



Thème R4 – Scénarisation de la gestion des eaux pluviales urbaines, dans un contexte de changements globaux

Une partie des transformations que l'on regroupe fréquemment sous le terme de *changements globaux*¹ induit de profondes mutations sur les systèmes urbains. Face à ces évolutions amorcées ou annoncées, certaines villes initient aujourd'hui une démarche de *transition*, qui vise à en atténuer les impacts négatifs, parmi lesquels on peut citer l'accroissement des inondations, la baisse du niveau des nappes phréatiques, la contamination de différents compartiments environnementaux, la formation d'îlots de chaleur urbains, ou encore la déperdition de la biodiversité en ville.

Le changement de paradigme qu'a connu l'hydrologie urbaine au cours des dernières décennies a vu l'émergence de nouvelles pratiques de gestion de l'eau en ville, dont la finalité a elle-même évolué au cours du temps : d'une vocation essentiellement hydraulique – pallier les insuffisances du réseau d'assainissement par une maîtrise des volumes et débits ruisselés – on parvient aujourd'hui à une vision beaucoup plus « intégrée » de ces systèmes. Les études expérimentales menées à l'échelle d'un ouvrage ont révélé des avantages « multicomposantes » de ces dispositifs : réduction des volumes renvoyés au réseau, recharge de la nappe phréatique, interception d'une partie des flux polluants, évapotranspiration et rafraîchissement de l'air ambiant, support à la biodiversité, fonction paysagère ; autant de constats qui suggèrent que les nouvelles pratiques de gestion des eaux pluviales pourraient participer pleinement à l'adaptation des systèmes urbains face aux changements globaux.

Néanmoins, l'effet « cumulé » de ces pratiques à l'échelle d'un quartier ou même d'un territoire urbain demeure assez mal appréhendé à l'heure actuelle. La question des transferts d'échelle a été peu abordée dans la littérature, de sorte que Golden et Hoghooghi, dans un article paru en 2018, qualifient ces considérations d'« *emerging science* ». Il est relativement complexe d'aborder le problème par des approches expérimentales, car cela nécessite de pouvoir comparer deux configurations « avec » et « sans » techniques de gestion à la source, *toutes choses égales par ailleurs*. Dans la pratique, les auteurs y parviennent avec plus ou moins de succès, soit en comparant plusieurs bassins versants aux caractéristiques similaires à l'exception des modes de gestion des eaux pluviales, soit en mettant en perspective des mesures hydrologiques avant et après une opération de renouvellement urbain. Pour une description détaillée de ces études, le lecteur est invité à consulter le document de synthèse bibliographique qui accompagne ce projet scientifique et sur la base duquel il a été construit. Mentionnons-en néanmoins les principales conclusions : même si certaines études n'ont pas réussi à mettre en évidence de différence statistiquement significative entre les indicateurs hydrologiques mesurés « en présence » et « en l'absence » d'ouvrage de contrôle à la source, d'autres ont démontré une réduction des débits de pointe à l'exutoire et de leur variabilité inter- et intra-événementielle, une réduction des volumes ruisselés, une augmentation du

¹ Cette expression, issue d'une traduction de l'anglais *global change*, désigne, au-delà du changement climatique, l'ensemble des changements induits par l'anthropisation sur les écosystèmes naturels et construits.

temps de concentration des bassins versants, ou encore une augmentation du débit de base des cours d'eau urbains.

À ce titre, il semble que la modélisation offre un terrain beaucoup plus favorable à de telles investigations, car elle permet de tester virtuellement différentes configurations à travers ce que l'on nomme communément une *analyse de scénarios* – contrairement aux approches expérimentales qui introduisent de nombreuses contraintes sur les terrains étudiés pour espérer parvenir à des conclusions significatives. Les scénarios en question peuvent concerner aussi bien le déploiement d'ouvrages de gestion à la source sur un territoire donné – démarche dont la littérature scientifique nous offre un certain nombre d'illustrations intéressantes – que la prise en compte d'autres changements globaux comme l'évolution urbaine. Concrètement, les approches de ce type qui ont été mises en œuvre jusqu'à présent ont permis de répondre à des questions telles que :

- l'effet de la nature et de l'emplacement des ouvrages au sein d'un bassin versant sur certaines caractéristiques du débit à l'exutoire (débit de pointe par temps de pluie, débit de base sur des chroniques longues, *etc.*),
- les emplacements « optimaux » pour la mise en place des ouvrages de contrôle à la source, vis-à-vis d'un objectif de maîtrise du débit de pointe et de prévention des inondations urbaines,
- le « seuil minimal » d'ouvrages à mettre en place sur un bassin versant pour observer une différence significative sur sa réponse hydrologique globale,
- ou encore l'intérêt de privilégier une gestion décentralisée des eaux pluviales, par rapport à une approche centralisée, pour éviter les rejets urbains de temps de pluie.

