

L'hydromorphologie, une dimension-clé pour l'étude interdisciplinaire des petits hydrosystèmes périurbains (bassin de l'Yzeron, France)

Laurent Schmitt, Loic Grospretre, Pascal Breil, Philippe Namour, Michel Lafont, Hugo Delile, David Eschbach, Nicolas Jacob-Rousseau, Benoit Cournoyer

▶ **To cite this version:**

Laurent Schmitt, Loic Grospretre, Pascal Breil, Philippe Namour, Michel Lafont, et al.. L'hydromorphologie, une dimension-clé pour l'étude interdisciplinaire des petits hydrosystèmes périurbains (bassin de l'Yzeron, France). Bulletin de la Société Géographique de Liège, 2016, 67, pp.161-179. hal-01354049

HAL Id: hal-01354049
https://hal.science/hal-01354049

Submitted on 2 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

BSGLg, 67, 2016, 161-179

L'HYDROMORPHOLOGIE, UNE DIMENSION-CLÉ POUR L'ÉTUDE INTERDISCIPLINAIRE DES PETITS HYDROSYSTÈMES PÉRIURBAINS (BASSIN DE L'YZERON, FRANCE)

Laurent SCHMITT, Loïc GROSPRÊTRE, Pascal BREIL, Philippe NAMOUR, Michel LAFONT, Hugo DELILE, David ESCHBACH, Nicolas JACOB-ROUSSEAU, Benoît COURNOYER

Résumé
Les bassins versants sont des objets d'étude multidimensionnels dont la compréhension exige une approche interdisciplinaire. L'étude du bassin versant de l'Yzeron, marqué par un fort étalement périurbain, présente d'importants changements d'occupation du sol depuis le début du XX^{e} siècle. Cette évolution modifie le fonctionnement de ce bassin sur les plans hydrologique, morphologique, physico-chimique et biologique : élévation de la fréquence des crues d'intensité faible à moyenne, dégradation de la qualité des eaux, formation d'incisions spectaculaires en amont, ensablement en aval, etc. L'ensemble des résultats conduit à des préconisations de gestion innovantes et montre l'importance de la géomorphologie fluviale dans l'étude interdisciplinaire des petits hydrosystèmes périurbains.

Mots clés
hydromorphologie, périurbain, impacts des Rejets Urbains de Temps de Pluie (RUTP), étude interdisciplinaire, typologie de cours d'eau

Abstract
Watersheds are multidimensional objects and their understanding requires an interdisciplinary approach. The study of the Yzeron's watershed, under growing pressure from suburban sprawl, displays important landcover changes since the beginning of the 20th century. This changes modifies the watershed functioning in terms of hydrology, morphology, physical chemistry and biology: increase of flooding frequency of low to medium intensity, introduction of poor quality water, forming spectacular incisions upstream and sanding up downstream, etc. Results allowed us to give several innovative management guidelines and stress the importance of fluvial geomorphology in interdisciplinary researches of small periurban hydrosystems.

Keywords
hydromorphology, periurban area, impacts of urban inflow (UI) and/or combined sewer overflow (CSO), interdisciplinary study, river typology

I. INTRODUCTION

Le poids de l'environnement urbain et périurbain tient en quelques chiffres : environ 80 % de la population des pays dits développés vit dans des zones urbaines et 60 % de la population mondiale devrait y vivre en 2030. Les villes devraient absorber toute la croissance démographique mondiale au cours des quatre prochaines décennies (United Nations, 2010). En France, les derniers recensements font état d'une forte extension des villes avec 76 % de la population résidant en zones urbaines et périurbaines, dont la surface n'occupe que 18 % du territoire. Cette extension est notamment due à la croissance des communes rurales limitrophes des grandes villes par le phénomène de périurbanisation. Dans ces espaces de transition où les surfaces sont partiellement imperméabilisées, les rejets urbains de temps de pluie (RUTP) dans les cours d'eau récepteurs, par des déversoirs d'orages (réseaux unitaires et séparatifs lorsqu'ils sont saturés), ou simplement sous la forme de ruissellement concentré en bordure des chaussées, tendent à se multiplier. Ceci altère aussi bien l'hydrologie, la physico-chimie des eaux, l'hydro-géomorphologie, la biologie (Booth et Jackson, 1997 ; Paul et Meyer, 2001 ; Grapentine *et al*., 2004 ; Lafont *et al*., 2006 ; Namour *et al*., 2007 ; Lafont *et al*., 2008 ; Grosprêtre et Schmitt, 2010), que la microbiologie (Petit *et al*., 2010), ces divers impacts interagissant entre eux de façon complexe (Chocat, 1997 ; Breil *et al*., 2007a ; Schmitt *et al*., 2011). Ceci nous a conduits à mener des recherches à la fois interdisciplinaires, mais aussi appliquées de façon à transférer aux gestionnaires des outils opérationnels adaptés.

Les travaux que nous présentons ici ont été réalisés dans le bassin versant de l'Yzeron (France, Ouest

lyonnais), considéré comme représentatif de ce type de situation en zone de relief modéré (Chocat, 1997). Ce bassin versant est sans doute l'un des plus étudiés et instrumentés en France, notamment grâce au dispositif de l'OTHU (Observatoire de Terrain d'Hydrologie Urbaine) et à un grand nombre de programmes de recherche adossés à cet observatoire. C'est aussi dans ce cadre qu'a été effectuée la thèse de Loïc Grosprêtre (2011) dont nous reprendrons ici quelques éléments. Notons enfin que ces travaux nous ont amenés à étudier, entre autres, des hydrosystèmes de tête de bassin d'ordre 1 voire 2, qui sont rarement pris en compte par les gestionnaires alors que leur linéaire est très étendu et qu'ils constituent un maillon fondamental entre les versants et les cours d'eau de plus grande taille. Le présent article vise à fournir une synthèse, assortie d'éléments novateurs non publiés à ce jour, des principales recherches interdisciplinaires menées dans le bassin de l'Yzeron dans lesquelles l'hydromorphologie a occupé une place centrale.

II. SITE D'ÉTUDE ET TYPOLOGIE DU BASSIN DE L'YZERON

Le bassin de l'Yzeron, d'une superficie de 147 km², est situé à l'ouest de l'agglomération lyonnaise (Figure 1.a). La rivière Yzeron prend sa source à 720 m d'altitude, draine les Monts du Lyonnais et le plateau lyonnais, et conflue après 20 km avec le ruisseau de Charbonnières, son principal affluent. Dans ce secteur amont qui représente la majeure partie du bassin versant, le substratum est essentiellement cristallin et métamorphique (granit, gneiss) et présente une faible épaisseur de formations superficielles meubles de types arènes, colluvions et alluvions anciennes (Chocat, 1997), excepté dans les fonds de vallée de tête de bassin (Preusser *et al*., 2011 ; Delile *et al*., 2016). Les tronçons aval de l'Yzeron et du Charbonnières empruntent une paléo-vallée du Rhône et de la Saône (Mandier, 1988) où les formations superficielles alluviales, fluvio-glaciaires et glaciaires tendent à s'épaissir (Mandier, 1988).

Le réseau hydrographique et les vallées sont plus ou moins encaissés dans le plateau lyonnais et les dépôts hérités. Cet encaissement, de l'ordre de 150 m et à commande aval, puisque déterminé par le niveau de base local du Rhône à la confluence avec l'Yzeron, remonte plus ou moins vers l'amont dans le Plateau lyonnais en fonction de l'importance du débit, donc des surfaces drainées.

La Chaudanne est un affluent de rive gauche de l'Yzeron, de pente moyenne de 5 %, dont le bassin périurbain s'étend sur 3,7 km² et qui présente un écoulement non pérenne (assecs estivaux). La station de mesure de Grézieu-la-Varenne (lieu-dit *Pont de la Barge*) est l'un des sites instrumentés par l'OTHU. Elle est située à 2,96 km en aval de la source de la Chaudanne, de part et d'autre d'un important déversoir d'orages (DO). L'objectif est d'évaluer les impacts des déversements du DO sur le ruisseau.

Au commencement des recherches menées dans le bassin de l'Yzeron, une typologie hydromorphologique a été élaborée (Schmitt *et al*., 2004 ; Figure 1.b) notamment pour guider la localisation de sites de suivi biologique sur le réseau hydrographique de l'Yzeron. En effet, le postulat était que les impacts écologiques de mêmes pollutions diffèrent selon les types hydromorphologiques de tronçons homogènes de cours d'eau, et de façon plus précise que les capacités de dégradation des polluants organiques sont les plus élevées pour les types présentant le plus d'énergie. Nous montrerons que cette typologie est aussi utile pour l'étude d'autres compartiments des cours d'eau du bassin de l'Yzeron.

L'approche, hypothético-déductive, repose sur les acquis de travaux antérieurs menés dans d'autres bassins (Petit, 1995 ; Schmitt, 2001 ; Schmitt *et al*., 2001, 2007). La méthode typologique est détaillée par Schmitt *et al*. (2004) et seules les grandes étapes sont résumées ici : i) découpage du bassin versant en unités hydro-géomorphologiques naturelles (ou écorégions) réalisé par expertise ; ii) sectorisation des cours d'eau à partir de variables de contrôle du système fluvial (écorégions traversées, pente longitudinale, morphologie du fond de vallée, héritages géomorphologiques) ; iii) regroupement des secteurs obtenus pour élaborer une classification de tronçons homogènes. Le bassin de l'Yzeron comprend ainsi 8 types (Figure 1.c) ; iv) collecte de données sur le terrain de variables de réponse traduisant le fonctionnement hydromorphologique ; v) réalisation d'analyses statistiques multivariées pour valider (ou infirmer) la typologie ; vi) caractérisation morphodynamique des types de cours d'eau (Figure 1.d).

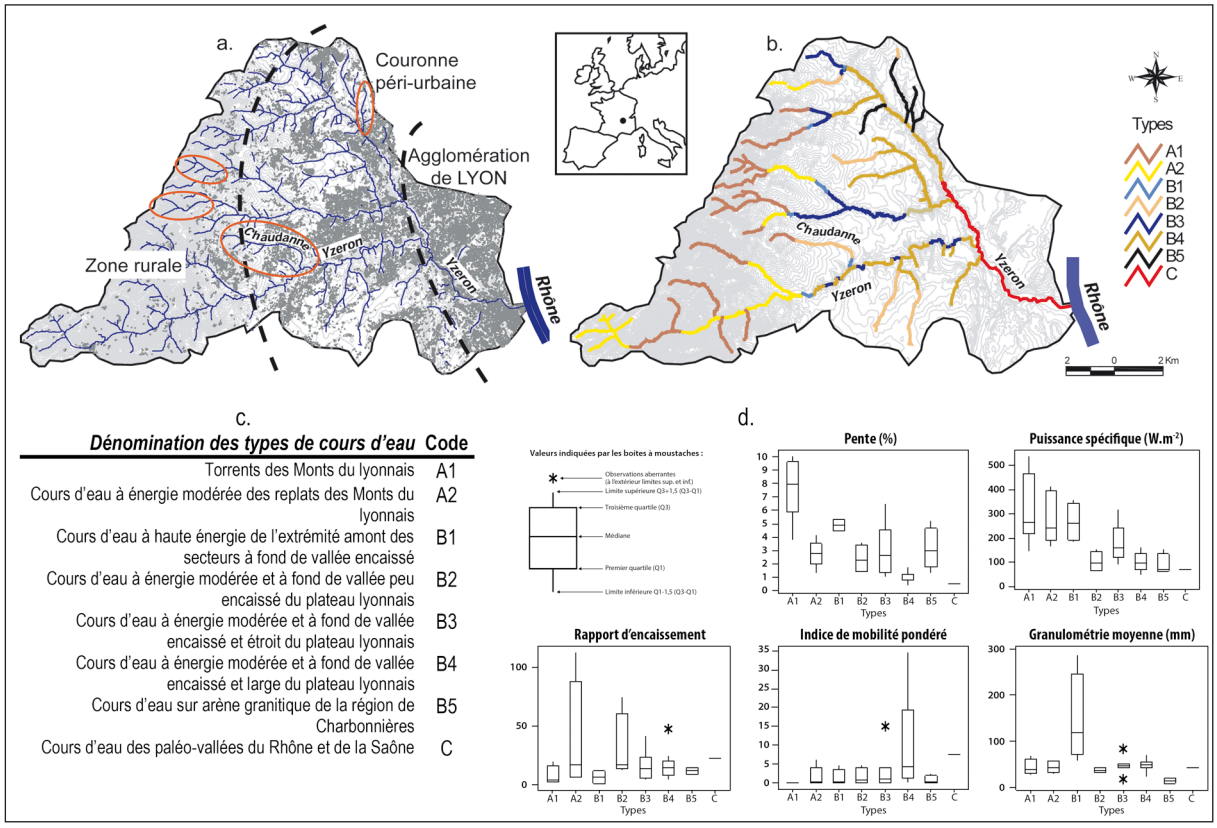


Figure 1. a. Relief, réseau hydrographique et zones artificialisées du BV de l'Yzeron. Les quatre sous-bassins étudiés par Privolt (2009), Delile (2009), Preusser *et al.* (2011) et Delile *et al.* (2016) sont localisés en pointillés ; b. Carte de la typologie hydro-morphologique du bassin de l'Yzeron ; c. Dénomination des types de cours d'eau ; d. Distribution de quelques paramètres géomorphologiques par types de cours d'eau (Schmitt *et al.*, 2004)

III. MÉTHODES

Les données d'occupation du sol du bassin de l'Yzeron sont issues de l'exploitation de diverses sources : les statistiques agricoles annuelles et le recensement général agricole pour le XX^{e} siècle (Cottet, 2005), le cadastre depuis 1826 et ses révisions (Privolt, 2009) et une analyse détaillée de l'ensemble du bassin à partir de photographies aériennes et de données de télédétection (SPOT), à plusieurs dates comprises entre 1945 et 2008 (ANR AVuPUR ; Grosprêtre, 2011). Le suivi hydrologique de la périurbanisation du bassin de l'Yzeron s'appuie sur un réseau de stations hydrométriques du réseau national et de stations implantées par l'IRSTEA de Lyon pour l'OTHU, complété de mesures de RUTP (Chaudanne) et de leur modélisation sur l'ensemble du bassin (Radojevic, 2002 ; Gnouma, 2006).

