



HAL
open science

La gestion des eaux pluviales coule de source, de l'amont à l'aval, du rural à l'urbain et vice-versa

C. Poulard, E. Berthier, Pascal Breil, M. Labbas, Hocine Henine, E.
Hauchard, K. Radzicki

► To cite this version:

C. Poulard, E. Berthier, Pascal Breil, M. Labbas, Hocine Henine, et al.. La gestion des eaux pluviales coule de source, de l'amont à l'aval, du rural à l'urbain et vice-versa. 8e conférence internationale Novatech, Stratégies et solution pour une gestion durable de l'eau dans la ville, Jun 2013, Lyon, France. 10 p. hal-00864903

HAL Id: hal-00864903

<https://hal.science/hal-00864903>

Submitted on 23 Sep 2013

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.

La gestion des eaux pluviales coule de source, de l'amont à l'aval, du rural à l'urbain et vice-versa.

Managing rainwater all the way down : what urban and rural practitioners can teach one another and do together

Poulard C.⁽¹⁾, Berthier E.⁽²⁾, Breil P.⁽¹⁾, Labbas M.⁽¹⁾, Henine H.⁽³⁾, Hauchard E.⁽⁴⁾, Radzicki K.⁽⁵⁾

(1) **Irstea**, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, 5 rue de la Doua, CS 70077, F-69626 VILLEURBANNE cedex (christine.poulard@irstea.fr).

(2) **DRIEA**, CETE Ile-de-France, Département Ville Durable, Unité Hydrologie - Gestion des eaux pluviales, 12, rue Teisserenc de Bort, F-78197 Trappes cedex.

(3) **Irstea**, Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes CS 10030, F-92761 ANTONY cedex. (4) **CODAH**, Dir. Cycle de l'eau, Dérivation Hydrosystèmes, rivières, lutte contre les inondations. Hôtel d'Agglomération, 19 rue Georges Braque, CS 70854, F-76085 Le Havre Cedex /CNRS-UMR6143-M2C Rouen. (5) **UPK**, Technical University of Cracow, IIGW, Warszawska 24, PL-31-155, Kraków.

RÉSUMÉ

La gestion des eaux pluviales est régie par les même processus hydrologiques et les mêmes préoccupations en contexte urbain comme rural (risque inondation, qualité des milieux récepteurs). En particulier, les techniques alternatives urbaines ont des équivalents en milieu rural ; les retours d'expérience, incluant les difficultés de mise en œuvre, méritent donc d'être partagés. Notre analyse bibliographique montre qu'une question essentielle commune est l'évaluation des effets cumulés d'un aménagement à l'échelle d'un bassin versant, sur les inondations comme sur la qualité de l'eau. Les études de fonctionnement hydrologique d'un aménagement, par analyses de chroniques mesurées ou simulées, arrivent aux mêmes conclusions sur la grande sensibilité à la répartition spatiale des ouvrages et à celle des pluies. Dans ce contexte, la modélisation est un outil précieux pour diagnostiquer l'existant et tester des scénarios d'aménagement. L'intégration d'ouvrages variés et disséminés et la prise en compte de processus jouant à différentes échelles rend cependant complexe l'élaboration de modèles, d'autant plus en milieu péri-urbain. En entrée de ces modèles, il est préférable d'utiliser des scénarios d'apports distribués : des travaux récents proposent différentes approches. Enfin, non seulement les deux communautés ont à apprendre l'une de l'autre, mais elles doivent travailler ensemble : les flux ne connaissent pas les limites administratives. Chaque sous-bassin peut aggraver les inondations ou la pollution à son aval, ou au contraire offrir des solutions. Tout ceci nous invite à (re)réfléchir à l'échelle de gestion pertinente, et aux acteurs à associer.

MOTS CLES : techniques alternatives, gestion intégrée des inondations, bassin versant, scénarios d'apport distribués

ABSTRACT

How different is urban stormwater source control from rural runoff management ? The processes are identical in the two contexts, and urban BMPs have their rural counterparts. Feedback analysis, including pragmatic considerations, should therefore be shared more widely. Our literature review shows that a common key issue is the assessment of the effect of structural measures at catchment scale, whether on flood mitigation or on water quality. In both contexts, studies -using simulated or observed data-, draw the same conclusions about the high sensitivity of the hydrological response of a combination of structures to their spatial distribution and to the space and time pattern of rainfall. Modelling is an invaluable tool to study the hydrological behaviour of existing or projected structures, but is a hard task when it involves various and scattered objects, and processes at different scales - complexity is thus maximised in peri-urban contexts. Building distributed input for these models is the topic of several recent studies. Both communities can thus learn much from each another, but furthermore they have to work together. In many cases, fluxes of flood or pollution- often cross urban/rural limits, and must thus be studied at a broader scale. Whilst each sub-catchment is a source of hazard for the land downstream, it also provides opportunities for solutions. This (re)assesses the importance of defining the appropriate scale of work and involving all the relevant services, as a prerequisite for efficient flood risk or pollution management.

1 GESTION LOCALE DES EAUX « EN URBAIN » ET « EN RURAL » : DEUX CONTEXTES, MAIS UNE MEME PHYSIQUE DES ECOULEMENTS

Nous allons comparer les contextes, les objectifs et les solutions techniques de la gestion des eaux « en rural » et « en urbain », plus particulièrement pour la prévention des inondations. Dans cette première partie, nous considérerons surtout les actions le plus en amont possible, qui se sont fortement développées dans les deux contextes pour retarder et « crêper les écoulements en profitant de toutes les opportunités. Les modes d'actions et les techniques employées « à la source » ou « en versant » sont les mêmes en rural et en urbain. Les habitudes de dimensionnement « à l'échelle locale sont comparées dans ce paragraphe 1, et le paragraphe 2 « largira la réflexion au bassin versant.