Le quatrième axe thématique du projet OPUR 5 a pour objectif d'aborder ces questions *dans un contexte de changements globaux*. Concrètement, il s'agit d'adopter une démarche de modélisation pour évaluer les « effets combinés » d'une diffusion des nouveaux modes de gestion des eaux pluviales en ville, et plus précisément leur capacité à *compenser* certains impacts négatifs (i) de l'évolution urbaine, (ii) du changement climatique, et (iii) des modifications des pratiques de construction, trafic, usages, *etc.* La finalité du travail est donc le développement et l'application d'outils destinés à :

1) Mettre en évidence les effets « à large échelle » :

- de solutions de gestion décentralisée ;
- de critères locaux (*e.g.* abattement des X premiers mm à chaque événement pluvieux).

2) Identifier des configurations « optimales » de mise en œuvre de la gestion à la source, c'est-à-dire :

- des scénarios de déploiement optimisés pour répondre à un objectif donné : combien d'ouvrages, à quel endroit, quelle conception (infiltration, rétention, présence d'un volume mort, *etc.*), quels bénéfices d'une combinaison d'ouvrages ?
- une réglementation adaptée (PLU, critère local donné aux aménageurs, *etc.*)

3) Creuser la question de la combinaison optimale entre le système centralisé existant (dont il n'est pas question de se passer) et les dispositifs décentralisés qui viendraient pallier les insuffisances du premier ; cette question peut encore se reformuler comme la recherche d'une combinaison optimale entre solutions « traditionnelles » et « innovantes ».

La figure 1 ci-dessous récapitule la démarche globale de cet axe de recherche, dont on détaille à présent les différentes étapes méthodologiques.

