

Réalisation d'un système national d'évaluation géospatiale du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau : Syrah_CE

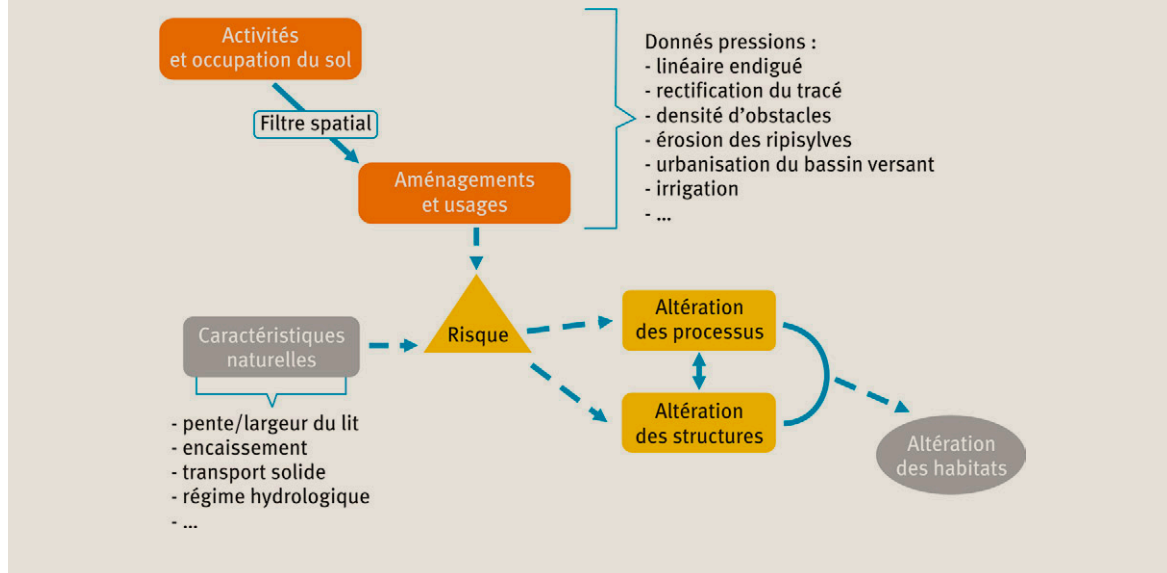
L'hydromorphologie, c'est-à-dire la composante physique des masses d'eau, influence fortement l'état écologique des cours d'eau. C'est aussi un des principaux leviers d'action de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) pour améliorer la qualité écologique d'un cours d'eau. Depuis 2012, en France, la démarche SYRAH CE, pour système relationnel d'audit de l'hydromorphologie cours d'eau, fait partie intégrante des méthodes déployées à chaque cycle d'évaluation de la DCE. Deux cent trente mille kilomètres de cours d'eau sont renseignés, et des cartes de zones à risques produites. Elle est aussi utilisée comme aide à la hiérarchisation des actions de restauration physique des cours d'eau.



Les réseaux de surveillance des milieux aquatiques ont historiquement été construits sur une logique d'évaluation de la qualité chimique des eaux. Il s'agissait notamment de voir en quoi les efforts de dépollution se traduisaient par une amélioration de cette qualité. À l'instar de réseaux mis en place par exemple aux États-Unis (Carlisle et Hawkins, 2008 ; Paulsen *et al.*, 2008) ou en Australie (Norris *et al.*, 2007), l'Europe a décidé en 2000 de renforcer son dispositif en donnant plus de place à l'évaluation par la bioindication portée par les communautés aquatiques, au pouvoir intégrateur de différentes pressions cumulées et en ajoutant un nouveau pilier, l'hydromorphologie, néologisme agrégeant l'hydrologie et la géomorphologie. Ces deux compartiments physiques déterminent le cadre général de l'habitat des communautés (Southwood, 1977 ; Poff et Ward, 1990), tant pour leurs répartitions géographiques, leurs mouvements et la réalisation de leurs différentes fonctions vitales (reproduction, repos, alimentation). Ils régissent également plusieurs dynamiques, celle des sédiments (érosion, transport, dépôt), de la matière organique (transport, accumulation, métabolisation) et de la physico-chimie des eaux (oxygénation, thermie, nutriments, contaminants...). La structure d'organisation des bassins versants, l'occupation de leurs sols, la conformation de l'espace riverain des cours d'eau et notamment

la couverture ou non par la ripisylve, influencent ces dynamiques, ce que rappellent les publications relatives au concept de *Riverine Landscape* ou *Riverscape* des années 2000 (Fausch *et al.*, 2002 ; Wiens, 2002 ; Steel *et al.*, 2010). Cette intrication intime entre le cours d'eau et son bassin versant avait auparavant fait l'objet d'un texte avant-gardiste de Hynes en 1975 : « *in every respect, the valley rules the stream* ». À l'échelle du cours d'eau, ce sont ses profils en long et en travers, la forme, la composition et la nature du substrat sédimentaire, les communications avec la nappe phréatique, sa configuration en successions de faciès, et bien sûr la dynamique des débits qui définissent la structure et les propriétés de l'espace physique et *in fine* de l'habitat. Différentes pressions et usages présents et passés qui émaillent les paysages ou le cours d'eau en modifient la structure physique et le fonctionnement (Wasson *et al.*, 1998), soit au droit de leur implantation, soit à distance (ex. : de grands barrages situés à l'amont qui peuvent influencer une rivière sur tout son parcours, Ward, 1976 ; Graf, 2006). Comment alors rendre compte de cette complexité à l'échelle de tout un pays ? Et cela de façon homogène, cohérente et pertinente, au sens de l'utilité de l'information produite, de façon à aider à la hiérarchisation des impacts à corriger. Parmi les méthodes en cours au début de ces années 2000, beaucoup consistaient à appliquer un protocole standard de recueil d'informa-

❶ Schéma général d'analyse du système d'audit Syrah_CE, combinant caractéristiques naturelles et pressions influençant la structure et la dynamique de la morphologie des cours d'eau à différentes échelles spatiales. La notion de risque (triangle jaune) s'entend ici comme une notion probabiliste.



tions à l'échelle d'une station de moins d'un kilomètre de longueur, considérée comme un élément représentatif d'un tronçon de quelques kilomètres (la placette d'une parcelle des agronomes pour en donner une analogie). L'objectif était le plus souvent d'en estimer le taux de naturalité (ex. : protocole Sercon, Boon *et al.*, 1997 puis *River Habitat Survey* des Anglais et Écossais, Raven *et al.*, 2000 et 2002) auquel s'ajoutait le degré de conservation de la ripisylve (ex. : protocole QUALPHY de l'Agence de l'eau Rhin Meuse, 2004). Ces protocoles n'étaient pas entièrement satisfaisants pour les tenants de la géomorphologie fluviale (Newson et Large, 2006), car ils se basaient trop sur des états types fixes de cours d'eau et n'incluaient pas assez des principes de dynamique fluviale (voir à ce propos les controverses nourries à propos de la méthodologie de Rosgen, 1998 ; Simon *et al.*, 2008 ; et réponse de Rosgen, 2008). À l'opposé, à l'échelle des paysages, les tentatives étaient encore peu nombreuses pour relier structure et fonctionnement des bassins versants, géomorphologie et réponses des communautés aquatiques, avec des données réduites à quelques bassins versants seulement (Roth *et al.*, 1996 ; Lammert et Allan, 1999 ; Allan, 2004). Au démarrage des travaux en 2007 pour le compte du ministère en charge de l'écologie, nous avons une petite expérience, ayant réfléchi à une préfiguration de l'annexe 5 de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE) (Souchon, 1998) et réalisé une étude collective sur l'ensemble du bassin de la Loire (Souchon *et al.*, 2000). De nombreux défis subsistaient :

