

# Vers une politique de gestion intégrée des eaux pluviales : Les éclairages apportés par la recherche



**Mercredi 9 septembre 2015**

**Auditorium du Ministère de l'Écologie**

**Tour Séquoia, Paris La Défense**

## NOTES DE SYNTHÈSE

## L'hydrologie quantitative un élément structurant de la Ville Durable

H. Andrieu<sup>1</sup>, E. Berthier<sup>2</sup>, I. Braud<sup>3</sup>, C. Joannis<sup>1</sup>

1 – IFSTTAR, Département GERS, Laboratoire Eau et Environnement

2- Cerema – Direction territoriale Ile de France

3 – IRSTEA, Centre de Lyon, Unité Hydrologie Hydraulique

### Principales priorités de recherche et besoins opérationnels identifiés

L'urbanisation est une évolution générale qui touche tous les pays. Les villes sont : consommatrices d'espace et d'énergie, génératrices de pollutions et nuisances, vulnérables aux aléas, naturels ou anthropiques (crues, tempêtes, vagues de chaleur,...). La promotion d'un développement urbain répondant à des enjeux globaux (climat, énergie, biodiversité, écologie) et locaux (foncier, qualité de vie, mobilité, mixité sociale, pollution et nuisances) est essentielle. L'hydrologie urbaine ont pour finalité de contribuer à ce développement urbain durable et la gestion de l'eau est un élément structurant de la ville durable. L'hydrologie urbaine s'est développée à partir d'un partenariat étroit entre recherche et pratiques opérationnelles dont les priorités ont évolué en fonction des besoins : évacuation des eaux usées mélangées aux eaux pluviales, protection contre les inondations urbaines, plus récemment protection des milieux aquatiques, et maintenant contribution à la qualité de vie en ville. Ces priorités orientent la recherche et le besoin de nouveaux outils et savoir-faire opérationnels. Cette note s'organise donc autour des priorités de recherche suivantes :

#### Cycle de l'eau en milieu urbain

Les préoccupations environnementales et les aspects multiples de la gestion de l'eau en ville rendent nécessaire la connaissance non seulement du ruissellement, mais aussi de toutes les composantes du bilan hydrologique : évapotranspiration, humidité des sols, origine et part des écoulements (surface, sub-surface, souterrain) et des flux et échanges entre ces différents réservoir, afin de bien mesurer l'impact des différentes pratiques de gestion sur l'ensemble du cycle de l'eau. Des dispositifs de mesures et des outils adaptés, permettant de documenter ces différentes composantes, sont à développer/consolider.

#### Hydrologie des espaces périurbains

Les agglomérations urbaines s'étendent des centres villes vers des zones plus rurales, et l'urbanisation se développe par fois rapidement dans des bassins, initialement plutôt ruraux. Dans ces zones de transition périurbaines, fortement hétérogènes, les pratiques de l'hydrologie urbaine ne sont plus suffisantes pour quantifier le bilan hydrologique, dimensionner les ouvrages. L'effort de recherche de recherche, qui débute, et de valorisation doit être tourné vers le développement de modèles et outils intégrés, empruntant aux pratiques de l'hydrologie urbaine et rurale.

#### Hydrologie urbaine et micro-climat urbain

Le climat urbain participe à la qualité de vie. Les villes subissent un effet d'îlot de chaleur, néfaste à la qualité de vie et à la santé, qui risque de s'intensifier avec le réchauffement climatique. Certaines mesures d'adaptation et d'atténuation, végétalisation, évaporation font appel à l'eau. Elles soulèvent plusieurs questions : i) la disponibilité de cette eau, et la gestion de cette ressource, ii) l'estimation et la modélisation de l'évapotranspiration dans le milieu très hétérogène. A ces questions scientifiques, s'ajoute la demande d'outils et méthodes permettant d'évaluer l'effet de ces dispositifs.

#### Pluie et hydrologie urbaine

Des progrès considérables ont été réalisés dans la mesure et la connaissance des précipitations aux échelles urbaines et notamment en hydrologie radar. La qualité des données, la longueur des

chroniques disponibles incite maintenant à mettre l'accent, sur les applications hydrologiques des images radar : modélisation pluie-débit, prévision des débits, gestion des systèmes d'assainissement.

Dans la synthèse qui suit, nous avons pris le parti délibéré de privilégier, dans la bibliographie, les travaux réalisés par les équipes françaises actives dans les domaines évoqués, afin de donner un panorama des compétences et de l'avancement des réflexions dans la communauté française sur ces sujets.

## **Le cycle de l'eau en milieu urbain**

Ne seront développés dans cette section que les écoulements de surface et de subsurface. Les flux atmosphériques permettant de fermer le cycle sont présentés plus en détail dans les sections relatives au micro-climat urbain (évapotranspiration) et à la pluie.

Le cycle urbain de l'eau présente un certain nombre de particularités du fait de l'imperméabilisation du sol, mais aussi de la présence d'aménagements et notamment de réseaux dans le proche sous-sol. Les bassins versants urbains présentent ainsi plusieurs exutoires : réseau d'eaux usées et d'eaux pluviales dans le cas d'un système séparatif, voire réseaux de tranchées (assainissement, eau potable, gaz, réseaux divers). Pour clore le bilan il faut y ajouter le sol (nappes) et l'atmosphère (Evapotranspiration)

Le comportement des *surfaces imperméabilisées*, et plus généralement des surfaces revêtues, ne se limite pas pour les événements pluvieux courants à un simple transfert hydraulique. Ramier et al. (2011) trouvent une valeur de 0,75 pour le coefficient de ruissellement annuel d'un tronçon de voirie en région Nantaise. Les pertes par évaporation (Mestayer et al., 2011) mais aussi par infiltration (Nichols et al., 2014) expliquent cette valeur, l'importance de chaque processus restant mal connue. Par ailleurs, estimer les débits de ruissellement lors des événements fréquents nécessite de meilleures caractérisations géographiques et physiques des surfaces revêtues urbaines (géométrie, topographie, granulométrie et porosité du revêtement, ...), et aussi une meilleure connaissance de leur conditions de connexion au réseau d'eaux pluviales (Jacqueminet et al., 2013).

L'influence de l'urbanisation sur les écoulements de sub-surface dépend à la fois des caractéristiques des sols et versants naturels (géologie, topographie, végétation ...), et des aménagements (imperméabilisation, réseaux de drainage urbains). Le rôle des réseaux urbains a été mis en évidence par Breil et al. (1994) puis Belhaj et al. (1995) qui ont étudié les eaux parasites d'infiltration d'origine pluviale dans les réseaux d'eaux usées et identifié une réaction rapide à la pluie, même en l'absence de raccordements directs d'eaux de ruissellement (réseaux séparatifs d'eaux usées exempts de mauvais branchements). Les bassins versants urbains drainés par un système séparatif présentent ainsi plusieurs exutoires constitués par les réseaux : réseau d'eaux usées et d'eaux pluviales. Ils ont montré que cette réaction dépend du niveau de saturation du sol dans lequel se situe le réseau. Ces travaux ont ensuite été poursuivis, afin de développer une modélisation hydrologique de l'infiltration d'eaux parasites dans les réseaux d'usées (Dupasquier, 1999 ; Raynaud et al., 2008) avec une application à l'analyse des surverses de réseaux d'eaux usées. Le rôle du sol urbain dans la réponse à la pluie d'un bassin versant urbain a été étudié à partir d'une modélisation détaillée d'un « versant urbain » schématisé par la section en travers d'une parcelle cadastrale urbaine, bordée par une rue et un collecteur d'eaux pluviales (Berthier et al., 2004). La comparaison entre observations sur le bassin expérimental de Rezé et modélisation indique que l'état hydrique du sol explique une part significative des variations du coefficient d'écoulement par événement. et que le débit de base d'un bassin versant urbain dépend du niveau de saturation du sol de ce bassin versant (Ruban et al., 2015). Toutefois, la modélisation des interactions entre la nappe et les réseaux d'assainissement réalisée avec le modèle MODFLOW ne parvient pas à reproduire correctement la dynamique observée du débit de base à l'exutoire du bassin versant étudié (Le Delliou et al., 2015). Des résultats tout récents de Li et al. (2014) indiquent que les fluctuations des nappes superficielles urbaines seraient plus expliquées par le forçage atmosphérique et l'existence d'aménagements du sol que par des transferts horizontaux en milieu saturé comme traditionnellement dans des nappes. Les résultats obtenus indiquent clairement que l'on ne décrit pas encore correctement les mécanismes de formation des débits de sub-surface et de base dans les réseaux d'assainissement et dans les bassins versants urbanisés. La thèse en cours de F. Séveno

consacrée à l'identification par traçage isotopique et géochimique des différentes contributions à l'écoulement généré à l'exutoire d'un bassin versant (Seveno et al., 2014) vise à remédier à ce constat, partagé par Hamel et al. (2013) qui mettent en exergue le besoin de modèles décrivant les écoulements de sub-surface en milieu urbain.

Les Observations et modélisations du cycle hydrologique urbain sont menées à des échelles spatiales diverses, pour la compréhension des phénomènes mais aussi en fonction des enjeux opérationnels. L'échelle du quartier fait l'objet d'observations de long terme (cf. les sites expérimentaux de URBIS) et du développement de modèles dédiés à la description des différents écoulements : des efforts importants ont été faits en direction d'une vision intégrée des écoulements, en observant le plus grand nombre de processus physiques (Rodriguez et al., 2013) et en simulant divers compartiments comme la surface et les réseaux d'eau, mais aussi le sol, l'interface sol-atmosphère (Li et al., 2014 ; El Tabach et al., 2009).

Enfin l'échelle de la ville ou de l'agglomération, pose des problèmes spécifiques d'échantillonnage spatial et de représentativité des observations. Le réseau d'assainissement constitue un outil d'agrégation spatiale intéressant pour certains écoulements et il fait l'objet d'une surveillance dont les résultats peuvent être valorisés par des synthèses et des interprétations dépassant le cadre opérationnel. Des mesures d'auto-surveillance des débits rejetés dans la Seine ont été exploitées pour faire un bilan des pollutions à l'échelle de l'agglomération parisienne, et des travaux portent sur une représentation intégrée de l'ensemble des réseaux à cette échelle (Allard et al., 2013)

Concernant l'échelle temporelle, l'accent est mis sur l'observation et la simulation en continu sur des durées pluriannuelles afin de bien caractériser les variabilités temporelles des écoulements. En effet pour les épisodes pluvieux courants, la « mémoire » du système joue un rôle important et intègre les antécédents pluvieux, les périodes sèches jusqu'à des échelles saisonnière et pluriannuelles et induit une grande variabilité des réponses à une sollicitation (Berthier et al., 2004).

### **Hydrologie des espaces périurbains**

L'urbanisation conduit à une évolution rapide des espaces en périphérie des villes (Braud et al., 2013b). Ces espaces sont très hétérogènes, avec une juxtaposition/imbrication de zones urbanisées et naturelles (Andrieu et Chocat, 2004). La création de réseaux (eaux potables, assainissement, voiries, etc.) modifie les chemins naturels de l'eau, rendant délicate la délimitation de ces bassins et le calcul de leur bilan hydrologique du fait des transferts dans et hors du bassin topographique (Jankowfsky et al., 2013; Vrebos et al., 2014). La réponse hydrologique est conditionnée par des temps de réponse différents entre zones urbaines et rurales (Furusho et al., 2014, Braud et al., 2013a). L'étude des milieux périurbains pose des défis pour l'observation et la modélisation (Braud et al., 2013b) qui restent à relever..

C'est aussi dans ces espaces que se pose de manière accrue la question des pratiques de gestion des eaux pluviales, l'extension des réseaux d'assainissement ayant un coût souvent jugé trop élevé. Les pratiques actuelles privilégient la rétention à la source. Le groupe de travail sur les eaux pluviales (Brelot et al., 2009) avait identifié un manque méthodologique pour la cartographie des zones sensibles au ruissellement, ce qui a conduit au développement de la méthode IRIP (Dehotin et Breil, 2011) qui identifie les zones les plus sensibles à la production, au transfert et à l'accumulation du ruissellement à l'échelle d'un territoire. La méthode est prometteuse, mais encore en cours d'évaluation. Par ailleurs, les problématiques environnementales imposent de s'intéresser aux crues, mais aussi à toutes les composantes du cycle: débits, humidité des sols, évapotranspiration, et composantes du débit (débit de base, débit de subsurface, ruissellement de surface) dont la répartition conditionne la qualité de l'eau. Pour les cours d'eau périurbains intermittents, cette connaissance est d'autant plus importante que, à certaines périodes de l'année, les seuls écoulements sont ceux issus des zones urbanisées.

Pour comprendre le fonctionnement de ces bassins, des suivis de long terme sont nécessaires. En France, on peut citer le bassin de l'Yzeron (Braud et al., 2013a), site pilote de l'OTHU<sup>1</sup> ou le bassin de

---

<sup>1</sup> Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine, <http://www.graie.org/othu/index.htm>

la Chézine (ONEVU<sup>2</sup>). Ces observatoires documentent la pluviométrie, les débits sur des sous-bassins aux occupations des sols différentes, mais devraient aussi intégrer des mesures piézométriques, de teneur en eau des sols et d'évapotranspiration pour les calculs de bilans. Caractériser l'hétérogénéité de ces surfaces et leur évolution dans le temps est aussi primordial. Les banques de données urbaines apportent des informations intéressantes (Rodriguez et al., 2003). La télédétection haute résolution permet de distinguer les zones perméables ou imperméables et de caractériser ces évolutions avec finesse. Néanmoins, ces méthodes restent sensibles à la résolution employée, et peinent à caractériser les zones connectées ou pas aux réseaux (Jacqueminet et al., 2013).

En termes de modélisation, des approches intégrées, empruntant à la fois aux pratiques de l'hydrologie urbaine et de l'hydrologie rurale sont nécessaires. Il est possible d'intégrer des composantes urbaines à un modèle rural ou réciproquement. On peut citer le travail de Furusho et al. (2013) où le modèle « rural » ISBA-Topmodel a été adapté en distinguant les mailles naturelles et urbaines et en ajoutant les interactions avec le réseau d'assainissement. Mais adapter un code existant présente des limites. Des cadres de modélisation souples et adaptatifs sont à privilégier (Salvatore et al. 2015). Le modèle PUMMA (Jankowsky et al., 2014), construit dans la plateforme LIQUID (Branger et al., 2010) permet de représenter le cycle hydrologique et les interactions surface/subsurface pour des petits bassins de quelques km<sup>2</sup>. Labbas et al. (2015) proposent le modèle J200P, construit dans la plateforme JAMS<sup>3</sup>, pour des bassins de taille intermédiaire, et intégrant la gestion des eaux pluviales.

Ces outils sont nécessaires pour aborder la question de l'impact cumulé, à l'échelle du bassin versant, des nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales où de nombreux progrès restent à faire (Walsch et al., 2005 ; Fletcher et al., 2013). La disponibilité de plus en plus grande de données à haute fréquence, les données d'auto-surveillance des réseaux, viennent enrichir les jeux de données qui pourront être exploités à cet effet. Petrucci et Bonhomme (2014) montrent l'apport des données haute fréquence, et des informations SIG haute résolution pour la spécification des paramètres, le calage et l'évaluation de modèles de complexité intermédiaire. L'effort de recherche initié sur ce sujet voici quelques années mérite d'être poursuivi et amplifié.

## **Hydrologie urbaine et micro-climat urbain**

L'évapotranspiration est une composante importante du bilan hydrologique, mais aussi du bilan énergétique (flux de chaleur latente) en milieu urbain. L'évapotranspiration urbaine a surtout été étudiée par les climatologues urbains (cf. l'intercomparaison de schémas de surface incluant les flux de chaleur latente, Grimmond et al., 2010). Au niveau national, deux modèles de bilan énergétique urbains incluant la description des flux de chaleur latente ont été proposés. Le modèle SM2U (Dupont et al., 2006) a adapté au milieu urbain le modèle IBSA dédié au milieu rural (Noilhan et Planton, 1989). Le modèle TEB (Masson, 2000) a été spécialement développé afin de calculer les échanges d'énergie et d'eau entre le milieu urbain et l'atmosphère. Des collaborations ont été initiées entre hydrologues et climatologues, afin d'améliorer la composante hydrique de TEB (Lemonsu et al., 2007) et de SM2U (Dupont et al., 2006), et de comparer les flux d'évapotranspiration estimés par un modèle hydrologique et un modèle climatologique (Berthier et al., 2006). Ces collaborations se poursuivent sur l'intégration des écoulements d'eau dans le sol urbain et de la présence des réseaux dans TEB (Chancibault et al., 2015). Une campagne expérimentale associant hydrologues et climatologues, FLUXSAP (Mestayer et al., 2011) s'est déroulée dans le cadre du projet ANR VegDUD.

Il se confirme donc que les flux d'eau dans le proche sous-sol urbain, que l'on peut qualifier d'écoulements de sub-surface en milieu urbain, et les flux d'eau à l'interface sol-atmosphère jouent un rôle déterminant dans le bilan hydrologique mais aussi dans le bilan énergétique en milieu urbain. L'expression « zone critique » est maintenant employée pour le compartiment incluant le proche sous-sol, la surface du sol et la proche atmosphère, au sein duquel s'effectuent tous les échanges : eau, énergie, polluants, gaz (gaz à effet de serre notamment). Compte-tenu des enjeux qui s'y rattachent en termes d'aménagement urbain, de limitation de l'îlot de chaleur urbain et de gestion des eaux pluviales urbaines, il est donc prioritaire de renforcer l'effort de recherche sur ce compartiment. Les

<sup>2</sup> Observatoire Nantais des Environnements Urbains, <http://www.irstv.fr/fr/observatoire-nantais-des-environnements-urbains>

<sup>3</sup> <http://jams.uni-jena.de/>

collaborations déjà engagées entre climatologues et hydrologues incitent à s'orienter vers une modélisation couplée des flux de sub-surface et les flux à l'interface sol-atmosphère qui contribuent tous les deux à l'évolution de l'eau présente dans le proche sous-sol urbain et du bilan hydrique du bilan énergétique. Un tel projet représente une véritable ambition scientifique commune dédiée au développement d'un modèle commun représentant la zone critique en milieu urbain.