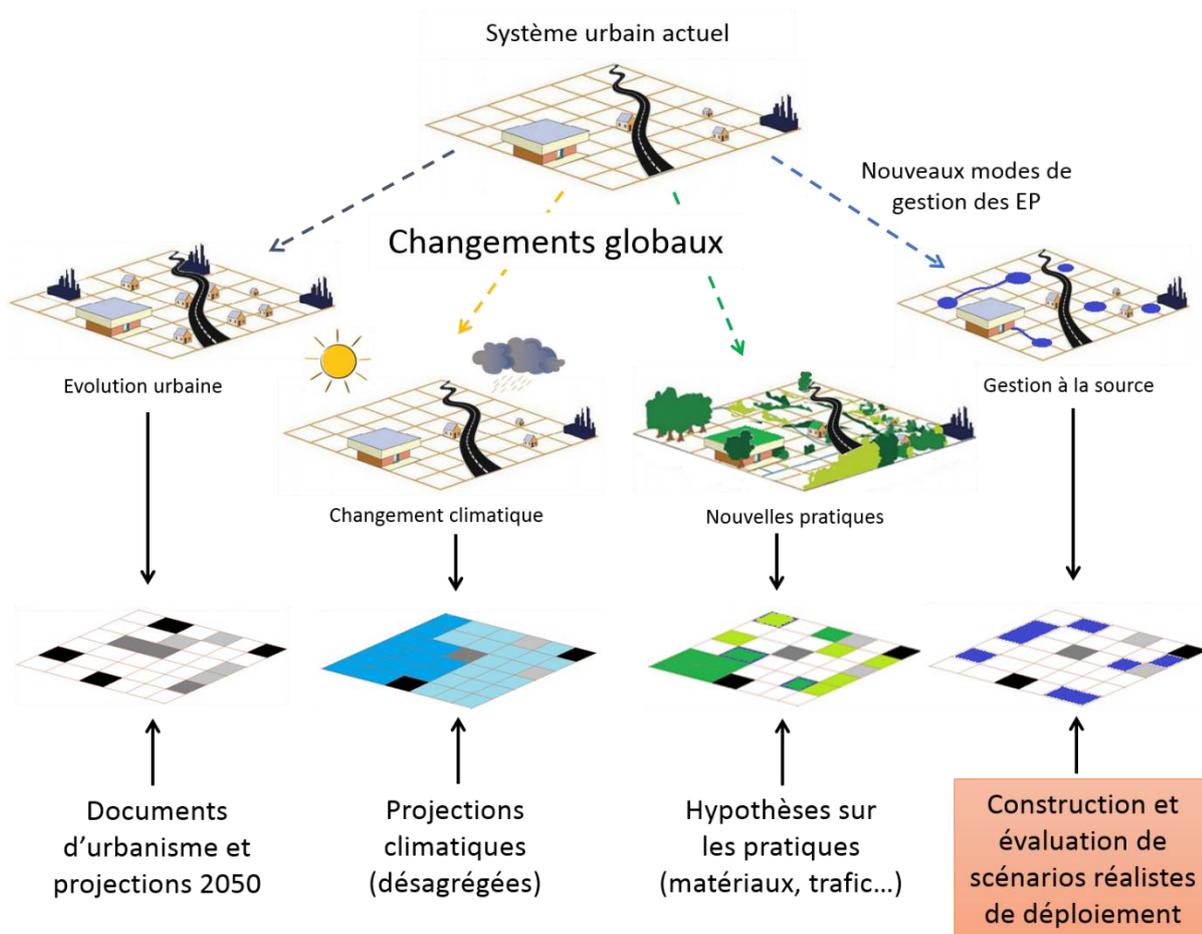


Figure 1 : Schéma de principe de l'approche de modélisation développée dans le cadre du thème 4 d'OPUR 5 : *Scénarisation de la gestion des eaux pluviales urbaines, dans un contexte de changements globaux.*

Plusieurs verrous scientifiques ont été identifiés au cours des réflexions préliminaires autour de la définition du projet :

- La représentation des processus hydrologiques (notamment l'évapotranspiration et l'infiltration) dans les modèles pose encore certaines questions.
- Les modèles de production de polluants souffrent encore d'un manque de connaissance, que ce soit pour l'évaluation de l'émission unitaire associée à chaque type de surface urbaine, ou pour le recensement (automatisé) de ces surfaces contributives à l'échelle d'un territoire étendu.
- A partir du moment où l'on adopte une description spatiale « semi-distribuée », c'est-à-dire qui distingue des sous-entités homogènes sur le territoire d'étude, il ne semble pas envisageable de représenter l'ensemble des dispositifs mis en place sur le territoire considéré ; aussi est-il nécessaire d'établir des hypothèses de simplification pour agréger spatialement les données, c'est-à-dire passer d'un inventaire d'ouvrages à une « loi de comportement macroscopique », ou un « ouvrage-équivalent », par sous-bassin versant.

- La description correcte du réseau, ainsi que les couplages entre hydrologie de surface et réseau, présentent également plusieurs enjeux de recherche.
- Etant donné que l'on souhaite évaluer les effets du changement climatique, de l'évolution urbaine et des changements de pratiques, il est nécessaire (i) de *traduire* les projections climatiques et urbaines à l'horizon souhaité en données d'entrée pertinentes pour l'outil de modélisation utilisé, ce qui implique une démarche de désagrégation de ces données (Figure 1), et (ii) de *construire* des hypothèses sur les nouvelles pratiques.
- L'évaluation des scénarios se fait toujours à l'aune de critères/indicateurs de performance qu'il convient de définir au préalable. Ceux-ci pourraient inclure, sans s'y limiter :
 - la part de l'évapotranspiration et de l'infiltration dans le bilan hydrologique (ce que certains auteurs anglophones nomment la *capacitance* du bassin versant) ;
 - le flux annuel de différents contaminants envoyés vers les eaux superficielles, le sol ou la nappe phréatique ;
 - l'économie de ressource en eau pour certains usages ;
 - des indicateurs plus qualitatifs pour caractériser par exemple l'impact sur la biodiversité, le confort thermique ou l'adaptation au changement climatique.
- Enfin, une question cruciale réside dans l'établissement de scénarios *réalistes* de déploiement des ouvrages de gestion à la source. Ceci implique de comprendre et de caractériser le « potentiel d'implantation » de chaque type de dispositif dans un contexte donné, et révèle ainsi le caractère éminemment pluridisciplinaire du problème, dans la mesure où le choix et la mise en œuvre de ces techniques relève autant de considérations techniques (topographie, nature du sol en place, infiltrabilité, disponibilité foncière...) que des politiques locales de gestion des eaux pluviales, ou d'éventuels freins socio-techniques qu'il faut pouvoir prendre en compte.

Afin de faire sauter ces verrous et de permettre la mise en œuvre de la démarche de modélisation dans son ensemble, **un consortium de recherche** sera constitué entre trois équipes : le Laboratoire Eau et Environnement (IFSTTAR à Nantes), le Cerema Ile-de-France, et le Laboratoire Eau, Environnement, Systèmes Urbains. Ce partenariat se construira autour de deux outils de modélisation : **SWMM**, **URBS** et **TEB-HYDRO**. Précisons rapidement la nature de ces deux modèles.