1.1 Genèse et aggravation des ruissellements

L'eau issue des précipitations va pour partie s'infiltrer, et pour partie ruisseler sur les versants, en se concentrant progressivement pour rejoindre des thalwegs secs, fossés, réseaux d'assainissement, jusqu'à atteindre un cours d'eau (figure 1). **Le ruissellement est un processus naturel**, modifié par certaines pratiques agricoles, l'occupation du sol, les infrastructures linéaires et bien sûr l'urbanisation. La figure 1 rappelle que le milieu urbain est une zone d'enjeux, affectée par le ruissellement venant de l'amont, mais aussi une cause de perturbation du ruissellement renvoyé à l'aval : l'imperméabilisation accentue les pics de ruissellement, les réseaux artificiels le détournent des axes naturels de transfert. Certains éléments sont ambivalents, comme le drainage agricole : **1)** comme les collecteurs enterrés diminuent la saturation du sol, en début d'épisode pluvieux l'infiltration est facilitée sur la parcelle et le ruissellement réduit; **2)** par la suite, cet effet s'atténue et l'eau est évacuée rapidement vers l'aval par le réseau de fossés connexes, surtout quand ceux-ci sont surdimensionnés.

Chaque contexte a ses habitudes de langage : on titre souvent sur le **ruissellement rural**, donc sur le phénomène, et sur les **eaux pluviales urbaines**, ce qui insiste sur l'origine de l'eau.

LEGENDE :

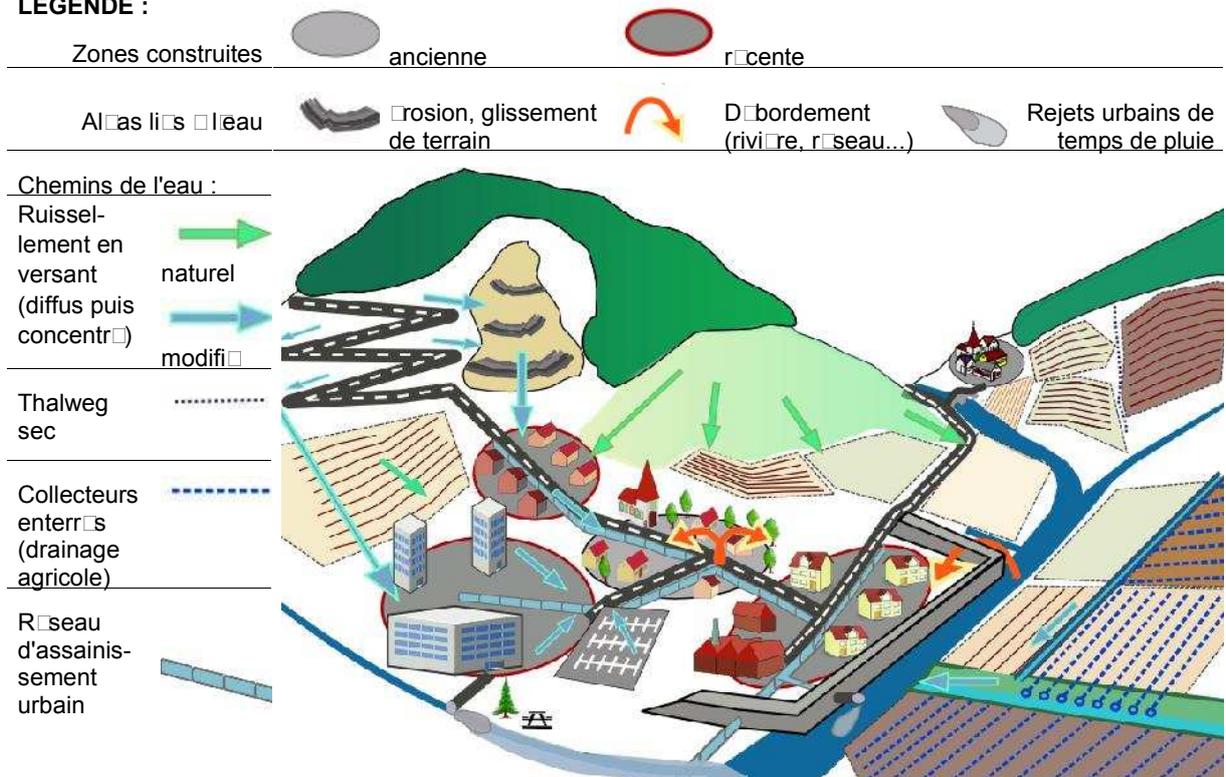


Figure 1 : Ruissellements sur un bassin versant : genèse, aggravation et inondations.

1.2 Actions « à la source, actions en amont pour la gestion des inondations

En milieu urbain comme en milieu rural, le ruissellement peut provoquer des inondations locales lors d'épisodes pluvieux intenses ou longs, en entraînant éventuellement des polluants. Comme les

mêmes processus entrent en jeu, les solutions pour gérer le ruissellement reposent sur les mêmes modes d'action même si on aime créer ou laminar en rural, et tamponner en milieu urbain. La **production locale de ruissellement** peut être réduite (figure 2, mode d'action 1), en agissant sur la source, c'est-à-dire la parcelle. Les axes de transfert -naturels ou artificiels- devront ensuite être identifiés et modifiés pour atténuer et détourner le ruissellement des enjeux locaux (modes d'action 2, 3, 4). **En milieu urbain**, les techniques alternatives (TA), sous-entendu alternatives au tout-réseau, permettent une gestion de la source, ou tout au moins en amont du réseau, sur les parcelles privées et sur le domaine public. Ce sont les Sustainable Urban Drainage Systems de la littérature internationale. **En milieu rural**, les actions en versant désignent l'ensemble des techniques mises en œuvre à l'amont des cours d'eau permanents, de la parcelle et dans les réseaux primaires naturels ou agricoles (thalwegs secs, fossés).



Légende : modes d'action et exemples en milieu rural (pastilles rondes) / en milieu urbain (pastilles carrées) :

- (1) **contrôle de la production en favorisant l'infiltration** : pratiques culturales, drainage enterré / toits végétalisés, jardins d'eau, structures poreuses (chaussées perméables, gabions)... **ou le stockage** : citernes.
- (2) **contrôle du transfert**, maîtrise et retard des écoulements de surface : haies, thalwegs embroussaillés, fossés et noues avec limiteurs de débit et/ou redents...
- (3) **favoriser le débordement** là où il est acceptable avec aménagement de la zone réceptrice : zones humides, parcelles agricoles de faible enjeu / espaces publics de faible enjeu.
- (4) **stockage temporaire avec limitation de débit** : actions possibles par des ouvrages de toutes tailles, des thalwegs secs aux cours d'eau : obstacles avec orifice calibré en fossé ou en thalweg sec, barrage à pertuis ouvert, casier latéral / structures réservoirs, bassin de stockage avec débit de fuite... Ces actions sont également possibles **sur les cours d'eau** : (4*) casiers latéraux, barrages à pertuis ouverts.