Sur un plan géomorphologique, outre la typologie présentée plus haut, les méthodes suivantes ont été mises en œuvre : identification et caractérisation des tronçons incisés et ensablés, étude du transport solide (traçage et modélisation des sables et galets), mesures dendrochronologiques pour dater les incisions (Cordier, 2006 ; Grosprêtre, 2011), étude paléo-environnementale de 4 fonds de vallée pour replacer les ajustements morphodynamiques contemporains dans une trajectoire temporelle longue, pluri-séculaire (près de 40 datations ^{14}C et OSL ; Delile *et al.*, 2016) ; seuls les résultats de la Chaudanne seront présentés ici.

De nombreux paramètres relatifs à la physico-chimie de l'eau ont été suivis (COT et COD, NO_2^-, NO_3^- et NH_4^+, PO_4^{3-}, Cr, Pb…), dans les eaux de surfaces et l'hyporhéon, selon les besoins de chaque programme de recherche. Les investigations hydro-écologiques ont reposé sur le concept EASY (Ecological Ambience SYstem) proposé par Lafont (2001). Sans rentrer dans les détails, ce concept met en avant le fait que les écosystèmes aquatiques reflètent les interactions (Figure 2.a) entre les flux (eau, nutriments, polluants), les formes fluviales appelées dans ce cas « unités fonctionnelles » (Figure 2.b) et les biocénoses, le tout formant une « ambiance écologique ». Le groupe

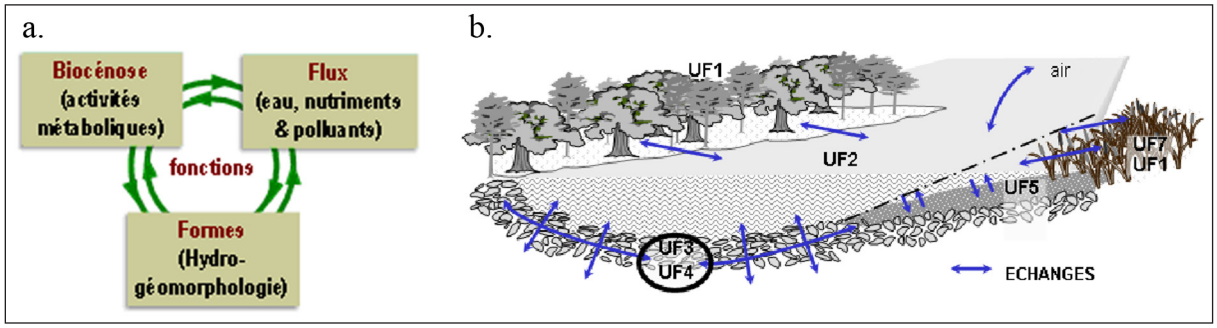


Figure 2. Le concept EASY *Ecological Ambience SYstem* (Lafont, 2001). a. Schéma des interactions entre les flux, les formes et les biocénoses des hydrosystèmes à eau courante. b. Identification des principales unités fonctionnelles d'un tronçon de rivière et des flux liant ces unités, avec le rôle central de la zone de sous-écoulement (hyporhéon) dans les échanges. *UF1 : milieu terrestre rivulaire ; UF2 : masse d'eau ; UF3 : sédiments grossiers superficiels ; UF4 : milieu hyporhéique ; UF5 : sédiments fins ; UF7 : macrophytes. L'UF6 (bancs de sable) et l'UF 8 (substrats plats [« dalle » naturelle ou artificielle]) ne sont pas représentées sur la figure*

pris en compte correspond aux communautés d'oligochètes interstitiels des sédiments grossiers superficiels et hyporhéiques. L'interprétation repose sur des traits fonctionnels, au nombre de 4 (FTrs) : FTr1 = % d'espèces indicatrices d'échanges hydriques entre les compartiments superficiels et hyporhéiques ; FTr2 = % d'espèces polluo-sensibles ; FTr3 = % d'espèces polluo-résistantes ; FTr4 = % d'espèces indiquant une imprégnation des interstices des sédiments par des boues polluées (Vivier, 2006 ; Lafont *et al*., 2006, 2010).

Pour l'étude des impacts des RUTP sur l'Yzeron, nous avons localisé les sites dans une logique de croisement entre deux types de pollutions, urbaine (surtout apports organiques) et rurale (intrants azotés et phosphatés) et deux types hydromorphologiques, le type B3 et le type B4 ; (Schmitt *et al*., 2004 ; Figure 1.c.). La Figure 7 explicite ce croisement. Pour ce qui est de la Chaudanne, ce ruisseau traverse trois types hydromorphologiques : l'amont de type A1, la partie médiane, où sont localisés les RUTP et la station OTHU, de type B2 et la partie aval de type B1 (Figure 1.b et 8).

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Évolution paysagère pluri-séculaire

Le bassin de l'Yzeron présente actuellement un contraste d'occupation du sol marqué entre l'amont rural, l'aval très urbanisé qui appartient à l'agglomération lyonnaise, et la partie médiane périurbaine (Figure 1.a ; Chocat, 1997 ; SAGYRC, 2002 ; Cottet, 2005). Près de la moitié du bassin est aujourd'hui urbanisée (Figure 3.a). Privolt (2009) montre, à partir de l'exemple des 4 sous-bassins étudiés sur le plan paléo-environnemental, une faible évolution de l'occupation du sol durant le XIX^{e} siècle (1826-1914). En milieu «*rural*» (ex. du Bouillon de la Figure 3.b) les labours représentaient alors 40 %-45 % des surfaces et les bois près de 50 %, alors qu'en milieu «*périurbain*» (ex. de la Chaudanne de la Figure 3.b) les forêts étaient quasi-inexistantes et les labours atteignaient plus de 60 % des superficies, occupant préférentiellement les versants. Les fonds de vallée étaient alors souvent en prairie, sans doute en raison de conditions relativement humides.

Cette organisation du paysage a accentué l'érosion des versants et l'exhaussement des fonds de vallée, ce qui s'est probablement aussi produit avant le XIX^{e} siècle (Privolt, 2010). Au cours du XX^{e} siècle, l'évolution de l'occupation du sol a été très significative (Cottet, 2005 ; Grosprêtre, 2011 ; Figure 3.a-b) : les labours ont fortement régressé (de 36 à 12 %), une évolution encore plus nette si l'on ajoute les vignes (de 8 à 0 %) ; les prairies ont légèrement augmenté avant 1930 en lien avec le déclin des labours, pour baisser par la suite du fait de l'extension des zones urbaines ; les forêts sont restées stables autour de 10 % jusqu'à un accroissement à partir de 1970 (18 %) ; les zones urbaines ont connu une forte progression (de 11 à 55 %). La Figure 3.b montre que la principale rupture s'est manifestée entre la première guerre mondiale et 1970, avec la quasi-disparition des labours et le développement des zones urbanisées. Les deux types d'évolutions, auxquels s'ajoute l'extension de la forêt surtout en zone rurale, tendent à induire des incisions (*cf.*

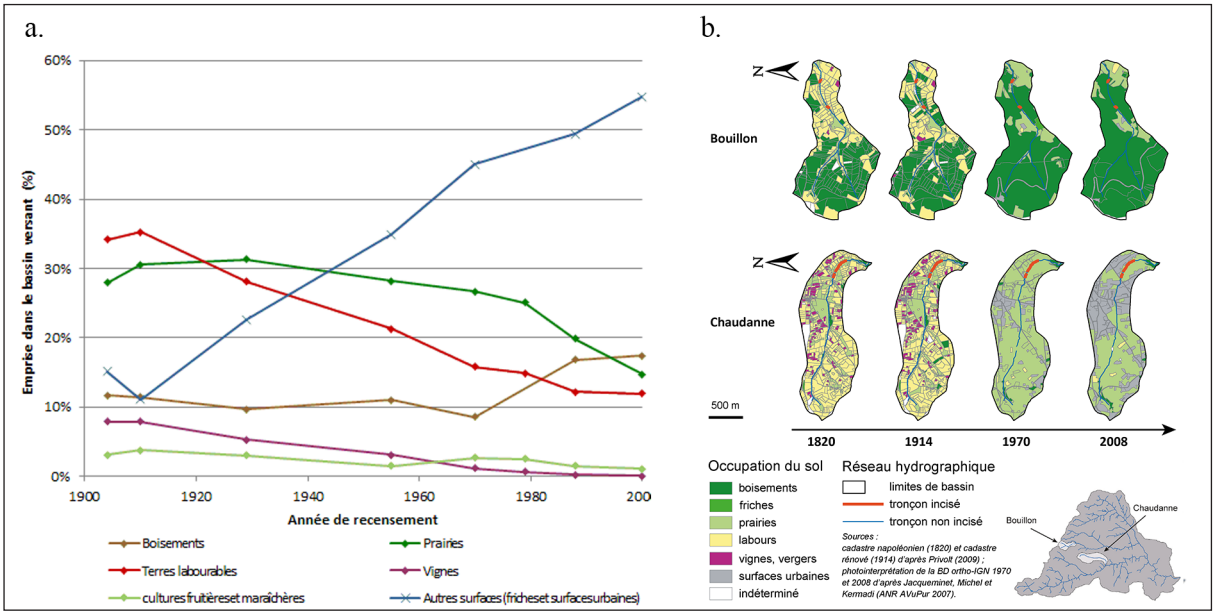


Figure 3. a. Évolution de l'occupation du sol du bassin versant de l'Yzeron au cours du XX^{e} siècle. (sources : statistiques agricoles annuelles, recensement général agricole et inventaire communal ; Cottet 2005) ; b. Évolution de l'occupation du sol pendant les deux derniers siècles de deux sous-bassins représentatifs de la zone périurbaine (Chaudanne) et de la zone rurale (Bouillon) (d'après Grosprêtre, 2011 et Delile *et al*., 2016)

infra). Plus généralement, la modification de l'occupation du sol est à l'origine d'un changement global du cycle de l'eau et des flux de matières associées, qui affecte tous les compartiments de l'hydrosystème comme nous le verrons ci-dessous.