## **La pluie : mesure, prévision et modélisation**

Des progrès considérables ont été effectués dans l'usage du radar météorologique qui est devenu un outil incontournable, tant pour la recherche que pour la surveillance hydrologique opérationnelle. La fiabilisation de la mesure radar résulte de : i) la densification du réseau national de radars météorologiques, ii) l'évolution du traitement des images radar (Tabary et al., 2007), iii) les logiciels éprouvés d'interprétation hydrologique à l'usage des utilisateurs développés par Météo-France et RHEA. L'étude des précipitations aux échelles d'espace et de temps de l'hydrologie urbaine demeure toutefois un domaine d'investigation privilégié dans trois directions : la mesure, la prévision et la modélisation de la pluie.

*La mesure de la pluie.* La polarimétrie offre un renouveau aux radars en bande X, adaptés à la couverture d'agglomérations urbaines. Il permet de mieux détecter et corriger certaines sources d'erreur : échos de sol, bande brillante, atténuation et d'en éviter certaines en se limitant à une couverture locale. On peut en attendre une amélioration de la mesure de pluie par radar (Tabary et al., 2011). La France est bien placée avec plusieurs initiatives comme : le radar expérimental de l'ENPC, et la présence de la société Novimet, pionnière en polarimétrie radar à partir des travaux du LATMOS (Testud et al., 2000). La validation de ces nouvelles données radar pour l'hydrologie urbaine mérite des études spécifiques intégrant la combinaison de données radar et celles de pluviomètres. La méthode proposée par Delrieu et al. (2014) mérite d'être testée dans un contexte urbain.

La mesure des précipitations à partir de la mesure d'atténuation des signaux Hyper Fréquence (HF) sur les liaisons de téléphonie mobile connaît également un vif engouement (Gosset et al., 2015), et une étude de faisabilité d'une reconstitution des champs pluvieux en milieu urbain par tomographie à partir de ces liaisons HF est en cours (Zohidov et al., 2014).

*La prévision de pluie par radar météorologique.* Ce sujet connaît un regain d'intérêt après des travaux ayant montré les limites de la prévision de pluie par advection d'images radar pour la gestion des systèmes d'assainissement en cas d'orages locaux (Faure et al., 1999). De nouvelles méthodes de l'advection des zones pluvieuses, flux optique notamment, sont utilisées (Wang et al., 2015). Elles sont complétées par l'élaboration d'ensembles afin d'intégrer les incertitudes. Cela impose d'élaborer des scénarios réalistes d'évolution de ces images, et donc de modélisation des champs pluvieux. La méthode de prévision STEPS (Bowler et al., 2006) combinant advection d'images radar et désagrégation de sorties de modèles illustre cette évolution et mérite d'être adaptée à un contexte urbain.

*Analyse et modélisation des champs et épisodes pluvieux.* Le radar météorologique constitue un outil incomparable d'étude de la morphologie et de la structure des champs pluvieux à différentes échelles (Emmanuel et al., 2012). Il existe plusieurs approches de simulation de chroniques temporelles de champs pluvieux : modèles stochastiques de processus ponctuels de type Neyman-Scott (Onof et al., 2000), cascades multiplicatives aléatoires, associées à des structures fractales (Lovejoy et Schertzer, 2010), géostatistique, avec le très récent modèle SAMPO (Leblois et Creutin, 2014). Ce modèle ouvre de vastes perspectives de recherches pour la simulation de scénarios réalistes, la prévision de la pluie et ses incertitudes (ensembles), la modélisation et la prévision hydrologique.

Ces acquis permettent de s'orienter vers les applications hydrologiques du radar et notamment la modélisation pluie-débit (Gires et al., 2014, Emmanuel et al., 2015) et la prévision hydrologique en vue de la gestion des systèmes d'assainissement (Schoorens et al., 2014).

## Conclusion

Vis-à-vis de l'hydrologie quantitative en milieu urbain, la demande opérationnelle exprimée jusqu'à présent concernait essentiellement la simulation des débits et des volumes. L'objectif est de vérifier l'impact d'aménagements sur les risques d'inondation d'une part, sur les rejets de flux polluants dans les eaux de surfaces voire souterraines d'autre part. Cette demande est en partie satisfaite par des outils tels que Canoe, qui continuent à évoluer pour prendre en compte les nouveaux modes de gestion des eaux pluviales.

L'évolution des enjeux vers des problématiques plus globales de la planification et de l'aménagement urbain fait émerger de nouveaux besoins d'expertise, de méthodes et d'outils. Les équipes de recherche sont mobilisées pour y répondre, en portant un effort particulier d'observation sur le long terme pour permettre le développement et la validation de modèles cognitifs et d'outils de simulation ou de prévision de grandeurs variées à différentes échelles: débits à différents exutoires pour différents régimes (pluie courantes, crues, étiages), niveaux de nappes, flux évaporatifs et températures de l'air, température de l'eau, pluie spatialement distribuée...

La valorisation des résultats de la recherche apporte des éléments de réponse à ces nouveaux besoins opérationnels. Elle facilite l'expression précise de ces besoins et en offre une capacité d'expertise dans le cadre d'échanges plus ou moins formalisés, par exemple au sein des observatoires ou d'associations tels qu'ARCEAU ou le GRAIE. Le développement d'outils de conception en cours à l'échelle de l'ouvrage, de la parcelle ou du bâtiment, et constitue un objectif fédérateur à l'échelle de l'opération d'urbanisme et de la planification urbaine.

## Références

- Allard A., Chancibault K., Andrieu H., 2013, Construction du réseau de drainage de l'ensemble d'une agglomération urbaine : cas de Nantes Est. Novatech 2013, Jun 2013, France.
- Andrieu H., Chocat B., 2004. Introduction to the special issue on urban hydrology. *Journal of Hydrology* 299, 163-165.
- Belhadj N, Joannis C, Raimbault G., 1995, Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage. *Water Sci. Technol.*, 32,161-8.
- Berthier E, Dupont S, Mestayer PG, Andrieu H., 2006.Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *J Hydrol* 2006;328:635-46.
- Berthier, E., Andrieu, H., & Creutin, J. D.,2004. The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of a 2D model. *Journal of hydrology*, 299(3), 252-266.
- Bowler, N. E., Pierce, C. E., & Seed, A. W., 2006. STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(620), 2127-2156.
- Branger, F., Braud, I., Debionne, S., Viallet, P., Dehotin, J., Hénine, H., Nédélec, Y., Anquetin, S., 2010. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework.Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling & Software*, 25: 1672-1681.
- Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., 2013a. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485: 5-23.
- Braud, I., Fletcher, T.D., Andrieu, H., 2013b. Hydrology of peri-urban catchments: Processes and modelling. *Journal of Hydrology*, 485: 1-4.
- Breil, P., Joannis, C., Raimbault, G., Brissaud, F., Desbordes, M., 1993. Drainage des eaux claires parasites par les réseaux sanitaires. De l'observation à l'élaboration d'un modèle prototype. *La Houille Blanche* N°1-1993: 45-57.
- Brelot, E., J. Chapgier, et al., 2009. Guide pour la prise en compte des eaux pluviales dans les documents de planification et d'urbanisme." Graie, Groupe de travail régional sur la prise en compte des eaux pluviales à l'échelle des bassins versants. Villeurbanne-France.
- Chancibault K., LemonsuA., BrunJ.M., De MunckC., AllardA., MassonV., AndrieuH., 2015, Improving the water budget in the urban surface scheme TEB for a better evaluation of green infrastructures for adaptation purposes, 9<sup>th</sup> International Conference on urban Climate, Toulouse,
- Dehotin, J., Breil, P., 2011a. Projet IRIP : Rapport technique - Cartographie de l'aléa ruissellement (Rapport technique).
- Delrieu G., Wibbrans A., Boudevillain B., Faure D., Bonnefait L., Kirstetter P.E., 2014, Geostatistical radar-rain gauge merging: A novel method for the quantification of rain estimation accuracy, *Advances in Water Resources*, 71, 110-124
- Dupasquier B.,1999. Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées PhD thesis, ENGREF, Paris, France.
- Dupond S., Guilloateau E., Mestayer P.G., Berthier E., Andrieu H., 2006. Parameterization of the urban water budget by using the force-restore method, *J. Applied Meteor.*, 45, 624-648.
- El Tabach, E., Tchiguirinskaia, I., Mahmood, O., & Schertzer, D. (2009). Multi-Hydro: a spatially distributed numerical model to assess and manage runoff processes in peri-urban watersheds. In *Proceedings Final conference of the COST Action C22 Urban Flood Management*, Paris (Vol. 26, No. 27.11, p. 2009).Emmanuel I, Andrieu H, Leblois E, Flahaut B., 2012, Temporal and spatial variability of rainfall at urban hydrological scales. *J Hydrol*;430-431:162-72.
- Emmanuel I, Andrieu H, Leblois E, Flahaut B., 2012, Temporal and spatial variability of rainfall at urban hydrological scales. *J Hydrol*;430-431:162-72.
- Emmanuel I., Andrieu H., Leblois E., Janey N., Payrastra O., 2015, Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modelling: Benefit of a simulation approach?, *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.058
- Faure D, Schmitt JP, Auchet P., 1999, Limits of radar rainfall forecasting for sewerage management: results and application in Nancy. In: 8th Internationalconference on urban storm drainage. Sydney, Australia; 1999, 441-9.
- Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51: 261-279.

- Furusho, C., Andrieu, H., Chancibault, K., 2014. Analysis of the hydrological behaviour of an urbanizing basin. *Hydrological Processes*, 28(4): 1809-1819.
- Gires, A., Giangola-Murzyn, A., Abbes, J.-B., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Lovejoy, S., 2014. Impacts of small scale rainfall variability in urban areas: a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework. *Urban Water Journal*: 1-11.
- Gosset, M., H. Kunstmann, F. Zougmore, F. Cazenave, H. Leijnse, R. Uijlenhoet, C. Chwala, F. Keis, A. Doumounia, B. Boubacar, M. Kacou, P. Alpert, H. Messer, J. Rieckermann, and J. Hoedjes, 2015: Improving Rainfall Measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks, *Bull Amer. Meteor. Soc.* doi:10.1175/BAMS-D-15-00164.1.
- Grimmond CSB, Blackett M, Best MJ, Barlow J, Baik JJ, Belcher SE, et al. 2010. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. *J Appl. Meteorol.Climatol*, 49, 1268–92.
- Hamel P, Daly E, Fletcher TD., 2013, Source-control stormwater management for mitigating the effects of urbanisation on baseflow, *J. Hydrol.*, 485, 201–211.
- Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., Beal, D., Gagnage, M., Branger, F., Jankowsky, S., Braud, I., 2013. Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: Application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *Journal of Hydrology*, 485: 68-83.
- Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Gironás, J., Rodriguez, F., 2013. Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments: application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes*, 27(25): 3747-3761.
- Jankowsky, S., Branger, F., Braud, I., Rodriguez, F., Debionne, S., Viallet, P., 2014. Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: Development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models. *Journal of Hydrology*, 517(0): 1056-1071.
- Labbas, M., Branger, F., Braud, I., 2015. Développement et évaluation d'un modèle hydrologique distribué périurbain prenant en compte différents modes de gestion des eaux pluviales. Application au Bassin de l'Yzeron (150 km<sup>2</sup>), La Houille Blanche, sous presse.
- Le Delliou A.L., Rodriguez F., Andrieu H., 2015, Contribution of groundwater to sewer network baseflow in urban catchments : Case study and modelling, à soumettre à *Journal of Hydrologic engineering*
- Leblois, E., Creutin, J.-D., 2013. Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field: adaptation of the turning band method. *Water Resour. Res.* 49, 3375–3387.
- Lemonsu A, Masson V, Berthier E., 2007. Improvement of the hydrological component of an urban soil, vegetation, atmosphere, transfer model. *Hydrol Process* 2007;21:2100–11.
- Li Y., Rodriguez F., Berthier E., 2014 . Development of the Integrated Urban Hydrological Model URBS: Introduction and Evaluation of a Transfer Module in the Saturated Zone, 13th International Conference on Urban Drainage, At Kuching, Malaysia
- Lovejoy S., Schertzer D., 2010, Towards a new synthesis for atmospheric dynamics: Space-time cascades, *Atmospheric Research*, 96, 1-52.
- Masson V., 2000. A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, 94, 357-397.
- Mestayer P., Rosant J.M., Rodriguez F., Rouaud J.-M., 2011. The experimental campaign FluxSAP2010 : Climatological measurements over a heterogeneous urban area, *International Association for Urban Climate*, 40, 22-30.
- Nichols, P., Lucke, T., Dierkes, T., 2014. Comparing Two Methods of Determining Infiltration Rates of Permeable Interlocking Concrete Pavers. *Water*, 6 (8), 2353–2366.
- Noilhan, J. and S. Planton, 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 536-549.
- Onof C, Chandler RE, Kakou A, Northrop P, Wheeler HS, Isham V., 2000, Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: a review of developments. *Stoch Env Res Risk Assess*;14:384–411.
- Petrucci, G., Bonhomme, C., 2014. The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: Trade-offs among complexity, calibration and geographical data. *Journal of Hydrology*, 517(0): 997-1007.
- Ramier, D., Berthier, E., & Andrieu, H. (2011). The hydrological behaviour of urban streets: long-term observations and modelling of runoff losses and rainfall–runoff transformation. *Hydrological Processes*, 25(14), 2161-2178.
- Raynaud O., Joannis C., Schoefs F., Billard F., 2008, A model-based assessment of infiltration and inflow in the scope of controlling separate sanitary overflows at pumping stations, *Proceedings 11 th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- Rodriguez F., Augris P., Flahaut B., Jankowsky S., Lebouc L., Mosini M.L., Mosset A., Pineau L., Rouaud J.M., Yilmaz D., 2013, **APPORT DES OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES A DIFFERENTES ECHELLES EN MILIEU URBAIN** colloque Quelles innovations pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain ? Nantes, décembre 2013, présentation orale
- Rodriguez, F., Andrieu, H., Creutin, J.-D., 2003. Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology*, 283(1-4): 146-168.
- Ruban V., Andrieu H., Béchet B., Chancibault K., Joannis C., Keravec P., Lamprea K., Larrarte F., Le Guern C., Lery S., Mestayer P., Rodriguez F., Rosant J.M., 2015, The Nantes Observatory on Urban Environment (ONEVU) (France), à soumettre à *Urban Water*.
- Salvatore, E., Bronders, J., Batelaan, O., 2015. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, Part 1: 62-81.
- Schoorens, J., Emmanuel, I., Le Balier, V., Guillon, A., 2014. Réponse d'un modèle d'assainissement à la variabilité spatiale des champs pluvieux : cas du bassin versant de Boulogne-Billancourt. *Congrès SHF « Optimisation de la gestion des systèmes d'assainissement pour la protection des milieux aquatiques »*, Bordeaux, 19-20 mars 2014.
- Seveno F., Rodriguez F., De Bondt K., Joannis C., 2014, Identification and representation of water pathways from production areas to urban catchment outlets: a case study in *France*, *Urban Water II*, 139, 245 - 256, eds. S. Mambretti & C.A. Brebbia,
- Tabary P., Boumahoud A.A., Andrieu H., Thompson R.J., Illingworth A., Le Bouar E., Testud J., 2011, Evaluation of two “integrated” polarimetric Quantitative Precipitation Estimation (QPE) algorithms at C-band, [405, 3–4](#), 248–260.
- Tabary, P. et al., 2007. The new French operational radar rainfall product. Part 1: methodology. *Weather. Forecast.* 22, 393–408.
- Testud, J., Le Bouar, E., Obligis, E., Ali-Mehenni, M., 2000. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17, 332–356
- Vrebos, D., Vansteenkiste, T., Staes, J., Willems, P., Meire, P., 2014. Water displacement by sewer infrastructure in the Grote Nete catchment, Belgium, and its hydrological regime effects. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(3): 1119-1136.
- Walsh, C.J., Fletcher, T.D., Ladson, A.R., 2005. Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: looking to the catchment to save the stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3): 690-705.
- Wang, L.-P., et al., 2015, Enhancement of radar rainfall estimates for urban hydrology through optical flow temporal interpolation and Bayesian gauge-based adjustment. *J. Hydrol.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.049>



Zohidov B., Andrieu H., Servières M., Normand N., 2014, Rainfall retrieval in urban areas using commercial microwave links from mobile networks: A modelling feasibility study, Geophysical Research Abstracts, 16, EGU2014-11911.

## Les pollutions transférées et leurs impacts

### Caractérisation, sources et flux, impact sur le milieu

*Ghassan Chebbo, Véronique Ruban, Johnny Gaspéri, Jean-Luc Bertrand-Krajewski*

## Introduction

La connaissance des polluants transférés dans les eaux pluviales et de leurs impacts sur les milieux aquatiques se situe au cœur des préoccupations des collectivités territoriales, du fait notamment des pressions réglementaires liées à la directive cadre sur l'eau (directive 2013/39/UE) et à ses déclinaisons locales (SDAGE) et nationales (loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006), et de l'augmentation des préoccupations environnementales.

La contamination des eaux pluviales a fait l'objet de nombreux travaux de recherche à l'échelle internationale, européenne et nationale. Elle a notamment constitué, depuis 20 ans, l'une des priorités de recherche des observatoires français en hydrologie urbaine : OPUR (Paris), OTHU (Lyon) et ONEVU (Nantes). La mise en place du réseau d'observatoires français en hydrologie urbaine URBIS a permis la structuration à l'échelle nationale d'une expertise scientifique sur les polluants urbains, appuyée par le développement de coopérations étroites entre les chercheurs et les opérationnels. L'existence d'associations comme le GRAIE (Lyon) et ARCEAU (Paris) favorisent la valorisation des recherches effectuées et l'évolution (parfois trop lente) des pratiques.