Figure 2 : illustration de solutions de gestion du ruissellement sur un bassin versant

En pratique, les ouvrages sont très variés et cumulent souvent plusieurs modes d'action. Par exemple, la noue urbaine et les fossés de drainage agricole représentés sur la figure 2 vont canaliser les écoulements (2), les ralentir ou même, pour le grand fossé en bas à droite, les retenir temporairement par des seuils avec orifices calibrés (4), et favoriser l'infiltration le cas échéant (sol perméable, pas de colmatage) (1) ; des surverses peuvent définir des lieux de débordement préférentiels (3).

Mais le ruissellement alimente ensuite les cours d'eau et les réseaux d'assainissement qui le collectent. Agir sur le ruissellement, c'est donc aussi participer à la gestion des inondations en aval. La gestion en amont désignera dans la suite de notre texte une **stratégie concertée sur un bassin versant naturel ou artificiel**, par des actions à l'amont des enjeux, combinant des actions de la source, en versant, et des actions dans les cours d'eau ou réseaux (types 4* de la figure 2). Ceci sera développé dans la partie 2.

1.3 Importance de la définition de l'objectif d'un aménagement et de la mesure de son efficacité

Un **aménagement** désignera ici un ensemble d'ouvrages -ouvrages, techniques, règlements- existants ou en projet, au service d'une stratégie. L'étude de cet aménagement doit parfois prendre en compte le fonctionnement d'autres ouvrages, mis en place pour un tout autre but (exemple : le drainage agricole et les talus routiers modifient le ruissellement). Mener un diagnostic de fonctionnement nécessite des **indicateurs d'efficacité** adaptés, explicites et si possible quantitatifs pour comparer objectivement plusieurs solutions. Pour les définir, le **but de l'aménagement** doit donc être clairement explicite : quel(s) problème(s) (inondation, érosion, qualité de l'eau), portée locale ou régionale du bassin ? De plus, caractériser l'impact en régime demande d'examiner le fonctionnement **pour plusieurs événements**, y compris ceux qui saturent les ouvrages (surverse) et peuvent conduire à des ruptures ; on peut aussi vérifier les conséquences de dysfonctionnements.

Les variables à calculer peuvent être des débits de pointe et/ou volumes évacués/rejetés, voire des durées cumulées d'inondation, pour différentes périodes de retour. Mais ces variables hydrologiques ne suffisent pas toujours pour caractériser les conséquences d'un aménagement : par exemple, des ouvrages créateurs peuvent réduire les hauteurs d'eau mais prolonger les inondations. Ainsi, les dommages induits sont de bien meilleurs indicateurs. La Directive Inondation de 2007 insiste sur la pertinence économique des projets. Les analyses coût-bénéfice (ACB) calculent des valeurs moyennes annualisées des coûts et des dommages évités par le projet. L'annualisation a le grand mérite de prendre en compte l'effet sur toute la gamme des événements, y compris les scénarios de rupture rarissimes mais catastrophiques. Ces variables semblent prometteuses comme indicateurs quantitatifs, aptes à comparer objectivement des solutions. Des difficultés méthodologiques subsistent néanmoins pour estimer *a priori* -pour des crues de projet non observées- l'ensemble des dommages : aux biens et aux personnes, directs et indirects (pertes d'exploitation, coupures de route), sur les propriétés privées et sur le domaine public voire des impacts écologiques.

En plus du risque d'inondation, la gestion de l'eau concerne aussi des problèmes de qualité (notamment avec la Directive Cadre sur l'Eau), et de plus en plus des étiages. **En milieu rural**, les actions sur le ruissellement ont également pour objet (1) l'érosion agricole, qui endommage les parcelles cultivées, génère des coulements boueux dommageables pour l'aval et (2) les transferts hydriques de produits phytosanitaires vers le cours d'eau (Gril *et al.*, 2010). **En milieu urbain et péri-urbain**, les rejets de temps de pluie des réseaux d'assainissement unitaires et pluviaux sont une source de pollution pour le milieu naturel et les cours d'eau récepteurs (surtout en période d'étiage), mais aussi une cause de désordres morphologiques -incision, atterrissement- (Navratil *et al.*, 2012).

1.4 Dimensionnement hydrologique local d'un aménagement: des réflexions pour améliorer les méthodes classiques

Cette partie traitera de l'étude du fonctionnement sur une échelle locale. Les techniques de la source sont dimensionnées pour des **pluies de projet**, définies dans les deux contextes à partir de courbes intensité-durée-fréquence estimées par analyse des chroniques de pluie disponibles. La durée choisie dépend de la surface étudiée et cherche souvent à maximiser la production de ruissellement (e.g. Henry, 2010). Les deux communautés savent que la pluie est plus difficile à caractériser sur des surfaces réduites (épacentrage) et ont pris conscience que calculer l'effet d'un aménagement sur un seul événement est très réducteur (e.g. Abessolo 2010 ; Poulard *et al.*, 2008).