Le modèle **URBS** (*Urban Runoff Branching Structure model*) est un modèle hydrologique distribué, dont la discrétisation spatiale repose sur un « réseau hydrographique », constitué du réseau d'assainissement et de la voirie, sur lequel sont connectées des unités hydrologiques définies d'après les parcelles cadastrales. Le modèle est donc basé sur :

- une fonction de production sur chaque unité hydrologique ;
- une fonction de transfert dans le réseau.

Chaque parcelle est divisée en trois composantes : les bâtiments (toitures), le jardin, et la voirie adjacente. Le modèle décrit également le sol sous chaque unité hydrologique, en incluant à la fois la zone non saturée et la zone saturée *via* un niveau de nappe variable.

Quant à lui, le modèle **TEB** (*Town Energy Balance*) appartient à une plate-forme de modélisation appelée **SURFEX** (*Surface Externalisée*), qui décrit les transferts d'énergie et d'eau entre le sol, la végétation et l'atmosphère ; son objectif initial était de fournir les conditions aux limites inférieures des modèles météorologiques de Météo France. La segmentation de l'espace se base sur un maillage régulier d'environ 250 m de côté ; *in fine*, le modèle évalue des transferts moyens par maille, mais il est possible de distinguer les types de surfaces à l'intérieur de la maille en faisant appel à des modules différents :

- Surfaces d'eau ouvertes ou fermées, gérées par le module **FLake** ;
- Surfaces naturelles (végétation, roche...), gérées par le module **ISBA** ;
- Surfaces urbaines, gérées par le module **TEB**.

Des développements récents ont permis de décrire la végétation à *l'intérieur des surfaces urbaines*, c'est-à-dire de coupler TEB et ISBA au sein d'une maille de type « surface urbaine » : le module qui réalise ce couplage s'appelle **TEB-VEG**. Comme URBS, il introduit ainsi une segmentation conceptuelle d'une surface urbaine en trois compartiments : bâti, voirie, et jardins. Initialement, le sol situé sous le bâti et la voirie n'était pas représenté dans le modèle, qui ne décrivait pas non plus le réseau, mais le développement de **TEB-HYDRO** a permis de remédier à ces lacunes dans la description du système. L'infiltration de l'eau a lieu dans les jardins et, dans une moindre mesure, sous les voiries, puis une redistribution latérale s'effectue dans le sol des trois compartiments. Pour ce qui est des transferts en réseau, seule une option de « routage » de l'hydrogramme à vitesse constante, avec sommation des différents signaux au niveau des jonctions, est disponible à ce jour. Une représentation simple des déversoirs d'orage *via* un « débit-seuil », au-delà duquel l'excédent est rejeté au milieu naturel, a déjà été évaluée dans un projet de recherche précédent.

Dans le cadre de ce consortium, plusieurs actions de recherche ont été définies pour mener à bien ce quatrième axe thématique d'OPUR 5 :

- **Action R4.1** : *Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle du quartier* (Isabelle Braud, Jérémie Sage, Emmanuel Berthier, Fabrice Rodriguez)
- **Action R4.2** : *Effets d'une diffusion des modes de gestion décentralisés des eaux pluviales sur l'hydro-écosystème urbain* (Marie-Christine Gromaire, Ghassan Chebbo)
- **Action R4.3** : *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur* (Emilie Bernard, Katia Chancibault, Aude Lemonsu, Cécile de Munck)
- **Action R4.4** : *Modélisation de l'émission des polluants à l'échelle urbaine* (Marie-Christine Gromaire, Ghassan Chebbo)
- **Action R4.5** : Vers la construction d'un outil de modélisation intégrée « Hydrologie – Pollution – Climat urbain » (action collective) (Figure 2)

