

La modélisation systémique peut-elle aider l'adaptation des systèmes de gestion des eaux pluviales urbaines au changement climatique ?

Can systemic modeling help the adaptation of urban stormwater systems to climate change?

Catherine F. Néel¹, Anthony Dicanot³, David Goutaland¹, Nathalie Lenouveau², Thierry Winiarski³

1. Cerema DterCE Dpt. laboratoire de Clermont-Ferrand. 8-10 rue Bernard Palissy, 63017 Clermont-Ferrand cedex 2, France (corresponding author: catherine.neel@cerema.fr). 2. Cerema DtecTV Dpt. Environnement et Systèmes d'informations. 2 rue Antoine Charial, CS 33927, 69426 LYON cedex 03, France. 3. ENTPE, CNRS UMR 5023 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels, Rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin cedex, France.

RÉSUMÉ

La ville est un système complexe et fragmenté qui perturbe le cycle naturel de l'eau, en particulier en imperméabilisant les surfaces, en déplaçant et en concentrant les rejets vers les milieux et les nappes. Afin d'optimiser le cycle de l'eau urbain, de réduire les pollutions à la source et d'adapter la ville au changement climatique, le défi est de proposer un outil opérationnel capable de prédire la performance globale du système de gestion des eaux pluviales, sur le long-terme et à l'échelle du bassin versant urbain, en tenant compte à la fois des contraintes de gestion des ouvrages et des prévisions de développement urbain, en plus des projections de changement climatiques. La modélisation systémique pourrait répondre à ce défi, en particulier si elle est utilisée dans une approche dynamique, en se focalisant sur les liens entre les objets urbains (bâtiments, parkings, toits, bassins, noues ...), les pluies et les nappes. Cette communication propose une revue des approches de modélisation systémique utilisables pour simuler la dynamique du système de gestion des eaux pluviales urbaines en vue d'en optimiser la performance technique et environnementale. La faisabilité de mise en œuvre d'une telle approche est ensuite discutée autour d'un cas concret.

ABSTRACT

The city is a complex and fragmented system that disrupts the natural water cycle, particularly by sealing surfaces, moving and concentrating releases to the ecosystems and groundwater. In order to optimize the cycle of urban stormwater, prevent sources of water pollutions and adapt the city to climate changes, the challenge is to provide an operational tool enabling to predict the overall performance of the urban stormwater system, over the long-term and at the urban catchment scale, that takes into account management constraints and forecasts of urban development, as well as projections of climate changes. Systemic modeling could meet this challenge, particularly if used in a dynamic approach, focusing on the links between urban objects (buildings, parking lots, roofs, basins, valleys ...), rainfall and groundwaters. This presentation proposes a review of systemic modeling approaches that can be used to simulate the dynamics of urban stormwater systems with the aim of optimizing their technical and environmental performance. The feasibility of implementing such approaches is then discussed through a case study.

MOTS CLÉS

Modèle systémique, Adaptation des villes, Analyse de performance

INTRODUCTION

La ville est un système complexe composé d'éléments en constante interaction, dont l'évolution peut être simulée par diverses approches systémiques (Torrens, 2003; Crooks, 2006; Pumain et al., 2006; Koppelaar et al, 2013). Au sein des villes, le sous-système de gestion des eaux pluviales détermine la qualité et la quantité de l'eau de pluie restituée aux nappes et aux rivières (Ellis et al., 2005). Dans la perspective d'adapter les villes au changement climatique, le système de gestion des eaux pluviales urbaines doit répondre, en plus de son objectif initial de pérennisation des surfaces construites, à l'obligation de limiter les perturbations sur le cycle de l'eau, et ce sur le long-terme (50 ans).

Les dispositifs de gestion des eaux pluviales ont déjà évolué dans ce sens, au profit d'ouvrages de rétention à la source (bassins de rétention, toits végétalisés) ou de techniques alternatives d'infiltration (noues et puits filtrants, jardins de pluie, bassins d'infiltration...). Les stratégies de développement urbain se sont également diversifiées dans ce sens, au bénéfice de bâtiments ou parcelles "zéro-rejets", d'écoquartiers ou de « *water sensitive urban design* » (Fletcher et al., 2014). Ces nouvelles pratiques se surimposent à des dispositifs préexistants. Elles sont souvent mises en œuvre sans conscience ni anticipation des contraintes opérationnelles qu'elles induisent sur le long-terme, ni des bénéfices et impacts qu'elles produisent sur le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant urbain et jusqu'aux nappes. Pour répondre à l'objectif de gestion intégrée de l'eau en ville, il devient crucial de se doter d'outils capables de mettre en évidence, de manière simple et accessible au gestionnaires, les bénéfices et risques de ces pratiques sur le long-terme (Chocat, 2013, Zhou 2014).