B. Impacts hydrologiques de la périurbanisation

Depuis les années 1970, le nombre de crues inondant l'aval du bassin de l'Yzeron au niveau de la ville d'Oullins (69) s'est sensiblement accru, notamment en lien avec l'extension de l'urbanisation (Radojevic, 2002). Ainsi, sur le Chaudanne en aval du DO susmentionné, le pic de crue principal du 6 et 7 août 2007 (Figure 4.a), qui est presque décennal (1,02 m^3/s), est composé à 50 % par le débit du DO (0,58 m^3/s) dont la période de retour est ici supra-décennale. La Figure 4.b illustre cet effet de façon plus générale en étudiant les pics de crues échantillonnés sur la même station hydrométrique de la Chaudanne. Les points supérieurs correspondent au débit total de la rivière et les points inférieurs correspondent aux apports du DO lors d'événements pluvieux. La comparaison des deux distributions est possible car, sur ce petit bassin, les crues urbaines sont synchrones avec les crues rurales. La contribution des RUTP aux crues de la rivière est en moyenne de 50 % pour les périodes

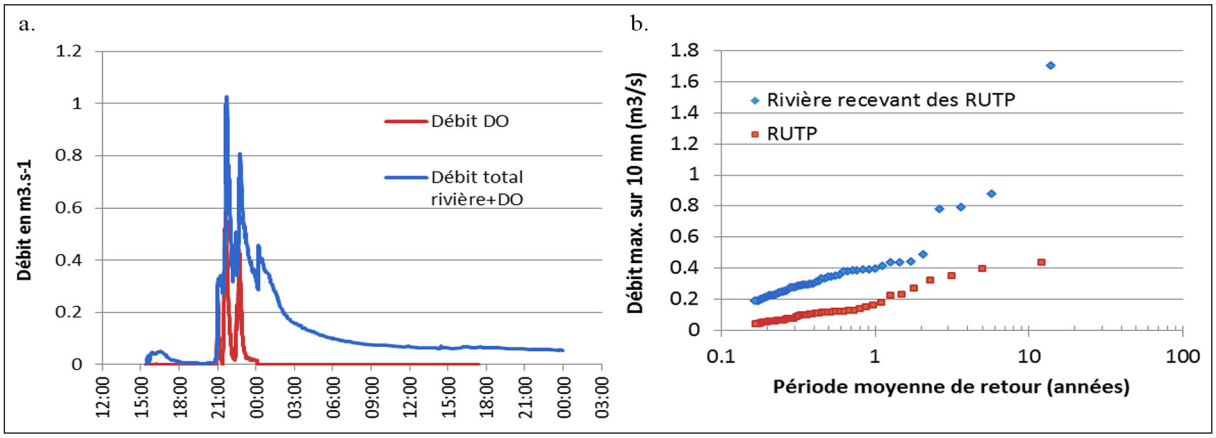


Figure 4. Illustration des impacts hydrologiques de la périurbanisation (Chaudanne, lieu-dit « Pont de la Barge »). a. Décomposition d'un hydrogramme de crue en aval du DO mettant en évidence les apports de ce dernier ; b. Contribution des RUTP aux débits de crue de la Chaudanne. Données : P. Breil, inédit (OTHU, IRSTEA)

de retour allant de 0,2 an à 3 ans. La crue annuelle influencée par le DO correspond ainsi à la crue biennale sans DO.

À l'échelle du bassin de l'Yzeron, on mesure l'ampleur de l'impact des RUTP quand on considère que plus de 300 points de rejet ont été recensés le long des 150 km du réseau de l'Yzeron (Grosprêtre et Schmitt, 2007, 2010 ; Grosprêtre, 2011). Au-delà de la crue décennale, l'influence du DO diminue, d'une part car la partie rurale du bassin produit alors beaucoup de ruissellement, d'autre part car le réseau d'assainissement est saturé et ne permet pas de drainer toutes les surfaces urbaines connectées. Par ailleurs, les crues moyennes à intenses devraient s'accentuer d'ici 2030, d'une part du fait d'une augmentation des cumuls pluviométriques sur plusieurs jours, déjà constatée depuis le dernier quart du XX^{e} siècle (Radojevic *et al*., 2010), et d'autre part en raison des prévisions d'augmentation des surfaces urbanisées (Breil *et al.,* 2010 ; Breil et Chocat, 2011). Notons que les étiages sont également impactés par la ville puisque le réseau d'assainissement, fissuré, draine une part significative des eaux de nappe (Breil *et al*., 2010).

C. Impacts physico-chimiques des Rejets Urbains de Temps de Pluie (RUTP)

En ce qui concerne la qualité de l'eau, il est clair que les réseaux unitaires rejettent dans le milieu récepteur, *via* les DO, un mélange pollué d'eaux usées et d'eaux pluviales. Quelle que soit leur origine (ruissellement pluvial, saturation des réseaux), les RUTP représentent la principale source de pollution des rivières périurbaines (Breil *et al*., 2005 ; Namour *et al*., 2007 ; Angerville, 2009). Toute extension des surfaces imperméabilisées conduit à polluer davantage les écosystèmes récepteurs en lien avec l'augmentation de la fréquence des déversements des DO (Breil *et al*., 2007b).

Les altérations physico-chimiques sont principalement dues à une baisse de l'oxygène dissous, à des apports trophiques conduisant à une eutrophisation du milieu, à des injections de substances toxiques (ex : Zn, Hg, Pb, Cu, Cd, Ni, Cr, HAP - hydrocarbures aromatiques polycycliques, PCB - polychlorobiphénols) et à des apports de substances pharmaceutiques et de divers produits chimiques (détergents, pesticides…) (Eganhouse & Sherblom, 2001 ; Pailler *et al*., 2009 ; Musolff *et al*., 2010). À ces altérations chimiques s'ajoutent des altérations mécaniques dues au rejet de particules minérales telles que le colmatage superficiel et interstitiel (Descloux *et al*., 2010), ainsi qu'une pollution liée au rejet de micro-organismes pathogènes (Vazquez-Prokopec *et al*., 2010 ; Petit *et al*., 2010).

Dans le cas de la Chaudanne en aval du DO, une étude combinant caractérisation géomorphologique, mesure de conductivité hydraulique et analyses de polluants sédimentaires a été menée (Figure 5). Le site d'étude a été subdivisé en trois types de faciès d'écoulement : radier, mouille et plat. Les sédiments benthiques et hyporhéiques ont été échantillonnés systématiquement tous les 2 m le long du cours d'eau. Les polluants particulaires classiques (Cr, Pb, Ptot & Corg) ont été dosés. Les résultats montrent que les polluants ne sont pas répartis aléatoirement dans les sédiments, mais qu'ils s'accumulent préférentiellement dans la zone hyporhéique (valeurs généralement 2 à 3 fois plus élevées que dans le compartiment superficiel, voire davantage), en particulier des radiers (ou seuil naturels), qui constituent un hot-spot de pollution (Namour *et al*., 2015).

Cela s'explique par : i) les flux hydriques hyporhéiques dans les seuils (alternance downwelling-upwelling ; Boulton *et al*., 1998) ; ii) une diminution de la conductivité hydraulique dans les zones aval des radiers et de transition entre radier et mouille (Namour *et al*., 2015) ; et iii) une relative stabilité des radiers par la présence d'une couche superficielle d'armure protégeant de l'érosion les sédiments sous-jacents plus hétérométriques (Bravard et Petit, 2000), dont la fraction fine peut fixer durablement des polluants. Les mêmes observations ont pu être faites sur la Chaudanne en amont du DO dans un contexte de pollution agricole. Ces résultats très novateurs montrent la nécessité de prendre en compte les sédiments hyporhéiques des radiers dans les stratégies d'évaluation de la qualité chimique des rivières.

D. Impacts hydro-écologiques des RUTP

Les résultats montrent tout d'abord, fort logiquement, que le Potentiel Écologique (PE) en surface et dans l'hyporhéos diminue lorsque le pourcentage de surfaces imperméabilisées du bassin augmente (Lafont *et al*., 2006 ; Figure 6). Mais il est intéressant de croiser ces résultats avec la typologie géo-

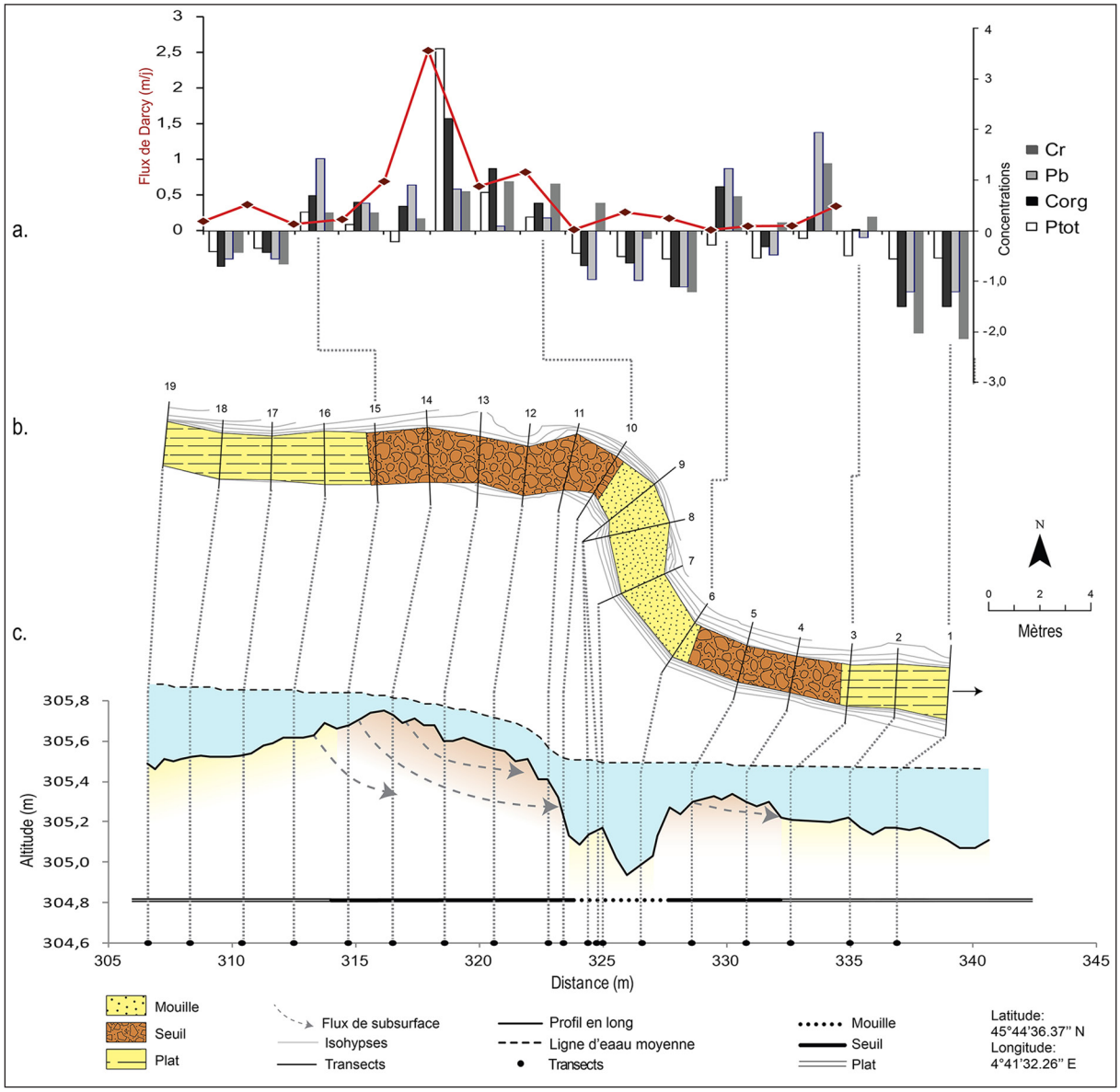


Figure 5. Variations longitudinales de 4 polluants dans l'hyporhéon de la Chaudanne en lien avec les faciès d'écoulement et le profil en long (aval du DO, lieu-dit « Pont de la Barge » ; d'après Namour *et al.*, 2015, modifié) ; (a) axe de gauche : flux de Darcy dans l'hyporéon (m/j) ; axe de droite : teneurs centrées réduites des polluants ; (b) faciès d'écoulement et transects de localisation ; (c) profils longitudinaux de la ligne d'eau moyenne et du talweg du chenal. La ligne horizontale (bas du graphe) délimite les faciès d'écoulement (données géomorphologiques et limnimétriques : B. Moulin & G. Fantino, AEMGEO)

morphologique. Ainsi, la distribution des valeurs du PE ne peut pas être expliquée uniquement par les RUTP. En effet, le type B3 présente des PE plus élevés que le type B4, quels que soient les types de pollutions (excepté l'hyporhéos des sites ruraux où les valeurs du PE sont comparables ; Figure 7). Nous interprétons cela comme la conséquence du fait que les pentes, la granulométrie des fonds et le pourcentage de faciès d'écoulement lotiques (c'est-à-dire des unités fonctionnelles de type UF3 « sédiments grossiers superficiels ») sont plus élevés pour B3 que pour B4. Il résulte des échanges eau superficielle/eau souterraine plus actifs, d'où une meilleure capacité de dégradation de la pollution organique (Breil *et al.*, 2005 ; Jezequel, 2006 ; Schmitt *et al.*, 2011).