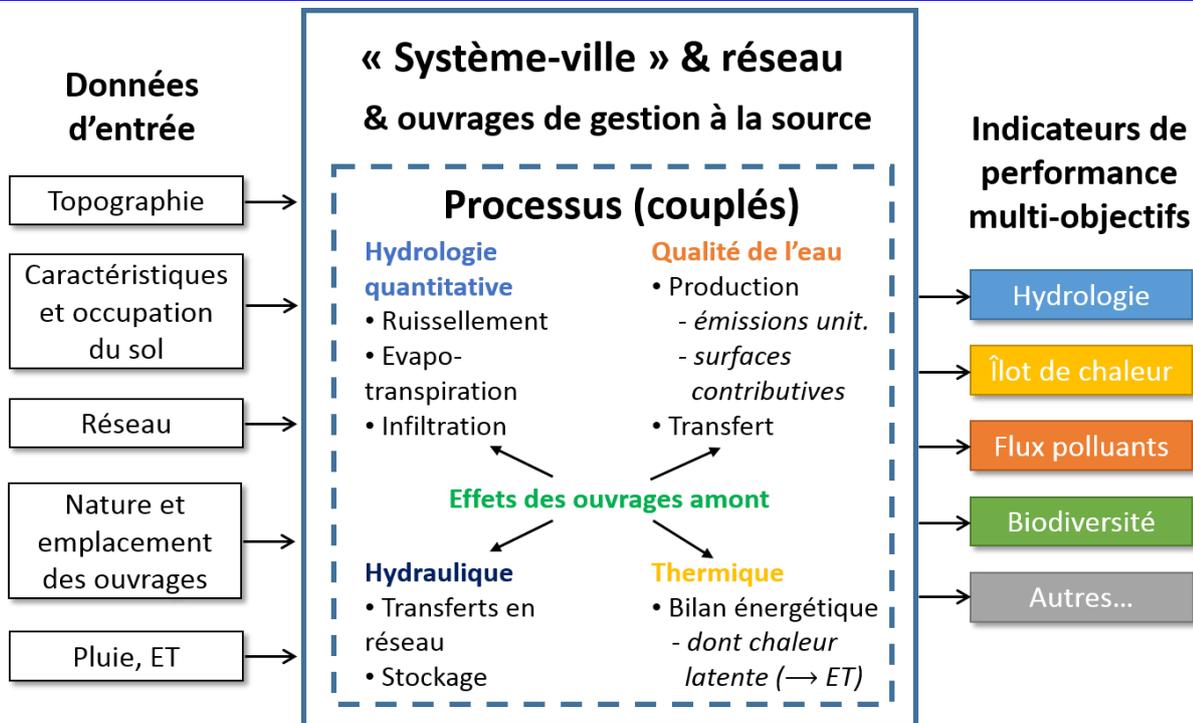


Figure 2 : Vision globale de l'approche de modélisation envisagée : système et processus à représenter dans le modèle, données d'entrée nécessaires, exemples d'indicateurs de performance en sortie.

Action R4.1. Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle du quartier

L'objectif de cette action est de préciser l'incidence des pratiques d'infiltration à la source des eaux pluviales urbaines sur le cycle de l'eau, et en particulier sur le niveau des nappes superficielles, en s'appuyant sur des outils de modélisation intégrés existants. L'utilisation du modèle URBS, co-développé par l'IFSTTAR et le Cerema Ile-de-France et spécifiquement destiné à l'étude des différentes composantes du cycle de l'eau en milieu urbain et périurbain, sera ici privilégiée.

Ce travail s'appuiera sur l'analyse et la comparaison d'une variété de scénarios de gestion du ruissellement, à l'échelle du quartier, simulés à partir du modèle URBS. Un temps important sera tout d'abord consacré à l'implémentation dans URBS d'un schéma de modélisation destiné à mieux représenter les écoulements de subsurface. La paramétrisation du sol dans URBS représente une évolution par rapport aux modèles classiques d'hydrologie urbaine ; elle conditionne le calcul de nombreux flux (infiltration, évapotranspiration, infiltrations parasites), mais ne rend pas bien compte de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrogéologiques du sous-sol et devra donc être consolidée. Le choix d'une représentation adéquate des écoulements souterrains s'avère bien souvent difficile, car supposant un compromis entre une description excessivement simple des processus et des schémas sur-paramétrés nécessitant une discrétisation spatiale relativement fine. Une adaptation de cette paramétrisation permettant de mieux rendre compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sol sera donc privilégiée. L'introduction de cette paramétrisation constituera un premier objectif scientifique de cette action de recherche.