Les gestionnaires ont en effet besoin, dès à présent, d'approches intégrant, en plus des impacts prévisibles sur le cycle de l'eau, une évaluation de leur choix, en termes de contraintes de gestion (emprise spatiale, coût, acceptabilité...). Il s'agit de répondre rapidement et de manière globale à des questions opérationnelles : Quelle est la part relative des ouvrages anciens et des méthodes alternatives dans la réponse globale du système ? Comment cette part aura évolué dans 50 ans, selon les prévisions d'évolution des surfaces urbaines et du climat ?

Autrement dit : **Comment fournir une évaluation globale et rapide des performances du système de gestion des eaux pluviales urbaines dans une optique de gestion intégrée de l'eau de la ville et dans le contexte prévisible de développement urbain et de changement climatique ?**

L'objectif de cette communication est d'analyser l'opportunité de répondre par une approche de modélisation systémique. Après présentation des nombreuses connaissances acquises ces dernières décennies en matière de modélisation de l'hydrologie urbaine et de l'évolution fonctionnelle des villes, différentes approches de modélisation systémique sont passées en revue afin d'en discuter les intérêts et limites. Un exemple d'approche, appliquée à un petit bassin versant urbain, est proposé.

1 POURQUOI CHERCHER UNE NOUVELLE APPROCHE DE MODELISATION DU SYSTEME DE GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES ?

1.1 De nombreuses connaissances phénoménologiques difficiles à traduire en termes opérationnels et à intégrer avec l'évolution des villes.

En France, au cours de la dernière décennie, le réseau d'observatoires en hydrologie urbaine (URBIS) a pérennisé des moyens expérimentaux de mesures en continu au niveau des dispositifs de gestion des eaux pluviales urbaines dans les métropoles de Lyon (OTHU), de Nantes (ONEVU) et de Paris (OPUR). De nombreuses recherches ont ainsi été menées, qui s'appuient sur la mesure des impacts des ouvrages urbains sur les flux d'eau, de matières en suspension et de polluants. Dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU), l'équipe du laboratoire "Environnement, Villes et Société" travaillant de l'INSA-Lyon (INSA/EVS/EHU) a suivi pendant 15 ans la qualité de l'eau restituée à la nappe au travers d'un bassin d'infiltration de la ZAC de Chassieu (Dembélé, 2010). Les données capitalisées (Sun et al., 2015) ont abouti à des méthodes simples de calcul (Dembélé et al., 2011) et à des recommandations générales pour la gestion de l'ouvrage d'infiltration (Winiarski, 2014). Cependant, pour transposer à l'opérationnel ces travaux focalisés à l'échelle des ouvrages, il reste nécessaire d'améliorer encore la connaissance sur la variation de la qualité des rejets par temps de pluie (Fournel, 2012) et sur les flux de polluants émergents (Becouze-Lareure, 2010 ; Sébastien, 2013), en particulier au niveau des nouveaux types d'ouvrages végétalisés, tels que les noues et parkings filtrants.

En parallèle de ces travaux, plusieurs modèles déterministes ont été développés pour intégrer l'ensemble des connaissances acquises à l'échelle des ouvrages et de calculer l'ensemble des composantes du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant urbain (Guo et Adams, 1998). Citons par exemple les modèles hydrologiques ISBA-Topmodel (thèse C. Furusho, 2011) et J2000 (thèse M. Labbas, 2015), testé sur des bassins versants péri-urbains nantais et lyonnais, respectivement. Plus récemment, le modèle URBS (Rodriguez et al., 2008) qui intègre aussi la zone non saturée, a été testé sur un quartier de la région parisienne (thèse Y. Li, 2015). Ce type de modèles, transforme l'état statique du système urbain (*i.e.* répartition spatiale des objets et réseaux) en une réponse dynamique en termes de flux d'eau. Il permet au final de simuler les impacts de l'urbanisation sur l'ensemble des composantes du cycle de l'eau ce qui est crucial pour anticiper la réponse du système de gestion des eaux pluviales urbaines (Jankowsky et al., 2013, Branger et al., 2013). Cependant, ces modèles reposent sur un grand nombre de paramètres ainsi que sur la détermination précise de la géométrie des cheminements de l'eau, depuis les toits jusqu'aux nappes, en passant par les réseaux enterrés. Or, la géométrie des réseaux reste souvent une variable incertaine du système. Aussi les modèles, calés sur une zone d'étude restent difficilement transposables à d'autres sites. Au final, s'ils permettent bien d'intégrer les connaissances phénoménologiques acquises à l'échelle des ouvrages, ils ne peuvent prédire la réponse à divers scénarii climatiques que pour le système urbain figé pour lesquels ils ont été déterminés. De surcroît, ils ne permettent pas d'agrèger facilement les variables utiles à la gestion (ex. coûts, personnel nécessaire et fréquences d'entretien à prévoir...).