- concevoir la structure générale d'analyse ;
- documenter les variables pertinentes à mobiliser en utilisant les derniers développements de la numérisation nationale de différentes couches géographiques ;
- proposer un système opérationnel pour le deuxième cycle d'évaluation de la DCE, soit un temps de développement de cinq ans,

- organiser l'animation continue partagée de ce travail et mettre en place les formations pour garantir cette opérationnalité.

Nous présentons ci-après une synthèse de ces différentes phases et terminons sur une discussion qui porte un regard sur le retour d'expérience de cette démarche de recherche action et sur sa réappropriation effective.

Structure générale d'analyse

Il était essentiel de construire toute la structure d'analyse en respectant les lois fondamentales de la dynamique fluviale, à savoir que le fonctionnement hydromorphologique d'un cours d'eau est un équilibre dynamique de processus (liés aux flux liquides et solides) interagissant avec des structures (formes, profils, sédiments...) (Petts *et al.*, 1992 ; Amoros et Petts, 1993 ; Bravard et Petit, 1997).

Ce fonctionnement peut être décrit par des variables de contrôle (nature géologique, pente et largeur de la vallée, hydrologie, débit solide...), qui représentent le cadre imposé qui dicte l'évolution physique et des variables de réponse (pente du lit, sédiments, tracé, largeur, profondeur, faciès...), qui caractérisent l'ajustement de la rivière à ces contraintes.

Différents travaux et infrastructures hydrauliques ont modifié au cours du temps ce fonctionnement (Brookes, 1988). Toute la difficulté était par conséquent de rendre compte de l'ensemble des paysages de rivière organisés en échelles emboîtées (Frissel *et al.*, 1986), en réseaux dendritiques (Brown et Swan, 2010), sièges de processus de contrôle/réponse en cascades spatiales (Burcher *et al.*, 2007 ; Fryirs et Brierley, 2013), en les couplant avec leurs modifications significatives.

Le schéma d'analyse proposé respecte ces propriétés (figure ❶).

► Pour bien comprendre la logique d'analyse, nous précisons sur la figure 2 quelles sont les altérations généralement rencontrées et prises en considération. Dans les réalités de terrain observées, il est difficile d'en isoler une seule, différents éléments étant modifiés, tant de structure que de processus. Par exemple, une situation fréquemment rencontrée concerne les travaux d'hydraulique en rivière : le cours d'eau a été ajusté mécaniquement à un gabarit généralement supérieur à celui d'origine, ses profils en long et en travers et ses berges ont été modifiés, la sinuosité a souvent été réduite avec des conséquences sur les alternances de faciès, la nature et l'agencement des substrats...

Le principe général retenu a été de combiner les pressions déjà renseignées et celles calculables par géomatique (ex. : nature et occupation des sols) avec les « traces » d'altération lisibles sur cartes (ex. : rectification de forme, présence d'ouvrages en travers...).

Il restait à sélectionner et à renseigner les variables au niveau de toute la France métropolitaine.

Documentation des variables et construction d'une plateforme de données opérables sous système d'information géographique

Développer un système d'analyse à l'échelle de tout un pays suppose que les données et leur traitement soient homogènes sur tout le territoire. À cette exigence, s'ajoutait l'obligation de réaliser le système en un temps court. D'où le choix qui a été privilégié de recourir essentiellement à des données déjà disponibles dans des bases de données nationales et à favoriser l'exploitation de données géographiques numérisées, de façon à les traiter avec des algorithmes géomatiques et à les mobiliser sous système d'information géographique (SIG). Rappelons qu'en 2007, ni Google Earth ni Geoportail n'offraient encore toutes leurs fonctionnalités actuelles et que la mise à disposition des couches en cours de numérisation par l'Institut national de l'information géographique et forestière étaient alors proposées à un coût

exorbitant. Cette dernière difficulté financière a été levée par le Directeur de l'eau (P. Berteaud) au ministère en charge de l'écologie, à la suite d'un argumentaire que nous avons préparé : les données numériques BD Topo ont été ouvertes aux Agences de l'eau et nous pouvions les utiliser gracieusement pour le projet Syrah_CE. L'extraction initiale en masse des données numériques a été réalisée par le bureau d'études Strategis, sur la base d'un cahier des charges élaboré par notre équipe en collaboration avec les six Agences de l'Eau.

Le premier travail a consisté à construire l'enveloppe géographique de l'analyse, en essayant de gérer les notions d'échelles emboîtées, pour combiner des informations globales relevant des surfaces des bassins versants ou des structures hydrauliques à effets distants notamment sur l'hydrologie et le transport solide (i.e. grands barrages avec stockage saisonnier) et des informations de niveau plus local rapportées au niveau des tronçons de rivière ou de sous-ensembles de ces tronçons. Ainsi a été construit un réseau coulant, à partir d'un premier réseau physique (Pella *et al.*, 2006) entièrement révisé et enrichi, notamment par une sectorisation morphologique semi-automatique, en considérant les confluences, les ruptures géologiques et les changements de forme et de sinuosité du lit et de largeur du fond de vallée. Au total, 69 500 tronçons ont été identifiés pour représenter les 230 000 km de cours d'eau du réseau DCE ; leur longueur n'est pas fixe et varie de 1 km pour les cours d'eau de tête de bassin à 10 km pour les parties aval des plus grands cours d'eau, la moyenne se situant à 3,2 km. À ce découpage linéaire, ont été ajoutés des tampons spatiaux, définis par des largeurs de part et d'autre du cours d'eau de 10, 30 et 100 m, notamment pour analyser la couverture des berges par la ripisylve.

Pour chaque espace élémentaire ainsi délimité, toutes les données brutes de caractéristiques des tronçons et de leurs différentes pressions ont été renseignées.