En milieu rural, les actions en versant sont souvent motivées par un problème de ruissellement menaçant des enjeux locaux (érosion agricole, routes communales, habitat dispersé ou village). Nous allons définir trois grands types et regarder quelques exemples de méthodes de dimensionnement, et les éventuelles difficultés dans un contexte opérationnel. **Les ouvrages de stockage temporaire** en versant sont caractérisés par un volume de stockage et un débit de fuite. Leur fonctionnement est aisé à modéliser, éventuellement avec une simple loi d'ouvrage. Leur dimensionnement peut suivre les mêmes méthodes que pour les ouvrages hydrauliques usuels en cours d'eau (barrage à pertuis ouverts, casiers), dont ils reproduisent le fonctionnement, en taille (très) réduite. Classiquement, les ouvrages en versant (et en thalweg sec) sont dimensionnés pour des pluies modestes : on stocke par exemple la pluie de période de retour 10 ans (pluie de projet de protection) et on gère la surverse jusqu'à 100 ans, voire plus pour des ouvrages plus grands (recommandations de la DREAL Seine-Maritime et de la DISE : 1000 ans si l'ouvrage est classé (plus de 2 m) et 300 ans sinon). La Communauté de l'Agglomération Havraise utilise par exemple à la fois une pluie d'orage d'intensité normalisante pour le débit de pointe (durée de quelques heures) et une pluie d'hiver normalisante pour

les volumes (durée de l'ordre de la journée). **Les techniques portant sur le transfert des écoulements** devraient, en toute rigueur, être dimensionnées par une modélisation hydraulique. Des formules d'hydraulique simplifiée (Manning-Strickler) ne suffisent pas toujours. Et la tâche peut se révéler complexe: les réseaux peuvent être ramifiés, étendus, alimentés par des parcelles drainées, et sujets à des évolutions significatives (érosions ou colmatages, végétalisation, tassements par passage d'engins). Par exemple, Fiener et Auerswald (2006) insistent sur l'importance du dimensionnement préalable des chenaux enherbés (sections en travers et topologie des chenaux) et sur l'entretien pour réduire efficacement les volumes et les pics de ruissellement. Ils calculent leur efficacité sur le bassin du Lauterbach, pour des sous-bassins de 30 à 1700 ha, pour des événements de période de retour 1 à 50 ans, en faisant varier durée et humidité initiale. Ils montrent ainsi que les crues d'hiver sont beaucoup moins atténuées que les crues d'été, et que l'efficacité dépend aussi de l'occupation du sol (qui contrôle la production de ruissellement). Enfin, pour **les techniques de la parcelle** favorisant l'infiltration ou le ralentissement des écoulements diffus, il n'est pas aisé d'en traduire les effets sur la modification des paramètres des modèles ou des formules de ruissellement (Curve Number des formules du SCS ; coefficients de rugosité). De plus, l'effet de ces techniques dépend fortement des conditions locales (pentes), de l'événement et de l'état initial. Naef *et al.* (2002) montrent, par une étude de parcelles fines, que l'occupation du sol a un impact sur le ruissellement surtout lorsqu'il est rapide et intense. Hess *et al.* (2010) utilisent la méthode des Curve Numbers pour estimer l'effet de modifications de pratiques agricoles ; ils concluent prudemment que les réductions de pics de crue sont surtout sensibles sur des sols dégradés et pour des crues fréquentes.

En milieu urbain, les travaux montrent des interrogations tout à fait similaires. Les ouvrages de stockage ont longtemps été dimensionnés en se référant à l'instruction technique de 1977, qui donnait un cadre méthodologique rigide. Abessolo (2010) a parcouru les méthodes de dimensionnement des techniques alternatives et s'est interrogé sur la définition des pluies de projet. Il a conduit une analyse des pluies de période de retour de 1 à 10 ans sur le territoire de la Communauté Urbaine de Lyon, à partir d'une étude fréquentielle. Il aboutit à des recommandations opérationnelles : des pluies simple triangle de durée déterminée par une formule simple. Il généralise ensuite sa méthode à un système composé de plusieurs bassins, en série et en parallèle. Aires *et al.* (2003) testent l'influence de la représentation de la pluie (événement, chroniques observées) sur le dimensionnement d'ouvrages de stockage permettant la dépollution.

Mais le plus souvent la mise en oeuvre des TA accompagne la rénovation ou le développement urbain. Un **règlement** local se référant au Code Civil (articles 640 et 641) et au Code de l'Urbanisme (L 421-3, R 111-2 et R 111-8 (2)) impose des TA sur les parcelles nouvellement bâties, souvent à partir d'une certaine superficie imperméabilisée. Généralement, l'objectif est que le ruissellement sortant des parcelles aménagées reste équivalent à celui produit naturellement (situation pré-développement). Cela se traduit par une limitation du rejet du nouvel aménagement vers l'aval (réseau d'assainissement ou cours d'eau) à une certaine valeur de débit par hectare aménagé pour une pluie précise (à défaut une période de retour de pluie). En France, ce type de règlement est apparu par exemple lors des constructions des villes nouvelles dans les années 1970 ; ils sont à présent quasiment généralisés sur le territoire français (par exemple tous les SDAGEs de 2010 contiennent ce type de prescription), et se retrouvent aussi à l'étranger. Il appartient donc aux propriétaires – souvent des promoteurs (ZAC, lotissement, éco-quartier) de concevoir sur leurs parcelles les solutions répondant à cette contrainte. Des dispositifs sont également conçus pour compenser le ruissellement généré par les infrastructures du domaine public.

Les autres effets des actions sur le ruissellement ne sont pas toujours faciles à quantifier.

En milieu rural, des formules plus ou moins empiriques évaluent le risque d'érosion, lié au ruissellement ; les logiciels Stream et Lisem ont été utilisés pour la modélisation de l'érosion respectivement globale et locale en fond de thalweg, et RUSLE en versant pour le PPR inondation de la Lézarde. Le calcul de l'effet des bandes enherbées sur le transfert hydrique des produits phytosanitaires nécessite quant à lui des modèles complexes, non utilisables en opérationnel. Des calculs couvrant un grand nombre de configurations ont donc été synthétisés pour aboutir à des recommandations pratiques, publiées dans des guides (Gril *et al.*, 2010).

En milieu urbain, les techniques alternatives contribuent à réduire les rejets par le double effet de l'abattement du volume de ruissellement (par infiltration et évapo(transpi)ration) et de rétention temporaire (atténuation des débits de pointe aval et décantation) : les volumes rejetés et les concentrations en polluants sont réduits. La DCE et ses transcriptions en droit français (lois sur l'eau) donnent des objectifs à atteindre de la qualité des milieux récepteurs. En fonction de ses objectifs et des usages de la ressource eau à l'aval, des prescriptions sur la qualité des rejets peuvent être

aussi imposées : elles peuvent par exemple être nonces sous la forme : la concentration moyenne en polluant Y des rejets lors d'un événement pluvieux ne doit pas dépasser X mg/L .