Pendant longtemps les recherches ont porté sur les polluants globaux traditionnels (MES, DCO/DBO, azote, phosphore) et quelques micropolluants (certains métaux et hydrocarbures). Depuis les années 2000, les micropolluants sont devenus une thématique de recherche à part entière, et le nombre de polluants étudiés dans les eaux de ruissellement (eaux pluviales ou RUTP) a augmenté considérablement. Cependant, de cette approche naît un certain nombre de questions. Le nombre des micropolluants est aujourd'hui de plusieurs milliers, voire de plusieurs dizaine de milliers. Leur toxicité et leur écotoxicité sont, pour la majorité d'entre eux, au mieux suspectées, au pire méconnues. Il en est de même pour leurs produits de dégradation dont on connaît mal, par ailleurs, les modes de production et d'évolution de l'amont à l'aval des hydrosystèmes urbains. Enfin, l'approche réglementaire est pour le moins tout aussi incertaine.

L'analyse des recherches effectuées montre une évolution permanente et rapide des molécules suivies, des méthodes utilisées et des résultats obtenus. L'efficacité de la valorisation des recherches effectuées est une question importante. A l'heure actuelle, des efforts importants sont réalisés mais les résultats obtenus restent limités dans la mesure où un certain nombre de messages émis par les chercheurs concernant la pollution des eaux pluviales a été soit peu repris, soit parfois hâtivement généralisé par les opérationnels sur le terrain.

## Caractérisation

Les recherches menées ces dernières années soulignent la diversité et l'ubiquité des polluants présents dans les eaux pluviales, quel que soit leur mode de gestion ; une brève synthèse est présentée ici.

### *Réseaux séparatifs*

Une base de données très importante portant sur 77 micropolluants (Gaspéri *et al.*, 2014) a été constituée par URBIS dans le cadre du projet ANR INOGEV sur trois bassins versants. Des profils de contaminations similaires entre sites mais avec des spécificités locales ont été observés. Sont détectés dans ces eaux des métaux, des HAP, des alkylphénols, des PBDE et des pesticides. De manière générale, une forte variabilité inter-événementielle des concentrations est notée pour de nombreux

polluants et des différences inter-sites liées à la différence de trafic automobile ou à la proximité d'activités industrielles ont été observées pour les métaux (Cu, Zn, Sr, Cr, Ni), les HAP ou les PBDE. Pour d'autres éléments métalliques, le bisphénol A (BPA) et les alkylphénols incluant les nonylphénols et octylphénols ethoxylés (NPnEO et OPnEO), aucune différence significative de concentration n'a été mise en évidence. Parmi les métaux, le Zn ( $126-212 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), le Cu ( $14-38 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) et le Sr ( $29-113 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) sont les plus abondants. Sur la vingtaine de pesticides recherchés, le glyphosate ( $95-198 \text{ ng.L}^{-1}$ ), l'AMPA ( $16-469 \text{ ng.L}^{-1}$ ), le diuron ( $25-795 \text{ ng.L}^{-1}$ ) et le glufosinate ( $6-389 \text{ ng.L}^{-1}$ ) sont prédominants. L'isoproturon ( $3-53 \text{ ng.L}^{-1}$ ), la carbendazime ( $7-195 \text{ ng.L}^{-1}$ ) et le mécoprop sont quantifiés à de plus faibles niveaux. Pour les PBDE, les eaux pluviales sont caractérisées par des profils moléculaires typiques de ceux mentionnés dans la littérature c'est-à-dire avec une part minime des tri-, tetra- et hexa-BDE mais avec une prédominance du deca-BDE (BDE-209,  $23-251 \text{ ng.L}^{-1}$ ). Enfin, les concentrations moyennes en BPA et NP sont respectivement estimées à 552 et 359  $\text{ng.L}^{-1}$ . Les NPnEO sont prédominants par rapport aux OPnEO. Si la plupart des métaux, HAP et PBDE sont majoritairement sous forme particulaire, le BPA, les alkylphénols et la plupart des pesticides sont préférentiellement présents sous forme dissoute. Au-delà de ces molécules, d'autres études pointent la présence d'organo étains, de PCB ou de phtalates dans les eaux usées (Zgheib, 2009).

#### *Ruissellements amont*

Plusieurs études ont été menées sur la qualité des eaux pluviales à l'échelle de la parcelle ou du quartier (Bressy, 2010, Delamain, 2014). Pour certains polluants (HAP, PCB, Cu, Pb, alkylphénols), une contamination des eaux pluviales plus faible que celle à l'aval de grands bassins versants drainés par des réseaux séparatifs est observée (Bressy, 2010). Ces études soulignent également une forte variabilité de la charge en micropolluants. Des travaux récents (Delamain, 2014) en démontrant que les concentrations en métaux et pesticides mesurées dans un écoquartier équipé de différentes techniques alternatives (noue, canal, toitures végétalisées) sont du même ordre de grandeur que celles mesurées aux exutoires des réseaux séparatifs amènent toutefois à s'interroger sur le rôle des matériaux utilisés au sein des ouvrages de gestion amont. Malgré ces études, les données sur la charge en micropolluants des ruissellements amont demeurent insuffisantes. A ce jour, il apparaît nécessaire de mieux caractériser le ruissellement amont pour orienter les solutions de gestion à la source.

#### *Réseaux unitaires*

Pour les réseaux unitaires et les RUTP, de nombreuses substances ont été détectées, la plupart étant aussi détectée dans les eaux usées ou les eaux de ruissellement. Certains polluants exclusivement véhiculés par les eaux usées comme les résidus pharmaceutiques, les COV, etc. sont également détectés dans les RUTP. Quelques différences apparaissent au regard des profils moléculaires et/ou des concentrations comparativement aux eaux pluviales. Pour la plupart des polluants organiques hydrophobes et des métaux particuliers communs aux deux matrices, les concentrations des RUTP excèdent les concentrations observées pour les eaux usées et les eaux de ruissellement, en raison de la remise en suspension des dépôts formés au sein du réseau. Pour des polluants plus fortement concentrés dans les eaux pluviales (cas de quelques métaux), des diminutions de concentrations sont produites par dilution. Pour les RUTP, une proportion plus importante de polluants est liée aux particules.

## **Sources des micropolluants dans les eaux pluviales**

Les travaux sur les flux de micropolluants dans les eaux pluviales attestent d'une production locale importante, et ce pour la majorité des polluants étudiés. Cette production est liée soit au lessivage des surfaces urbaines (toitures, bâtis), des véhicules ou encore du mobilier urbain soit des activités qui s'y déroulent. A titre d'exemple, des émissions importantes en Cu et Zn ont été reportées pour certaines toitures métalliques. Certains pesticides peuvent être également émis depuis les façades. Pour les HAP, les émissions liées au trafic automobile constituent la principale source. Pour certains polluants comme les PBDE, les alkylphénols, le bisphénol A et les phtalates, les sources de contamination sont moins bien cernées. Le lessivage des véhicules, du mobilier urbain et de certains types de bâtis

pourrait être une source de ces contaminants puisque certains de ces composés sont utilisés dans différents éléments automobiles ou dans les plastiques polycarbonates massivement utilisés en ville. Certains polluants (pesticides par exemple) peuvent également être transférés par la circulation atmosphérique depuis des bassins versants voisins ou parfois éloignés, ce qui explique que les activités et le bâti d'un bassin versant particulier ne sont pas toujours les seules sources de micropolluants observés sur ce bassin versant. Quel que soit le type de réseau, les apports atmosphériques contribuent peu à la contamination par temps de pluie. Pour les réseaux unitaires, l'érosion des dépôts formés par temps sec est une contribution importante aux flux de polluants hydrophobes.

## **Flux de micropolluants dans les eaux pluviales**

Pour les réseaux séparatifs, plusieurs tentatives, infructueuses à ce jour, ont tenté de relier les caractéristiques des événements pluvieux aux flux de micropolluants des eaux pluviales. Les modèles décrivant le mieux les flux de polluants sont fondés sur la hauteur des précipitations. Des travaux récents confirment que les variabilités de flux entre sites et au sein des mêmes sites sont majoritairement dues à des différences de précipitations. Pour les réseaux séparatifs, les ordres de grandeurs des flux de polluants varient de quelques g/ha actif à plusieurs centaines de g/ha actif.

Certains travaux ont montré que les techniques alternatives, en diminuant les volumes d'eau rejetés vers l'aval, réduisent les masses de contaminants émises. Bressy (2010) indique des réductions de 20 à 80 % pour certains polluants (MES, DCO, PCB, HAP, alkylphénols, métaux traces). L'amplitude de ces effets varie suivant l'importance de la pluie, mais surtout en fonction du type d'ouvrage mis en place. Les connaissances pour d'autres polluants sont extrêmement limitées.

Pour les réseaux unitaires, et pour les polluants à la fois présents dans les eaux pluviales et les eaux usées strictes, plusieurs cas de figure sont à différencier. Lorsque les concentrations des eaux usées sont supérieures à celles des eaux pluviales (cas des alkylphénols, phtalates et PBDE), des flux supérieurs par hectare actif sont attendus. Pour les polluants avec des concentrations dans les eaux pluviales bien supérieures à celles des eaux usées (cas des HAP et de certains métaux), des flux du même ordre de grandeur ou inférieurs à ceux des réseaux séparatifs sont observés.

## **Impact des rejets d'eaux pluviales sur les milieux aquatiques**

Les impacts des rejets d'eaux pluviales sont de nature physique, chimique, biologique et écologique, et sanitaire.

Les rejets, à des débits et des volumes parfois très élevés en fonction de l'intensité et de la hauteur des précipitations qui les ont générés, peuvent accroître de manière significative les débits et les vitesses d'écoulement des milieux aquatiques dans lesquels ils se produisent. Au droit des rejets, on observe des érosions localisées (affouillements) ou étendues, et parfois des phénomènes marqués d'incision et de creusement des lits des cours d'eau pouvant conduire à des modifications géomorphologiques significatives.

Les impacts chimiques des polluants traditionnels (MES, DCO/DBO, N et P) ont été étudiés depuis de nombreuses années et sont directement liés à la présence des polluants transportés par les rejets. Lorsque les débits et volumes d'eaux pluviales déversés sont significatifs par rapport à ceux transitant dans les cours d'eau, on observe généralement une augmentation des concentrations des polluants concernés dans les milieux aquatiques. Les rejets de MES peuvent entraîner des colmatages du lit et modifier, temporairement ou durablement, la composition des zones hyporhéiques. Les MES sont également le vecteur des polluants présents en phase particulaire. Les rejets de matière organique oxydable (DBO) entraînent une baisse de la concentration en oxygène dissous des milieux aquatiques. Si cette baisse est suffisamment longue et prononcée, elle peut conduire à des mortalités piscicoles. Les rejets d'azote et de phosphore, dans les milieux aquatiques avec des écoulements très lents ou relativement fermés (certaines baies, de même que les lacs et ruisseaux urbains par exemple), contribuent au phénomène d'eutrophisation.

Les concentrations en métaux, HAP et micropolluants organiques des milieux aquatiques sont également augmentées significativement par les rejets d'eaux pluviales. A l'échelle événementielle, les rejets de certains polluants (métaux, pesticides, HAP par exemple) dans les eaux pluviales peuvent représenter une contribution significative et parfois majeure des rejets urbains par rapport aux rejets des stations d'épuration. A l'échelle annuelle, la contribution des eaux pluviales aux flux polluants totaux rejetés dans un milieu aquatique est variable selon les sites et les polluants : de ratios de 20 à 60 % ont été observés sur certains sites parisiens.

Les impacts biologique et écologique affectent la biocénose des milieux aquatiques. Pour un certain nombre de substances (pesticides, PCB, certains métaux), les rejets d'eaux pluviales entraînent des phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification le long des chaînes trophiques, pouvant conduire à terme à la disparition de certaines espèces (maladies, longévité plus faible, reproduction perturbée) et donc à la perturbation de l'écosystème et des populations présentes.

Les très nombreux micropolluants organiques suivis plus récemment dans les eaux pluviales ont des conséquences sur les milieux aquatiques encore très mal documentées. Certaines substances semblent être bioaccumulables, écotoxiques et sont suspectées, pour certaines d'entre elles, d'être des perturbateurs endocriniens susceptibles d'affecter les populations des milieux aquatiques. Des études de long terme sur les effets des expositions chroniques à des faibles concentrations pour la biocénose sont nécessaires.

Pour toutes ces raisons, l'atteinte du bon état chimique et écologique de certains milieux aquatiques nécessite une réduction significative des rejets d'eaux pluviales.

Enfin, les rejets d'eaux pluviales ont des impacts sanitaires notables. Les concentrations élevées en germes tests de contamination fécale, bactéries et virus, peuvent conduire à la fermeture temporaire de zones de baignades ou d'activités nautiques en contact avec l'eau (surf par exemple). Les rejets peuvent également avoir des conséquences préjudiciables en rendant impropres à la consommation les productions conchylicoles.

## **Conclusions - Perspectives**

Les travaux récents menés sur les eaux pluviales mettent en évidence :

- une grande diversité des polluants et la présence de la plupart quel que soit le mode de gestion, une production majoritairement locale (trafic, matériaux, sites industriels) de ces polluants, la contribution des apports atmosphériques proches ou lointains restant faible ;
- des concentrations en micropolluants organiques fluctuant typiquement entre quelques dizaines de  $\text{ng.L}^{-1}$  à quelques centaines de  $\text{ng.L}^{-1}$  ;
- des différences de concentrations entre sites liées en particulier au trafic (Zn, Cu, HAP), à la proximité de sites industriels (Cr, Ni), aux pratiques d'entretien (pesticides) et aux matériaux (tous les polluants) ;
- une présence majoritairement sous forme particulaire de la plupart des métaux, des HAP et des PBDE), les pesticides, le BPA et les APnEO étant préférentiellement sous forme dissoute ;
- une variabilité importante des flux de micropolluants issus des réseaux séparatifs. Ces flux peuvent être plus ou moins réduits selon le type de gestion amont mis en œuvre. Les flux des réseaux unitaires s'avèrent supérieurs aux flux séparatifs pour les APnEO, les phtalates et les PBDE, et du même ordre de grandeur pour les HAP et certains métaux ;
- un impact des rejets sur les milieux aquatiques à la fois physique (érosion localisée), chimique (diminution de la concentration en oxygène, eutrophisation), biologique et écologique (bioaccumulation de micropolluants avec répercussion sur la biocénose aquatique).

L'ensemble des travaux de recherche menés jusqu'à présent a permis de générer des connaissances sur les pollutions véhiculées et leurs sources dans les eaux pluviales. Ces connaissances s'avèrent indispensables à l'atteinte du bon état chimique et écologique des milieux aquatiques, à l'orientation et

à l'implantation des solutions de gestions. Devant le nombre important de substances, des méthodes de hiérarchisation de suivi, des outils d'aide au choix des substances, et d'autres moyens de caractérisation de la pollution (par exemple screening non ciblé, semi-ciblé, bio-indication) constituent certains des futurs besoins de recherche.

Enfin, il est nécessaire de renforcer la collaboration entre les structures de recherche et les structures de valorisation pour relever le grand défi que représentent l'étude de la contamination des eaux pluviales et la qualité écologique des milieux aquatiques.

## ANNEXE

### Références

- Bressy A. (2010). Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines : effets de différents modes de gestion à l'amont. Thèse ENPC, 331 p.
- Delamain M. (2014). Comparaison des pratiques d'entretien des surfaces urbaines entre le bassin versant du Pin Sec (Nantes) et un écoquartier adjacent. Cas des pesticides et des métaux traces. Rapport ONEMA, Novembre 2013, 56 p.
- Gasperi J. Sebastian C., Ruban V., Delamain M, Percot S., Wiest L., Mirande C., Caupos E., Demare D., Diallo Kessou M., Saad M., Schwartz JJ., Dubois P., Fratta C, Wolff H., Moilleron R., Chebbo G, Cren C, Millet M., Barraud S., Gromaire MC. (2014). Micropollutant contamination of urban stormwater: new insight (land use influence, partitioning, atmospheric contribution) based on an extended French data set. *Env. Sc. Poll. Res.*, 21(8), 5267-5281.
- Zgheib S. (2009). Flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l'usage du territoire. Thèse ENPC, 349 p.

### Notations

AMPA	Acide amino méthyl phosphonique	OTHU	Observatoire de terrain en hydrologie urbaine
ANR	Agence nationale de la recherche	P	Phosphore
APnEO	Alkylphénols	PBDE	Polybromodiphényléthers
ARCEAU		PCB	Polychlorobiphényles
BPA	bisphénol A	RUTP	Rejets urbains de temps de pluie
COV	Composés organiques volatiles	SOERE	Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement
DBO	Demande biochimique en oxygène	URBIS	SOERE Environnement urbain
DCO	Demande chimique en oxygène		
GRAIE	Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les infrastructures et l'eau		
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques		
MES	Matières en suspension		
N	Azote		
NPnEO	Nonylphénol		
OPnEO	Octylphénol		
ONEVU	Observatoire nantais des environnements urbains		
OPUR	Observatoire des polluants urbains		

# Les dispositifs de gestion des eaux pluviales

S. Barraud<sup>1</sup>, M.-C. Gromaire<sup>2</sup>, F. Rodriguez<sup>3</sup>

1 – INSA de Lyon – Laboratoire DEEP

2 – Leesu – Ecole des Ponts ParisTech

3 – IFSTTAR, Laboratoire Eau et Environnement

## Introduction

L'histoire récente de la gestion des eaux pluviales est marquée par le passage d'ouvrages de génie civil et centralisés alimentés par des réseaux de conduites (bassins de rétention enterrés ou à ciel ouvert) à des ouvrages de plus en plus décentralisés (chaussées réservoirs, espaces urbains temporairement inondables) et avec des approches plus paysagères, en lien avec la végétation en ville (noues, toitures végétalisées, jardins de pluie). Cette évolution des approches de gestion s'est accompagnée d'une évolution des services attendus des ouvrages : gestion hydrologique tout d'abord, puis abatement des flux polluants, intégration urbaine, fonction paysagère, et plus récemment ressource alternative à l'eau potable, biodiversité, lutte contre l'îlot de chaleur urbain.