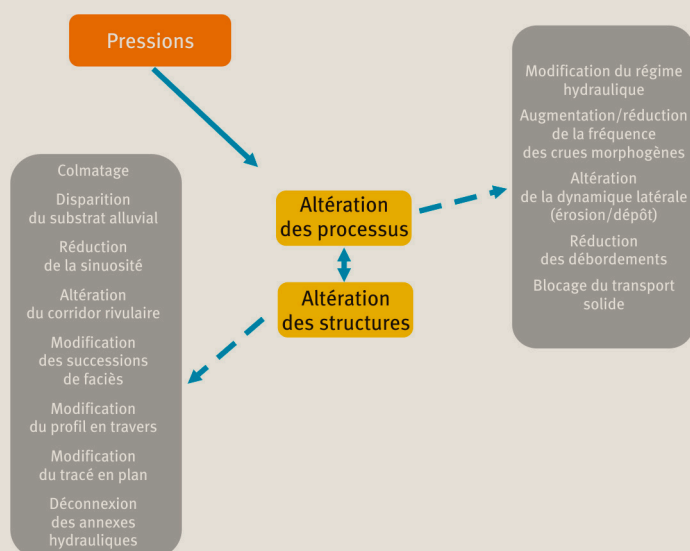
Présentation de Syrah_CE, système relationnel d'audit de l'hydromorphologie

Le système Syrah_CE se compose d'une sélection des différentes variables associées aux différentes échelles, soit 15 variables à large échelle et 15 variables de niveau tronçon (Valette *et al.*, 2012) non détaillées dans la présente synthèse. Elles peuvent être analysées variable par variable, thématique par thématique au moyen de cartographies synthétiques (figure 3) mais peuvent aussi être combinées, par exemple pour rendre plus pertinente l'information vis-à-vis des processus significatifs pour l'état physique des cours d'eau (figure 4).

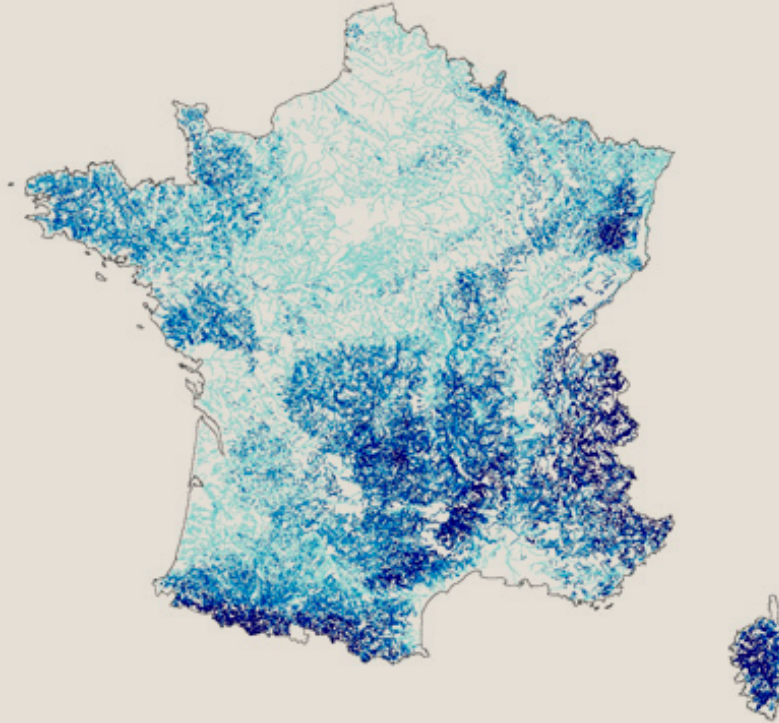
Grâce à une gestion des données sous SIG, il est possible de balayer les différentes échelles d'analyse et de bien cerner à la fois la signature des paysages et leurs pressions dominantes et d'en voir la traduction au niveau des tronçons (figure 5).

En présentant régulièrement l'avancée de nos travaux aux futurs utilisateurs et au ministère en charge de l'écologie et ses services, il nous est apparu que la grande souplesse permise par le système Syrah_CE satisfaisait les experts en géomorphologie, mais que sa complexité perturbait beaucoup d'opérateurs. C'est pourquoi nous avons formalisé et en quelque sorte standardisé la démarche

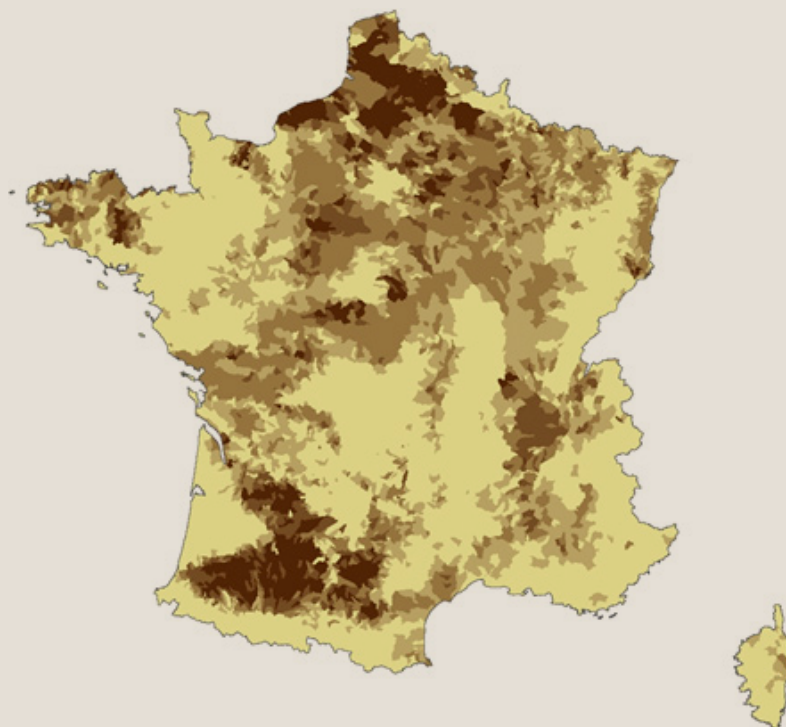
2 Exemples d'altération des processus et structures.