La même interprétation peut être faite pour le type B1 et A1 de la Chaudanne (Figure 8). Par contre, la Figure 6 montre que le type B2 est celui qui présente les capacités de recyclage des polluants les plus faibles, pour différents pourcentages de surfaces urbanisées (stations placées sous le modèle Log_2PE - % de surf. urbanisées). Ceci est lié à des

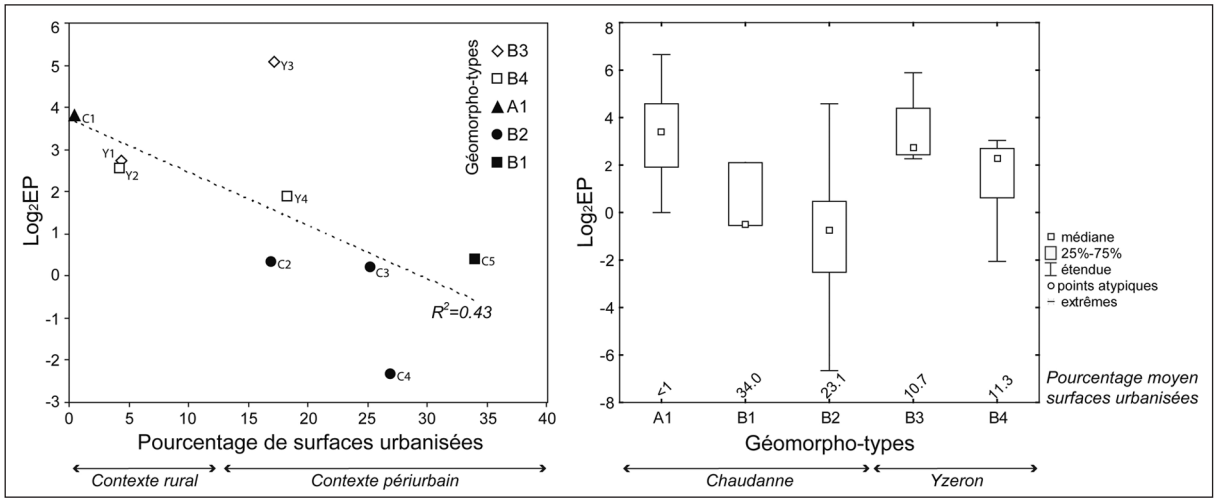
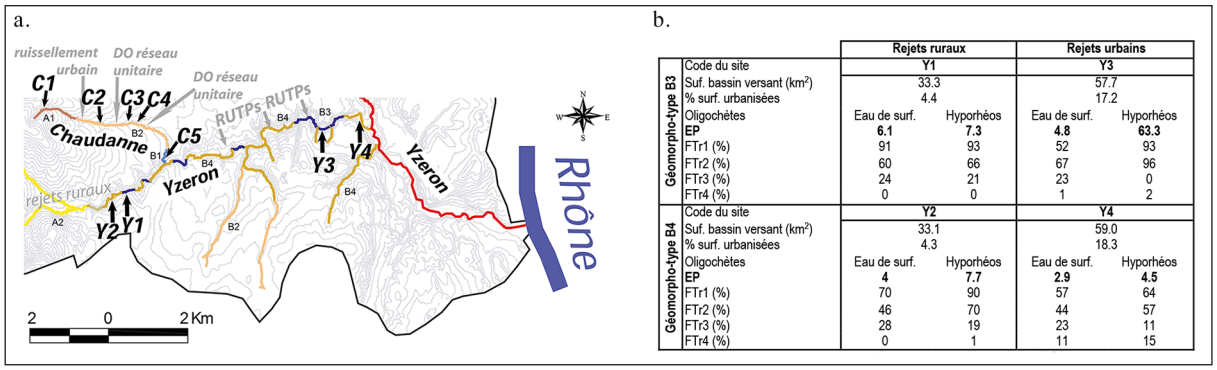


Figure 6. Synthèse des moyennes du potentiel écologique (PE) (surface et hyporhéos), transformé en $\log_2$, pour différents types hydro-géomorphologiques et pourcentages de surfaces urbanisées du BV (d'après Schmitt *et al.*, 2011)



b.

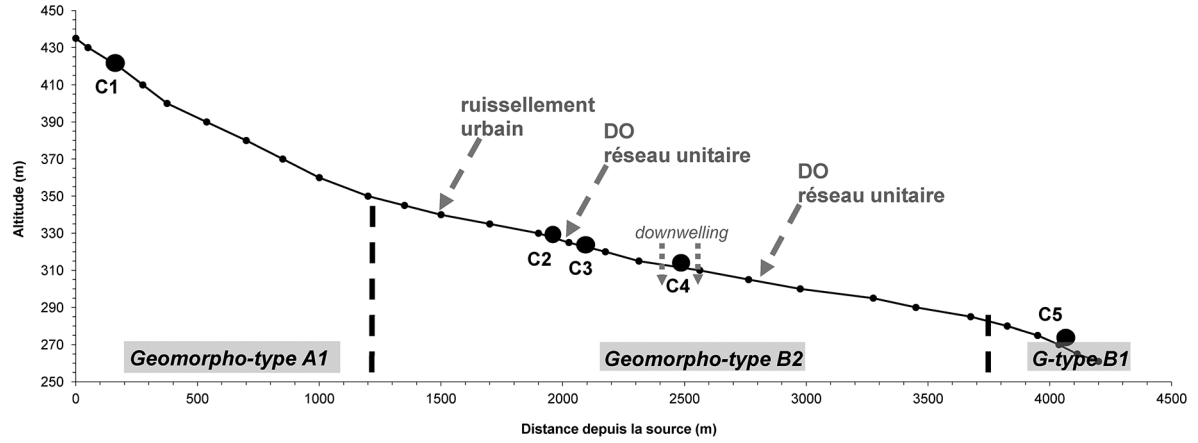
		Rejets ruraux		Rejets urbains	
Géomorpho-type B3	Code du site	Y1		Y3	
	Suf. bassin versant (km²)	33.3		57.7	
	% surf. urbanisées	4.4		17.2	
	Oligochètes	Eau de surf.	Hyporhéos	Eau de surf.	Hyporhéos
	EP	**6.1**	**7.3**	**4.8**	**63.3**
	FTr1 (%)	91	93	52	93
	FTr2 (%)	60	66	67	96
	FTr3 (%)	24	21	23	0
	FTr4 (%)	0	0	1	2
Géomorpho-type B4	Code du site	Y2		Y4	
	Suf. bassin versant (km²)	33.1		59.0	
	% surf. urbanisées	4.3		18.3	
	Oligochètes	Eau de surf.	Hyporhéos	Eau de surf.	Hyporhéos
	EP	**4**	**7.7**	**2.9**	**4.5**
	FTr1 (%)	70	90	57	64
	FTr2 (%)	46	70	44	57
	FTr3 (%)	28	19	23	11
	FTr4 (%)	0	1	11	15

Figure 7. a. Localisation de quatre stations de suivi biologique de l'Yzeron en fonction des types hydro-géomorphologiques (cf. types B3 et B4, selon la légende de la figure 1b) et de la présence ou pas de RUTP. NB : les sites de la Chaudanne sont aussi indiqués b. Résultats hydro-biologiques des zones benthiques et hyporhéiques (d'après Schmitt *et al.*, 2011, modifié)

pentes, des granulométries, des pourcentages de faciès lotiques, et donc des échanges nappe-rivière, plus faibles. Cela explique les faibles valeurs du PE de la station C2, malgré la présence de quelques apports d'eaux pluviales (Figure 8). La Figure 8 montre que le PE reste du même ordre de grandeur immédiatement en aval du DO (station C3) que plus en amont (station C2). Ceci est lié à une pente locale relativement élevée (2,4 %). Par contre, le PE diminue très fortement quelques centaines de mètres en aval (station C4), en particulier dans l'hyporhéos, du fait d'une atténuation locale de la pente (1,1 %) ayant induit un dépôt sableux. Il en découle une moindre capacité de dégradation de la matière organique, ainsi qu'un phénomène de downwelling entraînant les polluants et les stockant dans la zone hyporhéique (Lafont *et al.*, 2006 ; Vivier, 2006). Plus en aval, l'appartenance de la station C5 au type B1, à énergie et granulométrie très élevées (faciès de type marches-cuvettes), explique la ré-augmentation du PE, même si l'éloignement de la station à plusieurs centaines de mètres en aval du dernier point de rejet est aussi un facteur explicatif (Schmitt *et al.*, 2011).

Ces résultats montrent que les impacts écologiques des RUTP diffèrent selon les types géomorphologiques, mais il est également important de tenir compte de la variabilité géomorphologique locale (dépôts sableux dans notre cas), cette variabilité étant elle-même liée aux types de cours d'eau. Le rôle de la géomorphologie, en particulier de la typologie, vis-à-vis des modes de fonctionnement écologique est essentiellement lié aux capacités d'échanges eau de surface/eau souterraine, ce qui est un facteur essentiel dans le fonctionnement

a.



b.

Station	C1		C2		C3		C4		C5	
Géomorpho-type	A1		B2						B1	
Surface drainée	0,3 km²		2,4 km²		2,7 km²		2,8 km²		3,6 km²	
% Urbanisé	<1 %		17,0 %		25,3 %		27,0 %		34,0 %	
Oligochètes	Benthos	Hyporheos	Benthos	Hyporheos	Benthos	Hyporheos	Benthos	Hyporheos	Benthos	Hyporheos
EP	**8,6**	**19,5**	**0,7**	**1,8**	**0,8**	**1,5**	**0,2**	**0,2**	**1,3**	**/**
FTr1 (%)	63	39	34	61	36	51	10	13	56	/
FTr2 (%)	48	38	13	36	13	27	2	3	25	/
FTr3 (%)	10	3	53	39	49	42	44	31	32	/
FTr4 (%)	2	0	17	13	15	11	32	50	31	/

Figure 8. a. Profil longitudinal de la Chaudanne montrant la localisation des types hydro-géomorphologiques, des stations de suivi biologique et des apports urbains ; b. Résultats hydro-biologiques des zones benthiques et hyporhéiques (d'après Schmitt *et al*., 2011, modifié)

des écosystèmes aquatiques (Dahm *et al*., 1998 ; Jones et Mulholland, 2000 ; Hancock *et al*., 2005 ; Boulton et Hancock, 2006).

E. Ajustements morphodynamiques

Le dysfonctionnement géomorphologique le plus marqué est le phénomène d'incision, qui pose des problèmes de gestion comme la déstabilisation d'ouvrages (buses, ponts…), des pertes foncières, la déstabilisation de versants (glissements de terrain…), l'abaissement du niveau piézométrique et l'appauvrissement biologique par érosion de la zone hyporhéique (Schmitt, 2002 ; Cordier, 2006 ; Grosprêtre et Schmitt, 2007). Un levé systématique de toutes les incisions du bassin de l'Yzeron, ainsi que des points de rejets, a été effectué par Grosprêtre (2011 ; Figure 9) de façon à montrer la structure spatiale des incisions et à identifier les facteurs pouvant déclencher et/ou favoriser les incisions.

Les RUTP, en apportant un surplus d'eau à la rivière (élévation des puissances) sans une charge sédimentaire associée, augmentent la fréquence des incisions en têtes de BV d'un facteur 2,5 et les volumes de sédiments déstockés de 77 % (Figure 10.b). Des incisions peuvent néanmoins survenir en l'absence de RUTP, en zone rurale (Grosprêtre, 2011). Les incisions en contexte périurbain se développent en général sur une profondeur de 1 à 2 m, mais peuvent atteindre 4 m (Figures 10.a et 11.a) ! Il s'ensuit fréquemment un élargissement des chenaux par érosion des berges, qui se trouvent déstabilisées après dépassement de la hauteur critique des berges. Il est remarquable de constater que certains types géomorphologiques (types B4, B5 et B2) présentent une sensibilité à l'incision nettement plus élevées que d'autres (Figure 10.c). Dans le Plateau lyonnais, avec une même abondance de RUTP, cette différence de sensibilité à l'incision selon les types est à mettre en relation avec la morphologie des fonds de vallée et la granulométrie du fond des chenaux, deux paramètres intégrés dans la typologie. La sensibilité à l'incision des types B2 et B4 s'explique par le fait que les fonds de vallée, plus ou moins encaissés dans le plateau, sont alluviaux. Les incisions ne sont donc pas limitées par des affleurements rocheux.