1.2 Des rétroactions entre les flux d'eau et la dynamique urbaine restant à intégrer dans les approches de modélisation

Les projections climatiques pour 2030 pour la région Rhône-Alpes, annoncent une augmentation des fréquences de pluie de forte intensité, ainsi qu'une accentuation des périodes de sécheresse avec un déficit prévisible de la recharge des aquifères (AERMC, 2013). Dans le même temps, les prévisions démographiques indiquent que 60% de la population mondiale sera métropolitaine d'ici 2030 (UN Habitat, 2006). L'urbanisation devient ainsi la composante la plus visible et prévisible des changements globaux. Pour anticiper les impacts de ces changements, l'une des principales incertitudes porte sur les effets induits par les activités humaines (Zhao et al., 2013). Plus que la densité ou le nombre de citoyens, ce sont les modes d'organisation des activités et les choix des populations qui influenceront le cycle urbain de l'eau. Or ces choix sont eux-mêmes dépendants de l'évolution des variables externes du système, en l'occurrence le climat.

C'est pourquoi les géographes et urbanistes ont développé plusieurs approches systémiques permettant d'appréhender la complexité fonctionnelle du système urbain, et surtout d'en prédire l'évolution. De nombreux travaux ont ainsi cherché à montrer la rétroaction entre le modèle spatial urbain et les choix de moyens de transport et de trajets des citoyens, et par suite les émissions de gaz à effet de serre (GES) (Koppelar et al, 2013). Ces approches restent appliquées à une question stratégique, telle la prévision de l'évolution de la résilience des systèmes urbains (Zhao et al., 2013) ou de la répartition des îlots de chaleurs (Masson et al., 2014). La modélisation systémique dynamique adoptée est implémentée sur une base SIG qui demande une détermination spatiale du système aussi poussée que celle requise dans les approches déterministes maillées. A ce jour, ce type n'a pas été appliquées à la simulation du cycle de l'eau urbain. Seuls 4 sur les 17 modèles analysés pour la prévision des émissions de GES par Koppelar et al (2013) comprennent un module d'hydrologie et ce module reste très sommaire (type boîte noire).

Les rares démarches entreprises pour évaluer la sensibilité du système de gestion des eaux pluviales urbaines au changement climatique n'étudient qu'un nombre limité de scénarii pour un système urbain fixé à son état actuel (Semadeni-Davies et al., 2008 ; Berggren et al., 2012). Ces tentatives n'intègrent donc pas de rétroactions dynamique entre la complexité urbaine et le cycle de l'eau.

2 QUE PEUT APPORTER UN MODELE SYSTEMIQUE POUR ASSURER UNE GESTION DURABLE DES EAUX PLUVIALES URBAINES?

2.1 Des outils opérationnels pour aider la décision en appréhendant la complexité des systèmes de gestion des eaux pluviales urbaines

Plusieurs approches systémiques proposent la modélisation du système de gestion des eaux pluviales urbaines dans une optique de planification de la gestion intégrée de l'eau en ville. Ces outils réduisent le système à ses fonctions, par exemple pour calculer "l'empreinte écologique" à l'échelle de la

collectivité (Hellström et al., 2000). Les choix de gestion des eaux pluviales sont alors une composante du système de l'eau urbaine, au même titre que les prélèvements pour l'alimentation en eau potable et les autres usages de l'eau, dont les diverses formes possibles de réutilisation des eaux urbaines. L'outil développé dans le cadre de l'ANR OMEGA (*Outil Méthodologique d'aide à la Gestion intégrée des eaux urbaines*) vise un objectif plus opérationnel (Cherqui et al., 2014) en abordant le système de gestion des eaux pluviales par la méthode EAR (*Evaluation, décision, Action, suivi, Rétroaction*). Il s'agit de calculer l'écart entre les services rendus et les services attendus du système, tels que perçus par les multiples acteurs (Granger, 2009). La rétroaction intervient sur les actions et sur les décisions pour limiter cet écart, ce qui aide la concertation, l'acceptabilité et la planification globale des projets. Cet outil, de type système expert, a été testé à l'échelle de parcelles et de quartiers de plusieurs villes françaises (Lyon, Bordeaux, Metz). Il reste adapté à l'étape stratégique du choix de projet en n'évaluant ni les bénéfices, ni les impacts du projet sur la ressource en eau. Il n'intègre pas non plus les contraintes opérationnelles induites par les décisions ou actions.