La note aborde sommairement l'état des connaissances en lien avec les performances et objectifs principaux des dispositifs actuels de gestion des eaux pluviales, les nouveaux enjeux et les besoins tant de recherche qu'opérationnels. Elle n'aborde pas les dispositifs traditionnels par réseaux. Les références bibliographiques citées sont principalement celles obtenues en contexte français, mais les connaissances évoquées tiennent largement compte des données internationales.

## Limitation des flux d'eau

### A l'échelle locale

La plupart des ouvrages de gestion des eaux pluviales répondent en premier lieu à un objectif de limitation des débits afin de maîtriser les surcharges des réseaux d'assainissement et les risques d'inondation associés lors d'événements météorologiques exceptionnels. Ils permettent de limiter les débits de pointe (grâce au stockage / régulation et/ou à l'infiltration), et de limiter les volumes de ruissellement (grâce à l'infiltration) à l'exutoire des zones contributives de ces ouvrages, et à une échelle locale. Les préconisations de conception des ouvrages stipulent en général des critères de débit de fuite, et plus rarement, des critères d'abattement des volumes (Petrucci, 2012). La maîtrise des volumes associés aux « pluies courantes » est un objectif secondaire qui a émergé plus récemment, en lien notamment avec la maîtrise des flux polluants (Sage et al, 2015). D'autres objectifs sont moins souvent cités en France, mais le sont beaucoup plus à l'étranger (Fletcher et al, 2014) : le retour à un bilan hydrologique équivalent avant le développement de la zone urbaine (« pré-développement »), ou la réalimentation des nappes.

Historiquement, ce sont d'abord des ouvrages centralisés de délestage de réseau aux capacités importantes qui ont été mis en œuvre. L'approche privilégiée actuellement, pour répondre à l'essor urbain, repose sur une gestion au plus proche de la source, dans des ouvrages décentralisés intégrés à l'aménagement.

Les freins au développement de ces dispositifs du point de vue de la limitation des flux d'eau sont aujourd'hui souvent liés aux risques de dysfonctionnements sur le moyen ou le long terme ou plus exactement à la difficulté de les prévoir et de les gérer. Deux problèmes sont évoqués quant au bon fonctionnement hydraulique : le piégeage des sédiments dont la gestion et le traitement posent problème aux maîtres d'ouvrage et le colmatage qui conduit à une réduction de la performance hydraulique initiale pour les ouvrages d'infiltration. Ces phénomènes affectent particulièrement les ouvrages centralisés ou semi-centralisés, pour lesquels le rapport surface de bassin versant sur surface d'ouvrage est grand.

Néanmoins, des connaissances et recommandations existent aujourd'hui permettant de relativiser ces risques notamment sur le colmatage. Moins d'éléments sont présents pour l'évaluation quantitative des sédiments

piégés pour lesquels des programmes sont en cours (e.g. ANR CABRRES, Lipeme Kouyi et al 2014). L'évolution du colmatage et son emplacement pour différents systèmes en service a fait l'objet de nombreuses études. Sa localisation est bien connue maintenant : à l'interface de différentes couches (sol / matériaux granulaires par exemple) comme pour les biofiltres, tranchées, puits et en fond de dispositif (bassins d'infiltration non comblés, noues en terre (Siriwardini et al 2007, Proton 2008, Le Coustumer 2008, Gonzalez-Merchan, 2012). On sait aussi que les parois des dispositifs sont quasiment épargnées par le colmatage, qu'ils soient centralisés ou décentralisés. Les cinétiques de colmatage sont très dépendantes du type de dispositifs et du type d'apport. Des recommandations existent (Barraud et al., 2009) mais aucun modèle de prévision du colmatage n'est disponible et applicable à des dispositifs quelconques. L'expérience montre cependant que le colmatage de ces ouvrages est visible (lames d'eau, débordements locaux) et qu'il est par conséquent facile d'intervenir. On sait également par ailleurs que la végétation est un facteur plutôt positif quand elle est bien choisie ou adaptée (Gonzalez-Merchan 2012, Hatt et al., 2007, Le Coustumer, 2008).

Un autre type de freins concerne les critères d'implantation locale des systèmes décentralisés qui sont souvent calqués sur des recommandations relatives à des systèmes centralisés de grande taille et pouvant présenter une forte pression sur l'environnement. Par exemple des risques géotechniques ou géologiques sont mis en avant vis-à-vis des pratiques d'infiltration. Y-a-t-il des risques à infiltrer en milieu urbain au plus près des bâtiments pour la bonne tenue de leurs fondations ? Y-a-t-il des risques à infiltrer sur des sols gypseux de petites quantités d'eau alors même que l'on n'interdit pas l'infiltration dans les espaces verts qui fonctionnent de manière similaire ? Il y a là peu d'études qui permettent d'objectiver les réponses.

En termes de conception hydraulique (échelle de l'ouvrage), et en contexte français, les méthodes existantes et utilisées par les opérationnels sont principalement de deux ordres :

- des méthodes de pré-dimensionnement utilisées en dimensionnement (méthode des pluies ou méthode des volumes). Leurs bases reposent sur des hypothèses très simplifiées (e.g. coefficient d'apport constant, pas d'effet d'amortissement des flux d'eau sur le bassin versant alimentant l'ouvrage, débit de fuite constant). Elles reposent également sur des données statistiques de pluies qui sont le plus souvent prises égales à des valeurs de la littérature dont l'adaptation au contexte n'est pas acquise. Elles fournissent le volume à stocker, un temps de vidange approximatif. Ces méthodes dimensionnent les ouvrages pour des événements rares (e.g. période de retour de 10 ans à 100 ans) mais ne se soucient ni des problèmes de gestion de la pollution ni des événements courants (situations les plus souvent rencontrées).

- des méthodes de simulation basées dans le meilleur des cas sur des pluies historiques dites de référence ou plus souvent sur des pluies de projet qui ont été construites pour modéliser la transformation pluie/débit sur des bassins versants urbains drainés par des réseaux et dont l'adaptation à la simulation des BV munis de systèmes de stockage et ou d'infiltration n'est pas étayée. Les méthodes les plus opérationnelles sont toutes plus ou moins basées sur la "méthode des débits" qui s'appuie sur un modèle de réservoir. La simulation par des séries de pluies est rarissime en France ; les chroniques de pluies n'étant pas accessibles facilement. Les collectivités qui disposent de réseau pluviométrique ne les utilisent pas plus pour les dimensionnements, soit parce qu'elles sous-traitent les études, soit parce qu'elles ne disposent pas de logiciel performant permettant de les exploiter facilement en des temps acceptables. Des simulations sur de longues chroniques permettraient pourtant, non seulement de dimensionner les ouvrages pour des événements exceptionnels mais également de disposer d'éléments pour mieux appréhender le fonctionnement courant (statistiques sur les périodes de temps pendant lesquels les ouvrages sont à sec par exemple et qui pourraient constituer un handicap pour la survie des végétaux, temps moyen de vidange prenant en compte la succession des événements pluvieux, ...).

Pour les systèmes décentralisés, la représentation de leur comportement local, pour ce qui est des flux d'eau, nécessiterait en outre d'adapter des modèles qui font intervenir des processus peu pris en compte traditionnellement pour les systèmes centralisés en milieu urbain comme par exemple l'infiltration profonde et l'infiltration de sub-surface, l'évapotranspiration, les écoulements en milieu poreux ou dans le sol urbain très artificialisé et extrêmement hétérogène. Si des modèles de recherche existent partiellement, peu de logiciels adaptés permettent de les simuler à l'aide d'outils dédiés. Certains logiciels existent (MUSIC® en Australie, Storm® en Allemagne, SWMM ®), mais de façon très simplifiée, très locale ou peu pratique à utiliser pour des stratégies décentralisées. Une étude préliminaire des modèles à l'international est en cours sur ce point (Sun 2015).



## A l'échelle globale

Si l'impact des ouvrages à l'échelle locale est avéré, leur effet à une échelle plus large (agglomération urbaine, rivière urbaine, nappe) a peu été abordé. La réduction des flux d'eau à l'échelle locale est *a priori* bénéfique à une échelle plus large, mais la part des dispositifs est souvent faible sur un bassin versant urbain donné, ce qui rend leur impact peu détectable à l'échelle globale. La diffusion de dispositifs alternatifs de gestion des eaux pluviales à l'échelle urbaine doit être assez systématique pour que cet impact soit significatif (Versini et al. 2015)

Deux composantes du cycle de l'eau en milieu urbain peuvent être en particulier modifiées par cette diffusion. D'une part, l'infiltration généralisée des eaux pluviales en milieu urbain se traduit par un changement de l'état hydrique du sol et des nappes : la recharge des nappes peut être favorisée par ces pratiques, ce qui est un moyen de maintenir la ressource en eau souterraine dans les zones urbaines, sur lesquelles les ouvrages souterrains et les pompages ont traditionnellement plutôt tendance à abaisser les niveaux de la zone saturée. Néanmoins peu d'études montrent l'impact réel qu'aurait la généralisation de techniques à la source en termes de quantité des ressources souterraines. (Li, 2015) 'autre part, ces pratiques d'infiltration sont un bon moyen de maintenir les débits de base en zone urbaine, et donc l'écoulement des rivières urbaines, trames bleues de nos cités, lors des périodes d'étiage (Hamel et al., 2013) ; ceci peut être un point sensible pour ces rivières souvent soumises à la pollution urbaine, plus visible lors des périodes sèches. Ces points sont encore plus saillants sur les zones urbaines pour lesquelles les scénarios de changement climatique indiquent une sécheresse plus importante dans le futur.

Cependant la systématisation aveugle des techniques à la source faisant intervenir notamment stockage et régulation peut s'avérer contreproductive. Un bassin versant muni de techniques de régulation est un système qui conduit à écrêter les hydrogrammes de pluie et à les prolonger dans le temps si bien que la contribution des différentes parties de ce bassin versant peut induire une superposition des flux d'eau qui durent plus longtemps. Cela peut donc mener à des inondations plus longues et plus critiques, ou encore conduire à une augmentation de la fréquence et du volume des surverses unitaires (Faulkner, 1999, Petrucci 2012). G. Petrucci (2012) a bien montré dans un contexte français les biais possibles des politiques de limitation réglementaire des débits imposées par les collectivités sans études hydrologiques préalables. L'effet d'une systématisation de l'infiltration n'a pas été étudié de manière suffisamment satisfaisante pour en tirer des conclusions similaires.

### *Besoin de connaissances et d'outils (à l'échelle locale et à l'échelle globale)*

Du point de vue de la recherche, les besoins concernent le développement et la mise à disposition des modèles génériques à une échelle locale capables de représenter ces dispositifs et la variété des configurations possibles (rétention et ou infiltration dans différents types de matériaux poreux...) intégrant les échanges entre les compartiments air/ ouvrages /réseaux / nappe, afin de pouvoir étudier de façon fiable et sur de longues chroniques les performances de ces ouvrages et les interactions entre les différents processus physiques et géochimiques.

A une échelle globale, il est nécessaire de disposer d'outils simplifiés permettant la simulation de l'effet sur ces différents compartiments: (i) des changements globaux (changement climatique, évolution de l'urbanisation ou des modes de gestion des eaux pluviales) (ii) de scénarios d'évolution temporelle des dispositifs, permettant l'intégration de modifications structurelles comme celle induite par le colmatage.

Ces travaux de modélisation devront également s'appuyer sur des observations de moyen et long terme du fonctionnement hydrologique des dispositifs, de l'échelle locale à l'échelle du bassin versant, en regroupant si possible les moyens d'instrumentation des différents compartiments évoqués plus haut, sur des sites instrumentés selon des procédures communes. La métrologie de ces dispositifs n'est en effet pas triviale.

Certaines connaissances sont encore à construire par exemple sur les aspects stabilité et géotechnique peu investis et qui nécessiteraient l'implication de chercheurs compétents dans d'autres domaines.

Du point de vue des besoins plus opérationnels, nous l'avons évoqué, il est nécessaire aujourd'hui de pouvoir disposer d'outils de conception adaptés au dimensionnement de dispositifs de gestion favorisant l'abattement des volumes par évapotranspiration et l'écrêtement des débits par écoulement au travers d'une couche de substrat, tels que les toitures végétalisées, bandes enherbées, parkings végétalisés, ouvrages de bio-rétention ainsi que des outils permettant de simuler l'incidence d'une systématisation de leur usage à des échelles

d'espace plus grandes (quartier, ville, ...) et sous différents scénarios crédibles de changements globaux ou régionaux. Encore faudra-t-il réfléchir aux scénarios à prendre en compte.

## Performance environnementale / flux de polluants

**Les ouvrages centralisés** reposent pour la plupart sur la décantation en conditions statiques ou dynamiques. Lorsqu'ils sont bien conçus (i.e. volume d'interception ou débit traversier nominal bien dimensionnés, circulation de l'eau conçue pour éviter les volumes morts, conditions de vidange et de gestion des boues évitant les remises en suspension) ils permettent un abattement efficace (Chebbo 1992) de la pollution particulaire, les particules étant le principal vecteur de contamination des eaux pluviales à cette échelle. La décantabilité des eaux pluviales semble cependant plus faible que ce qui avait initialement été mesuré (Chebbo et al, 2003, Torres, 2008), et les vitesses de chute souvent retenues pour le dimensionnement des ouvrages de décantation est à revoir (Arambourou et al 2013) et des méthodes de simulation hydrodynamiques simplifiées à produire. De plus, certains polluants d'intérêt plus récent pour les eaux pluviales urbaines (alkylphénols, biocides, pesticides) présentent une nature plus hydrophile et ne sont pas abattus efficacement dans les ouvrages de décantation (Sébastien, 2013).

Ces performances en termes de piégeage induisent cependant l'accumulation de sédiments pollués à gérer. De nombreuses études ont été menées pour les caractériser physiquement et chimiquement (El Mufleh et al 2014 pour les expériences françaises). Cependant peu de données existent sur leur traitabilité / recyclabilité et sur les façons optimales de les gérer. Certains traitements physiques et biologiques ont été testés pour abattre leur charge polluante avant réutilisation (Petavy, 2007) mais ce domaine mériterait d'être exploré plus précisément car il constitue une vraie préoccupation pour les collectivités.

Le recours à des ouvrages centralisés extensifs de filtration (filtres plantés) commence également à se développer en France pour le traitement des eaux pluviales. Les retours d'expérience sur leur efficacité pour ces eaux pluviales strictes restent limités, en particulier pour les micropolluants organiques (Molle et al, 2013 et projet Adepté en cours).

Pour les ouvrages d'infiltration centralisés des études permettent aujourd'hui d'être optimiste sur le rôle du sol pour le piégeage des principaux polluants véhiculés par les eaux pluviales (e.g. métaux lourds, hydrocarbures) présents sous forme plutôt particulaire. Ces polluants ne migrent pas de manière détectable dans les eaux souterraines dès lors que la conductivité hydraulique et l'épaisseur de zone non saturée sont adaptées (Gautier 1998, Datry 2003, Foulquier 2009). Ils s'accumulent dans les premiers centimètres du sol (Dechesne 2002, Le Coustumer 2008, Larmet 2007). Se posent cependant la question des polluants présents sous forme dissoute comme les pesticides par exemple qui sont détectés en aval de systèmes d'infiltration centralisés (Marmonier et al 2013). Des essais très encourageants sont en cours d'étude pour le développement de bio-indicateurs (organismes sentinelles et biofilms indicateurs) permettant de détecter des dysfonctionnements de bassins d'infiltration (Marmonier et al 2013).

**Les ouvrages de gestion à la source** contribuent par différentes voies à la maîtrise des flux polluants (Bressy 2010). En limitant les transferts dans des réseaux d'assainissement, on s'affranchit des contaminations croisées dues aux connexions entre des réseaux séparatifs souvent imparfaits. D'autre part, la réduction du flux de polluants est favorisée par le fait que les effets de lessivage et d'entraînement des particules sont plus faibles sur les surfaces amont (débit plus faible), par la réduction des volumes de ruissellement pouvant être engendrée et par des processus propices au piégeage des polluants particuliers comme certains métaux et hydrocarbures (stockage, ralentissement et filtration) ou dissous (adsorption sur les sols et substrats).

La gestion à la source permet par ailleurs une gestion différenciée des ruissellements en fonction de leur potentiel de contamination (AESN, 2013). Pour les ruissellements présentant des concentrations en polluants modérées (toitures, espaces piétons, voirie à faible circulation), un abattement des volumes de ruissellement dans des ouvrages perméables et végétalisés peut permettre une maîtrise suffisante des flux polluants. En effet, cette réduction des flux d'eau ruisselés s'accompagne d'une diminution des flux de polluants associés. Dans le cas des surfaces à fort potentiel polluant (surfaces métalliques, voirie à forte circulation, parking à forte sollicitation) la mise en œuvre de solutions permettant une filtration et une adsorption des polluants sur un substrat naturel ou artificiel doit être envisagée pour se prémunir d'éventuels transferts vers les eaux souterraines. Il peut s'agir d'ouvrages relativement rustiques s'appuyant sur les services écosystémiques des sols vivants. Une offre croissante de dispositifs préfabriqués de décantation / filtration / adsorption destinés

au traitement décentralisé des eaux de ruissellement se développe par ailleurs. Les retours d'expérience sur l'efficacité et la durabilité de ces ouvrages restent à ce jour insuffisants.

Les polluants persistants restent présents, soit dans les matériaux poreux favorisant l'infiltration, soit dans les sédiments décantés pour les ouvrages de rétention. La question de la gestion de ces sols / sédiments sur le long terme reste également posée même si l'accumulation est bien moins rapide que dans le cas des systèmes centralisés. Pour les polluants organiques, la rétention en surface ou dans le sol des ouvrages de gestion peut permettre des processus de dégradation biotiques ou abiotiques (Leroy et al, 2015). Il est à noter que les eaux de ruissellement amont sont caractérisées par une granulométrie plus fine. Elles sont donc moins décantables, et par une importance de la pollution véhiculée sous forme dissoute, ce qui est moins favorable à la performance d'abattement par décantation et nécessite le recours à des processus de filtration et d'adsorption (en favorisant l'écoulement au travers d'une couche de substrat ou de sol d'épaisseur suffisante).