A contrario, le type B3 est peu sensible à l'incision car ce type présente des fonds de vallée étroits et encaissés dans le plateau (granulométrie élevée, nombreux affleurements rocheux) dans lesquels les incisions surviennent difficilement. Le même

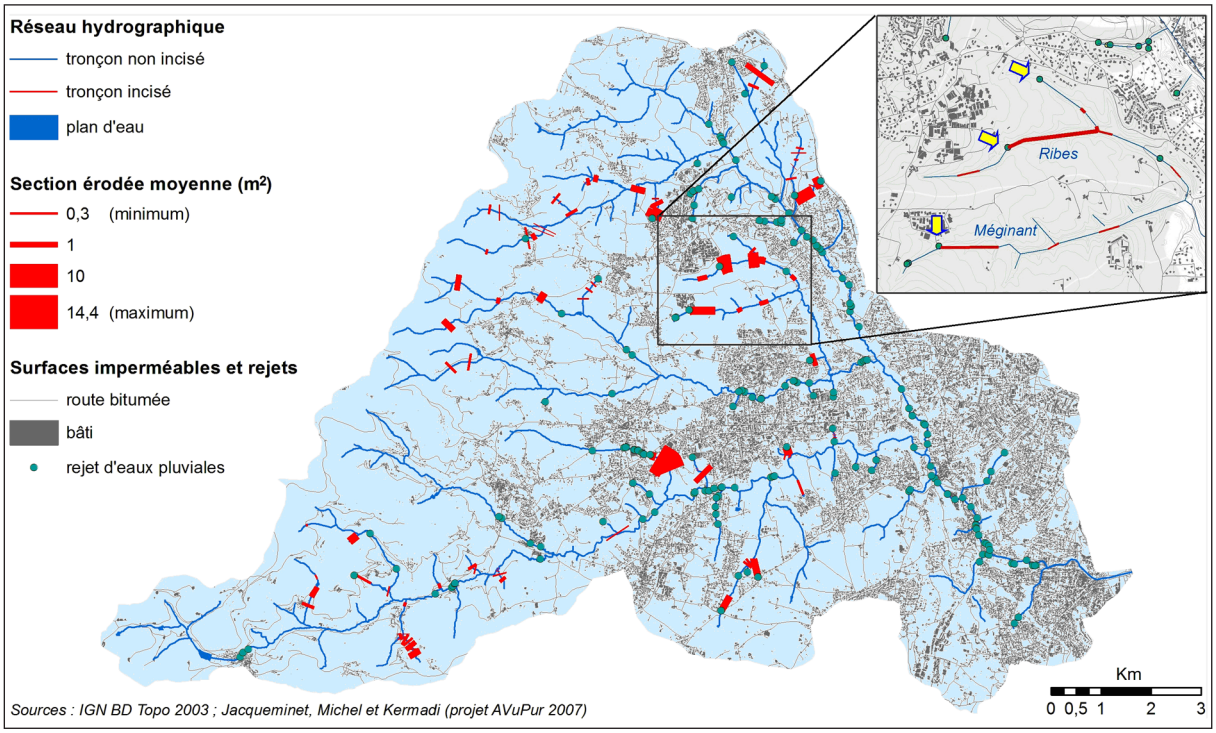


Figure 9. Inventaire des tronçons incisés. Les sections érodées moyennes, représentées par l'épaisseur des tronçons en gris foncé, correspondent aux sections à pleins bords des tronçons incisés desquelles ont été soustraites les sections théoriques à pleins bords sans incision établies à partir de relations de géométrie hydraulique longitudinale. Le produit de ces sections érodées par les linéaires incisés correspond aux volumes déstockés par les incisions (d'après Grosprêtre, 2011, modifié)

raisonnement vaut pour le type B1. Pour ce qui est du type B5, sa sensibilité à l'incision est liée à la granulométrie essentiellement sableuse du fond des chenaux (secteur des arènes granitiques). Notons enfin qu'aucune incision n'a été observée sur des drains dont les surfaces drainées dépassent 4 km² (Grosprêtre, 2011). Ce seuil de taille de bassin, qui n'a de sens que pour l'Yzeron, a deux explications : i) au-delà de ce seuil, les apports hydriques des RUTP ne sont plus significatifs par rapport aux écoulements naturels ; ii) les affleurements rocheux sont plus fréquents pour les drains plus grands.

Précisons que ce seuil ne signifie pas que les RUTP ne produisent aucun effet sur la morphologie des cours d'eau drainant une surface supérieure à 4 km². En modifiant l'équilibre entre les flux liquides et solides, ils peuvent induire des changements moins spectaculaires au niveau de la géométrie en travers des chenaux (Navratil *et al.*, 2013).

Les sédiments déstockés par les incisions tendent à se déposer plus en aval, conduisant en partie à l'ensablement des branches principales du réseau hydrographique de l'Yzeron. Les problèmes de gestion posés par l'ensablement sont surtout écologiques : uniformisation des faciès d'écoulement par comblement des mouilles, dégradation des habitats piscicoles par colmatage des frayères (Grosprêtre & Schmitt, 2010). L'estimation d'un budget sédimentaire annuel moyen des sables par Grosprêtre (2011), dont la méthode assez lourde ne peut être détaillée ici, montre que les érosions du lit et des berges des tronçons incisés représentent 30 à 60 % du volume annuel moyen de sable transporté par l'Yzeron. Ceci prouve que les incisions contribuent significativement à la fourniture sableuse des tronçons aval, donc à leur ensablement.

Là aussi, certains types géomorphologiques présentent plus d'ensablement que d'autres, à savoir les types C, B3 et B4 (Figure 10.d). Cela s'explique en premier lieu par l'influence de la pente. Les types C et B4 présentent effectivement les pentes les plus faibles, respectivement 0,5 et 0,9 %. En revanche, la pente n'explique pas l'ensablement important du type B3, dont la pente est élevée (3,05 %). Pour ce type, l'ensablement s'explique par le fait qu'il contient un nombre élevé de barrages artificiels d'une chute supérieure à 1 m, l'ancrage des ouvrages étant facilité par l'étroitesse des fonds de vallée.

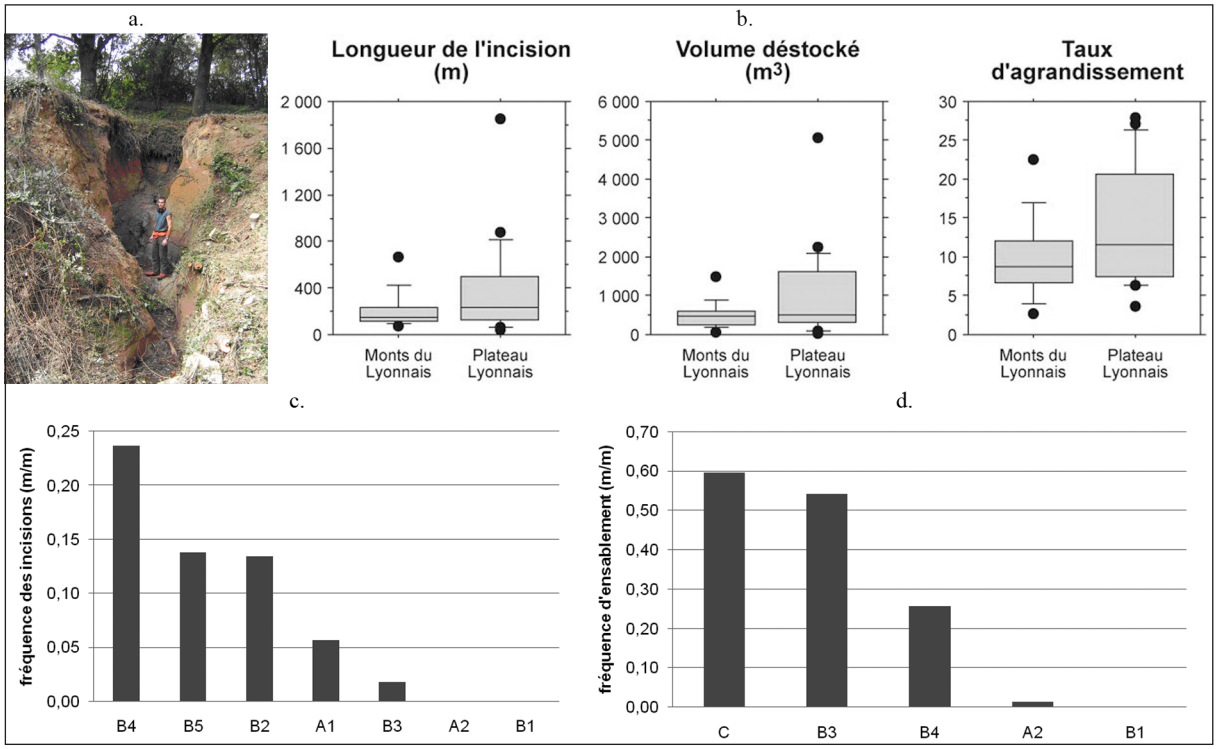


Figure 10. Illustration et éléments de diagnostic des ajustements géomorphologiques des cours d'eau dans le bassin de l'Yzeron. a. Photo d'une incision de près de 4 m ! (copyright : R. Roy) ; b. Caractérisation des incisions en fonction de leur localisation générale dans le bassin ; les Monts du Lyonnais sont ruraux alors que le Plateau lyonnais est périurbain et présente de nombreux RUTP (d'après Grosprêtre, 2011) ; c. et d. Fréquences « linéaires » des principaux ajustements géomorphologiques dans le bassin de l'Yzeron (a.- incision et b.- ensablement) en fonction des types hydro-géomorphologiques (d'après Grosprêtre, 2011). NB : Dans le cas des incisions, seuls les sous-bassins d'une taille inférieure à 4 km^2 ont été pris en compte (cf. texte)

F. Intérêt du temps long pour la compréhension des ajustements morphodynamiques récents

Pour expliquer l'origine des incisions en zone rurale et comprendre pourquoi les incisions en zone périurbaine peuvent atteindre de telles ampleurs comme l'illustrent les Figures 10.a et 11.a, nous avons mené des recherches paléo-environnementales sur quatre tronçons fortement incisés représentatifs des deux types de paysages du bassin de l'Yzeron, périurbains et ruraux (Figure 1.a). Nous livrons ici les résultats acquis sur la Chaudanne, quelques centaines de mètres en aval du lieu-dit « Pont de la Barge » et où l'incision est particulièrement marquée. Ceux des trois autres sous-bassins étudiés, qui donnent des résultats comparables dans les grandes lignes, sont disponibles dans Privolt (2009), Delile (2009), Preusser *et al*. (2011) et Delile *et al*. (2016). Pour ne pas alourdir le propos, nous ne donnons ici que les dates OSL et deux dates ^{14}C sur deux souches, sans intégrer les datations sur charbons de bois qui, sans contredire les datations OSL, complètent celles-ci (Delile *et al*., 2016).

La Figure 11 donne la topographie de la berge. Les sédiments sont essentiellement sableux, mais peuvent aussi contenir des passées de graviers et des limons. La stratification et les valeurs d'indice de tri indiquent qu'il s'agit essentiellement d'alluvions et non de colluvions, ce qui est confirmé par la topographie, transversalement plate, du fond de vallée. Les souches présentes au fond du chenal incisé, des genres *Populus, Salix* et *alnus* (*glutinosa/incana*) (déterminées par Sarah Ivorra), appartiennent à une ripisylve du passé marquant un ancien niveau du fond de vallée. Les âges radiocarbones sont 1470-1620 AD (ULA-1141 ; 355 ± 20 14C BP) à une profondeur de 350 cm, et 1520-1650 AD (ULA-1140 ; 285 ± 20 14C BP) à une profondeur de 220 cm et à 30 m en amont de la coupe. Ces dates révèlent un exhaussement de 3,5 m depuis environ 5 siècles.