Le modèle sera ensuite utilisé pour simuler, sur des bassins versants réels ou théoriques, différents scénarios d'infiltration des eaux pluviales correspondant à des variantes en termes de répartition spatiale ou de fonctionnement hydrologique des ouvrages. L'élaboration d'un plan d'expérience

permettant d'évaluer, d'une façon aussi générale que possible, l'impact des techniques de gestion à la source des eaux pluviales représente un problème méthodologique à part entière. Une attention particulière devra donc être portée à la définition des scénarios de gestion testés. Ces derniers pourront dans un premier temps être construits et évalués pour des bassins versants ayant d'ores et déjà fait l'objet d'une application du modèle URBS et pour lesquels des observations sont disponibles. La portée des résultats et la possibilité de les généraliser seront nécessairement limitées par le nombre et la nature des cas d'étude (type de tissu urbain, topographie, géologie...) retenus en première approche. La faisabilité et la pertinence d'approches plus théoriques reposant par exemple sur l'utilisation de bassins versants « synthétiques » pourra alors être discutée. Les résultats obtenus à l'issue de ce travail feront enfin l'objet d'une analyse de sensibilité qui permettra de rendre compte de l'incidence des différentes hypothèses ou incertitudes associées à l'utilisation et la paramétrisation du modèle URBS. Cette démarche, justifiée par les difficultés méthodologiques que soulève l'utilisation des modèles distribués, assurera alors la robustesse des conclusions obtenues et apportera un éclairage sur la pertinence d'outils tels que URBS dans un contexte plus opérationnel.

Action R4.2. Effets d'une diffusion des modes de gestion décentralisés des eaux pluviales sur l'hydro-écosystème urbain

Comme présenté ci-dessus, il s'agit ici d'évaluer, d'une part, la possibilité, et d'autre part, les effets d'une systématisation de la gestion à la source des eaux pluviales à l'échelle d'une zone urbaine, de façon à étendre les considérations et résultats acquis à l'échelle d'un ouvrage. La démarche prévue repose sur quatre piliers : (i) la réalisation d'une typologie des ouvrages de gestion à la source, (ii) la construction des scénarios de déploiement, (iii) l'identification des performances visées, et, en conséquence, la définition d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs pour évaluer ces scénarios, et enfin (iv) la mise en œuvre du modèle de simulation numérique qui sera construit dans le cadre de l'action n°5.

La typologie des ouvrages reposera aussi bien sur leur fonctionnement hydrologique (régulation du débit sans infiltration, combinaison régulation et infiltration, abatement des premiers millimètres de pluie, déconnexion totale...) que sur les autres effets qui auront été retenus comme pertinents (*e.g.* rétention des contaminants, soutien à la biodiversité, réduction de l'îlot de chaleur urbain, multifonctionnalité...). Cette étape permettra d'aboutir à des classes d'ouvrages génériques, décrites par un nombre limité de paramètres, et auxquelles seront associées des caractéristiques fonctionnelles.

L'élaboration des scénarios de déploiement sera fondée sur une analyse préalable des critères qui conditionnent le choix d'une solution technique parmi la palette d'ouvrages disponibles, à savoir :

- les « conditions physiques » du site étudié, et plus précisément :
 - les propriétés du terrain (topographie, capacités d'infiltration) ;
 - le climat local (caractéristiques de la pluviométrie, évapotranspiration) ;
 - le contexte urbain (emprise foncière, nature du bâti) ;
- les critères fournis aux aménageurs (débit maximum admissible dans les réseaux collectifs, interception d'une certaine lame d'eau à chaque événement pluvieux, tout-infiltration...) ;

- d'éventuels freins socio-techniques (capacités des services techniques à assurer l'entretien).

L'évaluation des scénarios requiert l'établissement d'indicateurs de performance. Ces derniers pourront inclure, sans s'y limiter, la part de l'évapotranspiration et de l'infiltration dans le bilan hydrologique (*i.e.* ce que certains auteurs appellent la « capacitance » du bassin versant), l'économie de ressource en eau pour certains usages, le flux annuel de différents contaminants envoyés vers les eaux superficielles, le sol ou la nappe, ou d'autres critères plus qualitatifs. La représentativité du modèle d'« ouvrage-équivalent » sera interrogée à l'aide de séries de mesures sur une zone urbaine caractérisée finement, ou bien grâce à un modèle de référence. Enfin, l'impact des scénarios préalablement établis sera éprouvé sur plusieurs cas d'étude, représentatifs d'une diversité de contextes urbains, climatiques, et socio-économiques.

La démarche de modélisation dans son ensemble permettra d'évaluer l'effet des changements multiples à l'échelle de zones urbaines, en abordant des questions telles que :

- l'effet de la nature et de l'emplacement des ouvrages au sein d'un bassin versant sur certaines caractéristiques du débit à l'exutoire (débit de pointe par temps de pluie, débit de base sur des chroniques longues, flux polluant, *etc.*),
- les emplacements « optimaux » pour la mise en place des ouvrages de contrôle à la source, vis-à-vis d'un objectif de maîtrise du débit de pointe et de prévention des inondations urbaines,
- le « seuil minimal » d'ouvrages à mettre en place sur un bassin versant pour observer une différence significative sur sa réponse hydrologique globale ou la température,
- ou encore l'intérêt de privilégier une gestion décentralisée des eaux pluviales, par rapport à une approche centralisée, pour éviter les rejets urbains de temps de pluie.