Que ce soit pour les ouvrages centralisés ou décentralisés, la végétation est aujourd'hui très présente dans les systèmes. Elle est globalement favorable quand les espèces sont bien choisies pour contribuer à la tranquillisation des flux d'eau et donc favoriser décantation et les processus d'adsorption. Cependant la plante elle-même n'est pas très efficace pour extraire la pollution. Ainsi la part extraite par les racines ou les parties aériennes ne représente-elle que quelques pourcents des masses piégées selon Saulais (2011) pour ce qui concerne les métaux lourds. La phytoextraction est donc quasi inexistante, en revanche les micro-organismes présents dans la rhizosphère permettent des processus de stabilisation et/ou de dégradation.

Jusqu'à présent la performance environnementale des ouvrages de gestion a surtout été évaluée sous l'angle de la réduction des flux d'eau et de polluants rejoignant le milieu aquatique superficiel via les eaux pluviales. Une évaluation complète de l'efficacité environnementale nécessite de prendre en compte l'ensemble des flux rejoignant l'environnement, ce qui peut être complexe dans des systèmes pour lesquels plusieurs compartiments physiques sont concernés, comme évoqué plus haut (évaporation / air – infiltration / sub-surface & sous-sol & nappe – rejet / milieux récepteurs de surface rivières-lacs) :

- flux infiltré vers le sol et le sous sol pendant les périodes pluvieuses
- flux liés aux sous-produits issus du traitement (boues, sédiments, eaux de lavage, végétaux...)
- mais aussi flux induits par la construction du dispositif, sa maintenance et sa fin de vie.

Une analyse globale de cycle de vie serait nécessaire pour permettre une évaluation fiable des différents systèmes de gestion envisageables.

#### *Besoin de connaissances et besoins opérationnels*

La performance environnementale de ces dispositifs reste insuffisamment documentée aujourd'hui, en particulier pour les ouvrages de gestion à la source. Evaluer cette performance, dans le cadre « intégré » décrit plus haut, nécessite de mettre en place là encore des campagnes d'observation associant un suivi fin des processus physico-chimiques à l'échelle événementielle (in situ ou en conditions contrôlées sur pilote) et un suivi de chroniques longues permettant de vérifier la pérennité de l'abattement de la pollution vis à vis de l'évolution de l'ouvrage. Cette observation doit s'appuyer sur la mise en œuvre de moyens expérimentaux classiques (mesure d'échantillons d'eau et de sols par prélèvements ponctuels, par temps sec et par temps de pluie), et par des moyens nouveaux à développer, comme la mise en place d'accumulateurs passifs, bioindicateurs ou biocapteurs, tests écotoxicologiques qui permettront de mieux suivre, à la fois dans l'eau mais aussi dans les massifs filtrants, la qualité du milieu considéré. La compréhension de la capacité de ces dispositifs à retenir ou filtrer la pollution passe par une meilleure représentation des systèmes qui les composent, par une meilleure compréhension des processus physiques chimiques et biologiques en jeu et par une modélisation adaptée. En particulier, les processus de transferts des polluants dans les sols urbains doivent être modélisés afin d'étudier le rôle des écoulements préférentiels et le risque de transfert rapide de polluants dans les ouvrages d'infiltration, ainsi que les processus de rétention et de dégradation de certains micropolluants organiques. Une attention particulière doit également être portée aux liens entre les conditions hydrodynamiques dans le massif filtrant et leur fonction épuratoire.

Enfin, les dispositifs basés sur un stockage de l'eau pluviale (bassins de rétention, cuves de récupération/réutilisation des eaux pluviales) peuvent favoriser un développement de micro organismes

pathogènes (Sebastian et al. 2014, Nguyen Deroche et al 2013). Le risque sanitaire potentiel devrait être mieux évalué notamment si les systèmes sont couplés à de la réutilisation des eaux ou ouverts au public.

Les ouvrages de gestion à la source doivent être adaptés à la nature des eaux de ruissellement à traiter, or celle-ci est fortement variable en fonction de la surface d'apport. Le besoin d'une grille d'analyse simple et faisant référence pour classer le potentiel polluant des surfaces d'apport et orienter les aménageurs vers les solutions de gestion appropriées se fait sentir.

Des documents d'orientations récents (DRIEE 2012, AESN 2013) soulignent la nécessité d'abattre le volume de ruissellement des pluies courantes par infiltration partielle et évapotranspiration. Cependant, aucun outil n'est actuellement proposé pour permettre à l'aménageur de quantifier cet objectif en termes de volume d'interception et d'évaluer l'efficacité de cette approche en termes d'abattement des flux polluants (Cf. Limitation des flux d'eau). Des travaux de recherche sont en cours (thèse J. Sage) mais demandent à être déclinés sous forme d'outil opérationnel. Si quelques modèles intégrant la qualité existent à l'étranger, leur utilisation n'est, là encore, pas entrée dans la pratique à ce jour en France.

Parmi les questions qui restent en suspens figure le sujet de la maintenance des systèmes par un entretien adapté et régulier. Cette maintenance est essentielle pour assurer la fonction de dépollution de façon pérenne. Le problème d'extraction des sédiments pour les systèmes de rétention, ou du renouvellement des matériaux filtrants pour les systèmes d'infiltration et les dispositifs industrialisés de filtration/adsorption pour lesquels les filières de traitement et de valorisation des déchets sont peu satisfaisantes reste entier.

### **Autres fonctions des dispositifs de gestion des eaux pluviales.**

Ces dispositifs assurent en général d'autres fonctions que la fonction de rétention ou d'infiltration des eaux pluviales. Par leur conception, ils ont en général une fonction paysagère, ou fonction d'espace public, qui leur confère des impacts bénéfiques sur d'autres points de vue, comme sur le plan de la biodiversité, de l'îlot de chaleur urbain, ou du cadre de vie.

La pluri-fonctionnalité de ces ouvrages est visible en particulier sur les bassins de rétention à sec souvent insérés dans des parcs publics ou des espaces sportifs, mais aussi sur les trames vertes et bleues qui sont présentes dans les outils de planification urbaine, ou encore plus localement sur les noues végétalisées (Azzout et al 1992). Cette pluri-fonctionnalité permet d'optimiser les espaces et les usages, dans un milieu urbain où la contrainte foncière est importante et de garantir leur maintenance. Elle présente l'intérêt de mieux connecter les riverains à la question de la gestion de l'eau pluviale : le citoyen constitue alors un « opérateur d'alerte » direct en cas de dysfonctionnement (présence d'eau, odeurs...).

Les techniques de gestion à la source vertes (ouvrages perméables et végétalisés) ou bleues (bassins en eau) peuvent contribuer à limiter l'îlot de chaleur urbain, car elles permettent un stockage de l'eau dans les couches superficielles (e.g. toitures végétalisées, noues, jardins de pluie, parkings perméables) et son évaporation ou évapotranspiration ultérieure. Augmenter ce flux d'évapotranspiration permet de modifier le bilan hydrique et le bilan d'énergie local, et d'augmenter le flux de chaleur latente au détriment du flux de chaleur sensible. Cela peut avoir un effet sur la température de l'air lors de périodes chaudes. L'efficacité de ces dispositifs a été étudiée dans des projets de recherche récents (ANR VEGDUD, ANR VURCA) mais reste à confirmer, en particulier aux différentes échelles d'intérêt (locale pour le citoyen, globale pour l'urbaniste). Par ailleurs, l'impact bénéfique de la végétation nécessite un maintien des conditions hydriques favorables au développement de la plante, ce qui peut nécessiter de mettre en place une irrigation, si possible en stockant de l'eau ruisselée (Norton et al, 2015).

Enfin, la diffusion des zones végétalisées associées à ces dispositifs, au sein de la ville, favorise *a priori* un retour de la biodiversité en ville, mais la présence de zones humides peut également générer des nuisances liées à la présence de moustiques non désirés, voire de crapauds trop bruyants...

### Besoin de connaissances et besoins opérationnels

Ce volet montre que la compréhension, la représentation et la perception de ces nouveaux espaces urbains passe par une prise en compte plus globale de ces dispositifs dans les recherches futures, associant les processus physiques liés à l'hydrologie, la thermique, la climatologie, la biodiversité et mais aussi les sciences sociales (sociologie humaine et sociologie des organisations, sciences politiques, économie) de manière à étudier les conditions selon lesquelles ces dispositifs peuvent se développer et assurer le rôle qu'on cherche à leur faire jouer. Des études ont été menées mais restent partielles, datées ou très locales (e.g.

Meuret et al 1995 ; Berdier et Toussaint 2007 ; Chauveau et Monier 2013 ; Sibeud et Mazereel 2007).

En effet, si cette plurifonctionnalité présente de nombreux avantages, elle peut constituer un frein au développement de l'approche. Parmi les freins les plus souvent évoqués on compte : la peur de mauvaise appropriation par les usagers ou des dévoiements d'usages, un sur-investissement technique pour des dispositifs rustiques (qui les rendent chers ou compliqués à gérer) la plupart du temps lié à la méconnaissance du fonctionnement des systèmes, une gestion complexe car en inadéquation avec la répartition des tâches des services, les freins habituels à l'innovation de la part des techniciens ou des décideurs. Il est nécessaire de développer une recherche permettant de faire la part entre les effets ressentis et ceux qui sont avérés.

Il paraît enfin nécessaire aujourd'hui de disposer d'outils de gestion patrimoniale des systèmes décentralisés qui permettraient également à une échelle plus large de suivre les fonctionnements, les biais d'utilisation, de gestion et de coûts qui viendraient compléter les observations scientifiques. Cependant comme pour les réseaux de conduites, des méthodologies sont à développer et doivent faire l'objet de recherche.

## Bibliographie

- AESN Agence de l'Eau Seine Normandie, Leesu, Composante urbaine (2013). Outils de bonne gestion des eaux pluviales. Document d'orientation pour une meilleure maîtrise des polluants dès l'origine du ruissellement. 64p.  
[http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Dossier\\_partage/COLLECTIVITES-partage/EAUX\\_PLUVIALES/](http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Dossier_partage/COLLECTIVITES-partage/EAUX_PLUVIALES/)
- Arambourou H., Charvet R., Amirat S., Lavison G., Moulin L., Garnaud S., Chebbo G., Gromaire M.-C. (2013). Caractérisation du fonctionnement d'un ouvrage de stockage-décantation en ligne des eaux pluviales Cas de la galerie Tolbiac-Masséna]. TSM (11), 87-99.
- Archer, N. A. L., Quinton, J. N., & Hess, T. M. (2002). Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain. (doi: DOI:10.1006/jare.2002.1011). Journal of Arid Environments, 52(4), 535-553.
- Azzout Y., Barraud S., F.N.Crès, Alfakih E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien, Collection Tec & Doc, Edition Lavoisier, Paris, 1994, 378 p, ISBN 2-85206-998-9.
- Barraud S, De Becdelièvre L. (coord.), Bedell J.-P., Delolme C., Perrodin Y., Winiarski T., Bacot L., BreLOT E., Soares I., Desjardin-Blanc V., Lipeme-Kouyi G., Malard F., Mermillod-Blondin F, Gibert J., Herbretreau B., Clozel B., Gaboriau H., Seron A. Come, J.-M., Kaskassian S., Verjat J.-L., Bertrand-Krajewski J.-L., Cherqui F. (2009). L'infiltration en questions. Guide édité dans le cadre du projet ECOPLUIES – ANR PRECODD. Accessible : [http://www.graie.org/ecopluiers/delivrables/55729e\\_guidemodifie\\_20090203fin6-2.pdf](http://www.graie.org/ecopluiers/delivrables/55729e_guidemodifie_20090203fin6-2.pdf) (le 2/09/2015)
- Barraud, S., Gautier, A., Bardin, J. P., & Riou, V. (1999). The impact of intentional stormwater infiltration on soil and groundwater. (doi:10.1016/S0273-1223(99)00022-0). Water Science and Technology, 39, 185-192.
- Berdier C.; Toussaint J.Y. (GRAIE, Lyon, France, 2007). Sept hypothèses sur l'acceptabilité des ouvrages alternatifs d'assainissement des eaux pluviales par infiltration, Conférence internationale Novatech 2007. Accessible : [http://www.novatech.graie.org/n\\_actes.php](http://www.novatech.graie.org/n_actes.php). (le 02/09/2015)
- Bressy A. (2010) Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des eaux pluviales, Thèse de l'École des Ponts et Chaussées- ParisTech.
- Carre C.; Barraud S.; Roux C.; Kovacs Y.; Desbordes M.; Deutsch J.C.; Guillon A.; Laplace D. (2010) Quelle maîtrise publique des eaux pluviales urbaines en France ? Conference internationale Novarech 2010. Accessible : [http://www.novatech.graie.org/n\\_actes.php](http://www.novatech.graie.org/n_actes.php). (le 02/09/2015)
- Chauveau J., Monier L. (2013) Analyse critique de l'exploitation des techniques alternatives en partie privative Critical analysis of the operation of sustainable urban drainage systems in private plots Conférence internationale Novatech 2013. Accessible : [http://www.novatech.graie.org/n\\_actes.php](http://www.novatech.graie.org/n_actes.php). (le 02/09/2015)
- Chebbo G (1992). Solides des rejets pluviaux urbains : caractérisation et traitabilité. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Chebbo G, Gromaire M.C. & Lucas E. (2003). "Protocole VICAS - mesure de la vitesse de chute des MES dans les effluents urbains." TSM, 12, 39-49.
- Datry T. (2003). Urbanisation et Nappes Phréatiques; Réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale. Thèse de Doctorat de l'Université Claude Bernard, Lyon, 215 p.
- Dechesne M. (2002). Mesure et modélisation des flux d'eau et de polluants dans les systèmes d'infiltration. Thèse INSA de Lyon, 2002, 278 p
- Deletic A. (1999) Sediment behaviour in grass filter strips. Water Science and Technology, 39(9), 129-136.
- DRIEE (2012) Doctrine relative à l'instruction des dossiers de rejets d'eaux pluviales dans le cadre de la police de l'eau (rubrique 2.1.5.0.) et de la police des ICPE. Direction régionale et interdépartementale de l'Environnement et de l'Energie d'Ile de France, Paris
- El-Mufleh, A., Béchet, B., Ruban, V., Legret, M., Clozel, B., Barraud, S., Gonzalez-Merchan C., Bedell J.-P., Delolme, C. (2014). Review on physical and chemical characterizations of contaminated sediments from urban stormwater infiltration basins within the framework of the French observatory for urban hydrology (SOERE URBIS). Environmental Science and Pollution Research, 21(8), 5329-5346.
- Faulkner B. (1999). The control of surface water runoff from new development -UK national 'policy' in need of review? Urban Water 1 (3), 207-215.
- Fletcher T. Shuster W., Hunt W.F., Ashley R., Butler D., Arthur S., Trowsdale S., Barraud S., Semadeni-Davies A., Bertrand-Krajewski J.-L., Mikkelsen P.S., Rivard G., Uhl M., Dagenais D. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water Journal. On line : DOI:10.1080/1573062X.2014.916314
- Foulquier A. (2009). Ecologie fonctionnelle dans les nappes phréatiques : liens entre flux de matière organique, activité et diversité biologiques, Thèse de Doctorat de l'Université Claude Bernard, Lyon, 268 p.
- Foulquier, A., Malard, F., Barraud, S., & Gibert, J. (2009). Thermal influence of urban groundwater recharge from stormwater infiltration basins. Hydrological Processes, 23(12), 1701-1713.
- Gautier A. (1998). Contribution à la connaissance du fonctionnement d'ouvrages d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial urbain, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon.
- Gonzalez-Merchan (2012) Amélioration des connaissances sur le colmatage des systèmes d'infiltration d'eaux pluviales. Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. 298 p.
- Hamel, P., Daly, E., & Fletcher, T. D. (2013). Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow: A review. Journal of Hydrology, 485, 201-211. Hatt, B. E., Lewis, J. F., Fletcher, T. D., & Deletic, A. (2007). Insights from the design, construction and operation of an experimental biofiltration system. 13th International Rainwater Catchment Systems Conference and 5th International Water Sensitive Urban Design.
- Larmet H. (2007). Mobilisation et transfert de Zn, Cd, Cu et des colloïdes bactériens dans les bassins d'infiltration d'eaux pluviales : Influence des conditions hydrodynamiques. Thèse Université Grenoble / ENTPE
- Le Coustumer (2008). Colmatage et rétention des éléments traces métalliques dans les systèmes d'infiltration des eaux pluviales. Thèse de doctorat INSA de Lyon / Université Monash Melbourne. 427p.
- Leroy M.C., Legras M., Marcottec, S., Moncond'huy V., Machour N., Le Derf F., Portet-Koltalo F. (2015). Assessment of PAH dissipation processes in large-scale outdoor mesocosms simulating vegetated road-side swales. Science of the Total Environment 520 (2015) 146–153
- Li Y (2015) Modélisation des processus hydrologiques au sein d'un bassin versant urbain – Étude d'un module d'écoulement dans la zone saturée et application au projet urbain du futur campus Paris-Saclay. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, ED SPIGA.
- Lipeme Kouyi G, Cren Olivé C., Cournoyer B. (2014). Chemical, microbiological and spatial characteristics and impacts of contaminants from urban catchments : CABRES project. Environmental Science and Pollution Research, 21(8), 5363-5366.
- Marmonier P., Maazouzi C., Foulquier A., Navel S., François C., Hervant F., Mermillod-Blondin F., Vieney A., Barraud S., Togola A., Piscart C. (2013). The use of crustaceans as sentinel organisms to evaluate groundwater ecological quality. Ecological Engineering. 57(2013), 118-132. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.009>
- Meuret, B., Cres F.-N., Alfakih, E. (1995). Intégration des techniques alternatives, approche sociologique. Conférence internationale Novatech 1995. 567-573.
- Molle P. (coord.) et al. (2013). Guide technique sur les systèmes extensifs pour la gestion et le traitement des eaux urbaines de temps de pluie.