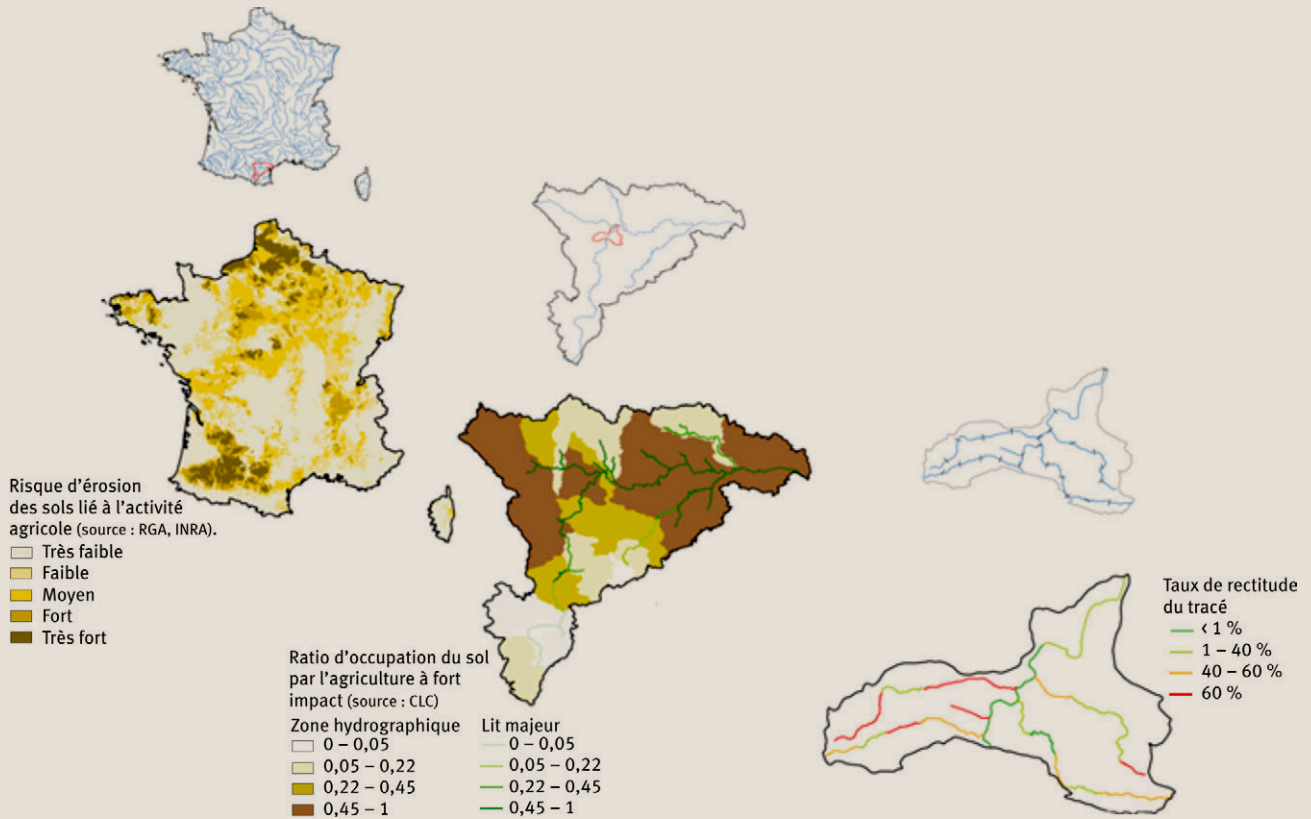
③ Caractéristiques naturelles des cours d'eau de la France métropolitaine : exemple de représentation de la puissance spécifique maximale (largeur du fond de vallée x pente). La puissance est un indicateur utile en géomorphologie pour apprécier la capacité des cours d'eau à s'auto-réajuster à condition que les flux sédimentaires subsistent.



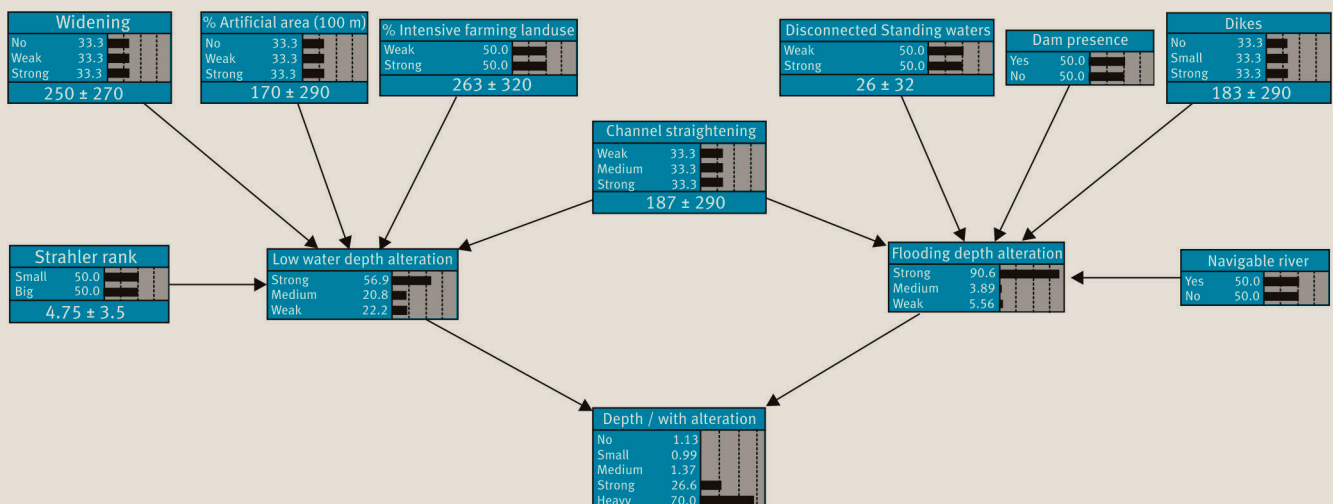
④ Risque d'excès de sédiments fins lié aux usages agricoles à large échelle, représenté à l'échelle des zones hydrographiques. La métrique risque d'érosion diffuse d'origine agricole est représentée en 5 classes, selon des couleurs d'autant plus sombres que le risque est fort. Il s'agit d'une combinaison de variables à large échelle, obtenues en croisant le risque aléa érosion des sols (Montier et al., 1998) avec les orientations technico-économiques des exploitations agricoles dominantes par communes (OTEX, RGA 2000). Le premier décrit à large échelle le risque d'érosion, sur la base d'une combinaison d'informations : battance et érodibilité des sols, pente des terrains, occupation des sols, hauteur et intensité des précipitations, le résultat obtenu combine l'érosion d'origine naturelle avec celle d'origine anthropique. Le croisement avec le deuxième document permet de mieux faire la part des altérations liées à l'usage agricole des sols, en particulier pour les cultures sollicitant les couches superficielles du sol (permanentes ou terres labourées).



⑤ Exemple d'analyse effectuée à trois échelles, le territoire national (reprise de la carte d'érosion de la figure ④), la zone hydrographique (occupation du sol par une agriculture intensive), et les tronçons (taux de rectitude du tracé du cours d'eau, témoin d'intervention hydraulique passée). Exemple concernant le bassin du Lez (750 km², département Hérault).



⑥ Analyse du risque de modification de la largeur et de la profondeur des cours d'eau. BBN Syrah_CE (d'après Van Looy et al., 2015).



Le réseau est construit à partir de variables de pressions anthropiques préalablement discrétisées en fonction de leur degré d'impact sur le fonctionnement des cours d'eau. Ces variables sont croisées par le biais de tables de probabilités conditionnelles pour former des variables latentes. Ces tables, construites par expertise et validées dans des bassins versants tests, décrivent la distribution des probabilités dans les différentes classes d'altération pour chaque combinaison de valeurs des variables de pressions. Deux variables latentes, la profondeur à l'étiage (réduction souvent associée à un élargissement du lit en raison de recalibrages urbains ou agricoles) et la profondeur en crue (augmentation de la hauteur liée à la présence d'ouvrages dans le lit ou aux conséquences d'extractions de granulats) sont ainsi construites. Elles sont ensuite croisées à leur tour pour obtenir le risque, c'est-à-dire la classe d'altération la plus probable et l'incertitude associée, de modification de la profondeur et la largeur du lit. Il s'agit bien, dans ce cas, d'identifier les altérations de la géométrie hydraulique d'origine anthropique, sans tenir compte des variations naturelles en fonction des variables de contrôle de la géomorphologie fluviale.

experte en réalisant un travail complémentaire construit sur une logique d'analyse de risque et reposant sur un réseau bayésien ou *Bayesian Belief Network* (BBN), décrit par Van Looy *et al.* (2015).