Plus récemment, les techniques de gestion à la source s'imposent comme des éléments d'amélioration de l'environnement urbain, en introduisant un peu de paysages naturels et de biodiversité en ville (trames vertes et bleues), en réduisant l'effet d'îlot de chaleur urbain, etc.. En outre, elles rendent de nouveau visible le circuit des eaux pluviales en ville, et contribuent à informer et maintenir la culture du risque auprès des riverains.

1.5 Bilan de la comparaison : des moyens d'action très semblables

Les contextes urbain/rural semblaient très différents, avec respectivement des inondations souvent boueuses coupant ou empruntant le réseau routier, et des pics de ruissellement brutaux provoquant des débordements de réseaux. Finalement, les processus et les techniques de gestion des inondations locales ont beaucoup de points communs. Le calcul d'un réseau de noues en zone urbaine n'est pas très différent du calcul d'un réseau de fossés en milieu rural. De plus, certaines zones ont des caractéristiques mixtes comme les milieux péri-urbains, en forte extension. La même intelligence des coulements est requise pour s'adapter aux spécificités de terrain (topographie, place disponible). Il faut anticiper les mêmes problèmes pratiques : risques d'érosion et de modification des coulements (tassements, affaissement différentiel), colmatage par les matières en suspension, obstructions d'orifices et de passages busés par les flottants, problèmes d'accès, maintenance d'ouvrages nombreux et variés (e.g. Galza et Ramez, 1995). Utiliser des structures existantes (voirie à chaussée réservoir ou espace vert inondable) offre des opportunités, mais augmenter le nombre de parties prenantes -privées et publiques- est une difficulté (e.g. Gadiolet, 2010). Les règles doivent être définies et assumées sur le long terme, pour l'entretien courant et les remises en état occasionnelles.

En pratique, l'urbain se distingue surtout par la présence de réseaux d'assainissement urbains, exigeant des outils de calcul spécifiques (système ramifié et parfois maillé de tuyaux enterrés, possibilités de passages en charges). L'autre originalité est la formulation de règlements obligeant les propriétaires à construire ses dispositifs de réduction du ruissellement sortant de leurs parcelles.

2 FONCTIONNEMENT D'UN AMENAGEMENT A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT : DES QUESTIONS COMMUNES EN RURAL ET EN URBAIN

L'effet d'un ensemble d'ouvrages à l'échelle du bassin versant est loin d'être la somme des effets individuels. D'une part, chaque ouvrage modifie les coulements pour les ouvrages à son aval ; selon les événements, cela peut améliorer leur fonctionnement ou au contraire les rendre moins utiles. D'autre part, certaines combinaisons peuvent parfois aggraver une crue si elles concourent à synchroniser des pics de crue, même créés (e.g. Petrucci, 2012). Nous commentons ici quelques approches utilisées, pour identifier les problèmes méthodologiques communs aux deux contextes. Nous examinerons la pertinence d'indicateurs distribués, car les conséquences de l'aménagement peuvent être différentes selon les sous-bassins (pour les inondations : moins d'eau ici, mais plus là).

2.1 Analyses de chroniques ou d'événements observés

Les mesures de terrain donnent à voir le fonctionnement réel des ouvrages, les anomalies éventuelles, ainsi que les effets du vieillissement et du colmatage. Elles sont indispensables pour caler puis valider les modèles (processus, valeurs des paramètres). Les analyses de chroniques peuvent également quantifier l'effet global d'un aménagement sur le bassin en comparant :

- la situation avant et après aménagement sur le même système (étude diachronique) : malheureusement, on ne retrouvera jamais la même séquence d'événements sur les deux périodes. Or, la réponse d'un bassin dépend de l'événement de pluie - caractérisé par sa durée, son intensité, sa structure spatiale-, et des conditions hydriques initiales. Enfin, les états ne sont pas stables sur de longues périodes : un bassin se modifie en permanence (changement de cultures, construction de routes, urbanisation, travaux en rivière)..
- deux bassins -ou réseaux- voisins (étude synchronique) réputés ne différer que par le paramètre que l'on étudie. Cette approche est surtout utilisée en rural pour comparer l'effet de l'occupation du sol (occupations du sol comparables mais pourcentages de répartition différents) et paraît peu adaptée à l'étude d'aménagements ponctuels, dont l'effet dépend beaucoup de la topologie des différents versants et réseaux. Une variante est de suivre des bassins emboîtés (e.g. Henine et al., 2012).

En pratique, on dispose rarement de longues chroniques mesurées, ou moins d'étudier un aménagement influant sur un bassin jaugé par une station hydrométrique pérenne, et/ou de travailler dans un bassin expérimental. Le plus souvent, seul un nombre limité d'événements a été suivi en quelques points. Pourtant, l'analyse d'événements mesurés reste précieuse dans les cas encore trop complexes pour envisager une simulation numérique, et pour caler et valider les modèles.

2.2 Simulations

La modélisation permet de calculer le fonctionnement hydrologique d'un bassin pour des scénarios d'aménagements (actions individuelles ou combinées) et des scénarios d'événements. Pour choisir les modules de calcul, construire un modèle, le caler et l'utiliser conformément à ses limites de validité, il faut des mesures de terrain et de solides connaissances ! Deux points sont importants à l'échelle d'un bassin versant : le modèle doit prendre en compte des ouvrages divers et dissimulés, le scénario d'apport doit être spatialement cohérent (globalement, scénarios de pluie).

2.2.1 Scénarios d'aménagement et choix du modèle

La modélisation nécessite un outil de calcul adapté à la question à traiter, avec des pas de temps et des mailles de calcul pertinentes, prenant correctement en compte les processus dominants.