## Vers une politique de gestion intégrée des eaux pluviales : les éclairages de la recherche

Séminaire scientifique organisé dans le cadre de la mission d'expertise de la politique de gestion des eaux pluviales

9 septembre 2015

- Programme ANR SEGTEUP (2013). Disponible : <http://www.graie.org/segteup/IMG/pdf/anrsegteup-guide-vfin-novembre2013.pdf> (28/08/2015). 42 p.
- Nguyen-Deroche, T.L.N., De Gouvello, B., Lucas, F., Garrec, N., Gromaire, M.-C. (2013). Évaluation de la qualité de l'eau de pluie en vue de son utilisation: vers la définition de paramètres pertinents et de protocoles adaptés. *Journal Européen d'Hydrologie*, 44 (1), pp. 1-12
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., Williams, N. S. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138.
- Petavy F. (2007). Traitement et valorisation des sédiments de l'assainissement pluvial. Thèse Nantes University & Ecole centrale de Nantes. 317 p.
- Petrucchi G. (2012) La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines : confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique. Thèse Université Paris Est / ENPC, 326 p+ annexes
- Proton A. (2008). Etude hydraulique des tranchées de rétention / infiltration. Thèse INSA Lyon 299 p
- Rioust E. (2012). Gouverner l'incertain : adaptation, résilience et évolutions dans la gestion du risque d'inondation urbaine : les services d'assainissement de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne face au changement climatique Thèse de doctorat, Université Paris Est /ENPC, 429 p
- Sage, J., Berthier, E., Gromaire, M.-C. (2015). Stormwater Management Criteria for On-Site Pollution Control: A Comparative Assessment of International Practices. *Environ. Manage.* 56, 66–80.
- Saulais M. (2011). Colonisation végétale des bassins d'infiltration et de rétention. Caractérisation de la flore et évolution des caractéristiques physico-- chimiques de l'horizon de surface végétalisé. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon / ENTPE, 248 p.
- Sebastian C., Barraud S., Ribun S., Zoropogui A., Blaha D., Becouze-Lareure C., Lipeme Kouyi G., Cournoyer B. (2014). Accumulated sediments in a detention basin: chemical and microbial hazards assessment linked to hydrological processes. *Environmental Science and Pollution Research*. 21(8), 5367-5378. DOI: 10.1007/s11356-013-2397-z
- Sénéchal C.; Guillon A.; Kovacs Y.; Lovera M Pérenniser la gestion des eaux pluviales à la parcelle : cinq propositions à destination des législateurs, des gestionnaires d'ouvrages et des aménageurs . Conférence internationale Novatech 2010. Accessible : [http://www.novatech.graie.org/n\\_actes.php](http://www.novatech.graie.org/n_actes.php) (le 02/09/2015)
- Sibeud E.; Mazereel S. (GRAIE, Lyon, France, 2007). Porte des Alpes, 10 ans après Conférence internationale Novatech 2007. Accessible : [http://www.novatech.graie.org/n\\_actes.php](http://www.novatech.graie.org/n_actes.php). (le 02/09/2015)
- Siriwardene, N., Deletic, A., & Fletcher, T. D. (2007). Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: insights from a laboratory study. *Water Research*, 41(7), 1433-1440.
- Sun S. (2015). Literature review on modelling of alternative techniques. rapport SOERE Urbis (en cours).
- Torres A. (2008). Décantation des eaux pluviales dans un ouvrage réel de grande taille : éléments de réflexion pour le suivi et la modélisation. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 374 p.
- Versini, P.-A. Ramier, D., Berthier, E., de Gouvello, B. (2015). Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale. *Journal of Hydrology*, 524, 562-575

## Acteurs, territoires, gouvernance et gestion

José-Frédéric Deroubaix<sup>1</sup>, Nathalie Le Nouveau<sup>2</sup>, Caty Werey<sup>3</sup>

1 - Leesu / Ecole des Ponts ParisTech

2 - Cerema – Direction territoriale Territoires et ville

3 - Irstea – ENGEES UMR GESTE

*Ces réflexions s'appuient principalement sur des travaux français.*

### Une politique de gestion des eaux pluviales, pour répondre à quels enjeux, avec quel(s) service(s) public(s) et quelle(s) compétence(s) ?

#### *Politiques publiques : une affirmation partielle de différents enjeux*

Plusieurs travaux récents de R&D ont souligné que les eaux pluviales ont obtenu une reconnaissance comme objet de politique publique à part entière, en réponse à l'évolution et à la diversification des enjeux d'ordres environnementaux, sociaux et économiques. Au niveau national, le lancement par le MEDDE d'une mission d'expertise de la politique de la gestion des eaux pluviales le confirme. Néanmoins les problèmes saisis et leur trajectoire varient selon les niveaux de gouvernement, du niveau Européen au niveau local. Quelques points saillants peuvent être soulignés.

En France, à l'échelle de la législation de l'eau (première loi de 1898), cette reconnaissance est récente. Elle est sans doute liée à plusieurs facteurs tels que la forte progression des problématiques urbaines, le développement des connaissances grâce l'hydrologie urbaine et une certaine autonomisation des réponses avec la généralisation du « contrôle à la source », même si la dépendance au sentier technologique du « tout réseau » se fait encore sentir. On peut considérer que cette reconnaissance a été véritablement amorcée en 1992 par le législateur : il décide alors de réguler les "eaux pluviales et de ruissellement", tant sur les questions de quantité que de qualité et tant des systèmes unitaires que des systèmes séparatifs. Et il pose le principe d'un partage des responsabilités : aux communes et leur regroupement celles d'identifier et spatialiser les problématiques et les mesures à prendre pour y remédier, y compris d'urbanisme, et aux services déconcentrés de l'Etat les missions de police de l'eau pour les rejets au milieu naturel.

A la même période, le Conseil Européen se limite aux problèmes de déversements de pollution de temps de pluie, par les seuls systèmes unitaires (directive Eaux résiduaires urbaines de mai 1991), en laissant aux Etats membres ce qui a pu être considéré comme une nécessaire marge d'appréciation au vu de la variété des contextes, en particulier climatiques. La condamnation du Royaume- Uni en 2012 par la Cour de Justice Européenne est venue poser des limites à des déversements considérés comme excessifs de temps de pluie, tandis que la Directive cadre sur l'eau de 2000 avait marqué une transition d'une logique de normes d'émission basée sur les « *best available technologies* », qui reste donc d'actualité, à une logique de norme d'immission basée sur une concentration « *souhaitable* » (d'un spectre bien plus large de) polluants dans un milieu (Barraqué, 2001). Quant aux problématiques d'inondations pluviales, phénomènes complexes, leur appréhension semble plus floue. La directive inondation donne la possibilité d'« *exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts* », et l'Etat français a ainsi exclu lors de sa transposition les « *inondations dues aux réseaux de collecte des eaux usées, y compris les réseaux unitaires* », restant silencieux sur d'autres types de réseaux et systèmes d'écoulement (et il a exclu la *maîtrise des eaux pluviales et de ruissellement* de la compétence GEMAPI). On peut constater néanmoins que plusieurs territoires à risque d'inondation (TRI) ruissellement ont été définis, que ce type d'inondations est mentionné dans la SNGRI et qu'une promotion de la prise en compte de ce type d'inondation est effectuée au travers de référentiels portés



par le ministère de l'écologie<sup>1</sup>. Enfin, c'est l'enjeu de protection des sols qui a suscité la publication récente de lignes directrices pour limiter contre l'imperméabilisation par la commission européenne, à défaut de directive.

Dans le cadre du projet européen Daywaters, une analyse des politiques de gestion des eaux pluviales conduites dans plusieurs Etats-membres avait été conduite (Chouli E., 2006). Elle a mis en évidence une diversité des formes de décentralisation des compétences assainissement et gestion des eaux pluviales ainsi qu'une diversité de combinaison d'instruments pour la mise en œuvre des politiques de gestion des eaux pluviales<sup>2</sup>. Sans que l'on puisse dire alors qu'une combinaison de formes institutionnelles ou organisationnelles soit supérieure à une autre pour une plus importante et plus innovante gestion des ruissellements urbains et des impacts de ces ruissellements sur les milieux récepteurs. Les travaux engagés en 2015 par la Commission Européenne pour dresser un état des lieux de la prise en compte par les Etats-membres des enjeux environnementaux associés aux eaux pluviales pourraient apporter un nouvel éclairage.

Au niveau local en France, on a pu reconstituer la trajectoire de la construction, dans le temps long, des politiques territoriales de gestion des eaux pluviales d'une vingtaine de collectivités<sup>3</sup>. Concernant l'inscription des eaux pluviales sur les agendas politiques, les deux grands types de faits – déclencheurs, des inondations et des dysfonctionnements de systèmes d'assainissement, masquent une grande variété de spécificités territoriales dans la perception de l'acuité du problème pluvial, qui conduit alors à la formalisation d'un engagement politique (Le Nouveau N., Deroubaix, 2013). Des profils de politiques ont également été dégagées selon les composantes les plus mobilisées : hydraulique, environnementale, d'aménagement (Soyer, 2014).

### ***Un service public de gestion des eaux pluviales, à l'état d'embryon***

C'est l'explicitation nouvelle à partir de 2006 d'un *service public de gestion des eaux pluviales* qui a consacré véritablement la reconnaissance du besoin de structurer les réponses apportées, en donnant un cadre. Cependant après dix années de parcours législatif et réglementaire, ce service reste à l'état d'embryon. D'abord les conditions de sa « sauvegarde » par le MEDDE dans le cadre de la loi de finances 2015 n'ont pu conduire qu'à des missions minimales, désormais définies par l'art. R. 2226-1 du code général des collectivités territoriales<sup>4</sup>. Ses finalités, en particulier environnementales, ne sont pas véritablement et spécifiquement explicitées, ses usagers non identifiés comme le caractère administratif du service a été conservé. Pour l'instant, on ne peut qu'aller chercher une partie des finalités, et une définition des eaux pluviales, dans la description des performances du système de collecte et de traitement des eaux usées, par temps de pluie<sup>5</sup>. Mais elles sont alors limitées aux réseaux unitaires. Et enfin, alors même que le service avait été initialement introduit en 2006 pour résoudre les problèmes de financement des eaux pluviales (Le Nouveau, Deroubaix et al, 2013), il est aujourd'hui privé de ressources financières spécifiques.

Dans ces conditions, ce service paraît donc inabouti et faiblement injonctif, d'autant plus si on le compare aux trois autres services publics du petit cycle de l'eau, au caractère industriel et commercial : assainissement collectif, assainissement non collectif et eau potable. Cette première comparaison,

---

<sup>1</sup> Certu, MEDDE (2003). La Ville et son assainissement ; DPPR (2004). PPR Inondation – note Ruissellement péri-urbain ; DPPR (2006). Les collectivités locales et le ruissellement, etc.

<sup>2</sup> Outils réglementaires, outils d'incitation fiscale, outils d'information et de participation.

<sup>3</sup> Opération de R&D du RST « Gérer durablement les eaux pluviales en zones urbaines » (2010-2014).

<sup>4</sup> « Art. R. 2226-1. - La commune ou l'établissement public compétent chargé du service public de gestion des eaux pluviales urbaines, mentionné à l'article L. 2226-1 :

1° Définit les éléments constitutifs du système de gestion des eaux pluviales urbaines en distinguant les parties formant un réseau unitaire avec le système de collecte des eaux usées et les parties constituées en réseau séparatif. Ces éléments comprennent les installations et ouvrages, y compris les espaces de rétention des eaux, destinés à la collecte, au transport, au stockage et au traitement des eaux pluviales ;

2° Assure la création, l'exploitation, l'entretien, le renouvellement et l'extension de ces installations et ouvrages ainsi que le contrôle des dispositifs évitant ou limitant le déversement des eaux pluviales dans ces ouvrages publics.

Lorsqu'un élément du système est également affecté à un autre usage, le gestionnaire du service public de gestion des eaux pluviales urbaines recueille l'accord du propriétaire de cet ouvrage avant toute intervention ».

<sup>5</sup> Arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg / jour de DBO<sub>5</sub>.

étayé de retours d'expérience de collectivités, souligne qu'il serait déjà nécessaire *a minima* de fixer une échéance pour établir le descriptif patrimonial<sup>6</sup>, de permettre voire imposer la consultation du service lors d'une demande de permis de construire sur la base d'une étude préalable, de donner le droit d'accès aux propriétés privées pour contrôler l'imperméabilisation et les dispositifs, etc. La mesure prise des problématiques de temps de pluie en système unitaire, exprimée par le nouvel arrêté du 21 juillet 2015, va inviter à une plus forte coopération des services assainissement collectif et gestion des eaux pluviales urbaines (et probablement d'autres services encore comme les voiries, etc.). On ne peut qu'en proposer une première lecture au lendemain de la publication des textes :

- partage de l'inventaire patrimonial des composantes unitaires,
- diagnostic du système d'assainissement de temps de pluie quantifiant « *la fréquence, la durée annuelle des déversements et les flux polluants déversés au milieu naturel* »,
- partage du recensement des « *ouvrages de gestion des eaux pluviales permettant de limiter les volumes d'eaux pluviales dans le système de collecte* »,
- le cas échéant, élaboration conjointe et évaluation d'un « (...) *programme de gestion des eaux pluviales le plus en amont possible, en vue de limiter leur introduction dans le réseau de collecte* »<sup>7</sup>...

Mais pour l'instant, faute d'une maturité du service public de gestion des eaux pluviales urbaines, on risque de continuer à observer encore un temps l'innovation dans les politiques et dispositifs locaux, comme le font déjà un certain nombre d'acteurs comme le GRAIE<sup>8</sup>, l'agence de l'eau Loire-Bretagne<sup>9</sup>, le Cerema et le Leesu. C'est pourquoi il paraît nécessaire de questionner et créer les conditions de véritables services publics de gestion des eaux pluviales urbaines et d'accompagner leur structuration et développement. La place des eaux de ruissellement, intégrée initialement par le projet de loi sur l'eau adopté en 2006, reste posée, de même que la place des zones non urbaines<sup>10</sup>.

### ***Quelle place pour les eaux pluviales dans les évolutions de l'organisation territoriale ?***

La question des eaux pluviales dans l'organisation territoriale semble avoir fait l'objet de peu de recherches dédiées. Les responsabilités des acteurs sont généralement analysés par les travaux sur l'assainissement pluvial, relevant des sciences et technique de l'environnement (par exemple, Chamoux, 2003 ; Granger, 2009). Dans le cadre de l'ANR INOGEV, des travaux en sociologie ont souligné le rôle des collaborations entre collectivités et chercheurs, au sein des observatoires de terrain en hydrologie urbaine (Soyer, 2014). L'observation de 20 collectivités par le RST a permis de reconstituer les étapes et spécificités de la construction de leur politique territoriale de gestion des eaux pluviales, et les coopérations développées (Le Nouveau, Deroubaix et al, 2014a et 2014b). Le Graie et le Certu ont conduit en Rhône-Alpes plus spécifiquement des réflexions pour répondre aux besoins exprimés de clarification de la « compétence eaux pluviales », face au partage des responsabilités (Graie, Certu, 2013). Dans ce cadre, l'analyse de l'expérience de la communauté de communes du Pays de Gex a mis plus particulièrement en évidence le besoin et les capacités à structurer une gouvernance adaptée lorsque les compétences eaux usées et eaux pluviales sont aux mains de différents structures (communauté de communes et communes). S'il y a encore peu de temps, dans certains territoires, personne ne s'occupait des eaux pluviales comme le constatait un chargé de mission de SAGE, aujourd'hui au contraire, on pourrait parfois faire le constat inverse, celui d'un foisonnement des acteurs et territoires s'en emparant : communes, EPCI, syndicats, CLE, district hydrographique, syndicat de SCOT. Le juriste P. Billet invitait récemment à inventer les territoires du ruissellement, aux côtés des agglomérations d'assainissement (Billet, 2013)...

<sup>6</sup> Une telle échéance a été fixée pour le service eau potable, potentiellement pénalisée s'il le respecte pas. Ainsi l'instruction du 16 juin 2015 précise les modalités de l'application du doublement de la redevance pour prélèvement sur la ressource en eau pour l'usage « *alimentation en eau potable* », en l'absence d'établissement du descriptif détaillé du réseau de distribution ou en situation de rendement insuffisant des réseaux. Ce doublement a été introduit par le décret du 27 janvier 2012 qui demande la réalisation d'un descriptif détaillé et d'un plan d'action pour la réduction des pertes en eau en cas de rendement inférieur à la valeur prescrite (85% ou valeur fonction des m<sup>3</sup> prélevés en ZRE (Zone de répartition des eaux) : « *Le doublement du taux est applicable dès l'année de facturation 2017 au titre de l'année 2016 pour des rendements calculés sur l'année 2014* ».

<sup>7</sup> Article 12 de l'arrêté du 21 juillet 2015, *op. cit.*

<sup>8</sup> <http://www.graie.org/graie/BaseDonneesTA/BaseDonneeTA.html>

<sup>9</sup> [http://www.eau-loire-bretagne.fr/collectivites/guides\\_et\\_etudes/eaux\\_pluviales](http://www.eau-loire-bretagne.fr/collectivites/guides_et_etudes/eaux_pluviales)

<sup>10</sup> En cohérence avec les termes de la loi sur l'eau de 1992, la dénomination initiale du service intégrait « *les eaux pluviales et de ruissellement* ».