Le risque d'altération a ainsi été calculé pour les 10 items des critères DCE qualifiant l'hydromorphologie. Les éléments de qualité et leurs paramètres élémentaires sont :

- régime hydrologique : hydrologie, quantité et dynamique, connexion aux masses d'eau souterraines ;
- continuité longitudinale de la rivière : continuité biologique échelle locale et échelle large (migrateurs) et continuité sédimentaire ;
- continuité latérale (connexion lit mineur/lit majeur) ;
- conditions morphologiques : variation de la profondeur et de la largeur de la rivière, structure et substrat du lit, structure de la rive.

On remarque d'emblée que ces paramètres mélangent des notions physiques de géomorphologie et d'hydrologie avec des notions plus biologiques, comme la connectivité entre habitats et qu'une agrégation de ces 10 paramètres n'aurait pas grand sens ; c'est pourquoi, nous avons traité séparément chacun d'entre eux.

Nous illustrons ici un de ces 10 items, le risque de modification de largeur et profondeur, paramètres à forte signification en géomorphologie, puisqu'il s'agit de variables de réponse aux modifications de flux liquides ou de flux solides dans les bassins versants (figures 6 et 7).

La démarche complète de risque concernant les 10 items a été proposée aux opérateurs de la DCE, lors du processus d'établissement du risque de non-atteinte des objectifs environnementaux en 2012 et 2013 (DCE, 2^e cycle). Elle a été adoptée et validée par eux. Ils ont pu comparer des situations bien connues par les experts locaux et les résultats du calcul BBN : ces résultats concordent dans 80 % des cas (bilan national établi par le ministère en charge de l'écologie) ; les discordances étaient majoritairement liées à des disparités d'informations entre les bases nationales, notamment celle recensant les ouvrages et la connaissance locale plus fine de la donnée.

L'accompagnement de la démarche Syrah_CE

Tout le développement de la démarche a été réalisé en interaction quasi permanente avec les opérationnels. Un point d'avancée du travail était régulièrement fait au sein du groupe national hydromorphologie auprès du ministère en charge de l'écologie (Direction de l'eau), qui comptait dans ses membres les représentants du dit ministère, des six Agences de l'eau, des Dreal¹ de bassin, du Conseil supérieur de la pêche (devenu Onema, puis AFB et OFB²). Le travail de mise au point s'est basé sur des tests en vraie grandeur dans six bassins géographiquement contrastés, ce qui a également permis de nombreux échanges.

1. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

2. Onema : Office national de l'eau et des milieux aquatiques ; AFB : Agence française de la biodiversité ; OFB : Office français de la biodiversité.

Une fois le système avancé et stabilisé, une présentation a été faite à un large public dans chacune des six Agences de l'eau.

Enfin, deux types de formation ont été assurés, l'une s'adressant dans un premier temps à un premier cercle d'opérateurs, l'autre dans un deuxième temps à de futurs formateurs.

Le système a également été présenté dans différentes formations initiales, notamment les écoles formant les futurs ingénieurs : ENTPE (Vaulx-en-Velin), Agro Paris Tech (spécialisation Eau Montpellier), Pont Paris Tech, Master Cogeval'Eau (Lyon 2).

Discussion

Le système Syrah_CE apporte une information simultanée sur les différents niveaux de complexité nécessaires pour analyser la structure et le fonctionnement physiques des cours d'eau, aux échelles terrestres des bassins versants, celles des écotones constitués par les espaces ripariens et enfin celles des cours d'eau et de leurs tronçons morphologiques.

Il permet une utilisation « à la carte » de 30 variables élémentaires pour l'expert géomorphologue. Il propose aussi une analyse probabiliste plus « guidée » du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau au

- 7 Risque de modification de la largeur ou de la profondeur des cours d'eau. Probabilité établie par le réseau bayésien BBN présenté figure 6. Le risque de modification de largeur et profondeur fait apparaître des situations à risque fort à très fort dans les principales vallées fluviales, dans des régions urbanisées à forte densité humaine (région parisienne) ou dans des régions à activité agricole soutenue (sud-ouest coteaux aquitains ; ouest, sud Bretagne et Vendée et est Alsace), ce qui est cohérent géographiquement avec les structures spatiales existantes et avec les activités qui s'y exercent. Par ailleurs, il faut également retenir que 50,4 % du linéaire total de cours d'eau sont à risque très faible à faible ; le risque très fort concerne 19 % du linéaire.



► sein d'un réseau bayésien. C'est un système opérationnel réapproprié et utilisé dans le processus DCE, maintenant depuis deux cycles d'évaluation (2013 et 2019, méthode de référence pour le socle commun dévaluation, <https://professionnels.ofb.fr/node/368>)³.

À notre connaissance, il n'existe pas de système complet équivalent à cette échelle. S'il y a un large consensus pour pousser à prendre en considération simultanément les échelles des bassins et celles des cours d'eau dans leurs caractéristiques naturelles et avec les pressions anthropiques qui s'y exercent (Vörösmarty *et al.*, 2010; Bellard *et al.*, 2015; Gurnell *et al.*, 2016 et 2020; Kuemmerlen *et al.*, 2019), les expériences diffèrent quant à l'envergure des projets, aux grains élémentaires de constitution de la donnée, au choix des variables et à la façon dont elles sont exprimées, agrégées et interprétées. Ainsi plusieurs auteurs compilent les variables de stress et cartographient des indices agrégés de menace ou de condition pour différents écosystèmes :

- le bassin aval du fleuve Colorado (États-Unis, 350 000 km², Paukert *et al.*, 2011), variables générales telles que les espaces dominés par l'agriculture ou l'urbain, les barrages et canaux, les infrastructures routières, exprimées en présence/absence ou en intensité ;
- la région des Grands Lacs Laurentiens (États-Unis, Canada, 245 000 km², Smith *et al.*, 2015), 50 variables de stress regroupées en familles telles que pompages et dérivations, contaminants toxiques, polluants diffus, espèces invasives, pêcheries, développement côtier, changement climatique, altérations de l'habitat aquatique, exprimées selon leur emprise spatiale, leur occurrence temporelle, leur impact écologique potentiel, l'amplitude induite de la modification du système et le temps de récupération ;
- l'Europe des 27 pays sous juridiction DCE (4,2 M km², Grizzetti *et al.*, 2019), avec une analyse à gros grain de 180 km² des relations entre la condition des écosystèmes, incluant l'hydromorphologie la soutenant et les services écosystémiques (fourniture d'eau, purification de l'eau, prévention contre les érosions, protection contre les crues, protection côtière et récréation).

