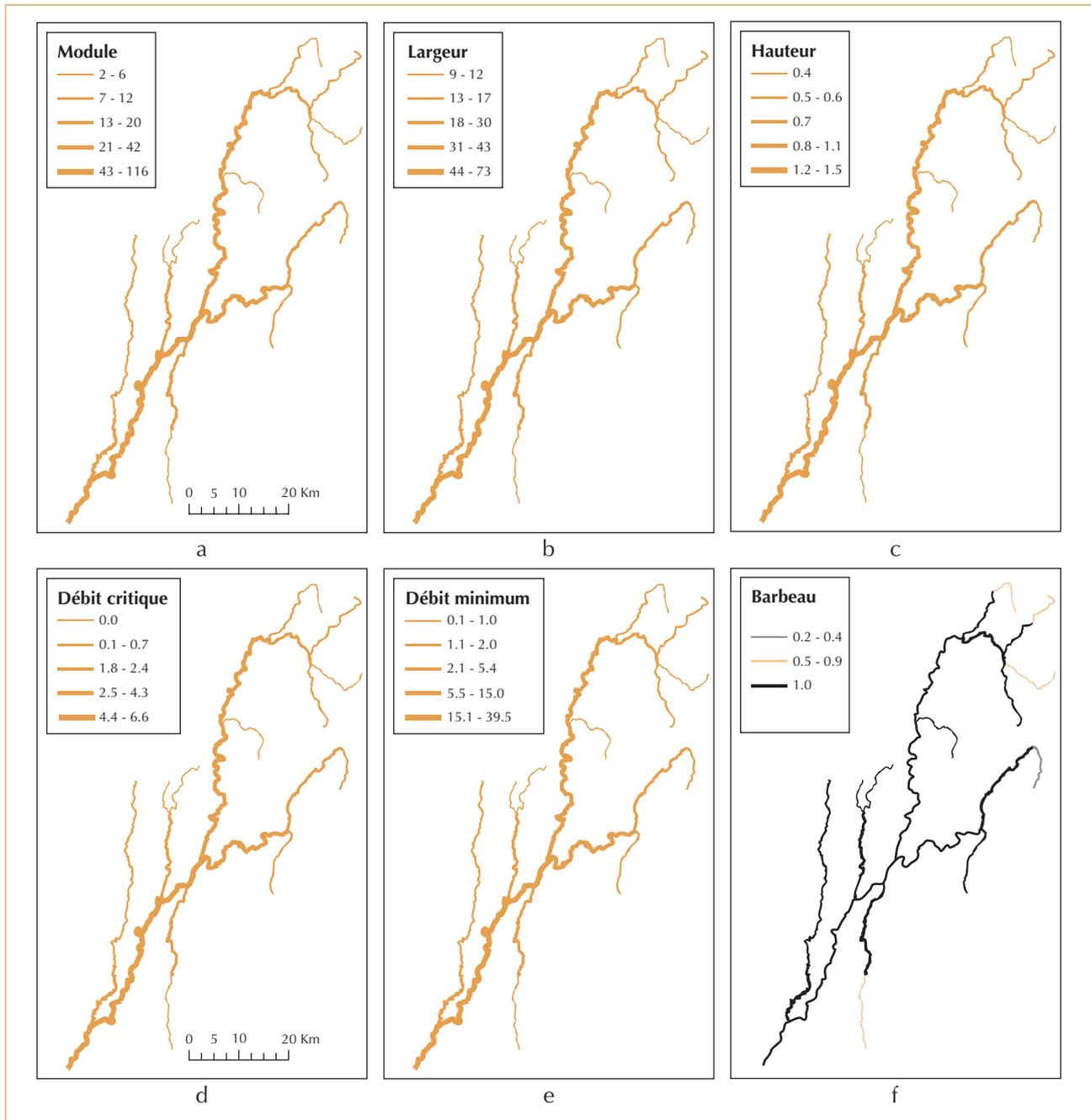
Le réseau hydrographique naturel étendu (RHE)

Le travail d'extension du réseau a été initié en considérant le DP comme l'axe de référence du futur réseau. La méthode a consisté à sélectionner les arcs de la base des cours d'eau de Carthage[®] qui se connectent directement au DP. L'objectif final était d'obtenir un réseau hydrographique plus dense, dont les arcs sont parfaitement jointifs, bien orientés de l'amont vers l'aval et les plus naturels (dans la classification Carthage[®]).

La création de ce réseau densifié doit rendre possible la modélisation de l'écoulement et donc le parcours du réseau amont-aval. De la même manière que pour la construction du DP, 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

L'analyse spatiale nécessaire pour la détermination de ce réseau densifié a été réalisée sous ArcGis[®]. Les deux couches d'informations géographiques utilisées pour ce traitement sont issues de



▲ Figure 2 – Exemple d'estimation (a) du module, (b) de la hauteur, (c) de la largeur, (d) du débit critique pour les espèces eaux courantes, (e) du débit mensuel minimum et (f) de la probabilité de présence du barbeau, sur la basse rivière d'Ain, consultés sur la plate-forme de modèles « Estimkart » (Lamouroux *et al.*, 2008b). L'unité en (a), (d) et (e) est le m^3/s . La hauteur (b) et largeur (c) sont exprimées en mètres.

la BD Carthage® version 3. Il s'agit d'une part des arcs du DP, et d'autre part des arcs du réseau de la BD Carthage® sans les arcs correspondants au DP. À partir de cette dernière couche, la première

étape consiste à généraliser l'appartenance des arcs à un cours d'eau. Pour cela, nous utilisons l'attribut « Cgenelin » qui est le code générique du cours d'eau passant par le tronçon élémentaire.