En rural, des modèles comme HEC-HMS, SWAT, TOPMODEL intègrent l'ensemble des processus de transfert dominants dans le bassin versant ; ils permettent de simuler des scénarios de potentialité de réduction de l'érosion et des inondations. Cependant, leur utilisation demande de la prudence, il ne suffit pas de connaître les descripteurs physiques du milieu (topographie, nature et profondeur des sols) : comme le résume Naef *et al.* (2002) : « convertir des propriétés physiques mesurées ou estimées et des variables d'état en paramètre de modèles est difficile ». La difficulté dépend du nombre de processus à prendre en compte (ruissellements de sub-surface, en zone non-saturée, en zone saturée, en réseau de drainage, dans des fossés) - et de la complexité du domaine d'étude (microtopographie, hétérogénéité du sol et de l'état de surface, présence de haies, fossés avec passages busés-, drainage agricole, infrastructures linéaires). Ainsi, il reste parfois nécessaire de construire une modélisation spécifiquement pour une étude en recherche. Par exemple, une étude menée sur le bassin versant polonais de l'Isepnica ayant conduit à proposer une combinaison d'ouvrages en versant variés pour réduire le ruissellement (Poulard *et al.* 2005), des outils de calcul ont été spécialement développés. Ils sont basés sur une représentation du ruissellement en versant classique (formules de Manning-Strickler), mais adaptés à tous les ouvrages envisagés, avec des pas d'espace et de temps très petits (durées d'événements pouvant descendre à une heure). Cette étude montrait que les ouvrages étaient efficaces pour des pluies de période de retour jusque 10 ans, mais que l'efficacité globale sur les inondations n'était pas du tout proportionnelle à la surface couverte par les aménagements.

En urbain, des modèles opérationnels permettent la modélisation du fonctionnement des réseaux d'assainissement (SWMM, MOUSE, Cano). Les sous-bassins -urbains et ruraux- alimentant le réseau sont souvent représentés comme des zones d'apport définies par quelques paramètres (superficie, coefficient d'imperméabilisation, pentes). Certains modèles permettent le couplage réseaux/ ruissellement de surface (débordements). L'introduction de techniques alternatives dans ces logiciels, bien que parfois affichée, n'est pas encore pleinement satisfaisante : tous les fonctionnements ne sont pas correctement simulés (interactions avec un substrat ou/et du sol), et les rétroactions sur les TA des modifications induites par elles sur les niveaux de nappe et sur les débits dans les réseaux ne sont pas bien calculés (e.g. Berthier *et al.*, 2004). **En péri-urbain**, les difficultés du rural s'ajoutent à celles de l'urbain. Des travaux en cours s'attachent à décrire les processus utiles, et à trouver un compromis entre la finesse de représentation et la taille de bassin à modéliser (Labbas et Branger, 2013). Le bon niveau de simplification, par exemple par conceptualisation, dépend des objectifs des études pour lesquels la modélisation est conçue, en l'occurrence non seulement l'influence de l'urbanisation sur les inondations, mais aussi sur la ressource.

2.2.2 Scénario d'apport et conditions initiales

La genèse des crues dépend non seulement des valeurs moyennes de l'épisode pluvieux (intensité moyenne, cumul) mais également de la répartition spatiale des précipitations. Des auteurs étudient dans les deux contextes l'effet de l'hétérogénéité spatiale sur le fonctionnement d'ouvrages distribués : certains seront trop peu sollicités, d'autres saturés.

En urbain, quelques études récentes simulent différentes stratégies de gestion des eaux pluviales à l'échelle d'un bassin versant. Henry *et al.* (2010) testent des pluies de projet spatialisées pour étudier

le fonctionnement du système d'assainissement du Grand Lyon. Ils ont sélectionné des pluies fortes observées en 29 pluviomètres au pas de temps de 6 min, pour servir de scénario d'apport dans une modélisation hydrologique. Ils ont construit un outil opérationnel, qui permet notamment d'adapter la durée de la pluie de projet au sous-bassin étudié, de 4 à 900 km². Pour augmenter la variabilité de cet échantillon de pluies, l'utilisateur peut décaler ces pluies ou en modifier les intensités.

En milieu rural, Poulard *et al.* (2009) utilisent un générateur stochastique de champs de pluie distribués (SAMPO, présenté dans Emmanuel *et al.* (2012)). basé sur la méthode des bandes tournantes. Le générateur est préalablement calé sur les chroniques observées disponibles sur le bassin, pour respecter les propriétés spatio-temporelles du régime local des pluies. Un modèle pluie-débit très simplifié du bassin versant de l'Yzeron (140 km²) a été construit pour simuler l'effet sur les pics de crue de barrages à pertuis ouverts. Pour un jeu de pluies donné, le modèle détermine ensuite comment placer trois ouvrages sur le réseau hydrographique pour réduire au mieux les pics de crue. Cette étude a confirmé et illustré la grande sensibilité du résultat à la variabilité des pluies (selon leur période de retour et leur répartition spatio-temporelle), même en utilisant des jeux consolidés d'une trentaine de champs de pluies, et a permis de réfléchir à la définition de l'indicateur d'efficacité.

2.3 Indicateurs : prendre en compte tous les enjeux, et raisonner en régime

Petrucci *et al.* (2012) réalisent l'exercice de modéliser les TA sur un bassin expérimental urbain au Sud de Paris. Deux règles de gestion des eaux pluviales sont testées : limitation du débit de fuite à q^* L/s/ha (pour plusieurs valeurs de q^*), et instauration d'un volume de stockage avec infiltration. Les auteurs calculent la réduction de fréquence des débordements de déversoirs d'orage, et montrent que la limitation homogène sur le territoire à un débit de fuite donné accroît parfois le débit de pointe à l'exutoire à cause d'un effet de concomitance. En périurbain, des cas de mise en concomitance de certains pics de crue par des barrages à pertuis ouverts sont également mis en évidence (Radojevic *et al.* 2010). Petrucci *et al.* proposent aussi des indicateurs pour la qualité de l'eau, en fonction notamment des possibilités de décantation. Booth *et al.* (2002) élargissent également leur étude hydrologique à des aspects environnementaux : ils calculent que des bassins de rétention peuvent effectivement contrebalancer l'aggravation des inondations et de l'érosion liées à la forte imperméabilisation du bassin versant de King County (Washington), mais toutefois le régime du cours d'eau ne revient pas à la situation antérieure et les habitats aquatiques restent dégradés.