Les différentes publications de cette nature aident à prendre conscience des nombreuses pressions cumulées existantes au sein des hydrosystèmes avec leur spatialisation géographique (Ormerod *et al.*, 2010; Hering *et al.*, 2015). C'est une étape importante pour des échelons de décision nationaux pour visualiser et identifier la nature des actions potentielles de remédiation à entreprendre.

Centré sur le fonctionnement géomorphologique des cours d'eau, le système Syrah_CE est construit à un grain élémentaire plus fin. Par ailleurs, il renseigne les réseaux hydrographiques de façon continue, ce qui présente l'avantage d'éviter le prisme de stations de mesures disjointes spatialement à partir desquelles il est difficile d'extrapoler. En cela, en plus de son objet

premier, à savoir l'analyse de l'état des lieux DCE, le système construit peut s'avérer être d'une aide précieuse pour l'accompagnement des actions de restauration, en identifiant les causes locales et distantes de dégradation physique et d'une certaine façon en anticipant sur les chances de succès d'une action de restauration. Kail et Wolter (2013) insistent beaucoup sur cette contrainte forte des pressions du bassin qui peuvent contrecarrer voire annihiler toute tentative de restauration physique locale, notamment dans nombre de cours d'eau des plaines européennes sujettes à forte anthropisation.

Disposer d'un système comme Syrah_CE ne signifie pas se passer d'une analyse de terrain (descriptions de type Carhyce, Gob *et al.*, 2014 ou Aurhace, Valette *et al.*, 2013) et d'expertises locales pour préciser l'analyse ou pour dimensionner finement des actions de restauration à réaliser ; il faut bien comprendre la complémentarité des approches et leur enrichissement mutuel. Syrah_CE n'est pas fermé et pourra s'enrichir de variables et de relations nouvelles, notamment celles dont les mesures de terrain auront pu montrer la pertinence.

Par la suite, depuis sa réalisation, le système Syrah_CE a permis de nouvelles explorations scientifiques, qu'il s'agisse d'un cadre pour une meilleure interprétation des réponses écologiques (prise en compte dans l'indice multimétrique macroinvertébrés, I2M2, Mondy *et al.*, 2012), des données de pressions pour enrichir des modèles pressions impacts (Villeneuve *et al.*, 2015) ou des couplages toxicologie/écologie (Sarkis *et al.*, 2020), en encore pour contextualiser et renseigner des approches sur les effets de la fragmentation (Van Looy *et al.*, 2013; Floury *et al.*, 2020).

Pour finir, la conception et la construction de Syrah_CE n'ont été possibles que parce que dans un temps limité, nous avons pu travailler de façon vraiment pluridisciplinaire en rassemblant au sein d'un pôle Cemagref/Irstea-Onema/AFB, deux géomorphologues, deux écologues terrestres (forestier), un écologue aquatique, deux modélisateurs dont un spécialiste des approches bayésiennes, un géomaticien, un gestionnaire de bases de données nationales. Cette expérience passionnante a relevé le challenge de construire un système opérationnel appliqué par les praticiens. Un contre-exemple pour Bruno Latour dont les propos en 1994 qualifiaient les recherches appliquées, en particulier à l'INRA, de RANA (« recherche appliquée non applicable »). ■

3. « Dans le cadre de l'actualisation des états des lieux 2013 et 2019 pour les cours d'eau, la démarche Syrah-ce a été positionnée comme socle commun national pour l'évaluation harmonisée des pressions hydromorphologiques et des risques d'altération des cours d'eau qui en découlent. Elle répond en cela à la recommandation 5 sur le suivi de la morphologie des cours d'eau du rapport de l'Inspection générale de l'environnement de 2006 « Évaluation des états des lieux des bassins métropolitains, 1^{re} phase de la mise en œuvre de la DCE ». Le système peut également être utilisé pour diverses études, pour instruire des dossiers réglementaires, ou encore pour élaborer des pré-diagnostic territoriaux et ainsi aider à définir le ou les scénarii les plus efficaces pour la conciliation des différents usages et l'atteinte des objectifs environnementaux. »

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 Pour une définition de l'hydromorphologie, 🌐 <https://hydroeco.cemagref.fr/hydromorphologie>, Hydroeco, site internet Irstea-Onema.
- 📖 VALETTE, L., PIFFADY, J., CHANDESRIS, A., SOUCHON, Y., 2012, SYRAH-CE : description des données et modélisation du risque d'altération de l'hydromorphologie des cours d'eau pour l'état des lieux DCE, Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Irstea Lyon, MALY-LHQ, 104 p., 🌐 http://oai.afbiodiversite.fr/cindocoai/download/PUBLI/1185/1/2012_108.pdf_4080Ko
- 📖 VALETTE, L., CHANDESRIS, A., SOUCHON, Y., 2013, Protocole AURAH-CE Audit RAPIDE de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau. Méthode de recueil d'informations complémentaires à SYRAH-CE sur le terrain V2, Pôle Hydroécologie des cours d'eau Onema-Cemagref Lyon MAEP-LHQ, 46 p + outils de mise en œuvre (fiche terrain, base de donnée préformatée...), 🌐 https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/protocole_aurahce_v2_vfc.pdf
- 📖 « SYRAH : un outil pour guider la restauration de la morphologie des cours d'eau », 🌐 <https://www.graie.org/ISRivers/docs/papers/1P08-49508GAU.pdf>
- 📖 Données Syrah_CE, données de base pour le développement d'un indicateur (créé par le Cerema) de potentiel de naturalité des cours d'eau, 🌐 <https://naturefrance.fr/indicateurs/naturalite-estimee-des-cours-deau>

Les auteurs

Laurent VALETTE, André CHANDESRIS, Jérémy PIFFADY, Martial FERRÉOL et Yves SOUCHON

INRAE, UR RiverLy,
5 rue de la Doua, CS 20244,
F-69625 Villeurbanne, France.

🌐 laurent.valette@inrae.fr
🌐 andre.chandesris@inrae.fr
🌐 jeremy.piffady@inrae.fr
🌐 martial.ferreol@inrae.fr
🌐 yves.souchon@inrae.fr

Bertrand VILLENEUVE

INRAE, UR EABX,
50 avenue de Verdun,
F-33612 Cestas Cedex, France.

🌐 bertrand.villeneuve@inrae.fr

Thierry TORMOS

Office français de la biodiversité,
510 rue René Descartes, CS 10458,
F-13592 Aix-en-Provence Cedex 3, France.

🌐 thierry.tormos@ofb.gouv.fr

Kris VAN LOOY

OVAM, Mechelen, Belgique.

🌐 kris.van.looy@ovam.be

Jean René MALAVOI

EDF, HYDRO Pôle énergies renouvelables,
CIH Mission technique,
F-73373 Le Bourget du Lac Cedex, France.