Le groupement des tronçons élémentaires par cet attribut permet de considérer des arcs représentant des cours d'eau dans leur entier plutôt que des arcs ne représentant que des tronçons de cours d'eau. L'étape suivante consiste à sélectionner les cours d'eau qui sont connectés au DP.

Le résultat de la sélection (figure 3) comprend 216 153 arcs, ce qui représente un linéaire total de 221 620 km.

Sur la figure 3, la densité du réseau apparaît différente d'un bassin à l'autre. Cela est principalement lié aux méthodes de délimitation des zones hydrographiques dont la surface moyenne varie selon les bassins. Cette variation de densité était déjà importante pour la construction du DP. Comme le réseau densifié est basé sur le DP, ce déséquilibre perdure pour le RHE. On note également un déséquilibre entre l'agence Loire-Bretagne et les autres agences. Cela tient au fait

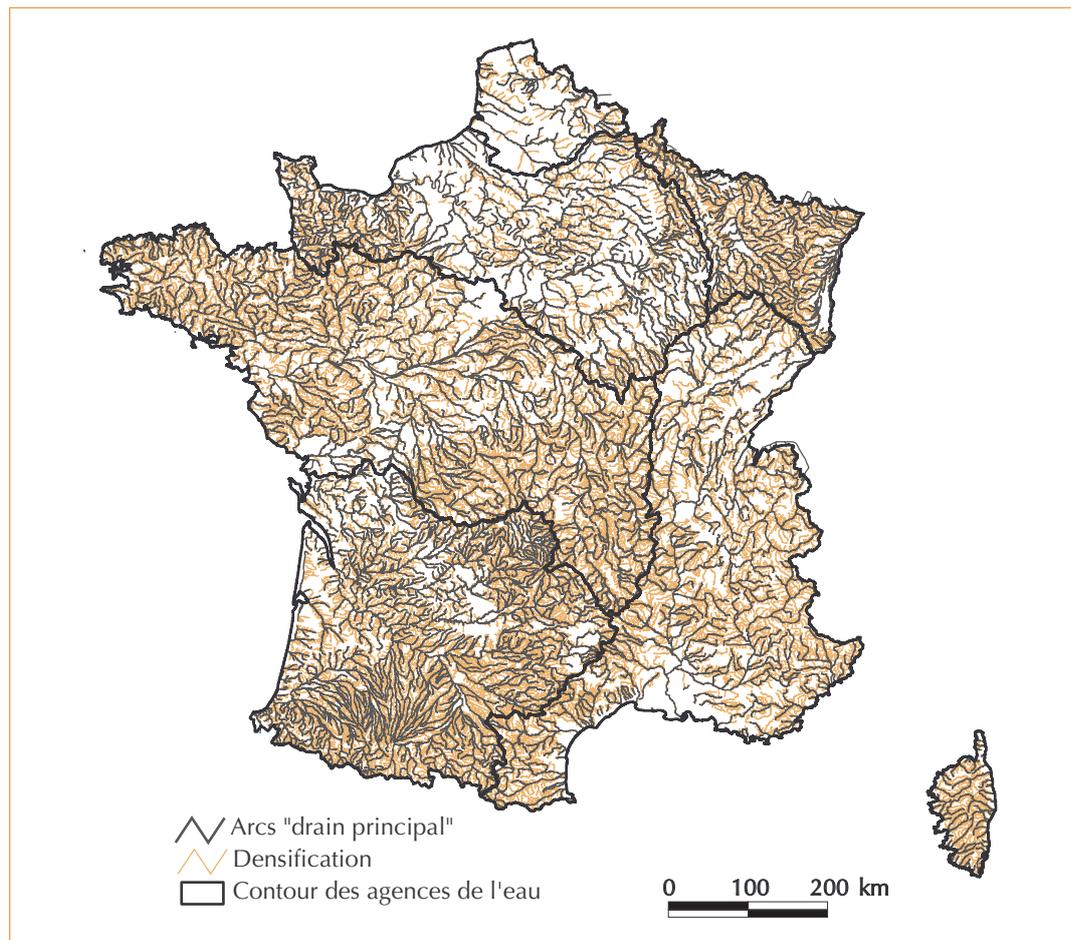
que Loire-Bretagne est la seule agence qui ait codé l'ensemble des arcs de la BD Carthage®. Comme la densification est basée sur la partie des arcs codés de la BD Carthage®, en Loire-Bretagne, la sélection est de fait plus importante.