Action 4.3. Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur

Cette action de recherche vise à étudier, par la modélisation, la réponse couplée hydro-climatique d'une zone urbaine à des stratégies d'aménagement basées sur la végétalisation, en temps présent et futur

Le modèle TEB du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) sera utilisé. Il dispose depuis peu de paramétrisations physiques permettant de décrire la végétation urbaine de façon plus réaliste et parallèlement de représenter de façon détaillée les échanges hydrologiques au sein de l'écosystème urbain.

Le cas d'étude choisi concerne Paris et sa petite couronne. Ce choix est motivé, d'une part par la disponibilité, à la fois, de données urbaines (description des surfaces et du réseau hydrologique urbain) et d'observations météorologiques et hydrologiques ; et d'autre part, par l'importance des enjeux liés au changement climatique et à l'adaptation de ce territoire, qui toucheront une portion importante de la population.

Cette recherche comporte trois phases :

1. ÉTUDE DU BASSIN PARISIEN SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE (1979-MAINTEANT)

Cette partie consistera à réaliser une simulation “de référence” sur une période historique (de 1979 à maintenant) et à l’échelle d’évènements extrêmes remarquables (canicules, périodes humides). Il s’agira de : (1) Définir une configuration de simulation pour fournir des conditions météorologiques à des échelles spatiales et temporelles adaptées aux études d’impacts en milieu urbain ; (2) Identifier les indicateurs hydro-climatiques pertinents pour évaluer les impacts ; (3) Tester et évaluer les paramétrisations de végétation et d’hydrologie récemment développées dans le modèle urbain TEB.

2. RÉPONSE DU BASSIN PARISIEN AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans un deuxième temps, la réponse du bassin parisien au changement climatique sera évaluée dans le cadre de modélisation établi en début de thèse.

Ce travail s’appuiera sur deux thèses en cours au CNRM et à l’IFSTTAR :

- Les simulations réalisées au CNRM par Benjamin Le Roy (étude des méthodes de descente d’échelle dynamiques pour la production de projections climatiques à la résolution spatiale de 2,5 km avec le modèle AROME-Climat sur toute la France) pourront servir de point de départ pour la préparation de forçages climatiques futurs à haute résolution spatiale et temporelle pour Paris et sa petite couronne
- Les conclusions des travaux réalisés à l’IFSTTAR par Xenia Stavropoulos-Laffaille concernant l’évaluation d’une méthode statistique de désagrégation temporelle des projections climatiques régionales, à l’échelle de Nantes seront utilisées, si nécessaire, pour améliorer les champs pluvieux issus des projections climatiques.

3. ADAPTATION PAR LA VÉGÉTALISATION URBAINE

Dans un troisième temps, un choix de scénarios pertinents en termes d’aménagement sera établi, en lien avec les départements présents sur le territoire étudié, puis évalué dans le même cadre de modélisation.

R4.4. Modélisation de l’émission des polluants à l’échelle urbaine

La modélisation des émissions de polluants par une approche de type « SFA » (*Substance Flow Analysis*) repose sur deux piliers :

- la caractérisation de l’émission unitaire de chaque type de surface urbaine ;
- la détermination de l’« assiette émettrice » sur une zone donnée, c’est-à-dire le recensement des surfaces contributives au flux de la substance considérée.

La première étape du travail sera de réaliser une typologie des principaux polluants urbains selon leurs sources et leurs processus/dynamiques d’émission, puis d’identifier un « représentant » au sein de chaque famille. On peut imaginer par exemple :

- un composé classiquement associé au trafic routier (*e.g.* HAP)
- un composé émis par un processus de type « dissolution avec stock infini » (*e.g.* métal)
- un composé présent sur un type de surface avec un stock limité (*e.g.* biocide)

- un composé qui nécessite un processus de diffusion à l'intérieur du matériau avant de pouvoir être lessivé par la pluie (*e.g.* phtalate)
- et les matières en suspension

La suite du travail consistera à recenser les données expérimentales existantes, sur lesquelles il est possible de s'appuyer pour construire un tel modèle. Si de nombreuses données sont disponibles pour les métaux (*cf.* par exemple la thèse de Pauline Robert) et les biocides (thèse d'Antoine Van de Voorde), il faudra envisager de nouveaux essais pour caractériser les émissions unitaires des autres contaminants organiques et ainsi compléter la base de données expérimentales.