Dans leur conclusion, Poulard *et al.* (2009) recommandent comme indicateurs d'effet sur les inondations les dommages moyens annualisés évités (DMA_E). En effet, pondérer les événements par leur fréquence estimée est pertinent pour travailler sur tout le régime et résoudre également le problème de la prise en compte d'événements extrêmes. La période de retour d'un événement n'ayant de sens qu'à l'échelle de sous-bassins suffisamment petits, il faut calculer des DMA_E élémentaires, et sommer ensuite pour connaître l'effet intégré sur le bassin (Erdlenbruch *et al.* (2008)). Enfin, les dommages évités peuvent être calculés sous plusieurs scénarios de vulnérabilité, et même avec des vulnérabilités qui évoluent en fonction du développement ou de réajustements.

Tous ces résultats conduisent à s'orienter vers des simulations continues (ou quasi-continues) pour s'affranchir des particularités d'un échantillon trop réduit. De plus, cette approche permet considérer la variabilité des conditions initiales et la possibilité d'événements rapprochés. En effet, dans les deux contextes, des calculs et des retours d'expérience montrent que des événements de pluie survenant avant la vidange complète des ouvrages de stockage, et/ou sur un sol déjà saturé, remettent en cause les calculs fréquentiels encore répandus considérant des capacités de stockage pleinement disponibles en début de simulation, et/ou une humidité initiale du sol fixée forfaitairement.

2.4 Bilan : des réflexions communes, à mutualiser !

La comparaison de travaux sur le diagnostic d'effet à l'échelle du bassin montre des préoccupations communes. Il serait donc dommage d'ignorer des travaux appliqués à un autre contexte mais traitant en fait des mêmes sujets : interprétation de chroniques mesurées ou simulées, construction de scénarios de pluie distribués, prise en compte des conditions initiales, développement de modèles intégrés (interactions écoulements de surface / écoulement en réseau / saturation du sol) et la définition d'indicateurs.

3 VERS « LA BONNE ECHELLE DE GESTION » INTEGRANT DES SOUS-BASSINS URBAINS ET RURAUX ?

Enfin, non seulement les deux communautés ont à apprendre l'une de l'autre, mais elle doivent travailler ensemble : pour les inondations comme pour la qualité, les intérêts urbains et ruraux sont

multiples et interagissent. Chaque sous-bassin peut aggraver la situation à son aval, ou au contraire offrir des solutions. Les bassins ruraux peuvent être une source de ruissellement vers la ville en particulier dans les zones péri-urbaines qui s'étendent vers le rural- ; la ville peut à son tour aggraver les inondations à son aval à ne serait-ce qu'en s'endigant. En règle générale, le périmètre d'une étude doit remonter suffisamment en amont pour trouver les solutions, et suffisamment à l'aval pour diagnostiquer toutes les conséquences d'une action.

3.1 Lien amont-aval : l'amont source d'aléa ou terre d'opportunité

Des ouvrages sont installés en zone rurale pour protéger des villes, dans la même intercommunalité (barrage à pertuis ouvert dit « digue de l'Oudan » qui protège Roanne) ou bien au contraire très éloignés (les 4 lacs-réservoirs gérés par l'Établissement Territorial Public de Bassin à Seine Grands Lacs « contribuant à protéger l'Île-de-France»). Des compensations ou des dommages pour l'amont peuvent être négociés « allant jusqu'à l'achat des emprises surinondées (cas de la Digue de l'Oudan).

Deux outils récents permettent d'intervenir juridiquement pour prévenir les coulées boueuses ou inondations générées par des zones cultivées. Il s'agit de l'aléa « érosion » dans le cadre d'un PPR Inondation, et du décret 2007-882 sur l'érosion. Dans le cas du PPRI, ces mesures sont intégrées dans un document d'urbanisme avec des prescriptions opposables aux tiers. Ces deux démarches peuvent être déroulées conjointement. Le bassin versant de la Lézarde (Seine Maritime) est une zone test nationale. Son PPRI concerne d'abord les risques inondations par ruissellement, débordement de rivière et remontée de nappe ; un volet sur l'aléa érosion part en enquête publique en 2013. Les zones d'érosions les plus importantes susceptibles de générer une aggravation des inondations liées aux coulées boueuses sur les zones urbanisées situées en aval seront identifiées. Cette démarche permet de lier le monde agricole au monde urbain : toutes les zones amont comme aval se retrouvent concernées par des prescriptions et des recommandations.

3.2 Complémentarité enjeux locaux / enjeux à l'échelle du bassin

Les ouvrages modestes en versant peuvent être conçus de manière complémentaire aux ouvrages du réseau principal, par exemple en dimensionnant les ouvrages en versant pour des crues modestes, et en intégrant leur fonctionnement dans les études d'ouvrages plus importants (barrages à pertuis ouvert, bassins d'eaux pluviales). Sur l'Isèpnica (Poulard *et al.*, 2005), la proposition aboutissait à des ouvrages en versant efficaces contre les problèmes locaux d'érosion, et d'inondation jusqu'à une période de retour 10 ans. Leur fonctionnement a été pris en compte dans le dimensionnement de deux barrages à pertuis ouverts sur le torrent principal pour agir sur la crue centennale : ils en retardent le remplissage et donc la surverse. Sur un schéma analogue, l'aménagement d'une ZAC du futur cluster de Saclay (Essonne et Yvelines) projetée de réguler les eaux à la parcelle jusqu'à une période de retour centennale via des techniques alternatives diverses, puis jusqu'à une période centennale via d'importantes noues et bassins de rétention en espaces publics.

Les études locales pilotées par des syndicats intercommunaux peuvent être inscrites dans une réflexion plus large, par exemple au sein d'un Plan d'Action de Prévention des Inondations. Erdlenbruch *et al.* (2008) ont défini des DMA_E complémentaires par communes, utiles pour une éventuelle négociation intercommunale. Ils pourraient même intégrer les pertes d'une commune causées par un aménagement conçu pour protéger l'aval (restrictions d'occupation du sol).