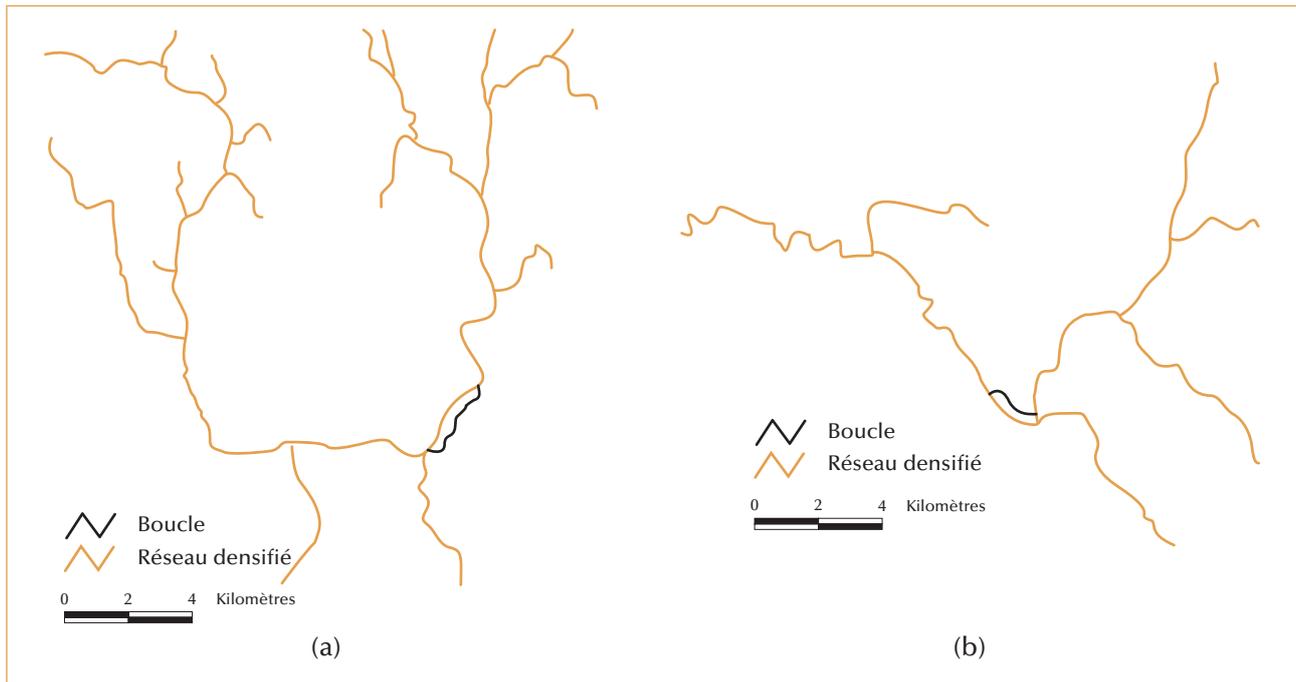
Corrections des boucles

Le traitement automatique aboutit à une sélection des arcs qui se connectent au DP. Alors que la majorité des arcs de cette sélection sont connectés par le point aval de l'arc, une partie des arcs présente deux points communs. Dans ce cas, l'écoulement ne peut se faire qu'en choisissant un des axes au détriment de l'autre. Ces arcs peuvent correspondre à des bras multiples en zone alluviale, à des bras morts (ou lônes) ou à des dérivations (figure 4).

Une vérification du RHE a donc été faite. Elle a porté sur la recherche et la résolution des boucles.

► Figure 3 –
Résultat de la
sélection des arcs
de la BD Carthage®
connectés au DP.





Ce traitement a été automatisé grâce à une routine développée en Avenue (langage de programmation de l'outil de traitement ArcView⁷). L'algorithme consiste à parcourir le réseau d'amont en aval jusqu'à ce qu'une boucle soit détectée (cheminement aval impossible) à partir de chaque tête de réseau. Le positionnement de la boucle est repéré. Le choix d'un des arcs est alors proposé pour gérer ce problème. Une fois la correction achevée, le réseau densifié ne comprend plus que 215 650 arcs ce qui représente un linéaire total de 221 077 km.

Attributs environnementaux du RHE : deux exemples

Les deux exemples présentés sont des résultats directs de l'utilisation possible du RHE. De la même manière que pour le DP, le RHE est une extraction des arcs de la BD Carthage®. Les 215 650 arcs que compte le RHE 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 215 650 arcs de départ sont agrégés en 65 740 arcs. La longueur moyenne des arcs est alors de trois kilomètres.

Pour la modélisation de l'écoulement ou pour tout parcours de réseau amont-aval, le fait de

travailler avec un nombre d'arcs restreint permet de diminuer sensiblement le temps de calcul. Les exemples d'utilisation présentés ci-après sont basés sur le réseau agrégé