La réforme de l'organisation territoriale, initiée en 2014 avec la loi MAPTAM du 27 janvier 2014, va modifier en profondeur dans les prochaines années la gouvernance de l'eau dans un mouvement de rationalisation. Le service public de gestion des eaux pluviales a été explicité et relève des communes (art. L. 2226-1 du CGCT). Cependant, seules les communautés d'agglomération avaient vu, de manière éphémère, les eaux pluviales explicitées aux côtés des eaux usées dans leurs compétences facultatives par le CGCT, par la loi Grenelle 2. Une telle explicitation était apparue cohérente, d'une certaine manière, avec celle du service public dédié. La loi NOTRE du 7 août 2015 introduit deux évolutions : i) elle revient à un seul terme générique, "assainissement" (la question des eaux pluviales, débattue lors de la loi de finances, a été ici absente des débats parlementaires), ii) elle rend cette compétence obligatoire à l'horizon 2020 pour les communautés d'agglomération et de communes. Selon les représentants du Ministère, en matière de compétence, l'assainissement du CGCT emporte aussi la gestion des eaux pluviales urbaines, sur la base de jurisprudences du Conseil d'Etat visant les communautés urbaines (CE, 4 décembre 2013, n°349614<sup>11</sup>). Cependant, les conditions varient : contrairement aux communautés urbaines, les communautés d'agglomération et de communes ne bénéficient pas d'un transfert obligatoire de la compétence voiries qui représentent une part notable des surfaces imperméabilisées, les responsabilités reconnues le conseil d'Etat étaient aussi liées à certaines circonstances (réseaux existants, etc.). D'où probablement des besoins à venir de clarification et partage des conditions d'exercice, de transfert de compétences (inventaire patrimonial, évaluation des charges...) et d'évolutions des organisations, et pourquoi pas d'explicitation d'une compétence gestion des eaux pluviales pour mieux l'affirmer. Une relecture des jurisprudences intervenues en matière d'eaux pluviales pourrait également mieux éclairer et circonstancier les partages des responsabilités et leurs fondements. Enfin, on voit déjà des collectivités structurer des services ou directions du cycle de l'eau, au sein desquels la GEMAPI a parfois déjà trouvé une place. Cela augure des synergies possibles, souhaitables, nécessaires entre les différentes compétences du cycle de l'eau, et de besoins de compréhension des processus à l'œuvre, d'accompagnement et d'évaluation.

## **Quels instruments de politique de gestion intégrée des eaux pluviales ?**

### *Une préférence d'abord marquée pour l'instrument réglementaire*

Pour des politiques territoriales de gestion des eaux pluviales, parmi les différents instruments mobilisables, la préférence semble nettement aller à l'instrument réglementaire pour intégrer le plus en amont possible les eaux pluviales dans l'aménagement. C'est ce qu'ont montré différentes observations en France (SOeS, 2008 ; Guillon, Lovera et al, 2008 ; Petrucci, Rioust et al, 2013 ; Le Nouveau, Deroubaix et al, 2014a, 2014b), ceci à l'instar par exemple des Etats-Unis (US EPA, 2010). Un tel instrument est mobilisé par les collectivités pour imposer une gestion à la source des eaux pluviales<sup>12</sup> lors de nouvelles constructions. La règle elle-même revêt différentes expressions : débit limite de rejet, zéro rejet dans le réseau, infiltration et plus récemment abattement d'une lame d'eau ou d'un volume. La justification hydrologique des limitations uniformes de débits a été questionnée par les scientifiques au regard du fonctionnement des bassins versants (Ferguson, 1995 ; Petrucci, 2012 ; Chocat, 2013).

L'Etat se saisit également de différents instruments de planification, plus ou moins souples, pour accompagner et soutenir ce mouvement à différentes échelles territoriales et niveaux de gouvernance. Au niveau des districts hydrographiques, l'incitation par des SDAGE à privilégier l'infiltration comme en Suisse<sup>13</sup> est peu discutée. En revanche, la mention de valeurs limites de débit de rejets d'eaux pluviales à partir de 2009 a été plus questionnée, avec un risque de « dispense » des acteurs de réflexion sur les enjeux locaux. Au niveau des départements, outre les missions de police de l'eau, quelques DDT mobilisent également les PPR pour accompagner la maîtrise du ruissellement à

---

<sup>11</sup> les responsabilités reconnues le conseil d'Etat étaient aussi liées aux circonstances (défaillance de réseaux, etc.).

<sup>12</sup> Notion récemment consacrée l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, à l'exception des installations d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique inférieure ou égale à 1,2 kg/j de DBO<sub>5</sub>, sans néanmoins avoir été définie.

<sup>13</sup> ou de l'ANC en France, où l'épandage souterrain est d'abord privilégié.

l'échelle de bassin versant, parfois à la demande de collectivités (exemple du département du Rhône depuis les années 1990).

L'analyse plus fine des processus décisionnels en jeu a permis de comprendre les motivations des différents acteurs impliqués, progressivement élargis. Elle a aussi mis en évidence l'hybridation progressive des rationalités dans la construction de ces règles. Si cette hybridation traduit la prise en compte de plusieurs politiques (eau, risque, urbanisme, équité territoriale...), il s'agit bien souvent plus d'une juxtaposition, incrémentale, de ces rationalités que d'une véritable intégration. Il peut en résulter, dans certaines configurations, une sévèrisation des normes de gestion des eaux pluviales (niveaux de rejet et de protection), susceptible de grever alors le droit de propriété bien au-delà de la servitude d'écoulement naturel, sans évaluation technico-économique.

Les résultats de recherches sur les réglementations locales, leurs conditions d'élaboration et leurs implications potentielles mériteraient une plus large diffusion. Des méthodes et des outils sont nécessaires pour promouvoir l'évaluation environnementale et économique de différents scénarios (décentralisé / semi-décentralisé...). Des acteurs ont déjà été conduits à faire évoluer leur règle renonçant à l'imposition systématique d'une gestion à la parcelle pour privilégier le projet urbain dans un contexte de densification, ou à les adapter aux projets de rénovation (abattement au moins des faibles pluies par exemple). Pour promouvoir également l'amélioration de l'existant, l'innovation apportée par le projet de SDAGE Rhône-Méditerranée, incitant à un déracordement voire une désimpermeabilisation à l'échelle des projets de territoires (SCOT, PLU), initialement portée par le plan de bassin d'adaptation au changement climatique, sera intéressante à observer. Des travaux, encore peu nombreux sur l'apport des SAGE à la gestion territoriale des eaux pluviales (Le Nouveau, Deroubaix et al, 2014b), pourraient également être consolidés.

### ***Des acteurs de l'aménagement accompagnés par les collectivités et les services de l'Etat***

Les prescriptions établies localement par les collectivités entraînent un nécessaire changement dans la fabrique urbaine, ceci pour tout ou partie des aménageurs. Elles sont conduites à adapter leur organisation pour s'assurer du respect de leurs prescriptions. Dans ce sens, certaines d'entre elles développent un accompagnement des pétitionnaires et plus largement des différents acteurs de l'acte de construire dans un apprentissage collectif. Ce « service rendu » semble passer par la production de guides, plus ou moins territorialisés et aux multiples dénominations<sup>14</sup>. Ils constituent des supports d'intégration de l'eau dans l'aménagement, aux côtés de l'exemplarité donnée. Une première série de fonctions territoriales remplies par ces référentiels a été mise en évidence dans le cadre des travaux d'observation des politiques de gestion des eaux pluviales de 20 collectivités conduits par le Cerema et le Leesu : accompagnement du changement culturel, représentation politique, porter à connaissance réglementaire, assistance-conseil, capitalisation et management des connaissances, appui à la structuration de la gouvernance et enfin rationalisation des coûts de transaction (Le Nouveau, Deroubaix et al, 2014a).

Depuis le début des années 2000, ce phénomène de développement des doctrines marque également l'action des services de police de l'eau, en charge de l'instruction des demandes de rejets d'eaux pluviales au milieu naturel (à partir de 1 ha), de leur régularisation et de leur contrôle. La rubrique 2150 de la nomenclature eau représente à l'échelle nationale le nombre le plus important de dossiers instruits, avec 2 700 en 2010, 4 000 en 2013. Mais ce rôle de régulation des services déconcentrés de l'Etat serait encore peu reconnu et étudié spécifiquement. Un travail plus poussé de caractérisation du développement des doctrines des services de l'Etat et de leurs pratiques est actuellement conduit par le Cerema.

Ce phénomène de développement des doctrines et guides locaux pourrait donner lieu à une analyse sous l'angle de la théorie du droit souple (Conseil d'Etat, 2013). Elle aiderait à mieux l'appréhender, en cerner les intérêts et limites, notamment en matière de légitimité et de sécurité juridique. Elle étayerait également des propositions pour, d'une part conforter le service public de gestion des eaux

---

<sup>14</sup> Cela va du guide de bonnes pratiques au « règlement pluvial ».

pluviales et préciser son articulation avec les missions de l'Etat<sup>15</sup> et d'autre part proposer des éléments de doctrines pour recourir à ce type de référentiel, tant par l'Etat que par les collectivités. Enfin, des recherches pourraient être également approfondies pour mieux comprendre et accompagner la traduction des règles en pratiques d'aménagement, de construction et d'ingénierie, ainsi que l'influence de la forme des règles sur les décisions et les dispositifs techniques résultants (Berdier, Toussaint, 2007 ; Patouillard, 2014). Un débit limite de rejet inciterait à un bassin technique de rétention, un zéro rejet à un aménagement valorisant l'eau pluviale...<sup>16</sup>

### ***Des recherches sur la gestion « citoyenne » des eaux pluviales, à développer***

Alors qu'ils sont de plus en plus responsabilisés, les citoyens semblent pour l'instant peu voire pas investigués en France, en comparaison de l'intérêt que leur portent certaines équipes de recherche à l'étranger. Il faut plutôt consulter des travaux sur la vulnérabilité aux inondations et la résilience territoriale. Des premiers travaux en sociologie ont observé l'appropriation des aménagements par les usagers des espaces publics dans le cadre de l'ANR OMEGA (Baati, Vareilles et al, 2014). D'autres s'intéressent aux incitations financières à l'utilisation des eaux de pluie, aux succès variés (Deroubaix, de Gouvello et al, 2015). On peut mentionner le projet Lumieau qui questionnera la représentation du « tout à l'égout » par les habitants et artisans strasbourgeois<sup>17</sup>. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette situation : des actions publiques à destination des particuliers limitées à l'information et aux participations procédurales (enquête publique...), le caractère diffus et peu organisé des citoyens qui rend difficile et coûteux leur accès ou encore l'implication assez récente de sociologues dans les recherches en hydrologie urbaine. Les responsabilités des propriétaires, leurs expositions aux inondations pluviales, les financements publics engagés ou requis, la place donnée aux citoyens localement et dans la transition écologique, l'importance des changements de comportements... tout cela milite pour une plus grande attention à l'accompagnement d'une gestion « citoyenne » des eaux pluviales. Ces observations sur les citoyens pourraient probablement être étendues à certains acteurs économiques. La gestion des eaux pluviales par les ICPE par exemple, qui disposent d'une réglementation eau « intégrée », mériterait ainsi d'être analysée.

### ***La taxe pour la gestion des eaux pluviales, un rendez-vous manqué ?***

C'est une question légitime, au lendemain de la suppression de la taxe par la loi de finances 2015. Elle aurait pu répondre aux besoins de sensibilisation des citoyens et d'amélioration de l'existant. Un certain nombre de pays dispose déjà d'un tel outil. Quelques dizaines de collectivités s'y intéressaient et avaient lancé des études d'opportunité, seules cinq avaient effectivement délibéré pour l'instaurer (Le Nouveau, Deroubaix et al, 2013). Les expériences du Douaisis et de la commune de Sauzé-Vaussais semblaient démontrer la capacité de la fiscalité écologique à générer un double dividende : générer des ressources (au moins pour un temps) tout en incitant à des comportements vertueux. La taxe, fondée sur le principe imperméabilisateur – payeur, n'aura donc pas eu le temps de faire ses preuves, face à la conjonction de plusieurs éléments : l'image première de complexité qui lui était attachée, la rationalisation de la fiscalité avec la suppression des taxes dites à faible rendement ou l'agenda politique peu propice à sa saisie immédiate après son instauration en 2011. Le financement par le budget général reste, à nouveau, le principe général. A ce jour en France, les expérimentations de programmes d'incitations financières de collectivités auprès des propriétaires connaissent des succès variés et visent majoritairement l'utilisation des eaux de pluie (de Gouvello, Moreau de Bellaing, 2009 ; Mucig, Gerolin et al, 2013). Des collectivités pionnières comme l'Eurométropole de Strasbourg offrent des subventions pour la déconnexion des eaux pluviales<sup>18</sup>. Leur succès reste tributaire de nombreux facteurs à évaluer. Les travaux de parangonnage en cours apporteront un nouvel éclairage sur les modèles de financement et d'incitation, les finalités visées et les modalités d'accompagnement.

---

<sup>15</sup> Un arrêté de prescriptions générales pour la rubrique 2150 est en préparation par la DEB.

<sup>16</sup> Selon notamment l'expérience du département de la Seine-Saint Denis.

<sup>17</sup> <http://www.onema.fr/AAP-Micropolluants-reseau-assainissements>.

<sup>18</sup> <https://www.strasbourg.eu/environnement-qualite-de-vie/eau-assainissement/eaux-usees/recuperer-eau-pluie>.

## **Quels risques sont appréhendés aujourd'hui et quelle gestion des incertitudes ?**

### *Les changements climatiques, des risques multiples, encore peu considérés*

Il existe peu de recherches sur la résilience des services d'assainissement face au changement climatique. La recherche conduite dans le projet Garp 3 C (Gestion de l'Assainissement en Région Parisienne dans le Contexte du Changement Climatique) s'intéressait aux modes de traitement par les services d'assainissement des questions d'inondations par débordement de réseaux (Rioust, 2012). Cette recherche avait permis de mettre en évidence les risques politiques et juridiques encourus par les services d'assainissement des collectivités qui se refusent à considérer la possibilité d'une multiplication d'événements pluvieux extrêmes, évoquant l'incertitude qui caractérise les prévisions dans le domaine. Les collectivités d'ores et déjà engagées dans des stratégies d'optimisation de la gestion de leur patrimoine et dans le développement des mesures compensatoires à l'imperméabilisation estiment être en mesure de faire face à une telle éventualité. La prépondérance de cette logique hydraulique qui ignore la nature des enjeux urbains liés aux inondations par ruissellement et débordements de réseaux fait courir aux services un risque politique (de mobilisation) et juridique (de contentieux). La capacité des services à faire entendre les logiques hydrauliques dans la conduite des projets urbains est loin d'être évidente.

### *Des micro-polluants encore peu présents dans les politiques locales*

La question des micro-polluants est encore peu présente dans les politiques conduites locales, comme l'ont souligné les travaux conduits dans le cadre de l'ANR Inogev. Le spectre des polluants est très large, les connaissances semblent encore jeunes, à consolider et à diffuser dans toute la chaîne de la construction (cf. séquences 2 et 3). Ce sont à ce stade les pouvoirs publics et les chercheurs qui s'en sont saisis, avec quelques collectivités, notamment dans le cadre de l'appel à projet national « Innovations et changements de pratiques – Lutte contre les micropolluants chimiques des eaux urbaines » (Onema, Agences de l'eau, MEDDE). Trois projets sont portés par les observatoires de terrains en hydrologie urbaine : MATRIOCHKAS (Onevu - Nantes), ROULEPUR (Opur - Ile de France) et MICROMEGAS (Othu - Lyon).

### *Potentialités des dispositifs distribués*

Les recherches commencent à émerger concernant l'évaluation du potentiel des techniques alternatives aux réseaux : potentiel de faisabilité et potentiel d'effets sur le cycle de l'eau urbain, en terme de bénéfices et de risques (Petrucci, 2012 ; Belmeziti, Coutard et al, 2013 ; Versini, Ramier et al, 2015). Toutes les formes urbaines ne se prêtent pas également à la récupération et à l'utilisation de l'eau de pluie ou à l'installation de toitures végétalisées. Toutes ces techniques n'ont bien sûr pas les mêmes effets en termes de rétention des volumes et des flux d'eau et de polluants. Des besoins opérationnels portent sur l'aide à la décision et à l'évaluation (séquence 3).

### *Une méconnaissance patrimoniale, particulièrement des dispositifs privés*

Enfin un autre risque important porte sur le patrimoine privé qui tendrait à se diffuser largement, sous l'effet des politiques de gestion à la source des eaux pluviales, sans néanmoins que cette diffusion n'ait été encore réellement documentée. Les enquêtes auprès des services d'assainissement montrent une méconnaissance du patrimoine d'infrastructures lié à la gestion à la source. Même les collectivités en pointe sur le sujet ont une connaissance très relative du patrimoine, de sa conformité et de la maintenance des dispositifs, dès lors que ces dispositifs sont localisés sur des parcelles privées. Pour des collectivités engagées de longue date dans la gestion à la source, comme Bordeaux Métropole avec plus de 10 000 solutions compensatoires, c'est un travail pharaonique (Bourgogne, 2010). Certaines de ces collectivités ont cependant, lorsqu'elles ont envisagé la possibilité d'instaurer une taxe pour la gestion des eaux pluviales, cherché à compléter leur connaissance de ce patrimoine (Le Nouveau, Deroubaix et al, 2013). Des premiers constats d'état des lieux patrimonial dressent un tableau alarmant (Pierlot, 2014). Le confortement précité du service public de gestion des eaux pluviales aura vocation à mieux cerner et maîtriser les risques associés, politiques, juridiques, sociaux, environnementaux...

## Quels systèmes, quels patrimoines, à quels coûts pour quels services ?

### *Raisonnement à l'échelle du système de gestion des eaux urbaines*

Le passage de la solution « tout tuyau » à celle des techniques alternatives a nécessité un changement de paradigme introduisant la notion de gestion intégrée du système d'assainissement et au-delà du système de gestion des eaux urbaines (SGEU). Il comprend les différentes infrastructures (linéaires et surfaciques), le(s) bassin(s) versant(s) naturel(s) ou urbain(s), l'organisation c.a.d le(s) service(s) gestionnaire(s) mais également l'environnement naturel et humain. Le SGEU implique de considérer une échelle de gestion plus large et donc un changement d'échelle à trois niveaux :

- spatial : passage du réseau d'assainissement à un système enterré ou à ciel ouvert avec des vocations techniques mais également ludiques ou esthétiques en interaction avec l'aménagement urbain,
- organisationnel : le service se retrouve dans un processus interservices au sein de la collectivité ou avec des acteurs extérieurs,
- au niveau des acteurs : niveau multi acteurs concepteurs et gestionnaires où le citoyen est à considérer aussi bien comme abonné au service que comme usager, bénéficiaire ou victime, propriétaire...

