

OBSERVATOIRE DES POLLUANTS URBAINS (OPUR)–PHASE 5



ACTION R4.3 - REPONSE HYDRO-CLIMATIQUE DE PARIS ET SA PETITE COURONNE AU CLIMAT FUTUR

SYNTHESE DE LA THESE DE DOCTORAT D' ÉMILIE BERNARD

REPONSE HYDRO-CLIMATIQUE DE PARIS ET SA PETITE COURONNE

ENCADREMENT

Directrice de thèse : Cécile de Munck (CRDD, CNRM). Contact : cecile.demunck@meteo.fr

Co-directrice de thèse : Katia Chancibault (CRDD, Université Gustave Eiffel). Contact : katia.chancibault@univ-eiffel.fr

INTRODUCTION

De nos jours, plus de la moitié de la population mondiale habite en ville (55%, UN, 2018). Ce chiffre risque de s'accroître encore puisque d'ici 2050, il est attendu que presque 70% des habitants de la planète vivent en milieu urbain. Avec une artificialisation croissante et régulière de près de 10 000 km² des surfaces naturelles par an dans le monde (1985-2015; Liu et al., 2020), les villes et leurs habitants sont de plus en plus vulnérables aux extrêmes météorologiques et climatiques (IPCC, 2021). Alors que les villes se densifient (UN, 2018), le bien-être des habitants continue de décliner (Helliwell et al., 2020).

Les villes sont déjà soumises à de nombreuses vulnérabilités : climatiques, hydrologiques, pollution de l'air, des sols et des aquifères, perte de biodiversité (Faggi et al., 2008 ; Power et al., 2018 ; Leopold et al., 1968). Parmi elles, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (Oke et al., 1982) se traduit par des zones urbaines plus chaudes que la campagne environnante, et de façon plus marquée la nuit.

L'urbanisation future risque fortement d'amplifier ce phénomène. Il est attendu que la combinaison du développement urbain et de l'augmentation de l'occurrence d'événements climatiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, ait des conséquences délétères sur les populations concernées, du fait d'une plus grande fréquence de jours et de nuits chaudes qui aggraveront notamment le stress thermique dans les villes (Chapman et al., 2017 ; Lemonsu et al., 2013 ; Lemonsu et al., 2015).

L'urbanisation, du fait de l'imperméabilisation des surfaces, modifie également le cycle hydrologique naturel. L'infiltration des pluies dans le sol est fortement diminuée en ville, limitant la recharge des nappes et favorisant le ruissellement de surface (Foster et al., 1999). Les cours d'eau urbains voient une augmentation de l'intensité et de la fréquence de leurs pics de débit et des volumes collectés (Leopold et al., 1968). L'urbanisation s'accompagne nécessairement de la mise en place de réseaux d'assainissement, infrastructures spécifiques visant à collecter les eaux pluviales (et usées) pour les transporter vers les stations de traitement des eaux usées ou vers les réseaux hydrographiques naturels, selon le type de réseau (unitaire ou séparatif). Ces infrastructures modifient les chemins d'écoulement de l'eau et peuvent concentrer les eaux et augmenter la vitesse des écoulements, favorisant alors les crues voire les inondations (Nirupama et al., 2007). Le risque de pollution du milieu naturel est aussi accru par le phénomène de déversements, par le biais des déversoirs d'orage, qui conduit au rejet des effluents dans le milieu récepteur et donc potentiellement de contaminants.

Ces phénomènes risquent également de s'accroître avec l'augmentation potentielle des températures et de l'intensité et la fréquence des précipitations, dans le cadre du changement climatique (IPCC, 2021). C'est pourquoi la compréhension des échanges thermiques et hydriques, en ville, devient d'une importance capitale et constitue un réel enjeu sociétal et environnemental.

C'est notamment pour mieux caractériser ces enjeux que le climat urbain et l'hydrologie urbaine sont étudiés de façon concomitante. Les villes sont donc des lieux clés pour le développement de stratégies d'adaptation (Grafakos et al., 2019).

Des stratégies sont aujourd'hui à la disposition des aménageurs et décideurs pour limiter les effets néfastes de l'urbanisation et s'adapter au changement climatique. Certaines d'entre elles sont fondées sur la nature et peuvent conduire à la (re)végétalisation des villes. Cette végétation apporte un effet rafraîchissant lié, non seulement à l'ombrage des arbres (Joshi et al., 2015) mais aussi à l'évapotranspiration de la végétation (Qiu et al., 2013 ; de Munck et al., 2018). L'ajout de végétation, associé à l'augmentation de sol perméable permet aussi de capter une plus grande quantité d'eau et de l'infiltrer dans le sol. Ces deux processus combinés limitent ainsi la quantité d'eau envoyée vers les réseaux d'assainissement (Fletcher et al., 2014). Nombre de ces solutions végétalisées ont donc un impact sur la gestion de l'eau ainsi que sur le confort thermique. Ces deux types d'enjeux font intervenir les bilans énergétique et hydrique, tous deux reliés par un même processus : l'évapotranspiration (caractérisée par le flux de chaleur latente). L'évaluation des performances de ce type de solutions végétalisées ne sera alors que plus robuste si les bilans énergétique et hydrique, sont couplés dans le même outil d'évaluation.