Calcul des pentes

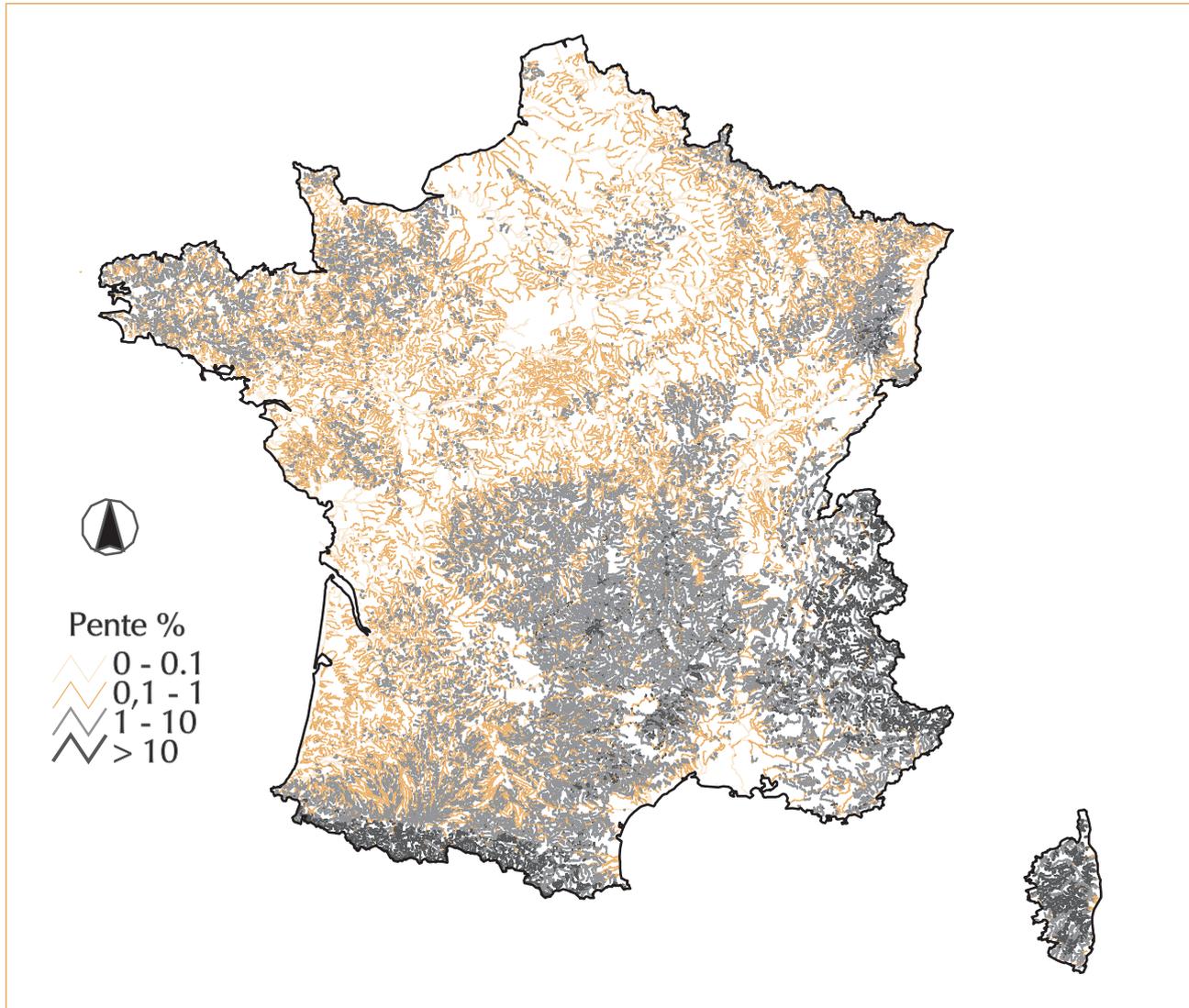
Le premier exemple d'utilisation du RHE est le calcul de la pente des arcs. Cette pente de l'arc correspond en fait à la pente du fond de vallée. La modélisation de l'écoulement impose que tous les arcs du RHE soient correctement jointifs entre eux et qu'ils soient bien orientés. L'orientation des arcs correspond donc au sens d'écoulement de l'amont vers l'aval. Le calcul consiste pour chacun des arcs à analyser les altitudes le long de son tracé. Pour cela, les arcs sont segmentés en lignes élémentaires d'amont en aval. À partir du modèle numérique de terrain au pas de 50 m (BD Alti®), on détermine l'altitude amont et aval. On ne retient alors que les points pour lesquels les altitudes diminuent. Au final, une pente du fond de vallée pour chacun des arcs est calculée par le rapport des différences d'altitude avec la longueur de l'arc (figure 5).

Calcul des distances à la source

La topologie de réseau portée par le réseau est utilisée pour le parcours amont-aval. Pour le calcul des distances à la source, le réseau est

▲ Figure 4 – Exemples de boucles détectées sur le réseau densifié correspondant (a) à une île sur le Rhône et (b) à une dérivation sur l'Albarine.

7. ArcView est un logiciel SIG (système d'information géographique) complet permettant de visualiser, de gérer, de créer et d'analyser des données géographiques.



▲ Figure 5 – Cartographie des pentes calculées sur le RHE à partir du modèle numérique de terrain.

parcouru depuis chacune des têtes de réseau jusqu'à l'exutoire. Un ensemble de distances aux têtes de réseau est ainsi associé à chaque arc, la distance maximale est alors considérée comme une estimation de la distance à la source (figure 6). Ce processus itératif est basé sur la topologie de réseau et sur la longueur des arcs.