L'outil développé depuis 2003 par l'agence gouvernementale de protection de l'environnement des USA (EPA), nommé *System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtegration (SUSTAIN)* est plus spécifiquement dédié à l'évaluation de la performance de l'ensemble du système de gestion des eaux pluviales urbaines d'une collectivité (Shoemaker et al., 2011). Il définit les pratiques de moindre coût et de moindre impact à plusieurs niveaux d'échelle (du local au régional) en fonction d'objectifs de qualité de l'eau. Le système est spatialisé avec un outil de traitement multicritère qui calcule, pour chaque "bloc homogène", les flux d'eau, de polluants, de sédiments et les coûts. L'approche cartographique est bien cadrée mais ne considère que la situation actuelle. Dans une perspective d'adaptation du système au changement climatique, l'enjeu serait de rendre un tel outil à la fois plus dynamique et surtout évolutif, c'est à dire capable de simuler l'évolution du système urbain.

L'approche de modélisation systémique dynamique proposée ici (Figure 1) permettrait de s'affranchir de la spatialisation du système pour se focaliser sur ce qui détermine, sur le long-terme, les opérations de gestion du dispositif de gestion des eaux pluviales, telles que le curage des bassins ou l'entretien de la végétation. Ce type d'approche reste à tester et nécessite de mieux détailler les relations entre le sous-système "BV urbain" et les autres sous-systèmes.

2.2 Des voies de modélisation dynamique de l'évolution du système complexe de la "ville" à intégrer aux modèles d'hydrologie urbaine.

Pour aborder la dynamique urbaine, en tant que système complexe, ouvert et s'auto-organisant sous l'effet de variables externes (*i.e. Cities as self organizing system*), les géographes et urbanistes ont développé des outils fonctionnant par analogie avec la vie d'un organisme pluricellulaire. Chaque cellule est fixe mais constitue un "automate", en constante interaction avec les autres de sorte à assurer les échanges nécessaires avec le milieu extérieur pour maintenir l'intégrité globale des fonctions du système (Torrens, 2003). Ces approches cellulaires ont rapidement évolué vers un système appelé "*Agents Base Model*" (ABM) qui permet de coordonner des groupes de cellules par un système d'agents de contrôle, en quelque sorte, un sous-système "cerveau" régissant l'évolution de la structure du système (Bousquet et Le Page, 2004). Ce concept a été utilisé avec succès pour simuler les évolutions socio-économiques des cités (Pumain et al., 2006). Il a été récemment adapté pour prédire les conflits d'usages de la ressource en eau au niveau des villes (Akhbari et Grigg, 2013).

Une autre voie pour simuler l'évolution des villes a été de coupler le modèle systémique avec des systèmes d'informations géographiques (SIG) et de tenir compte de l'effet des multiples agents de contrôle sur l'organisation spatiale des groupes fonctionnels de cellules (Cooks, 2013). Cette voie a été déclinée dans le projet de recherche européen SWITCH (*Sustainable Water management Improves Tomorrow's Cities Health*) qui propose une approche intégrée de gestion de la ressource en eau pour des agglomérations urbaines de la taille d'une ville moyenne à des mégacités de plus de 2 millions d'habitants tel Mexico (Howe et al., 2011).

Zhou (2014) a comparé une dizaine de modèles déterministes ou systémiques par rapport à leur capacité à prendre en compte la qualité et la quantité de l'eau rejetée, l'évolution spatiale de la ville et les critères utiles aux gestionnaires (coûts, santé, cycle de vie des équipements...). Il conclut qu'il n'existe pas encore d'outil opérationnel, adapté aux enjeux de l'urbanisation et du changement climatique. Suite à une analyse historique des schémas de pensées en hydrologie urbaine, un philosophe (Dicks, 2015) suggère le besoin d'évoluer vers un nouveau paradigme biomimétique, reprenant cette fois le fonctionnement d'un écosystème forestier : la ville comme une forêt avec ses zones de clairières pour figurer les espaces les plus anthropisés. Notons qu'à ce jour, la modélisation systémique n'a pas été développée par les scientifiques s'intéressant à la dynamique des

écosystèmes forestiers (Hasenauer, 2012). L'exemple de la dynamique des populations est pourtant souvent utilisé pour illustrer l'intérêt des approches dynamiques de modélisation systémique (Cambien, 2013).