🌐 jean-rene.malavoi@edf.fr

BIBLIOGRAPHIE COMPLÈTE

- ALLAN, J.D., 2004, Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems, *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 35, p. 257-284, <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>
- AMOROS, C., PETTS, G.E., 1993, *Hydrosystèmes fluviaux*, Masson, Paris, Collection Écologie n° 24, 300 p.
- BELLARD, C., LECLERC, C., COURCHAMP, F., 2015, Combined impacts of global changes on biodiversity across the USA, *Scientific reports*, 5(1): 1-11, <https://doi.org/10.1038/srep11828>
- BOON, P.J., HOLMES, N.T.H., MAITLAND, P.S., ROWELL, T.A., DAVIS, J., 1997, A system for evaluating rivers for conservation (SERCON): development, structure and function, in: *Freshwater Quality : Defining the Indefinable ?* BOON, P.J., HOWELL, D.L. (Eds.), The Stationery Office, Edinburgh, 26: p.299-326.
- BRAVARD, J.-P., PETIT, F., 1997, *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*, Masson & Armand Colin Éditeurs, 221 p.
- BROOKES, A., 1988, *Channelized rivers. Perspectives for environmental management*, Wiley Interscience, 326 p.
- BROWN, B., SWAN, C., 2010, Dendritic network structure constrains metacommunity properties in riverine ecosystems, *Journal of Animal Ecology*, 79(3): 571-580, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2010.01668.x>
- BURCHER, C.L., VALETT, H.M., BENFIELD, E.F., 2007, The land-cover cascade: Relationships coupling land and water, *Ecology*, 88(1), p. 228-242, https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_burcher002.pdf.
- CARLISLE, D.M., HAWKINS, C.P., 2008, Land use and the structure of western US stream invertebrate assemblages: predictive models and ecological traits, *Journal of the North American Benthological Society*, 27(4), p. 986-999, <https://doi.org/10.1899/07-176.1>
- FAUSCH, K.D., TORGERSEN, C.E., BAXTER, C.V., LI, H.W., 2002, Landscapes to riverscapes: bridging the gap between research and conservation of stream fishes, *BioScience*, 52(6), [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0483:LTRBTG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0483:LTRBTG]2.0.CO;2)
- FLOURY, M., CHANDESRIS, A., SOUCHON, Y., 2020, *Réservoirs Biologiques du bassin Rhône Méditerranée. Analyse de contexte et perspectives*, INRAE, Lyon Villeurbanne, 106 p.
- FRISSELL, C.A., LISS, W.J., WARREN, C.E., HURLEY, M.D., 1986, A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context, *Environmental Management*, 10(2): 199-214, <https://doi.org/10.1007/BF01867358>
- FRYIRS, K.A., BRIERLEY, G.J., 2013, *Geomorphic Analysis of River Systems. An approach to Reading Landscape*, Wiley-Blackwell, 368 p.
- GOB, F., BILODEAU, C., THOMMERET, N., BELLIARD, J., ALBERT, M.-B., TAMISIER, V., BAUDOIN, J.-M., KREUTZENBERGER, K., 2014, Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE), *Géomorphologie*, (1): 57-72, <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10497>
- GORDON, N.D., MCMAHON, T.A., FINLAYSON, B.L., 1992, *Stream hydrology: an introduction for ecologists*, John Wiley & Sons, Chichester, 526 p.
- GRAF, W., 2006, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers, *Geomorphology*, 79: 336-360, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.022>
- GURNELL, A., RINALDI, M., BELLETTI, B., BIZZI, S., BLAMAUER, B., BRACA, G., BUIJSE, A., BUSSETTINI, M., CAMENEN, B., COMITI, F., 2016, A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management, *Aquatic sciences*, 78(1): 1-16, <https://hal.inrae.fr/hal-02605446>.
- GURNELL, A.M., SCOTT, S.J., ENGLAND, J., GURNELL, D., JEFFRIES, R., SHUKER, L., WHARTON, G., 2020, Assessing river condition: A multiscale approach designed for operational application in the context of biodiversity net gain, *River Research and Applications*, 36(8): 1559-1578, <https://doi.org/10.1002/rra.3673>
- HERING, D., CARVALHO, L., ARGILLIER, C., BEKLIÖGLU, M., BORJA, A., CARDOSO, A.C., DUEL, H., FERREIRA, T., GLOBEVNIK, L., HANGANU, J., HELLSTEN, S., JEPPESEN, E., KODEŠ, V., SOLHEIM, A.L., NÖGES, T., ORMEROD, S., PANAGOPOULOS, Y., SCHMUTZ, S., VENOHR, M., BIRK, S., 2015, Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress — An introduction to the MARS project, *Science of The Total Environment*, 503-504: 10-21, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.106>
- HYNES, H.B.N., 1975, The stream and its valley, *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 19: 1-15, <https://doi.org/10.1080/03680770.1974.11896033>
- KAIL, J., WOLTER, C., 2013, Pressures at larger spatial scales strongly influence the ecological status of heavily modified river water bodies in Germany, *Science of The Total Environment*, 454-455: 40-50, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.096>
- KUEMMERLEN, M., REICHERT, P., SIBER, R. AND SCHUWIRTH, N., 2019, Ecological assessment of river networks: from reach to catchment scale, *Science of the Total Environment*, 650: 1613-1627, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.019>
- LAMMERT, M., ALLAN, J.D., 1999, Assessing biotic integrity of streams: Effects of scale in measuring the influence of land use/cover and habitat structure on fish and macroinvertebrates, *Environmental Management*, 23(2): 257-270, <https://doi.org/10.1007/s002679900184>
- LATOUR, B., 1994, *Le métier de chercheur, regard d'un anthropologue*, INRA Éditions.
- MONDY, C.P., VILLENEUVE, B., ARCHAIMBAULT, V., USSEGLIO-POLATERA, P., 2012, A new macroinvertebrate-based multimetric index (I2M2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands: A taxonomical and trait approach, *Ecological Indicators*, n° 18, p. 452-467, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.013>
- MONTIER, C., LE BISSONNAIS, Y., DAROUSSIN, J., KING, D., 1998, *Cartographie de l'aléa « Érosion des sols » en France*, INRA, Orléans, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, Ministère de l'Environnement : DPPR - Sous-Direction de la Prévention des risques majeurs, Centre national de la recherche scientifique : Laboratoire de géographie physique. 56 p. + cartes.
- NEWSON, M.D., LARGE, A.R.G., 2006, 'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(13): 1606-1624, <https://doi.org/10.1002/esp.1430>
- NORRIS, R.H., LINKE, S., PROSSER, I., YOUNG, W.J., LISTON, P., BAUER, N., SLOANE, N., DYER, F., THOMS, M., 2007, Very-broad-scale assessment of human impacts on river condition, *Freshwater Biology*, 52(5): 959-976, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01701.x>