Représentativité du RHE

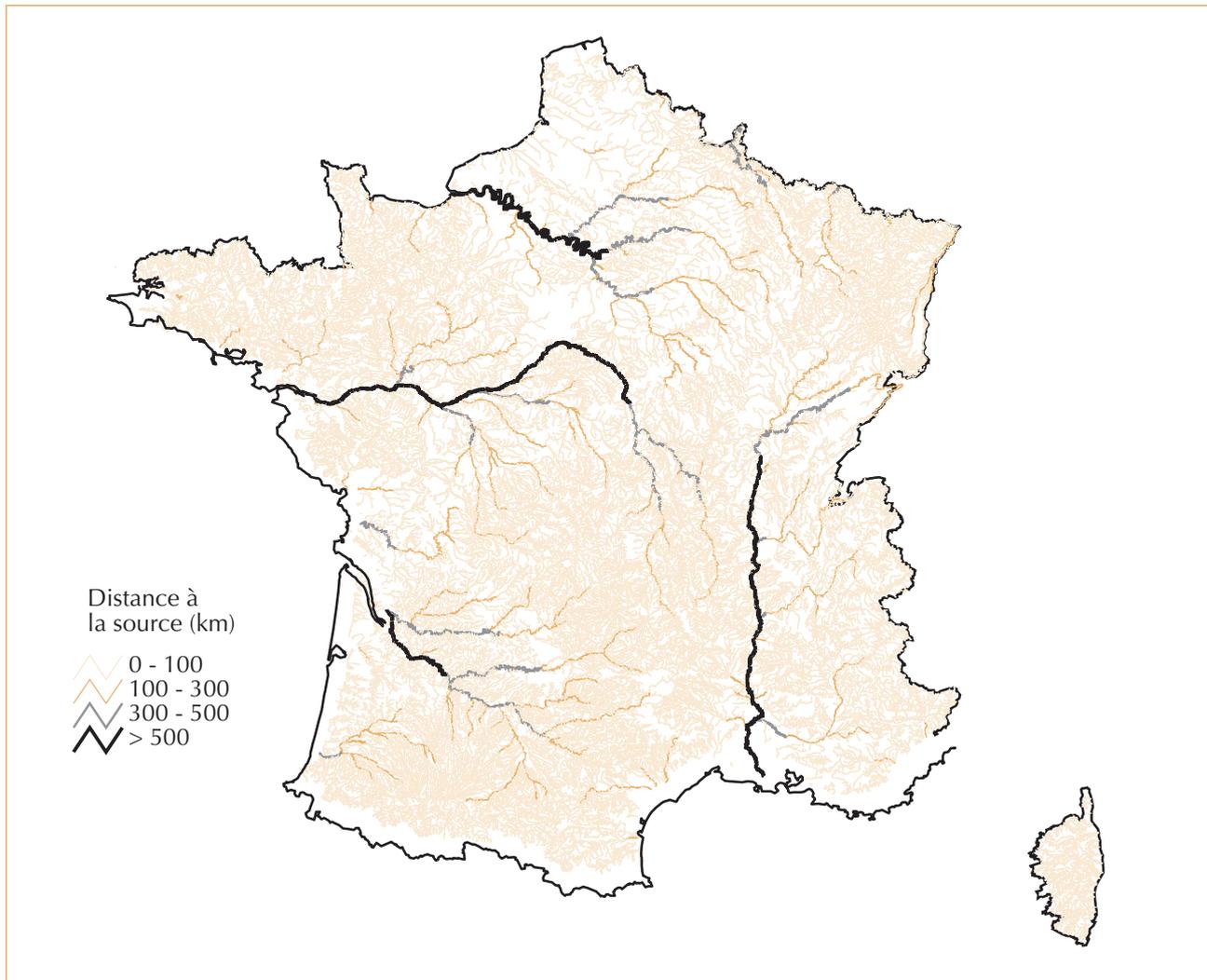
Les analyses suivantes ont pour but de comparer la représentativité du RHE par rapport à la BD Carthage® codée et de voir en quoi le RHE permet de corriger les faiblesses du DP.

Par rapport au linéaire total

La comparaison du linéaire total pris en compte par le RHE et le DP montre une augmentation importante dans tous les bassins des différentes agences de l'eau (tableau 2). Au total, le linéaire cumulé du réseau densifié représente 62 % du linéaire codé de la BD Carthage®.

En proportion d'arcs naturels

Pour la plupart des agences, la proportion d'arcs codés naturels est aussi importante sur le RHE que sur le DP (tableau 3). L'objectif de modéliser l'écoulement sur un réseau naturel est donc respecté. Le plus faible pourcentage d'arcs naturels DP en Artois-Picardie, vraisemblablement dû à



▲ Figure 6 – Cartographie des distances à la source calculées sur le réseau densifié.

▼ Tableau 2 – Longueur, proportion associée à chaque territoire des agences de l'eau (% agence) et proportion du linéaire total de la BD Carthage® pris en compte par les réseaux DP et RHE.

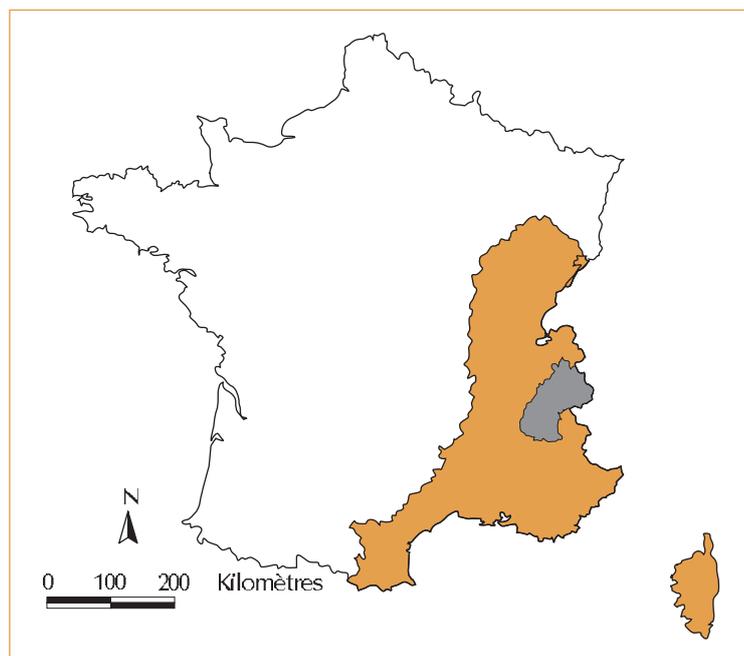
Agence	Longueur DP (km)	% agence DP	% total DP	Longueur RHE (km)	% agence RHE	% total RHE
Adour-Garonne	24 366	26,2	6,9	56 971	25,8	16
Artois-Picardie	2 672	2,9	0,8	3 326	1,5	0,9
Loire-Bretagne	27 000	29,1	7,6	69 249	31,3	19,5
Rhin-Meuse	7 391	8	2,1	15 390	7	4,3
Rhône, Méditerranée et Corse	16 095	17,3	4,5	49 118	22,2	13,8
Seine-Normandie	15 314	16,5	4,3	27 023	12,2	7,6
Total	92 838	100	26,1	221 077	100	62,3

▼ Tableau 3 – Pourcentage du linéaire des réseaux DP et RHE correspondant à des cours d’eaux naturels, par agence de l’eau.