La notion de SGEU a été au cœur du projet ANR OMEGA (Cherqui et al., 2013) et ses différents changements d'échelles techniques, environnementaux et humains sont des champs de questionnement à investiguer. L'échelle élargie favorise également l'interdisciplinarité, partant de l'approche hydraulique du dispositif technique, de l'analyse hydrobiologique, vers la description de son usage social et son évaluation économique et managériale au travers des coûts directs et indirects.

### *Une gestion patrimoniale encore embryonnaire*

La gestion patrimoniale reste embryonnaire, elle passe(ra) par une phase d'inventaire et de caractérisation des dispositifs nombreux et peut-être presque tous différents, exercice dans lequel un certain nombre de collectivités se sont déjà lancées (Bordeaux, Nantes, Lyon...) et qui repose la question de l'accès aux données et à la définition d'une typologie commune. Cet inventaire patrimonial, en inter-services (eau, voirie...) est fondateur dans la définition et la structuration du service, comme l'a montré par l'expérience de Roannaise de l'eau (Petit, 2013). Des travaux vont être renforcés par le RST pour développer des méthodes d'inventaire patrimonial, adaptées à différents besoins, avec le soutien de l'Onema.

La caractérisation de système végétalisés à caractère naturaliste, porteurs de biodiversité est différente de celle existante ou encore en cours de mise en place pour les services d'eau potable et d'assainissement via l'incitation du dispositif Grenelle et notamment du décret du 27 janvier 2012.

La multifonctionnalité des ouvrages, le jeu multi-acteurs nécessitent des approches différentes que l'approche purement tronçons utilisée pour les réseaux linéaires, pourtant dès que l'on s'intéresse à la prise en compte des impacts en cas de dysfonctionnement, externalités négatives, on peut croiser les approches tuyau et TA avec cependant des critères adaptés notamment pour les risques de pollution. Notons qu'il se rajoute un nouveau champ d'investigation qui est celui des externalités positives liées à l'aspect esthétique, paysagé, récréatif... La notion économique d'externalités est définie comme des effets secondaires non compensés (positifs ou négatifs) d'une action économique (Baumol and Oates, 1975).

Concernant l'évaluation de l'état actuel des dispositifs, les travaux sont amorcés. Cependant pour la prédiction de l'évolution des infrastructures dans le temps, le recul est encore insuffisant et nécessitera de nouvelles approches de modélisation qui pourront s'inspirer des approches développées pour les réseaux d'assainissement issus de la Méthodologie RERAU et du Projet INDIGAU (Le Gauffre et al. 2005) mais devront aussi prendre en compte le caractère autonome des systèmes et leur multifonctionnalité.

La gestion patrimoniale s'appuie, d'une part, sur l'entretien : la maintenance de l'équipement durant son cycle de vie, d'autre part, sur la réhabilitation de l'ouvrage, voire son renouvellement. La

réalisation de ces opérations nécessiteront de s'interroger sur la source de financement (budget général, budget annexe de l'assainissement, propriétaire privé ...) et sur qui est responsable de l'entretien et/ou de la réhabilitation (Maysonnave 2012).

L'évaluation des coûts nécessitera de se placer dans une approche de cout global (MEDDAT 2009) à regarder dans un jeu multi-acteurs, la recherche d'une approche générique pourrait s'avérer intéressante. De travaux dans ce sens seront poursuivis, avec le soutien de l'Onema.

La question de la programmation du financement de la réhabilitation pose également la question de la durée d'amortissement au regard de durée de vie réelles encore peu connues, quelques services commencent à dissocier les durées d'amortissement des différents patrimoines (tuyaux et techniques alternatives). Elle nécessitera également d'inventer d'autres modèles de stratégies financières à croiser avec ceux imaginés pour les réseaux d'assainissement (Marlangeon et al. 2012).

### ***Fonctions ou services ? écosystémiques naturels ou urbains ?***

L'eau cachée est passée au stade d'eau source d'agrément comme l'illustrent bien les différents articles de l'ouvrage « Peurs et plaisirs de l'eau » (Barraqué B. & Roche P. A., 2010). L'eau retrouve sa place dans les aménagements urbains et péri-urbains : miroir d'eau, aménagements de berges, remise à ciel ouvert de ruisseaux canalisés... Dans l'ouvrage cité précédemment F. Scherrer pose la question de « l'écocycle urbain », nouveau paradigme technique ? Selon nous, cela va au-delà de la dimension technique avec des incidences sur l'organisation des services urbains ou hors des services urbains. Pour O. Coutard et J. Rutherford (2009) « l'écocycle urbain durable » permet de définir des principes d'organisation territoriale différents aux marges de l'organisation en réseaux collectifs, ils parlent de systèmes composites : alternatifs, décentralisés (récupération des eaux pluviales, production de chauffage ou de froid en pied d'immeuble, assainissement non collectif...).

D'autres auteurs font référence à la notion de service écosystémiques tels que définis par l'approche *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), partant de l'écosystème naturel source de nombreux bénéfices pour les hommes, en les étendant à la notion d'écosystèmes urbains, à présent étudiée notamment dans le cadre du projet EFESE porté par le MEDDE<sup>19</sup>. Ainsi Bolund et Hunhammar (1999) définissent 6 services rendus dont le « drainage des eaux de pluie » pour 7 types d'écosystèmes : les arbres d'alignement, les pelouses des parcs, les parcelles forestières urbaines, les terres cultivées urbaines, les zones humides urbaines, les cours d'eau, les lacs et l'océan. Le positionnement des techniques alternatives, systèmes anthropisés, d'abord étudiés pour un fonctionnement hydraulique, dans la notion de service écosystémique est encore à approfondir tout comme son aspect multifonctionnel, son appropriation par les pratiques indifférenciées, exemple entre les jeux et les dispositifs de gestion urbaines (Ah Leung, et al. 2013).

L'aspect récréatif et paysager pose la question de la prise en compte des externalités positives quand on regarde à l'échelle du système d'assainissement et ceci à côté des externalités négatives plus regardée dans les approches gestion patrimoniale et ouvrant la porte à l'exploration d'analyses coûts bénéfiques ACB pour étudier une situation de fait et son évolution dans le temps et pour comparer différents projets d'aménagement, approches préconisées par la DCE pour étudier le risque de coûts disproportionnés pour l'atteinte de la bonne qualité des masses d'eau. La diversité des coûts à prendre en compte pose la question des méthodes d'évaluations les plus adaptées et de leur possibilité de mise en œuvre ainsi que l'interaction entre coûts directs pour le service (Nafi et al. 2013) et de coûts indirects (Cherqui et al. 2013 cas lac de Bordeaux, Wery et al. 2010 et 2003).

Des premières analyses de l'intégration de l'eau au sein de projets écoquartiers en France ont souligné qu'ils étaient le cadre d'une intensification de la gestion urbaine de l'eau dans ses différentes composantes, à explorer et évaluer (Le Nouveau et al., 2011). L'étude approfondie d'écoquartiers ou d'écocampus (Belzemiti et al. 2013) va au delà de l'étude des fonctions du SGEU (Cherqui et al. 2013) en introduisant la prise en compte des valeurs sociales (Faburel et Roché, 2012) et

---

<sup>19</sup> Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques :  
[http://www.territoires-ville.cerema.fr/IMG/pdf/EFESE\\_GT\\_SEU\\_20130906\\_Reccueil1\\_cle622b51.pdf](http://www.territoires-ville.cerema.fr/IMG/pdf/EFESE_GT_SEU_20130906_Reccueil1_cle622b51.pdf)



environnementales (Yepez Salmon, 2011) et la difficulté d'identifier la valeur apportée par les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales au sein d'autres fonctions du système retenu.

## Références bibliographiques

- Ah-leung S., Baati S., Patouillard C., Toussaint J.Y., Vareilles S., (2013), Que fabrique-t-on avec les eaux urbaines, les dispositifs techniques et usages du parc Kaplan dans l'agglomération lyonnaise, 8<sup>ème</sup> Conférence Internationale Novatech, 23-27 juin, Lyon, 10 p.
- Barraqué B., Roche P.A. ( sous la direction de) (2010) « Peurs et plaisirs de l'eau », éditions Hermann, 553 p.
- Baati S., Vareilles S., Toussaint J.Y. (2014). Valoriser l'eau urbaine pour la vie urbaine. Cas du parc Kaplan dans l'agglomération lyonnaise. GRAIE, Actes de la conférence de restitution du projet ANR OMEGA, 22 mai 2014, Lyon.
- Baumol, W.J and Oates, W.E. (1975) *The Theory of Environmental Policy: Externalities, Public Outlays, and the Quality of Life*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA.
- Belmeziti A., Coutard O., de Gouvello B. (2013). A new methodology for evaluating potential for potable water savings (PPWS) by using rainwater Harvesting at the urban level : the case of the municipality of Colonges (Paris Région), *Water* 5(1) : 312-326, march 2013.
- Belmeziti A., Cherqui F., Tourne A., Granger D., Wery C., Le Gauffre P., Chocat B (2015): Transitioning to sustainable urban water management systems: how to define expected service functions?, *Civil Engineering and Environmental Systems*. 19 P.
- Berdier C., Toussaint J.-Y (2007). Sept hypothèses sur l'acceptabilité des ouvrages alternatives d'assainissement des eaux pluviales par infiltration. *NOVATECH 2007*, pp. 335 – 340.
- Billet P. (2013). La pluie et le code, une histoire de responsabilité. *Revue M3* n°5.
- Bolund P. et Hunhammar S., (1999), Ecosystem services in urban areas, *Economical Economics*, 29(2), 293-301.
- Bourgogne P. (2010). 25 ans de solutions compensatoires d'assainissement pluvial sur la Communauté urbaine de Bordeaux. *NOVATECH 2010*, GRAIE, 10 p.
- Petit P. (2013). Roannaise de l'eau : une compétence eaux pluviales clarifiée à partir d'un inventaire patrimonial. *GRAIE, Certu*, Actes du séminaire Clarifier la compétence eaux pluviales, 18 avril 2013, Lyon.
- Chamoux C (2003). Techniques alternatives en assainissement pluvial : de la théorie à la pratique. Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis.
- Cherqui F., Baati S., Bentarzi Y., Chocat B., Le Gauffre P., Granger D., Loubière B., Nafi A., Patouillard C., Tourne A., Toussaint J.-Y., Vareilles S. et Wery C. (2013) Quels enjeux pour la gestion des eaux urbaines ? Contribution à la formalisation des services à rendre par le système de gestion des eaux urbaines, 8<sup>ème</sup> Conférence Internationale Novatech, 23-27 juin, Lyon, 10p
- Cherqui F., Baati S., Bentarzi Y., Chocat B., Granger D., Le Gauffre P., Loubière B., Nafi A., Patouillard C., Tourne A., Toussaint J.Y., Vareilles S. & Wery C. (2013), Outil Méthodologique d'aide à la gestion intégrée d'un système d'assainissement et par extension au système de gestion des eaux urbaines, L9 – Bilan des études de cas, 2013 p.
- Chouli E. (2006). *La gestion des eaux pluviales urbaines en Europe : analyse des conditions de développement des techniques alternatives*. Thèse de doctorat, ENPC, 266 p.
- Conseil d'Etat (2013). Le droit souple. Etude annuelle 2013. La documentation française, 295 p.
- Coutard O., Rutherford J., ( 2009) « Les réseaux transformés par leurs marges : développement et ambivalence des techniques « décentralisées » », *Flux*, 2009/2 n°76-77, p.6-13.
- De Gouvello B., Moreau de Bellaing C. (2009), Les mécanismes d'incitation à l'utilisation de l'eau de pluie en France : entre réglementation nationale et initiatives locales, *Cahiers de l'ASEES*, 14 (2009), 85-91.
- Deroubaix J.-F., de Gouvello B., Moreau de Bellaing C. (2015). Territorialisation et sens politique des incitations financières à la récupération et l'utilisation de l'eau de pluie. *Territoire en mouvement. Revue de géographie et aménagement*, 25-26 (2015). Gestions alternatives de la ressource en eau : approches territoriales.
- Faburel G. et Roché C., 2012 Les éco-quartiers, du projet technique et architectural... au projet social. Vers une typologie de cas étrangers et français, *Recherche sociale*, n°200, pp. 55-74.
- Fergusson B. K. (1995). *Downstream hydrographic effects of urban stormwater detention and infiltration*. Conférence de Georgie sur les ressources en eau, 11-12 avril 1995, pp. 128-131.
- Graie, Certu (2013). Clarifier la compétence eaux pluviales. Actes et synthèse du séminaire, 18 avril 2013, Lyon.
- Granger D. (2009). Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines. Thèse de doctorat, INSA de Lyon.
- Guillon A, Lovera M., Sénéchal C. (2008). *Les ouvrages de gestion des eaux pluviales à la parcelle en France : état des lieux en termes de contrôle et d'entretien*. In : *TSM*, n°12, Décembre 2008 : 69 :78.
- Le Gauffre, P., Joannis, C., Breyse, D., Gibello, C. and Desmulliez, J.-J. (2005) *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement urbains – Guide méthodologique*. Editions Tec & Do, Paris, France.
- Le Nouveau N., Moriceau B. (2011). Le quartier, échelle de réconciliation de l'eau et de la ville ? Première analyse de projets d'écoquartiers en France. *IWA, COF 2011*, Stockholm.
- Le Nouveau N., Deroubaix J.-F., Diou G., Tardivo B. (2013). *La taxe pour la gestion des eaux pluviales urbaines, un révélateur de l'action publique : analyse des premières expériences en France*. *NOVATECH'2013*, Lyon, France, 23-27 juin 2013, 11 p.
- Le Nouveau N., Deroubaix J. -F., Gerolin A., Kerloc'h B., Ramier D., Gradel O., Ruperd Y., Ménétieux C., Le Mitouard E., Correa E., Dulac E., Hautbois O., Ganne M., Soyer M., Tardivo B. (2014). Vers des politiques territoriales de gestion des

- eaux pluviales : analyse du ressort réglementaire mobilisé par 20 collectivités en France. Congrès mondial de l'eau, Lisbonne.
- Le Nouveau N., Deroubaix J.-F., de Gouvello B., Hubert G. (2014). Les crédits de débit, un instrument incontournable pour une gestion territoriale de l'eau ? 6<sup>ème</sup> journées doctorales d'hydrologie urbaine, Lyon.
- Marlangeon A., Werey C., Tsanga-Tabi M., Humbel X., (2014), Analyse comparative de stratégies techniques et financières pour la réhabilitation de réseaux d'assainissement : intérêt d'un outil de gestion patrimoniale intégrée pour anticiper et optimiser l'évolution du prix de l'eau, *Techniques Sciences et Méthodes*, n°7/8, pp.27-40.
- Mayonnave L., (2012), L'enjeu de la transversalité de la gestion des eaux pluviales au sein des collectivités, mémoire TFE ENGEES (GESTE/CUS), 119p.
- MEA (2005) Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis, World resources Institute, 100p.
- MEDDAT/CGDD/SEEI (2009) Calcul du Coût Global - Objectifs, méthodologie et principes d'application selon la Norme ISO/DIS 15686-5, 23 p.
- Mucig C., Gerolin A., Le Nouveau, de Gouvello, Lanher A., Irles A. (2013), Etat des lieux sur la récupération et l'utilisation de l'eau de pluie en France : premiers résultats. Colloque, Nantes, décembre 2013.
- Nafi A., Bentarzi Y., Granger D., Cherqui F., (2013), Eco Ear : méthode d'analyse économique des services rendus par le Système de gestion des eaux urbaines, 8<sup>ème</sup> Conférence Internationale Novatech, 23-27 juin, Lyon, , 10 p.
- Patouillard C. (2014). Evolutions des dispositifs de gestion des eaux pluviales dans les aménagements urbains. TSM, Janvier 2014.
- Petrucchi G., Rioust E., Deroubaix J.-F., Tassin B. (2013). *Do stormwater source control policies deliver the right hydrologic outcomes ?* Journal of hydrologie, 485 (2013), 188-200.
- Pierlot D. (2014). Support de formation « Diagnostiquer les problématiques locales, appréhender les opportunités offertes par le contexte territorial », PFC, Formation « Elaborer, mettre en œuvre et accompagner une politique territoriale de gestion des eaux pluviales.
- Rioust E. (2012). Gouverner l'incertain : adaptation, résilience et évolutions dans la gestion du risque d'inondation urbaine. Les services d'assainissement de la Seine-Saint-Denis et du Val de Marne face au changement climatique. Thèse, Université Paris Est.
- Soyer (2014). Solidité de l'expertise, prudence de l'innovation Chercheurs et praticiens dans les observatoires d'hydrologie urbaine. Thèse de doctorat, Université Paris Est.
- US EPA (2010). *Green Infrastructure Case Studies: Municipal Policies for Managing Stormwater with Green Infrastructure*. EPA-841-F-10-004 | August 2010, 76 p.
- Versini P.-A., Ramier D., Berthier E., de Gouvello D. (2015), Assessment of the hydrological impacts of green roof : from building scale to basin scale, *Journal of hydrology* 524, May 2015.
- Werey, C., Rozan, A., Wittner, C., Ghoulam, B., Soglo, Y. and Larabi, Z. (2010), T8 – évaluation des impacts en fonction des vulnérabilités - recommandations pour l'évaluation économique des impacts. Rapport à l'ANR, 200p.
- Werey, C., Janel J.L. and Weber, E. (2003), Renouvellement des réseaux d'eau potable : Analyse des coûts. *Houille Blanche* 3, 73-76.
- Yepez-Salmon G., (2011), Construction d'un outil d'évaluation environnementale des écoquartiers: vers une méthode systémique de mise en oeuvre de la ville durable. Thèse université de Bordeaux.