De façon plus détaillée, l'interprétation de l'ensemble des 7 datations OSL conduit à une chronologie de l'évolution morpho-sédimentaire résumée ci-après (Figure 12) : i) aggradation entre le XVI^e siècle et la fin du XVIII^e siècle en raison de l'érosion

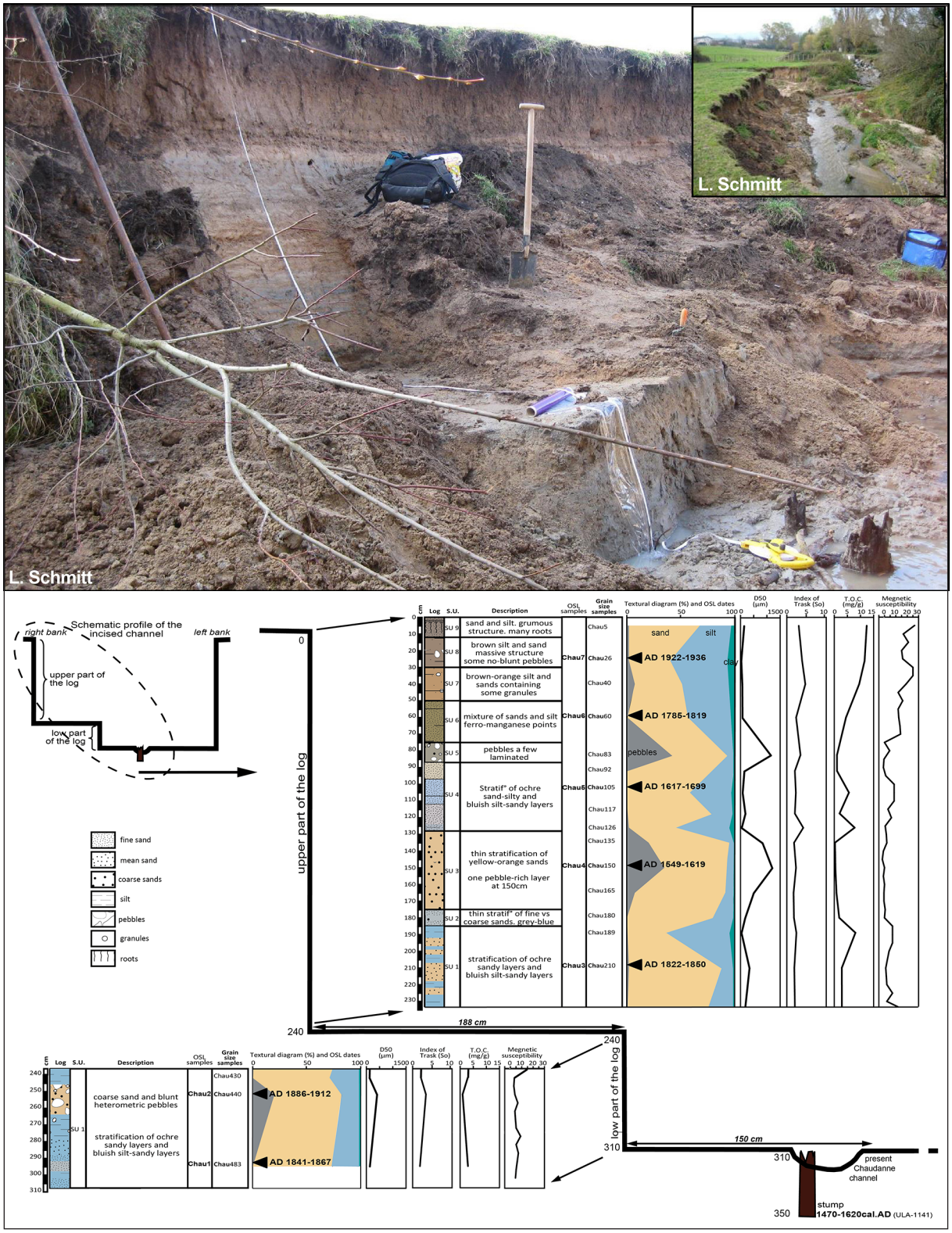


Figure 11. Illustration de l'étude paléo-environnementale de la Chaudanne sur une berge d'un tronçon fortement incisé (Lieu-dit « La Léchère »). a. Photo (copyright : L. Schmitt) et b. Log stratigraphique et profil topographique schématisé de la berge. Les échantillons OSL CHAU1-2 ont été prélevés sur une banquette inférieure de la berge (d'après Preusser *et al.*, 2011 et Delile *et al.*, 2016)

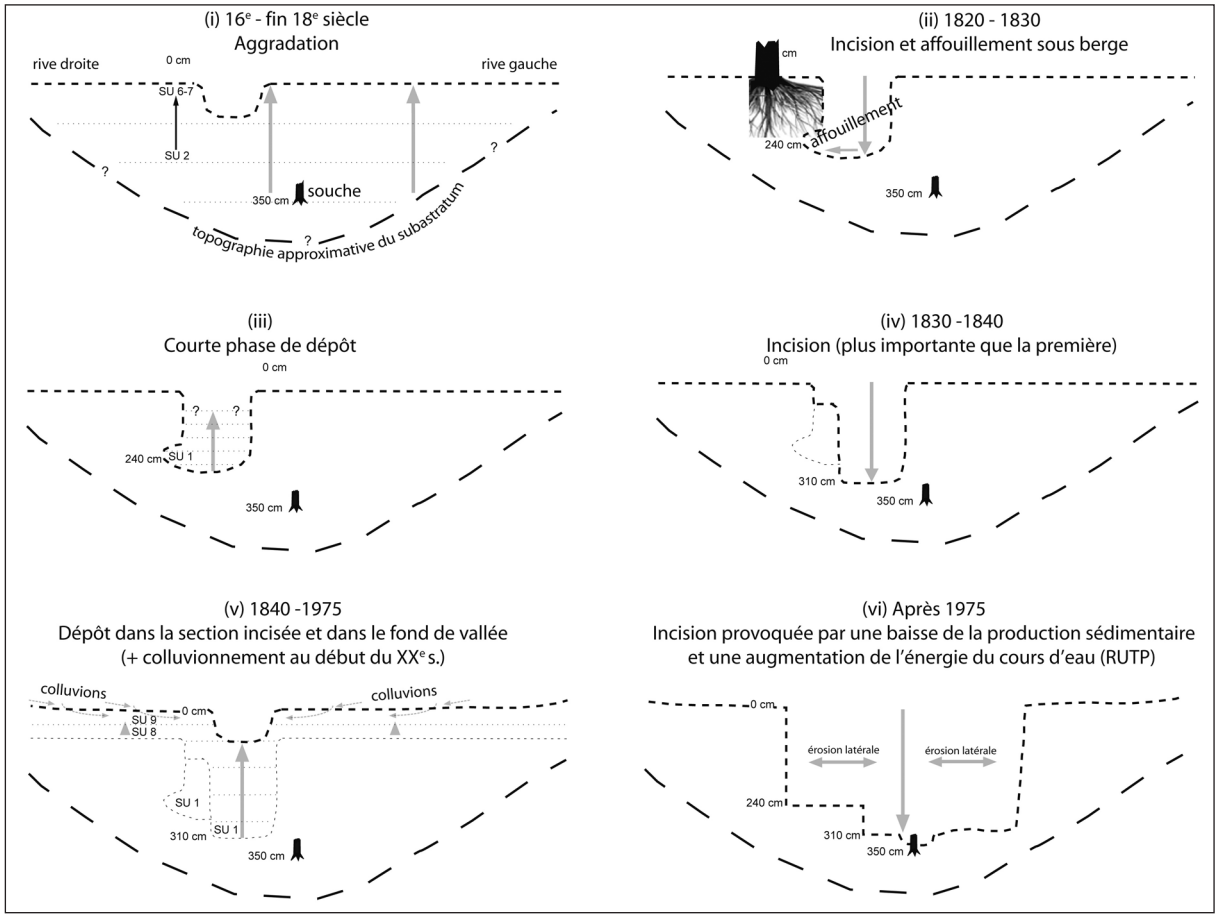


Figure 12. Schémas des phases de sédimentation et d'érosion du chenal et du fond de vallée de la Chaudanne. Les altitudes relatives sont données en valeurs relatives de façon à être comparables avec celles de la figure précédente (Delile *et al.*, 2016)

des labours (*cf. supra*) et de la détérioration climatique du Petit Âge Glaciaire (PAG ; Delile *et al*., 2016). De telles évolutions ont aussi été enregistrées dans le Sud et le centre de la France (Bravard, 2002 ; Allée, 2003 ; Bertran, 2004 ; Miras *et al*., 2004 ; Jacob *et al*., 2006) ; ii) brève incision durant la période 1820-1830 liée à une période particulièrement sèche entre 1820-1840 en zone méditerranéenne, notamment en termes de régime pluviométrique (Bravard, 2002 ; Jacob-Rousseau et Astrade, 2010). Ceci montre qu'au cours du XIXe siècle des variations climatiques de durées relativement courtes ont pu faire varier l'intensité du couplage versant-rivière et induire d'importantes évolutions morphologiques ; iii) rapide phase de dépôt avec comblement de la zone affouillée auparavant ; iv) deuxième phase d'incision également rapide (1830-1840) ; v) sédimentation durant la seconde moitié du XIXe siècle et le XXe siècle jusqu'environ 1975 ; vi) début d'érosion vers 1975 (d'après des mesures dendrochronologiques effectuées sur la ripisylve du linéaire incisé ; Grosprêtre, 2011) d'une dernière phase d'incision, plus importante verticalement et latéralement que pour les incisions antérieures, liée à l'importante augmentation de l'énergie en crue imputable aux RUTP. La diminution de la fourniture sédimentaire du bassin causée par le déclin des labours depuis le début du XXe siècle a augmenté la sensibilité à l'incision et explique la formation d'incisions en zone rurale.

Ce modèle d'évolution est cohérent avec ceux proposés par Liebault et Piégay (2002) et Bravard (2002) pour des rivières plus grandes du bassin du Rhône, mais il apparaît aussi plus complexe. Cette complexité semble imputable, du moins en partie, à la forte sensibilité des petits bassins de zones de relief modéré aux changements climatiques et aux modifications de l'affectation du sol, comme le montrent aussi Allée et Lespez (2006).

En faisant le lien entre la dynamique morpho-sédimentaire des têtes de bassin et les problèmes d'ensablement évoqués plus haut, il apparaît que

l'excès de sable constaté actuellement en aval est partiellement lié à l'érosion des terres agricoles au cours des derniers siècles, mais ce transfert, par cascade, s'est opéré par le biais d'une zone de stockage intermédiaire que sont les fonds de vallée de têtes de bassins. Sans l'importante aggradation des fonds de vallée, de parfois plus de 3,5 m en moins de cinq siècles, les incisions actuelles seraient moins importantes car elles seraient limitées par des affleurements rocheux, et la sensibilité à l'incision serait moins marquée (Viallon, 2008).

Par ailleurs, comme nous avons montré que certains types de cours d'eau présentent une plus grande sensibilité à l'incision que d'autres, et que l'aggradation des fonds de vallée au cours des derniers siècles, suivie du déclin des labours depuis un siècle, favorise les incisions, il est intéressant de chercher à établir un lien entre les types de cours d'eau et l'importance de l'aggradation des fonds de vallée au cours des derniers siècles. En d'autres termes, les différents types de cours d'eau (et de fonds de vallée) présentent-ils des capacités d'enregistrement sédimentaire significativement différentes ? Comme nous ne disposons de données paléo-environnementales que sur quatre sous-bassins, et que la typologie comprend sept classes, il est impossible de répondre à cette question. Néanmoins, nous pouvons avancer quelques éléments à partir de notre expertise de terrain, en particulier à partir de l'abondance des affleurements rocheux que présentent les différents types de cours d'eau. Il en découle clairement que les types présentant les plus faibles capacités d'enregistrement dans les fonds de vallée sont les types B1 et B3. Il est intéressant de constater que ces résultats rejoignent bien les données de la Figure 10.c. qui indiquent que ces deux types sont parmi les moins sensibles aux incisions.

V. CONCLUSION : PROPOSITION D'UN MODÈLE INTERDISCIPLINAIRE ET PRÉCONISATIONS DE GESTION

L'ensemble des résultats interdisciplinaires acquis dans le bassin de l'Yzeron est particulièrement riche, aussi bien sur les plans scientifique qu'opérationnel. Nous nous limiterons à une conclusion succincte en ne revenant que sur les points les plus marquants. La chaîne d'impacts induits par les RUTP concerne tous les compartiments de l'hydrosystème, de l'hydrologie et la physico-chimie à l'hydromorphologie et l'hydro-écologie, ces compartiments étant étroitement interdépendants ce qui explique des rétroactions. L'ensemble des interactions est détaillé dans le modèle conceptuel interdisciplinaire PHYPUR (Petit HYdrosystème PériURbain ; Figure 13), qui pourra être utile pour d'autres recherches, mais aussi pour communiquer sur les impacts des RUTP.

À titre d'exemple, les rejets peuvent induire des incisions, entraînant elles-mêmes un ensablement plus en aval, ces deux évolutions morphodynamiques pouvant conduire à des altérations écologiques. Il est cependant remarquable de constater que les impacts écologiques et les ajustements morphodynamiques sont plus ou moins importants et/ou fréquents selon les types hydromorphologiques de cours d'eau. Ainsi, sur la base de la typologie, Jezequel (2006) a dressé une carte de la capacité de dégradation des polluants organiques. De même, il est possible de cartographier la sensibilité à l'incision, ainsi qu'à l'ensablement, du réseau hydrographique. Il est remarquable de constater que ce sont les mêmes types qui présentent à la fois la meilleure capacité de dégradation des pollutions organiques et la moindre sensibilité à l'incision : il s'agit des types B1 et B3 (et dans une moindre mesure aussi A1 et A2), qui sont à haute énergie, granulométrie grossière et fonds de vallée étroits. À une échelle locale, comme l'hyporhéon des radiers constitue un hot-spot de polluants, ce compartiment doit être considéré comme de première importance dans l'évaluation de la qualité chimique des rivières. Les résultats hydro-écologiques soulignent aussi l'importance de suivre la zone hyporhéique, en plus du compartiment benthique.