Agence	DP	RHE
Adour-Garonne	97,8	97,9
Artois-Picardie	69,3	85,6
Loire-Bretagne	94,5	97,8
Rhin-Meuse	96,9	97,7
Rhône, Méditerranée et Corse	98,3	99,1
Seine-Normandie	97,3	97,0

▼ Tableau 4 – Pourcentage du linéaire de la BD Carthage®, du DP et du RHE par ordre de Strahler.

Ordre	Carthage codé	DP	RHE
1	52,8	10,1	42,0
2	18,9	13,3	22,3
3	10,9	18,6	15,4
4	5,9	16,1	8,9
5	3,4	10,6	5,1
6	1,6	4,8	2,5
7	0,5	1,4	0,7
8	0,4	0,8	0,5



▲ Figure 7 – Cadre géographique d’analyse : France entière, agence Rhône Méditerranée et Corse (en brun) et territoire SDAGE Isère amont (en gris).

l’existence de nombreuses rivières canalisées, se trouve augmenté en considérant un réseau plus dense.

En proportion d’arcs classés par ordre de Strahler

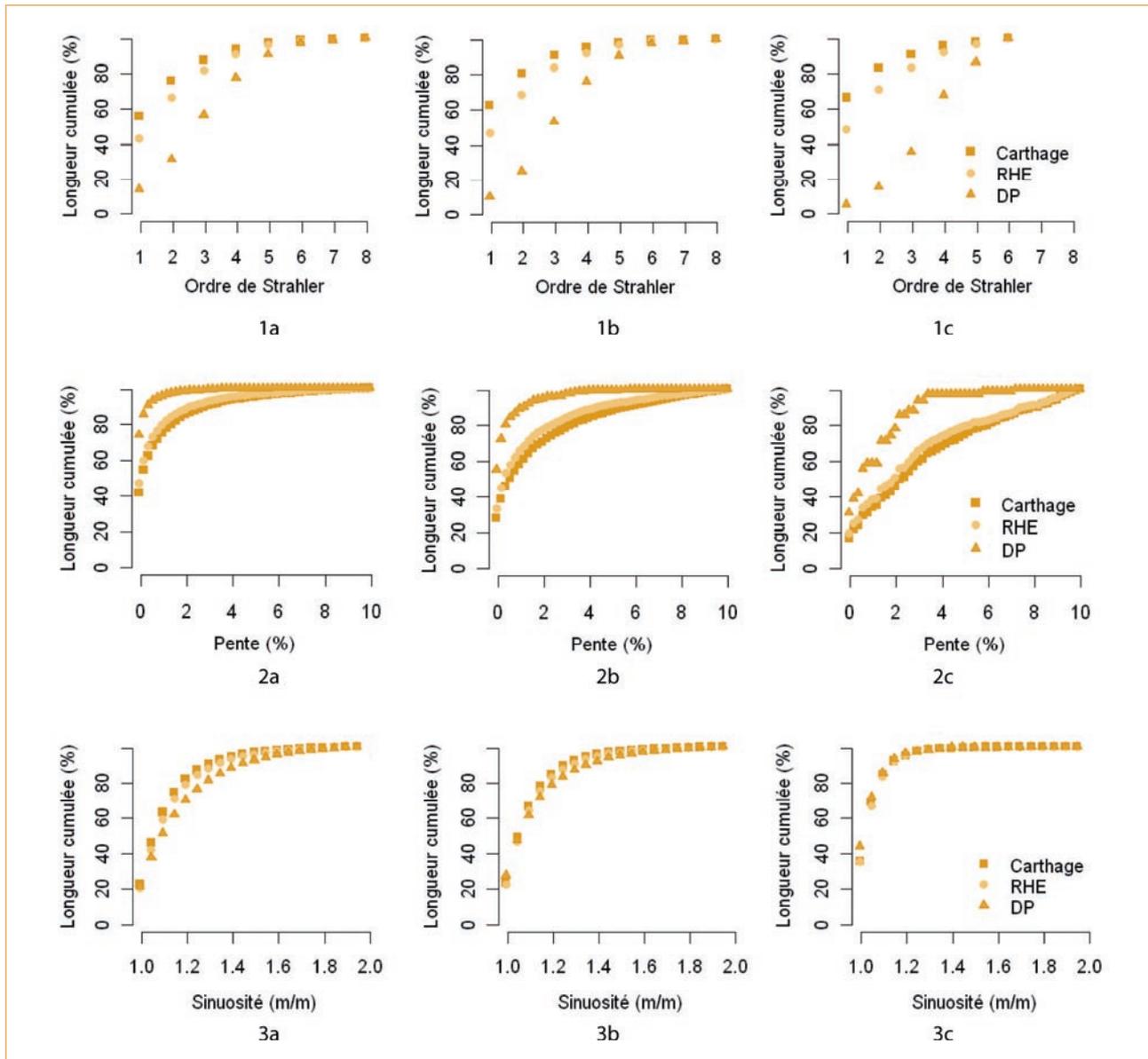
L’ordre de Strahler sur lequel nous avons basé notre comparaison a été déterminé par les agences de l’eau sur les cours d’eau codés de la BD Carthage® (tableau 4). La classification de Strahler est une méthode de détermination du rang d’un cours d’eau qui est simple à mettre en œuvre. Dans cette méthode, 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 répartition des arcs par ordre de Strahler comparée entre la BD Carthage® codée et le DP montre la faiblesse de ce dernier par rapport à la représentativité des ordres de têtes de bassin. La répartition des arcs d’ordre 1 est effectivement très éloignée de celle de la BD Carthage® codée. Par contre, la considération du RHE permet d’améliorer de manière importante ce déséquilibre.