Des collaborations à rural / à urbain sont donc naturelles à l'échelle d'un bassin versant. La définition d'une stratégie de gestion du risque inondation et qualité de l'eau à toutes échelles serait facilitée par des indicateurs partagés et spatialisés. Dès 2013, l'étude de l'aléa d'inondation sur les Territoires à Risque d'Inondation délimités dans le cadre de la Directive Inondation de 2007, définis surtout en France comme des poches d'enjeu urbain, posera la question du bon périmètre de gestion à associer, qui devra inclure une partie du bassin amont et aval. L'entrée de communes péri-urbaines ou même rurales dans des communautés urbaines favorise également la collaboration.

Remerciements

Le Ministère chargé de l'Ecologie (BRM) est à l'origine de ces fructueux échanges urbain/rural, en commandant deux analyses bibliographiques sur les Techniques Alternatives et les aménagements à en versant à en milieu rural, respectivement au CETE et à la DRIEA, en 2010. Cette communication s'appuie sur des travaux antérieurs effectués avec Etienne Lebois (IRSTEA), auteur du générateur de pluies stochastiques SAMPO, Yves Nédélec (CETE Bordeaux) et son expérience sur le ruissellement en milieu rural, le Professeur Szczesny et le Dr Witkowska de l'UPK. Elle doit beaucoup aux opérateurs de terrain qui ont présenté des réalisations aux auteurs : les Syndicats intercommunaux de

l'Yzeron (SAGYRC), de la Lézarde et de l'Austreberthe, le CETE de Lille (Journées Eaux Pluviales de 2011), la Commune de Czernich w (Isepnica), ainsi que les services techniques du Grand Roanne. Saluons enfin les collectivités dont nous avons consulté les documents sur leur gestion des eaux pluviales (Communautés urbaines de Lyon, Bordeaux, Douai) ainsi que l'AREAS, une référence en matière d'aménagements en versant ruraux.

BIBLIOGRAPHIE

Abessolo O., E. (2010). *Analyse fréquentielle appliquée au dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales*, Thèse de doctorat en Aménagement et Urbanisme. Univ. Lille 1 - Sciences et Technologies, 229 p.

Aires N., Ahyerre M., Chabanel M. (2003) . *Dimensionnement hydraulique d'ouvrages de d pollution : influence des modes de représentation de la pluie*. TSM,12, 9-19

Berthier, E., Andrieu, H. et Creutin, J.D. (2004). *The role of soil in the generation of urban runoff: development and verification of a 2D model*. Journal of Hydrology, special issue Urban Hydrology, 299(3-4), 252-266.

Booth, D. B., Hartley, D. et al. (2002). *Forest cover, impervious-surface area, and the mitigation of stormwater impacts*. Journal of the American Water Resources Association 38(3): 835-845.

Emmanuel, I., Andrieu, H., et al. (2012). *Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale*. Journal of Hydrology. 430-431: 162-172.

Erdlenbruch, K., Gilbert, E., et al. (2008). *Une analyse c t-b n fice spatialis e de la protection contre des inondations. Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb*. Ingénierie EAT. 53, 3-20.

Gadiolet, P. (2010). *Stratégie de gestion concertée des eaux pluviales à l'échelle d'un petit bassin versant - de la difficile gestion des eaux pluviales en zone rurale*. Novatech 2010, Graie Ed., Lyon, France, 10 p.

Gal a, G. et Ramez, P. (1995). *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau : guide à l'usage des aménageurs*. Etudes, n 10. Cemagref Editions. 128 p.

Gril, J.J., Le Hénaff, G. et Faidix, K., 2010 - *Guide de diagnostic à l'échelle du petit bassin versant : Mise en place de zones tampons et évaluation de l'efficacité de zones tampons existantes destinées à limiter les transferts hydriques de pesticides*. Cemagref   MAAP/DGPAAT 2010, 37p. (URL : <http://www.irstea.fr/les-zones-tampons>).

Fiener, P., Auerswald, K. (2006). *Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff*. Ecological Engineering, 27(3), 208-218.

Henry, F. O., Morin-Batut, C. et al. (2010). *Analyse et construction de pluies de projet spatialisées sur le Grand Lyon*. TSM. Techniques Sciences Méthodes, génie urbain génie rural, (5), 11.

Henine, H, Chaumont, C, et al. (2012). *Le rôle des réseaux de drainage agricole dans le ralentissement dynamique des crues : interprétation des données de l'observatoire Orgeval*. S.E.T., 16-23.

Hess, T. M., I. P. Holman, et al. (2010). *Estimating the impact of rural land management changes on catchment runoff generation in England and Wales*. Hydrological Processes, 24(10), 1357-1368.

Labbas, M., Branger, F. et al. (2013). *Multi-scale approach to assess the impacts of land use evolution and rainwater management practices on the hydrology of periurban catchments : application to the Yzeron catchment (150 km2)*. Soumis   Novatech 2013.

Navratil, O., Breil, P., Schmitt, L., Grospr tre, L., Albert, M.B. (2012 accepted). *Hydrogeomorphic adjustments of stream channels disturbed by urban runoff (Yzeron river basin, France)*. Journal of Hydrology.

Naef, F., Scherrer, S. et al. (2002). *A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change*. Journal of Hydrology, 267(1-2), 74-79.

Petrucci, G., Rioust, E., et al. (2012). *Do stormwater source control policies deliver the right hydrologic outcomes ?* Journal of Hydrology. <http://dx.doi.org/10.106/j.jhydrol.2012.06.018>

Poulard, C., Szczesny, J. et al. (2005). *Dynamic Slowdown: A flood mitigation strategy complying with the Integrated Management concept - Implementation in a small mountainous catchment*. JRBM, 3(2), 75-85.

Poulard, C., Chastan, B. et al. (2008). *Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations*. Ingénieries   E.A.T., N  sp cial "La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues", 5-24.

Poulard, C., Leblois, L., et al. (2009). *Towards objective design of dry dams at watershed scale: how to take into account the spatial structure of the rainfall and its variability*. Proceedings: hydrological extremes in small basins- ERB Conference, Kraków, Poland, 18-20/09/2008. UNESCO - Technical documents in Hydrology, 84, 2 1-28.

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.