Sur un plan opérationnel, en plus des recommandations détaillées par ailleurs par Schmitt *et al*. (2008), Grosprêtre et Schmitt (2010) et Grosprêtre (2011), nous insisterons ici sur un certain nombre de points. La stratégie d'assainissement du « tout au tuyau » n'est pas soutenable et il est indispensable de s'orienter vers des techniques alternatives moins perturbatrices pour le cycle de l'eau, ce qui est la règle en théorie (mais n'est pas appliquée systématiquement) : revêtements poreux, noues, réseaux d'assainissement séparatifs, bassins de rétention ou d'infiltration, bassin décanteur avec filtres à roseaux, etc. Les RUTP, qu'ils soient traités ou pas (même en cas de traitement de la qualité des eaux, il reste des pollutions), devraient être positionnés,

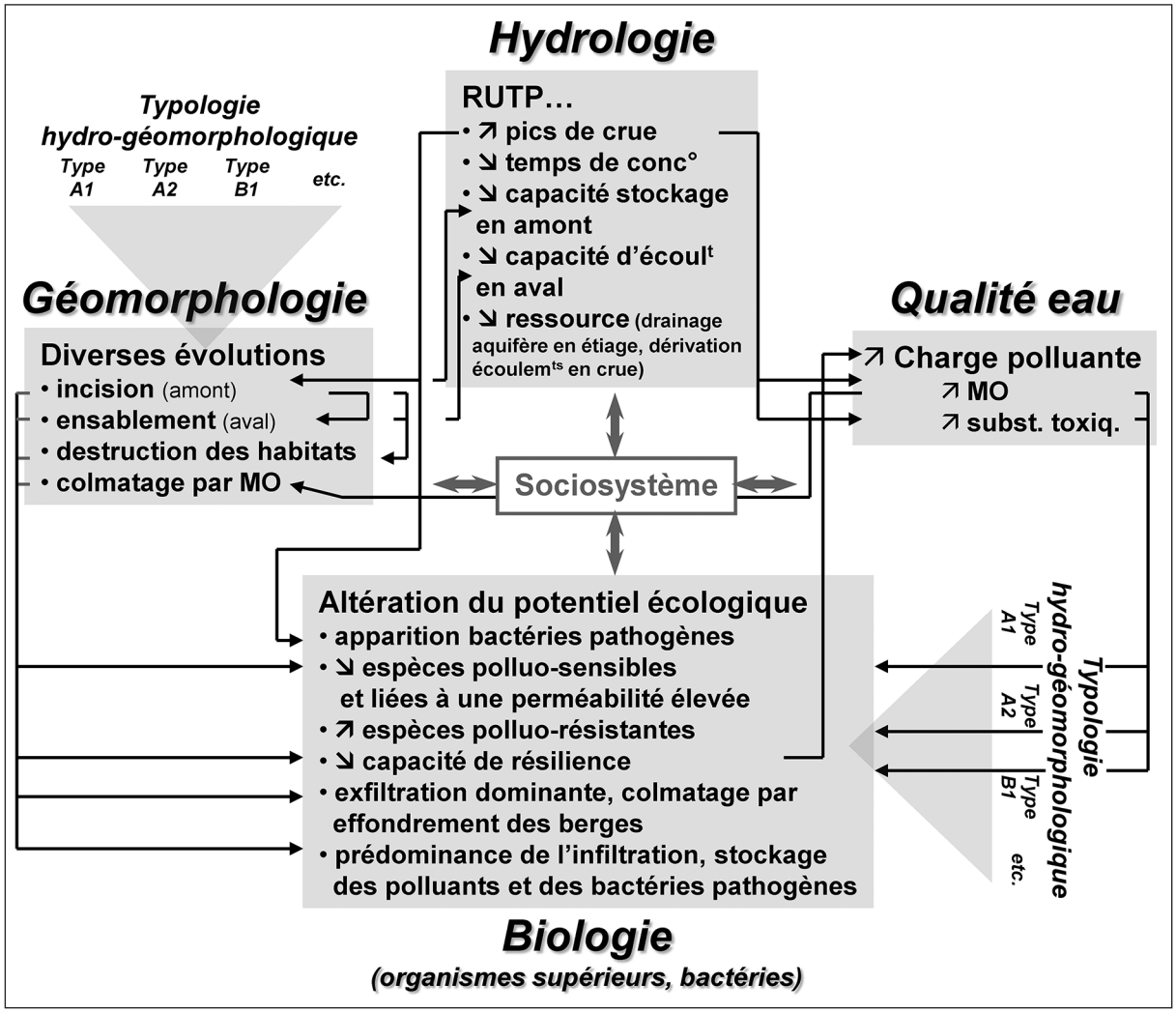


Figure 13. Modèle conceptuel PHYPUR (Petit HYdrosystème PériURbain) des interactions entre les différents compartiments d'un petit hydrosystème impacté par des RUTP

voire déplacés, dans les types hydromorphologiques les plus aptes à dégrader les polluants organiques et les moins sensibles à l'incision : les types B1, B3, A1 et A2.

On limitera aussi les incisions en ne rejetant que dans des tronçons drainant une aire supérieure à 4 km², une valeur qui n'est valable que dans le bassin de l'Yzeron. Pour les incisions ayant commencé à se former, excepté les tronçons à enjeux forts, le principe général de gestion est la non-intervention contrôlée. Outre son moindre coût, cette approche permet au lit fluviatile de s'ajuster librement aux nouvelles conditions d'écoulement.

Compte tenu de la diminution de la fourniture sédimentaire depuis un siècle, de nouvelles incisions devraient encore se développer dans le bassin de l'Yzeron, avec ou sans RUTP. Les résultats paléo-environnementaux soulignent l'importance de replacer les ajustements géomorphologiques contemporains dans des trajectoires temporelles longues. Malgré la tendance générale à l'incision, il est nécessaire que les gestionnaires réduisent les impacts hydrologiques des RUTP car nous avons vu que ces derniers augmentent significativement l'ampleur des incisions, et donc aussi l'ensablement en aval. Dans tous les cas, il est bien sûr indispensable d'assurer un suivi environnemental interdisciplinaire.

En définitive, ces recherches montrent comment la géomorphologie fluviale peut occuper une place d'importance dans les recherches interdisciplinaires, fondamentales et appliquées, sur les impacts environnementaux des villes sur les cours d'eau et plus particulièrement sur la gestion des rivières périurbaines impactées par des RUTP.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement pour leur aide Isabelle Braud, Céline Jézequel, Adrien Barra, Anne Vivier, Marilyse Cottet, Jean-Paul Bravard, Sarah Ivorra, Guillaume Fantino et Bertrand Moulin. Les recherches dont nous avons présenté ici une synthèse ont été soutenues financièrement par l'OTHU (Observatoire de Terrain d'Hydrologie Urbaine), le SAGYRC (Syndicat d'Aménagement et de Gestion de l'Yzeron, du Ratier et du Charbonnières), l'Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée, Corse, la Région Rhône-Alpes, la Communauté Urbaine de Lyon, le CNRS, l'Agence Nationale de la Recherche (projets CES INVASION coordonné par B. Cournoyer, Ecotech EPEC coordonné par J. Boisson et AVuPUR coordonné par I. Braud) et la ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône).

BIBLIOGRAPHIE

Allée, P. (2003). Dynamiques hydrosédimentaires actuelles et holocènes dans les systèmes fluviaux de moyenne montagne. Habilitation à diriger des recherches, volume 2, dossier scientifique, Geolab-CNRS UMR 6042 Clermont-Ferrand, Université de Limoges, 410 p.

Allée, P. & Lespez, L. (2006). De l'océanique au méditerranéen, la disparité des réponses morpho-sédimentaires holocènes, dans les massifs anciens européens. Dans Allée P. et Lespez L., *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement* (203-214). Clermont-Ferrand (France) : Presses Universitaires Blaise-Pascal.

Angerville, R. (2009). *Évaluation des risques écotoxicologiques liés au déversement de Rejets Urbains par Temps de Pluie (RUTP) dans les cours d'eau : Application à une ville française et à une ville haïtienne*, (thèse de doctorat). Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, (France).

Bertran, P. (2004). Soil erosion in small catchments of the Quercy region (southwestern France) during the Holocene. *The Holocene*, 14(4), 597-606.

Booth, D.B. & Jackson, C.R. (1997) Urbanization of aquatic systems: Degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(5), 1077-1090.

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H. & Valett, M.H. (1998). The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 29, 59-81.

Boulton, A.J. & Hancock, P.J. (2006). Rivers as groundwater-dependent ecosystems: a review of degrees of dependency, riverine processes and management implications. *Australian Journal of Botany,* 54, 133-144.

Bravard, J.P. & Petit, F. (2000). *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Paris : Armand Colin, 222 p.

Bravard, J.P. (2002). Les réponses des systèmes fluviaux à une réduction des flux d'eau et de sédiments sous l'effet du reboisement en montagne. *La Houille Blanche*, 3, 68-71.

Breil, P. (2005). Aquatic Habitat in Integrated Water Management: Special issue Summary, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 5(4), 351-353.

Breil, P., Lafont, M., Namour, Ph., Perrin, J.F., Vivier, A., Bariac, Th., Sebilo, M., Schmitt, L., Chocat, B., Aucour, A.M. & Zuddas, P. (2005). *Dynamique du Carbone et de l'Azote en rivière dans un gradient rural - urbain*, communication présentée au 1er colloque de restitution scientifique du Programme National/ACI « Ecosphère continentale, risques environnementaux (ECCO), CNRS, Toulouse (France) 387-392.

Breil, P., Grimm, N.B. & Vervier, Ph. (2007a). Surface water groundwater exchanges processes and fluvial ecosystem function: an analysis of temporal and spatial scale dependency. Dans P.J. Wood, D.M. Hannah & J.P. Sadler, *Hydroecology and ecohydrology: past, present and future* (93-108), Chichester (Angleterre): Wiley & Sons.

Breil, P., Lafont, M., Vivier, A., Namour, Ph. & Schmitt, L. (2007b). *Effects of combined sewer overflows on a periurban stream ecosystem: Methodological approach.* Communication présentée au *New directions in Urban Water management* International symposium, Unesco Head Quarters, Paris (France).

Breil, P., Radojevic, B. & Chocat, B. (2010, 25-29/10). *Urban development and extreme flow regime changes*. communication présentée 6th World FRIEND Conference Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources, Fez (Maroc).

Breil, P. & Chocat, B. (2011). *Méthode d'estimation de la modification du régime des crues dû à l'urbanisation*. Fiche technique OTHU N°13. http://www.graie.org/othu/pdfothu/fiches/F13v3.pdf.

Chocat, B. (1997). Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yzeron (Lyon), *Revue de Géographie de Lyon*, 72(4), 273-280.

Cordier, R. (2006). *Vitesse de réaction des affluents de l'Yzeron à la suite d'impacts anthropiques (étude dendrochronologique)* (Master 1 de géographie). Université Lumière Lyon 2, Lyon (France).

Cottet, M. (2005). *Évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Yzeron au cours du XXème siècle.*

Premiers éléments pour un diagnostic hydrologique (Master 1 de Géographie). Université Jean Moulin Lyon 3, Université Lumière Lyon 2, Lyon (France).

Dahm, C.N., Grimm, N.B., Marmonier, P., Valett, H.M. & Vervier, P. (1998). Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters. *Freshwater Biology*, 40, 427-451.

Descloux, S., Datry, T., Philippe, M. & Marmonnier, P. (2010). Comparison of Different Techniques to Assess Surface and Subsurface Streambed Colmation with Fine Sediments. Internat. Rev. Hydrobiol. 95(6), 520–540

Delile, H. (2009) *Mise en place des formations superficielles dans les fonds de vallée élémentaires du bassin versant de l'Yzeron* (Master 1 de géographie), Université Lumière Lyon 2, Lyon (France).

Delile, H., Schmitt, L., Jacob-Rousseau, N., Grosprêtre, L., Privolt, G. & Preusser, F. (2016). Headwater valley response to climate and land use changes during the Little Ice Age in the Massif Central (Yzeron basin, France). *Geomorphology,* 257, 179-197.

Eganhouse, R.P. & Sherblom, P.M. (2001). Anthropogenic organic contaminants in the effluent of a combined sewer overflow: Impact on Boston Harbor. *Marine Environmental Research*, 51(1), 51-74.