Analyse à plusieurs échelles

L’analyse des caractéristiques physiques des cours d’eau est faite à plusieurs échelles (figure 7). La première échelle d’analyse est l’échelle nationale qui consiste à considérer l’ensemble des cours d’eau (superficie : 549 000 km²). La seconde permet de comparer les cours d’eau à l’échelle d’une agence de l’eau, en l’occurrence l’agence Rhône Méditerranée et Corse (superficie : 130 700 km²). La troisième échelle est plus proche de celle du gestionnaire puisqu’elle correspond à celle d’un territoire de SDAGE⁸. Le SDAGE fixe pour chaque bassin hydrographique métropolitain les orientations fondamentales d’une gestion équilibrée de la ressource en eau dans l’intérêt général et dans le respect des principes de la loi sur l’eau. Les collectivités, les départements, les régions, l’État et ses établissements publics doivent tenir compte de la référence que constitue le SDAGE pour aménager leur territoire ou imaginer de grands travaux. Le territoire SDAGE considéré pour l’analyse est celui de l’Isère amont (superficie : 9 500 km²).

8. Schéma directeur d’aménagement et de gestion des eaux.



▲ Figure 8 – Répartition cumulée (pourcentage de la longueur totale du réseau) (1) des ordres de Strahler, (2) des pentes des arcs et (3) de la sinuosité des arcs. Cadre géographique de l'analyse des cours d'eau : (a) France entière, (b) agence Rhône Méditerranée et Corse et (c) SDAGE Isère amont (cf. figure 7).

Les trois caractéristiques prises en compte sont l'ordre de Strahler d'une part, la pente et la sinuosité calculées par arc d'autre part. La pente est calculée comme décrit dans le paragraphe « Calcul des pentes » (page 19). Comme pour la pente, la sinuosité est calculée à partir des arcs codés regroupés par le champ « Cgenelin ». La méthode consiste à diviser la longueur de chaque arc par

la distance directe entre le point de départ et d'arrivée de l'arc. Une valeur proche de 1 signifie que l'arc est rectiligne. Une valeur de 2 indique une sinuosité importante ; la longueur de l'arc est alors deux fois plus importante que la distance en ligne droite entre ses points extrêmes.

On note une différence importante dans la répartition cumulée des arcs par ordre de Strahler entre

la BD Carthage[®] codée et le DP, et cela aux trois échelles considérées (figure 8-1). La répartition des arcs d'ordre 1 est très éloignée de celle de la BD Carthage[®] codée. Cette répartition montre aussi un déséquilibre en ce qui concerne les arcs d'ordres 3, 4 et 5 qui sont surévalués par rapport aux arcs codés de la BD Carthage[®]. Le passage au RHE permet de corriger ce déséquilibre. En effet, la répartition des arcs d'ordres 1 à 3 sur le réseau densifié se rapproche de celle de la BD Carthage[®] codée.

En ce qui concerne la comparaison des pentes des arcs, la surévaluation observée sur le DP est bien corrigée sur le RHE (figure 8-2). À l'échelle nationale, la sinuosité sur le RHE est plus proche de celle de la BD Carthage[®] codée (figure 8-3). La considération de tronçons de cours d'eau de plus petite taille dans le cas du RHE est vraisemblablement à l'origine de cette amélioration.

Conclusion

Le réseau hydrographique étendu est issu d'un travail d'extension sur la base du drain principal. Le DP est limité dans la représentativité des cours d'eau de taille modeste. Le RHE permet de corriger ce problème de représentativité. L'analyse de la répartition des ordres de Strahler indique que le RHE intègre les cours d'eau de faible taille dans des proportions conformes à celle de la BD Carthage[®]. En ce sens, il est plus représentatif que le DP. De plus, la comparaison des variables pente et sinuosité entre le RHE, le DP et la BD Carthage[®] montre que le RHE est plus proche de la BD Carthage[®]. Les arcs du RHE sont en très grande majorité naturels au sens de la codification

de la BD Carthage[®]. Le RHE étant une extraction de la BD Carthage[®], la compatibilité avec cette base de données est totale. Pour toutes ces raisons, l'objectif initial d'obtention d'un réseau plus représentatif, naturel et correct du point de vue topologique est respecté. Le RHE correspond donc bien aux objectifs de densification du DP à partir de la BD Carthage[®] dans le but de modéliser l'écoulement naturel.

Des développements en cours, nécessitant le recours à des données précises (modèle numérique de terrain...) permettront à court terme d'appliquer sur le RHE tous les outils développés sur le DP, autorisant ainsi des simulations sur des gammes de cours d'eau plus représentatives de la réalité des bassins. À terme, l'association de chaque arc du RHE avec son bassin versant permettra le calcul de variables telles que l'occupation du sol, la géologie, l'altitude, le débit moyen annuel, les débits mensuels moyens.

Outre ces modélisations généralisées, le RHE permettra une meilleure fourniture de descripteurs environnementaux sur les stations de suivi nationales, ainsi que d'autres modélisations écologiques à large échelle (Finlayson et Montgomery, 2003). Le réseau contribuera ainsi à une appréciation plus juste, à différentes échelles de gestion (nationale, territoire agence, territoire SGADE), de la gamme des cours d'eau à gérer et de leurs caractéristiques écologiques. Des estimations comme la proportion de cours d'eau temporaires ou la proportion de cours d'eau utilisables par une espèce donnée peuvent être profondément modifiées par l'utilisation du RHE, qui comporte par exemple quatre fois plus de cours d'eau d'ordre 1 que le DP. □

Résumé

Les caractéristiques environnementales des écosystèmes aquatiques continentaux sont en grande partie héritées le long du réseau hydrographique. Leur estimation automatisée nécessite l'utilisation d'un réseau hydrographique jointif et orienté. Le réseau orienté actuellement disponible en France (drain principal naturel) a permis entre autres la modélisation de l'écoulement naturel, la mise en place de différentes typologies de cours d'eau et l'application de modèles écologiques à l'échelle nationale. Cependant ce réseau apparaît limité du fait de son manque de représentativité des cours d'eau de tête de bassin. Pour couvrir de manière plus complète les cours d'eau de moindre taille, nous présentons ici un réseau hydrographique étendu (RHE) complétant le réseau existant. Le RHE comporte 2,5 fois plus d'arcs que le drain principal naturel, et permet une meilleure représentation des têtes de bassin (petits cours d'eau, faibles distances à la source, pentes fortes).