3 UNE EBAUCHE D'APPROCHE SYSTEMIQUE APPLIQUEE A UN QUARTIER BENEFICIANT D'UN BASSIN D'INFILTRATION DE SON EAU PLUVIALE.

D'une manière générale, les approches de modélisation développées pour aborder l'évolution des surfaces urbaines et le cycle de l'eau sur le long-terme restent appliquées à un niveau stratégique de planification urbaine (Rosenzweig et al., 2007; Zhao et al., 2013; Koppelar et al., 2013), loin des préoccupations concrètes des gestionnaires des ouvrages de traitement de l'eau pluviales en ville. Or, les outils de modélisation systémique dynamique, tel que l'outil libre Vensim, permettent d'intégrer les contraintes de gestion tout en s'affranchissant de la spatialisation du système.

Prenons l'exemple d'un bassin versant urbain équipé à l'aval d'un unique bassin pour infiltrer les eaux pluviales urbaines, similaire à la ZAC de Chassieu analysée depuis 15 ans par l'OTHU (Sun et al., 2015). **L'objectif du modèle est d'optimiser la performance globale du système** en maximisant, d'une part, le ratio Infiltration / Ruissellement entrant dans le bassin et en limitant, d'autre part, les opérations de gestion (curage et entretien de la végétation dans le bassin). Afin de simplifier l'exemple, le système n'inclut pas de bassin de rétention / décantation en amont du bassin d'infiltration. Le diagramme causal du système (Figure 1) fait ressortir 4 sous-systèmes : 1) l'atmosphère, 2) le BV urbain., 3) le bassin d'infiltration, 4) la nappe. Les deux premiers sous-systèmes contrôlent les **variables externes** qui régissent le système de flux d'eau (pluie / évaporation – ruissellement).

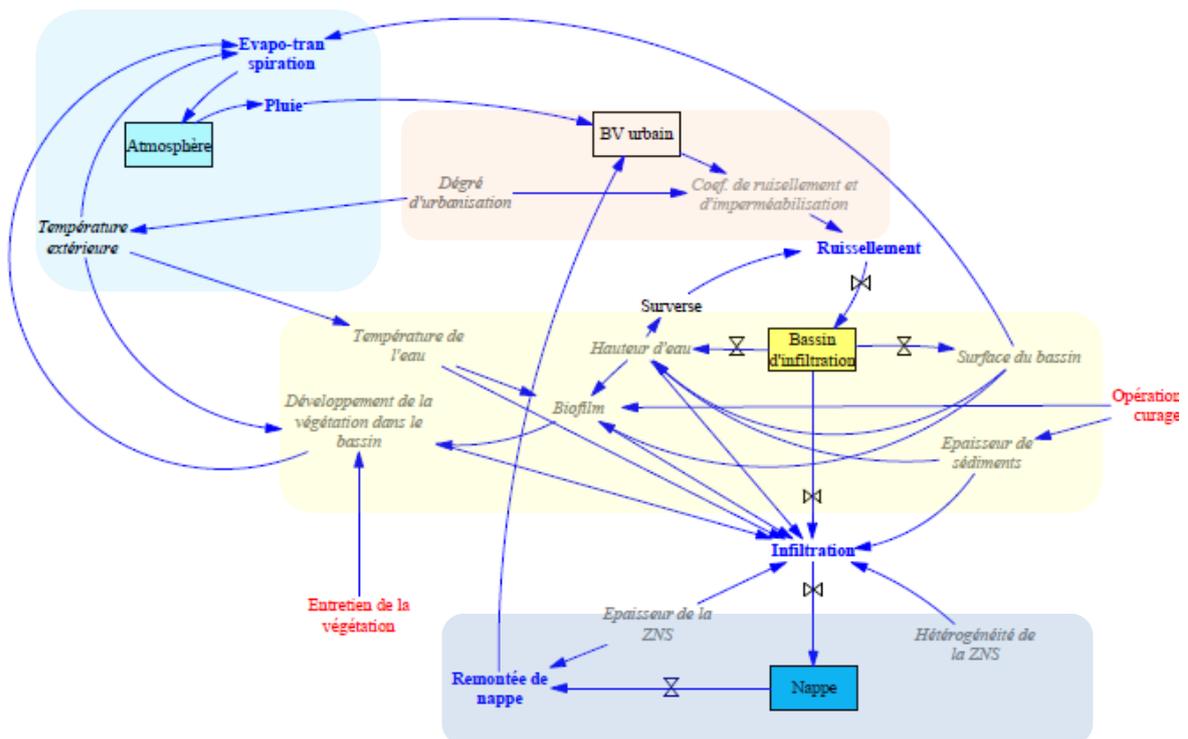


Figure 1 : Diagramme causal du système d'infiltration de l'eau au niveau d'un bassin d'infiltration.