Gnouma, R. (2006). *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*, (thèse de doctorat). Université Claude Bernard Lyon 1, INSA, Villeurbanne (France).

Grapentine, L., Rochfort, Q. & Marsalek, J. (2004). Benthic responses to wet-weather discharges in urban streams in southern Ontario. *Water Quality Research Journal of Canada*, 39(4), 374-391.

Grosprêtre, L. (2011). *Étude et gestion des impacts hydrogéomorphologiques de la périurbanisation. L'exemple du bassin de l'Yzeron dans l'Ouest lyonnais* (Thèse de doctorat) Université Lumière Lyon 2, Lyon (France).

Grosprêtre, L. & Schmitt, L. (2007). *Étude hydro-géomorphologique de l'Yzeron et définition d'indicateurs de suivi Rapport d'avancement n°*3, Université Lumière Lyon 2 CNRS/UMR 5600. Rapport réalisé pour le compte du Grand Lyon et du Sagyrc.

Grosprêtre, L. & Schmitt, L. (2010). *Étude hydro-géomorphologique de l'Yzeron et définition d'indicateurs de suivi, Partie 1 : Diagnostic hydro-géomorphologique des affluents et sous-affluents de l'Yzeron et des branches principales du réseau hydrographique et mesures de réhabilitation* », CNRS/UMR 5600. Rapport réalisé pour le compte du Grand Lyon et du Sagyrc.

Hancock, P.J., Boulton, A.J. & Humphreys, W.F. (2005). Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater. *Hydrogeology Journal*, 13, 98-111.

Jacob-Rousseau, N., Astrade, L. & Bravard, J.P. (2006). Le comportement hydrosédimentaire de rivières torrentielles des Cévennes et des Préalpes du Petit Âge Glaciaire. Enseignements géomorphologiques des archives historiques, de la dendrochronologie et de la lichénométrie (297-304). Dans P. Allée & L. Lespez, *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, Presses Universitaires Blaise-Pascal Clermont-Ferrand.

Jacob-Rousseau, N. & Astrade, L. (2010). Sécheresses et pénuries d'eau dans la France méridionale entre 1815 et 1840. *La Houille Blanche*, 4, 43-50.

Jezequel, C. (2006). Le rôle de la géomorphologie sur les échanges nappe-rivière et les écosystèmes aquatiques interstitiels en milieu pollué (compartiments superficiel et hyporhéique) (Mémoire de Master 1) Université Lyon 2, Cemagref-Lyon, 52 p. + ann.

Jones, J.B. & Mulholland, P.J. (2000). Streams and ground waters. Academic Press, San Diego, 425 p.

Lafont, M. (2001). A conceptual approach to the biomonitoring of freshwater: the Ecological Ambience System. *Journal of Limnology*, 60(Suppl. 1), 17-24.

Lafont, M., Vivier, A., Nogueira, S., Namour, Ph. & Breil, P. (2006). Surface and hyporheic oligochaete assemblages in a French suburban stream. *Hydrobiologia*, 564, 183-193.

Lafont, M., Marsalek, J. & Breil, P. (2008). Urban Aquatic Habitat characteristics and functioning (9-24). Dans I. Wagner, J. Marsalek & P.l Breil, *Aquatic habitats in sustainable urban water management,* Leyde-Londres-New York, Taylor & Francis.

Lafont, M., Jézéquel, C., Vivier, A., Breil, P., Schmitt, L. & Bernoud, S. (2010). Refinement of biomonitoring of urban water courses by combining descriptive and ecohydrological approaches. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 10, 3-11.

Liebault, F. & Piégay, H. (2002). Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.

Mandier, P. (1988). *Le relief de la moyenne vallée du Rhône au tertiaire et au Quaternaire - Essai de synthèse paléogéographique* (Thèse d'Etat), Université Lumière Lyon 2, BRGM.

Miras, Y., Laggoun-Défarge, F. & Guenet, P. (2004). Multi-disciplinary approach to changes in agro-pastoral activities since the Subboreal in the surroundings of the « narse d'Espinasse » (Puy de Dôme, French Massif Central). *Vegetation History and Archeobotany*, 13, 91-103.

Musolff, A., Leschik, S., Reinstorf, F., Strauch, G. & Schirmer, M. (2010). Micropollutant Loads in the Urban Water Cycle. *Environmental Science & Technology*, 44(13), 4877-4883.

Namour, Ph., Breil, P., Perrin, J.F., Gnouma, R., Lafont, M., Vivier, A., Schmitt, L. & Grosprêtre, L. (2007). Rejets par temps de pluie en rivière péri-urbaine :

diagnostic et gestion. *L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances*, 304, 78-87.

Namour, Ph., Schmitt, L. Eschbach, D., Moulin, B., Fantino, G., Bordes, C. & Breil, P. (2015). Stream pollution concentration in riffle geomorphic units (Yzeron basin, France). *Science of the Total Environment*, 532, 80-90.

Navratil, O., Breil, P., Schmitt, L. Grosprêtre, L. & Alabert, M.B. (2013). Hydrogeomorphic adjustments of stream channels disturbed by urban runoff (Yzeron River basin, France). *Journal of Hydrology*, 485, 24-36.

Pailler, J.Y., Guignard, C., Meyer, B., Iffly, J.F., Pfister, L., Hoffmann, L. & Krein, A. (2009). Behaviour and Fluxes of Dissolved Antibiotics, Analgesics and Hormones During Flood Events in a Small Heterogeneous Catchment in the Grand Duchy of Luxembourg. *Water Air and Soil Pollution*, 203, 79-98.

Paul, M.J. & Meyer, J.L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32, 333-365.

Petit, F., (1995). Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises (194-223), Dans A. Demoulin, *L'Ardenne, Essai de Géographie Physique, Livre en hommage au Professeur A. PISSART*, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviatile, Université de Liège.

Petit, S., Neto, M., Richard, Y. & Cournoyer, B. (2010). Quels sont les risques sanitaires associés aux rejets de micro-organismes pathogènes dans les milieux aquatiques via les déversements d'eaux usées ou pluviales ? Dans *La recherche en environnement en Rhône-Alpes*, Lyon (France) : Editeur Cluster Environnement.

Preusser, F., Schmitt, L., Delile, H., & Grosprêtre, L. (2011). Optically Stimulated Luminescence (OSL) dated sedimentation history of the Yzeron basin, Rhône Valley, France. *Quaternaire*, 22(1), 73-83.

Privolt, G. (2009). *Contribution à l'analyse de la mise en place des colluvions sur le bassin versant de l'Yzeron. Etude diachronique fine de l'occupation du sol depuis deux siècles, sur quatre sous-bassins de l'Yzeron : la Chaudanne, le Bouillon, le Verdy et le Prés Mouchettes*, (Mémoire de Master 1), Université Lumière Lyon 2.

Privolt, G. (2010). *Contribution à la reconstitution du paysage du plateau lyonnais au cours du XIX^e^ siècle. Interrogation de l'apport des archives iconographiques et constitution d'un inventaire critique d'archives* (Mémoire de Master 2), Université Lumière Lyon 2.

Radojevic, B. (2002). *Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 130 km²* (Thèse de doctorat) Université Claude Bernard Lyon 1, INSA.

Radojevic, B., Breil, P. & Chocat, B. (2010). Assessing impact of global change on flood regimes. *International Journal on Climate Change Strategies and Management Information*, 2(2), 167-179.

SAGYRC (2002). *Contrat de rivière Yzeron Vif 2002-2007*, Dossier définitif, 54 p. Lyon.

Sceau, R. (1995). *Lyon et ses campagnes. Héritages historiques et mutations contemporaines*, Lyon, Presse Universitaire de Lyon.

Schmitt, L. (2001). Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques Fre 2399 ULP-CNRS, Faculté de Géographie et d'Aménagement, 217 p. + ann.

Schmitt, L. (2002). *Définition des zones inondables et diagnostic géomorphologique du bassin versant du ruisseau des Prés Mouchettes*, Rapport Université Lumière Lyon 2, UMR 5600 CNRS, IRG, LRGE, Communauté Urbaine de Lyon, Direction de l'Eau.

Schmitt, L. (2010). *Dynamique fluviale et gestion environnementale durable des hydrosystèmes. Application à une grande plaine alluviale (Rhin-Ill, Alsace) et à un hydrosystème périurbain (Yzeron, Ouest lyonnais)*, (Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches), Université Lumière Lyon 2, UMR 5600 CNRS.

Schmitt, L., Maire, G. & Humbert, J. (2001). La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique de rivières. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 45(2), 201-224.

Schmitt, L., Valette, L., Valin, K., Piégay, H. & Hallot, E. (2004). Proposition d'une méthode de typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau et test sur un sous-bassin du Rhône (bassin de l'Yzeron). *Mosella*, 29(3-4), 323-340.

Schmitt, L., Maire, G., Nobelis, P. & Humbert, J. (2007). Quantitative morphodynamic typology of rivers. A methodological study based on the French Upper Rhine basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(11), 1726-1746.

Schmitt, L., Grosprêtre, L., Breil, P., Lafont, M., Vivier, A., Perrin, J.F., Namour, Ph., Jezequel, C., Valette, L., Valin, K., Cordier, R. & Cottet, M. (2008). Préconisations de gestion physique de petits hydrosystèmes périurbains : l'exemple du bassin de l'Yzeron (France). Dans Verniers G., Petit F. (eds), Actes du Colloque *La gestion physique des cours d'eau : bilan d'une décennie d'ingénierie écologique* Namur, 10-12 oct. 2007, (177-186). Groupe Interuniversitaire de Recherches en Ecologie Appliquée, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviatile, Direction des Cours d'Eau Non Navigables, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement - Ministère de Région wallonne, Namur (Belgique).

Schmitt, L., Lafont, M., Trémolières, M., Jezequel, C., Vivier, A., Breil, P., Namour, Ph., Valin, K. & Valette, L. (2011). Using hydro-geomorphological typologies in functional ecology: Preliminary results in contrasted hydrosystems. *Physics & Chemistry of the Earth*, 36(12), 539-548.

United Nations (2010). *World Urbanization Prospects, the 2009 Revision: Highlights*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm.

Vazquez-Prokopec, G.M., Vanden, E., Jodi, L., Kelly, R., Mead, D.G., Kolhe, P., Howgate, J., Kitron, U. & Burkot, T.R. (2010). The Risk of West Nile Virus Infection Is Associated with Combined Sewer Overflow Streams in Urban Atlanta, Georgia, USA. *Environmental Health Perspectives*, (118), 1382-1388.

Viallon, B. (2008). *Les phénomènes d'incision dans le bassin versant de l'Yzeron. Analyse comparative de la Beffe, de la Goutte des Verrières et du Prés Mouchettes. Eléments de compréhension et hypothèses prédictives* (Mémoire de Master 1 de Géographie-Aménagement), Université Lyon 3, 90 p.

Vivier, A. (2006). *Effets écologiques de rejets urbains de temps de pluie sur deux cours d'eau périurbains de l'ouest lyonnais et un ruisseau phréatique de la plaine d'Alsace*, (Thèse de doctorat) Université Louis Pasteur-Strasbourg I (France).

Coordonnées des auteurs :

Laurent SCHMITT
Université de Strasbourg
UMR 7362 CNRS
Laboratoire Image Ville Environnement
LTER - "Zone Atelier Environnementale Urbaine"
laurent.schmitt@unistra.fr

Loïc GROSPRÊTRE
Université de Lyon
UMR 5600 CNRS Environnement Ville Société
logrospretre@yahoo.fr

Pascal BREIL
Irstea Lyon
UR Hydrologie et hydraulique
pascal.breil@irstea.fr

Philippe NAMOUR
Université de Lyon
Institut des Sciences Analytiques UMR 5280
Irstea Lyon, UR MAEP
philippe.namour@univ-lyon1.fr

Michel LAFONT
Irstea Lyon
UR MAEP
michel.lafont33@sfr.fr

Hugo DELILE
Université de Lyon
Maison de l'Orient et de la Méditerranée
UMR 5133 Archéorient et
University of Southampton
Department of Archaeology
hdelile@gmail.com

David ESCHBACH
Université de Strasbourg
UMR 7362 CNRS
Laboratoire Image Ville Environnement
LTER – "Zone Atelier Environnementale Urbaine"
david.eschbach@live-cnrs.unistra.fr

Nicolas JACOB-ROUSSEAU
Université de Lyon
Maison de l'Orient et de la Méditerranée
UMR 5133 Archéorient
Nicolas.Jacob@univ-lyon2.fr

Benoît COURNOYER
Université de Lyon
UMR CNRS 5557 / UMR INRA 1418
Ecologie Microbienne Lyon
benoit.cournoyer@vetagro-sup.fr