Abstract

The environmental characteristics of continental aquatic ecosystems are largely inherited along the drainage network. Their automated estimation requires the use of a digital drainage network of connected linear features. The network currently available in France (drain principal naturel) allowed several applications including the modeling of the natural flow, classification of river types and application of ecological models at the national level. However, this network is limited because of its lack of representativeness of headwater basins and small rivers. In order to provide a more comprehensive coverage of small rivers we present an extensive drainage network (RHE) that supplements the existing network. The RHE contains 2.5 times more arcs than the natural main drain, and provides a better representation of headwater basins (small rivers, short distances to the source, steep slopes).

Bibliographie

- FINLAYSON, D.-P., MONTGOMERY, D.-R., 2003, Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems, *Geomorphology*, vol. 53 (1-2), p. 147-164.
- LAMOUREUX, N., 2008 Hydraulic geometry of stream reaches and ecological implications, *in : Developments in Earth Surface Processes*, vol. 11, Gravel Bed Rivers 6, *in : Process Understanding to the Restoration of Mountain Rivers*, HABERSACK, H., PIÉGAY, H., RINALDI, M., Elsevier.
- LAMOUREUX, N., PELLA, H., VANDERBECQ, A., SAUQUET, E., CHANDESRIS, A., CAPRA, H., SOUCHON, Y., PONT, D., 2008, *Rapport ESTIMKART : Impacts quantitatifs sur les peuplements aquatiques de la restauration hydraulique des cours d'eau. Guide de l'application*, Cemagref et Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée et Corse.
- LAMOUREUX, N., CAPRA, H., 2002, Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations, *Freshwater Biology*, vol. 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*, vol. 47 (8), p. 1531-1542.
- LEOPOLD, L.-B., MADDOCK, T., 1953, *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*, U.S. Geological Survey, Professional Paper 252, Washington, DC.
- OBERDORFF, T., PONT, D., HUGUENY, B., CHESSEL, D., 2001, A probabilistic model characterizing fish assemblages of french rivers : a framework for environmental assessment, *Freshwater Biology*, vol. 46 (3), p. 399-415.
- OBERDORFF, T., PONT, D., HUGUENY, B., BELLIARD, J., BERREBI DIT THOMAS, R., PORCHER, J.-P., 2002, Adaptation et validation d'un indice poisson (FBI) pour l'évaluation de la qualité

biologique des cours d'eau français, *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365/366, p. 405-433.

OBERDORFF, T., PONT, D. HUGUENY, B., PORCHER, J.-P., 2002, Development and validation of a fish-based index (FBI) for the assessment of "river health" in France, *Freshwater Biology*, vol. 47 (9), p. 1720-1734.

PARK, C.-C., 1978, World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels : an analysis and some observations, *Journal of Hydrology*, vol. 39 (1-2), p. 199-202.

PELLA, H., SAUQUET, E., CHANDESRI, A., 2006, Construction d'un réseau hydrographique simplifié à partir de la BD Carthage®, *Ingénieries-EAT*, n° 46, p. 3-14.

POFF, N.-L., 1997, Landscape filters and species traits : towards mechanistic understanding and prediction in stream ecology, *Journal of the North American Benthological Society*, n° 16, p. 391-409.

RICHARDS, C., HARO, R.-J., JOHNSON, L.-B., HOST, G.-E., 1997, Catchment and reach-scale properties as indicators of macroinvertebrate species traits, *Freshwater Biology*, n° 37, p. 219-230.

SAUQUET, E., 2005, *Cartographie des écoulements annuels moyens en France*, rapport, Cemagref et ministère de l'Écologie et du Développement durable, Lyon, 40 p.

SAUQUET, E., 2006, Mapping mean annual river discharges : geostatistical developments for incorporating river network dependencies, *Journal of Hydrology*, vol. 331 (1-2), p. 300-314.

SNELDER, T., PELLA, H., WASSON, J.-G., LAMOUREUX, N., 2008, Definition procedures have little effect on performance of environmental classifications of streams and rivers, *Environmental Management*, vol. 42 (5), p. 771-788.

SNELDER, T.-H., CATTANEO, F., SUREN, A.-M., BIGGS, B.-J.-F., 2004, Is the river environment classification an improved landscape-scale classification of rivers ?, *Journal of the North American Benthological Society*, vol. 23 (3), p. 580-598.

SNELDER, T.-H., WOODS, R., BIGGS, B.-J.-F., 2005, Improved eco-hydrological classification of rivers, *River Research and Applications*, vol. 21 (6), p. 609-628.

SNELDER, T.-H., BIGGS, B.-J.-F., 2002, Multi-scale river environment classification for water resources management, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 38 (5), p. 1225-1239.

WASSON, J.-G., CHANDESRI, A., PELLA, H., BLANC, L., 2002, Typology and reference conditions for surface water bodies in France : the hydro-ecoregion approach, *TemaNord*, n° 566, p. 37-41.