Le tableau suivant (Tableau 1) présente le bilan des variables intervenant dans le calcul de la performance du point de vue flux d'eau, indique que la composante d'infiltration dépend essentiellement du système « Bassin d'infiltration » alors que la composante de Ruissellement dépend du système « BV urbain » et doit donc prendre en compte l'évolution du développement urbain. Comparativement, les opérations de gestion qu'il s'agit de minimiser dépendent essentiellement du système « Bassin d'infiltration » et sont des variables externes « Atmosphère et BV urbain ».

Tableau 1 : Identification des variables déterminant la performance du bassin d'infiltration

Performance Flux d'eau	Système	Variable(s) externe(s)	Variable(s) de contrôle	Constante(s) d'état
Infiltration	Bassin d'infiltration	Atmosphère (Pluie / Evaporation)	Nappe (Hétérogénéité et épaisseur ZNS) Bassin d'infiltration (Epaisseur sédiments, Biofilm), Végétation)	Bassin d'infiltration (Paramètres géométriques)
Ruissellement	BV urbain	Atmosphère (Pluie / Evaporation)	Bassin d'infiltration (Surverse) Nappe (Remontée)	Bassin d'infiltration (Paramètres géométriques)

La construction de l'arbre causal permet de mettre en évidence les relations pour lesquelles les données scientifiques seront déterminantes pour le calcul, tel la relation entre le degré d'urbanisation du bassin urbain et l'arrivée de sédiments ou l'effet du développement de la végétation dans le bassin d'infiltration la sur sa perméabilité.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour répondre à l'objectif d'adaptation de la ville au changement climatique, les gestionnaires ont besoin d'outils facilement transposables permettant d'appréhender, rapidement et de manière globale, les impacts et bénéfices de leur choix de gestion sur le long-terme (50 ans). Ce défi est d'autant plus important à relever dans un pays comme la France, où la population citadine occupe encore des agglomérations extensibles en surface, ouvertes à diverses voies de développement. En France, la question est en outre d'actualité avec la mise en œuvre des Métropoles et des PLUi. En termes opérationnels, cela implique d'identifier les indicateurs qui permettront de décrire et de suivre l'évolution du système et d'en prédire la réponse, tant face aux variations climatiques que face aux évolutions prévisibles de l'urbanisation. En termes scientifiques, cela demande d'aborder le système à l'échelle du bassin versant urbain et d'intégrer sa dynamique dans toutes ses dimensions environnementales, sociales et économiques.

La modélisation systémique est une voie possible pour aborder la question sans investissement métrologique, à condition d'intégrer toutes les connaissances acquises en matière d'hydrologie urbaine grâce aux approches observatoires et aux différents modèles déterministes qui aident la compréhension et l'intégration des mécanismes. Les approches systémiques statiques (de type système expert) ont montré leur capacité à répondre aux questions stratégiques et opérationnelles en intégrant toutes les dimensions du système. Cependant elles restent peu prédictives et n'ont été évaluées qu'au travers de la satisfaction des utilisateurs, et non sur des mesures objectives.

Les approches mixtes de type systémique ABM couplée à un SIG, récemment proposées par les géographes et urbanistes, restent à explorer en matière d'hydrologie urbaine. Ce type d'approche modélise la ville sur le schéma commun actuel d'un organisme vivant dont toutes les cellules autonomes sont coordonnées par un système d'agents moteurs, dans un objectif unique. Or, les réflexions récentes suggèrent la nécessité de changer ce paradigme au profit d'un modèle plus proche d'un écosystème forestier, fonctionnant sous l'effet de coopérations entre des éléments du système, répondant chacun à un contrôle et à objectif différent. L'adaptation de ce paradigme pour les gestion des eaux pluviales reste à tenter.