La caractérisation de l'« assiette » se décline en deux grandes questions : (i) comment inventorier ces surfaces de façon plus ou moins systématique ? et (ii) comment prendre en compte la variabilité des émissions pour un type de surface donné (sachant qu'on dispose le plus souvent de caractérisations expérimentales ponctuelles, en conditions contrôlées) ? Concernant le premier point, un certain nombre de travaux antérieurs se sont basés sur des procédures de recensement non-automatiques (*cf.* par exemple la thèse d'Emna Sellami). Compte tenu des développements technologiques récents, il semble que les bases de données urbaines, ou simplement les photos aériennes et autres vues 3D, présentent un potentiel très intéressant, pour peu que l'on soit capable d'en extraire des informations pertinentes qui permettraient de classer un territoire de manière automatisée, et ainsi générer des cartographies des surfaces urbaines. Mentionnons par exemple les développements similaires dans le domaine du microclimat urbain (*Local Climate Zones, GENIUS, UrbanBEATS, World Urban Database*), dont il semble possible de s'inspirer. Néanmoins, cela requiert des compétences en traitement de l'image et méthodes d'assimilation de données *a priori* absentes du consortium de recherche, et implique donc une collaboration avec des équipes extérieures sur les aspects « traitement de l'image » (IGN par exemple).

L'amélioration des modèles de production de polluants permettra une description idoine au sein de la plate-forme de modélisation « hydrologie – pollution – climat urbain » dont la phase 5 d'OPUR initiera la création (action 5). Elle permettra par exemple de tester différents scénarios liés aux pratiques de construction ou d'entretien du bâti (utilisation généralisée d'un matériau non métallique pour les couvertures des immeubles, interdiction des biocides, *etc.*) ou les scénarios liés au trafic routier.

R4.5. Vers la construction d'un outil de modélisation intégrée « Hydrologie – Pollution – Climat urbain »

La mise en œuvre des objectifs du thème 4 d'OPUR requiert un outil de modélisation fonctionnel (Figure 2), qui permette une description « grande échelle » (de l'ordre de plusieurs dizaines de km²) des flux d'eau, de polluants et d'énergie en milieu urbain, afin de pouvoir tester *in fine* les différents scénarios qui auront été retenus comme pertinents dans les autres actions de recherche. L'objectif de cette action est de poser les bases d'un travail et d'une collaboration de long terme pour la construction d'un modèle intégré « hydrologie – pollution – climat urbain ».

Si l'on rencontre un très grand nombre d'outils de modélisation pour représenter l'hydrologie de surface, éventuellement les transferts en réseau, et les flux de contaminants associés², parmi

² Le lecteur qui souhaiterait de plus amples précisions à ce sujet est invité à consulter le rapport de synthèse bibliographique associé à la définition de ce projet.

lesquels on peut mentionner les modèles SWMM (*Storm Water Management Model*), SUSTAIN (*System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegratioN*), MUSIC (*Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation*), ou SWAT (*Soil-Water Assessment Tool*), en revanche, on rencontre très peu de modèles couplant hydrologie et thermique, ce qui fait tout l'intérêt d'un modèle tel que TEB-HYDRO, que nous avons présenté ci-dessus. Néanmoins, ce dernier ne dispose pas encore de toutes les fonctionnalités requises pour tester les scénarios évoqués dans l'en-tête de ce document. A titre d'exemple, à l'heure actuelle, il ne décrit ni la pollution urbaine, ni les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales ; en outre, les transferts en réseau sont représentés par un routage simple à vitesse constante (paramètre d'entrée du modèle), comme mentionné ci-dessus. Ainsi, un certain nombre de développements apparaissent nécessaires pour répondre aux objectifs du thème 4. Les réflexions sur les flux polluants seront menées dans le cadre de l'action 4, celles sur les ouvrages de gestion à la source, dans l'action 2 ; par ailleurs, il semble intéressant d'envisager l'intérêt d'un couplage avec un modèle décrivant plus finement l'hydraulique, tel que SWMM. L'action 5 aura pour but de coordonner l'ensemble des développements, pour tendre vers un modèle intégré, regroupé dans un outil d'expertise commun, et d'instaurer une gouvernance du projet afin d'intégrer les contributions des trois laboratoires du consortium.

ANIMATEURS

Ghassan Chebbo, ghassan.chebbo@enpc.fr

Katia Chancibault, katia.chancibault@ifsttar.fr