- ORMEROD, S.J., DOBSON, M., HILDREW, A.G., TOWNSEND, C.R., 2010, Multiple stressors in freshwater ecosystems, *Freshwater Biology*, 55: 1-4, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02395.x>
- PAUKERT, C.P., PITTS, K.L., WHITTIER, J.B., OLDEN, J.D., 2011, Development and assessment of a landscape-scale ecological threat index for the Lower Colorado River Basin, *Ecological Indicators*, 11(2): 304-310, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.05.008>
- PAULSEN, S.G., HAWKINS, C.P., VAN SICKLE, J., YUAN, L.L., HOLDSWORTH, S.M., 2008, An invitation to apply national survey data to ecological research, *Journal of the North American Benthological Society*, 27(4): 1017-1018, <https://doi.org/10.1899/08-123.1>
- 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, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00601215>
- PETTS, G.E., LARGE, A.R.G., GREENWOOD, M.T., BICKERTON, M.A., 1992, Floodplain assessment for restoration and conservation : linking hydrogeomorphology and ecology, in: *Lowland Floodplain Rivers*, CARLING, P.A. AND PETTS, G.E. (Eds.). John Wiley & Sons, p. 217-234.
- POFF, N.L. AND WARD, J.V., 1990, Physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatiotemporal heterogeneity, *Environmental Management*, 14(5): 629-645, <https://doi.org/10.1007/BF02394714>
- RAVEN, P.J., HOLMES, N.T.H., NAURA, M., DAWSON, F.H., 2000, Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the U.K., *Hydrobiologia*, 422-423: 359-367, https://doi.org/10.1007/978-94-011-4164-2_29
- RAVEN, P.J., HOLMES, N.T.H., CHARRIER, P., DAWSON, F.H., NAURA, M., BOON, P.J., 2002, Towards a harmonized approach for hydromorphological assessment of rivers in Europe: A qualitative comparison of three survey methods, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 12(4): 405-424, <https://doi.org/10.1002/aqc.536>
- ROSGEN, D., 1998, The reference reach - A blueprint for design, in: *Proceedings: Engineering Approaches to Ecosystem Restoration*, HAYES, D.F. (Ed.), ASCE, Denver, CO, p. 22-27.
- ROSGEN, D.L., 2008, Discussion: "Critical Evaluation of How the Rosgen Classification and Associated 'Natural Channel Design' Methods Fail to Integrate and Quantify Fluvial Processes and Channel Responses" by A. Simon, M. Doyle, M. Kondolf, FD Shields Jr., B. Rhoads, and M. McPhillips, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(3): 782-792.
- ROTH, N.E., ALLAN, J.D., ERICKSON, D.L., 1996, Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple spatial scales, *Landscape Ecology*, 11(3): 141-156, <https://doi.org/10.1007/BF02447513>
- SARKIS, N., GEFFARD, O., SOUCHON, Y., CHANDESRI, A., FÉRRÉOL, M., VALETTE, L., ALRIC, B., FRANÇOIS, A., PIFFADY, J. AND CHAUMOT, A., 2020, How to quantify the links between bioavailable contamination in watercourses and pressures of anthropogenic land cover, contamination sources and hydromorphology at multiple scales? *Science of The Total Environment*, 735: 139492, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139492>
- SIMON, A., DOYLE, M., KONDOLF, M., SHIELDS, F.D., RHOADS, B., MCPHILLIPS, M., 2007, Critical evaluation of how the Rosgen classification and associated "natural channel design" methods fail to integrate and quantify fluvial processes and channel response, *Journal of the American Water Resources Association*, 43(5): 1117-1131, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00091.x>
- SMITH, S.D.P., MCINTYRE, P.B., HALPERN, B.S., COOKE, R.M., MARINO, A.L., BOYER, G.L., BUCHSBAUM, A., BURTON, G.A., CAMPBELL, L.M., CIBOROWSKI, J.J.H., DORAN, P.J., INFANTE, D.M., JOHNSON, L.B., READ, J.G., ROSE, J.B., RUTHERFORD, E.S., STEINMAN, A.D., ALLAN, J.D., 2015, Rating impacts in a multi-stressor world: a quantitative assessment of 50 stressors affecting the Great Lakes, *Ecological Applications*, 25(3): 717-728, <https://doi.org/10.1890/14-0366.1>
- SOUCHON, Y., 1998, *Étude de la commission européenne (CE-DGXI) coordonnée par le Centre thématique européen sur les eaux continentales. Spécifications techniques de la Directive Cadre sur l'eau. Tâche 3. La qualité de l'habitat*, OIEAU/Agence de l'Eau RMC/Cemagref LHQ/BEA, 127 p.
- SOUCHON, Y., ANDRIAMAHÉFA, H., COHEN, P., BREIL, P., PELLA, H., LAMOUREUX, N., MALAVOI, J.R., WASSON, J.-G., NAPPEY, E., 2000, *Régionalisation de l'habitat aquatique dans le bassin de la Loire. Synthèse*, Agence de l'eau Loire Bretagne, Cemagref Bely/LHQ, mai 2000, 291 p.
- SOUTHWOOD, T.R.E., 1977, Habitat, the templet for ecological strategies?, *Journal of Animal Ecology*, 46(16): 337-365, <https://www.jstor.org/stable/3817>
- STEEL, E.A., HUGHES, R.M., FULLERTON, A.H., SCHMUTZ, S., YOUNG, J.A., FUKUSHIMA, M., MUHAR, S., POPPE, M., FEIST, B.E., TRAUTWEIN, C., 2010, Are we meeting the challenges of landscape-scale riverine research? A review, *Living Reviews in Landscape Research*, 4(1): 1-60, <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/46187>
- VAN LOOY, K., CAVILLON, C., TORMOS, T., PIFFADY, J., LANDRY, P., SOUCHON, Y., 2013, A scale-sensitive connectivity analysis to identify ecological networks and conservation value in river networks, *Landscape Ecology*, 28(7): 1239-1249, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01073015>
- VAN LOOY, K., PIFFADY, J., TORMOS, T., VILLENEUVE, B., VALETTE, L., CHANDESRI, A., SOUCHON, Y., 2015, Unravelling River System Impairments in Stream Networks with an Integrated Risk Approach, *Environmental Management*, 55(6): 1343-1353, <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0477-1>
- VILLENEUVE, B., PIFFADY, J., VALETTE, L., SOUCHON, Y., USSEGLIO-POLATERA, P., 2018, Direct and indirect effects of multiple stressors on stream invertebrates across watershed, reach and site scales: A structural equation modelling better informing on hydromorphological impacts, *Science of The Total Environment*, 612: 660-671, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01871023>
- VÖRÖSMARTY, C.J., MCINTYRE, P.B., GESSNER, M.O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GLIDDEN, S., BUNN, S.E., SULLIVAN, C.A., LIERMANN, C.R., DAVIES, P.M., 2010, Global threats to human water security and river biodiversity, *Nature*, 467(7315): 555-561, <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- WARD, J.V., 1976, Effects of flow patterns below large dams on stream benthos: a review, in: *Instream flow needs symposium*, ORSBORNE, J.F. AND ALLMAN, C.H. (Eds.), *American Fisheries Society*, p.235-253.
- WASSON, J.G., MALAVOI, J.R., MARIDET, L., SOUCHON, Y. AND PAULIN, L., 1998, *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières*, Cemagref Éditions, 14, 158 p.
- WIENS, J.A., 2002, Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water, *Freshwater Biology*, 47(4): 501-515, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00887.x>