Les approches de modélisation dynamique proposée en première ébauche est l'approche systémique la plus facilement envisageable, à ce stade des connaissances et de développement des outils (Figure 1). Elle permettrait de s'affranchir de la spatialisation du système pour se focaliser sur ce qui détermine, sur le long-terme, les opérations de gestion du dispositif de gestion des eaux pluviales, telles que le curage des bassins ou l'entretien de la végétation. Ce type d'approche reste à tester et nécessite de mieux détailler les relations entre le sous-système "BV urbain" et les autres sous-systèmes. Cela suppose de concevoir le modèle au moyen d'une démarche itérative de consultation des différents acteurs impliqués dans l'évolution du système. Cela nécessite également d'appuyer la conception d'un tel modèle sur une base de données constituée d'une chronique suffisamment longue de mesures (eg. type donnée observatoire) pour évaluer les résultats du nouveau modèle systémique de type dynamique qui serait proposé, notamment.

BIBLIOGRAPHIE

- AERMC (2013) Caractérisation des vulnérabilités du bassin Rhône-Méditerranée aux incidences du changement climatique dans le domaine de l'eau. Rapport du plan d'adaptation au changement climatique, 49 p.
- Akhbari, M., Grigg, N.S. (2013) A Framework for an Agent-Based Model to Manage Water Resources Conflicts *Water Resour Manage*, 27(11), 4039-4052
- Becouze-Lareure, C. (2010). Caractérisation et Estimation des flux de substances prioritaires dans les rejets urbains par temps de pluie sur deux bassins versants expérimentaux. Thèse de doctorat de l'INSA-Lyon, 308 p.
- Berggren, K., Moghadas S., Gustafsson, A.-M., Ashley, R., Viklander, M. (2013) Sensitivity of urban stormwater systems to runoff from green/pervious areas in a changing climate GRAIE, NOVATECH 2013, 10 p.
- Branger, F., Kermadi, S., Jacqueminet, C., Michel, K., Labbas, M., Krause, P., Kralisch, S., Braud, I. (2013) Assessment of the influence of land use data on the hydrology of a periurban catchment using a distributed modelling approach, *J. of Hydrology*, 505, 312-325.
- Berggren, K., Olofsson, M., Viklander, M., Svensson, G., and Gustafsson, A.-M. (2012). Hydraulic impacts on urban drainage systems due to changes in rainfall, caused by climate change. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 17(1), 92-98.
- Bousquet, F, Le Page, C (2004) Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecol Modell*176, 313–332.
- Cambien, A. (2007) Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité. Rapport d'études du Certu, 84 p.
- Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos M.R., Rauch W., Schilling W. et Urbonas B. (2007) Toward the Sustainable Management of Urban Storm-Water. *Indoor and Built Environment*, 16 (3), pp. 273-275.
- Chocat, B., (2013) Un nouveau paradigme pour les eaux pluviales urbaines. *Techniques, Sciences, Méthodes*, 6, 14-15.
- Crooks, A.T., (2006) EXPLORING CITIES USING AGENT-BASED MODELS AND GIS. Agent 2006 Conference [<https://www.bartlett.ucl.ac.uk/casa/pdf/paper109.pdf>], 10p.
- Dembélé, A. (2010) MES, DCO et polluants prioritaires des rejets urbains de temps de pluie : mesure et modélisation des flux événementiels. thèse de doctorat de l'Institut National Sciences Appliquées de Lyon 267 p.
- Dembélé, A., Bertrand-Krajewski J.-L., Becouze, C., Barillon, B. (2011). A new empirical model for stormwater TSS event mean concentrations (EMCs). *Water Science and Technology*, 64(9), 1926-1934.
- Dicks, H. (2015) Penser le nouveau paradigme de l'hydrologie urbaine : biomimétisme, éco-phénoménologie et gestion intégrée. *La Houille Blanche*, 5, 92-98.
- Ellis, J.B., Marsalek, J., Chocat, B. (2005) Urban water quality ; *Encyclopedia of Hydrological sciences*, ed G.Anderson, John Wiley and son, Ltd, London, 1479-1491.
- Fletcher, T. D., 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., Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, Juillet 2014, 20 p., DOI: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- Fournel, J. (2012) : Systèmes Extensifs de Gestion et de Traitement des Eaux Urbaines de Temps de Pluie. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2. ANR SegTEUP.
- Furusho, C. (2011) Modélisation hydrologique des bassins périurbains, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture (SPIGA), thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 266 p.
- Granger, D. (2009) Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines, thèse de doctorat de l'ENPC, 210 pages. ANR OMEGA
- Guo, Y., Adams, B.J. (1998) Hydrologic analysis of urban catchments with event-based probabilistic models: 1. Runoff volume. *Water Resources Research*, 34(12): 3421-3431.
- Howe, C.A., Butterworth, J., Smout, I.K., Duffy, A.M., Vairavamoorthy, K. (2011) SWITCH sustainable water management in the City of the Future : Findings of the SWITCH project (2006-2011). UNESCO-IHE, The Netherlands, 182 p.
- Hasenauer, H., (2012) Concepts within Ecosystem Modelling. In: *Modelling Forest Ecosystems- Concepts, Data and Application*. Proceedings of Spring School of COST FP0603, Kaprun 9-13 mai, Eds : Pötzelberger, E., et al., Institute of Sylviculture, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Autriche, 7-15.
- Hellström, D., Jeppsson, U., and Kärman, E. 2000. A framework for systems analysis of sustainable urban water management. *Environmental Impact Assessment Review*, 20 : 311–32.
- Jankowsky, S. , Branger, F., Braud, I., Gironas, 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.
- Koppelaar, R., Kunz, H., Ravalde, T. (2013) Review of Current Advanced Integrated Models for City Regions, The

- Ecological Sequestration Trust Ed., 65 p.
- Labbas, M. (2015) Approche multi-échelles pour étudier les impacts de l'évolution de l'occupation des sols et de la gestion des eaux pluviales sur l'hydrologie d'un bassin versant péri-urbain. Application au bassin de l'Yzeron. Ecole doctorale Terre, Univers, Environnement. l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Projet ANR AvuPUR.
- Li, Y. (2015) Modeling of hydrological processes of an urban catchment Study of a saturated soil flow module and application to an urban development zone of the future Paris-Saclay University. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 242 p. - projet GDEP.
- Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejidad, R., Avner, P., Bonhomme, M., Bretagne, G., Briottet, X., Bueno, B., de Munck, C., Doukari, O., Hallegatte, S., Hidalgo, J., Houet, T., Le Bras, J., Lemonsu, A., Long, N., Moine, M-P., Morel, T., Nologues L., Pigeon, G., Salagnac, J.-L., Viguié, V., Zibouche, K. (2014) Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate*, 10(2), 407–429.
- Novotny V. et Brown P. (ed.) (2007) *Cities of the future: Towards integrated sustainable water and landscape management*, ed. IWA, Londres (UK), 427p.
- Pumain, D., Bretnagolle, A., Glisse, B. (2006) *Modelling the future of cities*. European Conference of Complex systems, Oxford, France. Oxford University, 1-12
- Rodriguez, F., Andrieu, H., Morena, F. (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas - model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 351:268-287
- Rosenzweig, C., Major, D.C., Demong, K., Stanton, C., Horton, R., Stults, M. (2007). Managing climate change risks in New York City's water system: assessment and adaptation planning. *Mitigation Adapt. Strateg. Global Change* 12, 1391–1409.
- Sébastien, C. (2013): Mesure et modélisation des flux de micropolluants à l'échelle d'un bassin versant urbain muni d'un système de rétention – Approche globale. Direction scientifique : Equipe DEEP- LGCIE - INSA Lyon.
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., and Gustafsson, L.-G. (2008). The impacts of climate change and urbanization on urban drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater, *Journal of Hydrology*, 350(1-2), 114-125.
- Shoemaker, L., Riverson, J.-Jr., Alvi, K., Zhen, J.X., Paul, S., Rafi, T. (2011) *A Framework for Placement of Best Management Practices in Urban Watersheds to Protect Water Quality*, US-EPA Ed., 202 p.
- Sun, S., Barraud, S., Castebrunet, H., Aubin, J-B, Marmonier, P (2015) Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment. *Water Research* 85, 432-442.
- UN HABITAT (2006). *STATE OF THE WORLD'S Cities 2006/7. The Millennium Development Goals and Urban Sustainability: 30 Years of Shaping the Habitat Agenda*. UN-HABITAT program & Earthscan Publishing
- Varis O. (2005). *Water and sustainable development: Paradigms, challenges and the reality*. University partnerships for international development, Finish development knowledge; Finland future research center, Helsinki, Finland, pp 34-60.
- Winiarski, T. (2014) *Fonction filtration d'un ouvrage urbain : conséquence sur la formation d'un anthroposol*. Rapport de synthèse du projet GESSOL - FAFF. 15 p.
- Zhao, P., Chapman, R., Randal, E., Howden-Chapman, P. (2013) *Understanding Resilient Urban Futures: A Systemic Modelling Approach*. *Sustainability* (5), 3202-3223.
- Zhou, Q. (2014) *A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts*. *Water-open access journal*(6), 976-992.