Les outils de modélisation hydrologiques et/ou énergétiques, représentent la ville à travers une description plus ou moins détaillée des processus en jeu en lien avec la description en surfaces artificielles (avec des morphologies spécifiques) et naturelles en interaction. Ces outils sont importants pour le diagnostic de zones à enjeux thermiques et hydrologiques ainsi qu'en termes de planification urbaine puisqu'ils permettent d'évaluer les performances individuelles ou combinées de stratégies d'aménagement en considérant leurs effets en lien avec la complexité de la morphologie urbaine (Pelorosso et al., 2020). En effet, les interactions hydro-climatiques sont encore peu connues à l'échelle de grands territoires urbains. D'une part, les observations pour comprendre les processus impliqués et améliorer les modèles, ne sont pas si nombreuses, à ces échelles. D'autre part, l'échelle d'étude en hydrologie est le bassin versant. Si en milieu naturel, des études sur des territoires couvrant plusieurs bassins versants se multiplient, ce n'est pas le cas en milieu urbain. Ainsi, l'évaluation hydro-climatique des solutions végétalisées est encore assez rare à cette échelle.

OBJECTIFS DE LA THESE

L'étude de processus, ici hydrologiques et climatiques couplés, demande d'abord de déterminer **l'échelle spatiale** de travail. Pour le couplage hydro-climatique urbain, l'intérêt de cette étude est de considérer l'échelle d'une ville suffisamment grande, présentant un îlot de chaleur urbain déjà caractérisé mais aussi avec un réseau d'assainissement connu. C'est donc l'agglomération parisienne en tant que plus grande agglomération française qui est choisie.

Coupler l'hydrologie et le micro-climat urbains à grande échelle et sur de nombreuses années questionne le besoin d'un **outil** permettant de représenter conjointement les processus hydrologiques et micro-climatiques. La plateforme SURFEX permet d'étudier ces deux aspects avec le modèle urbain TEB suite aux développements récents qui permettront pour la première fois au sein d'une même étude : la représentation de l'hydrologie urbaine avec une meilleure description du sous-sol urbain et la prise en compte de la présence d'un réseau d'assainissement (TEB-Hydro, Stavropoulos-Laffaille et al., 2018 ; Stavropoulos-Laffaille et al., 2021) et une description raffinée de la végétation

arborée considérant les effets d'ombrage et de trainée des arbres (TEB-Tree, Redon et al., 2017 ; Redon et al., 2020).

L'utilisation d'un tel modèle soulève ensuite le besoin de fournir précisément en entrée les caractéristiques décrivant le domaine étudié. *Quelles caractéristiques sont particulièrement importantes pour l'étude des processus hydro-climatiques couplés ? A quelles **résolutions temporelle et spatiale** travailler pour représenter et analyser suffisamment finement ces processus ?* C'est pourquoi un travail de recherche et de combinaison de bases de données d'occupation du sol et architecturales avec une base de données de végétation (élément central des échanges d'eau et d'énergie) à haute résolution et avec une description distincte entre la végétation haute et basse a été mené. La texture du sol peut aussi avoir beaucoup d'impact sur les processus physiques qui définissent les équilibres hydrologiques et climatologiques en ville. Plusieurs études de sensibilité ont été menées pour évaluer les apports de données descriptives plus détaillées ou plus récentes de texture de sol pour les modèles. Enfin la prise en compte du réseau d'assainissement reconstruit est également très importante pour la représentation fine des processus d'hydrologie urbaine.

De plus, une spécificité de l'utilisation d'un modèle hydrologique pose la question de l'adaptation du modèle aux contraintes de la zone. C'est pourquoi, il faut avoir recours à un calage des paramètres impliqués dans le bilan hydrique, en particulier pour fixer les valeurs des paramètres pour lesquels des observations n'existent pas. Un des objectifs scientifiques de la thèse a donc été de développer une méthode de calage qui convienne à un large domaine d'étude composé de multiple bassins versants urbanisés et hétérogènes dans leurs caractéristiques et donc leurs comportements. Pour cela, j'ai donc également mobilisé un grand nombre de données observées hydrologiques et contribué à leur qualification. L'élimination d'un grand nombre de données après leur requalification vis-à-vis des objectifs de modélisation de cette étude a conduit à ce qu'une part importante du domaine soit couverte par des bassins versants non jaugés. D'où une question méthodologique : *Comment caler hydrologiquement un domaine de grande taille comportant de nombreux bassins versants variés avec peu d'observations ?*

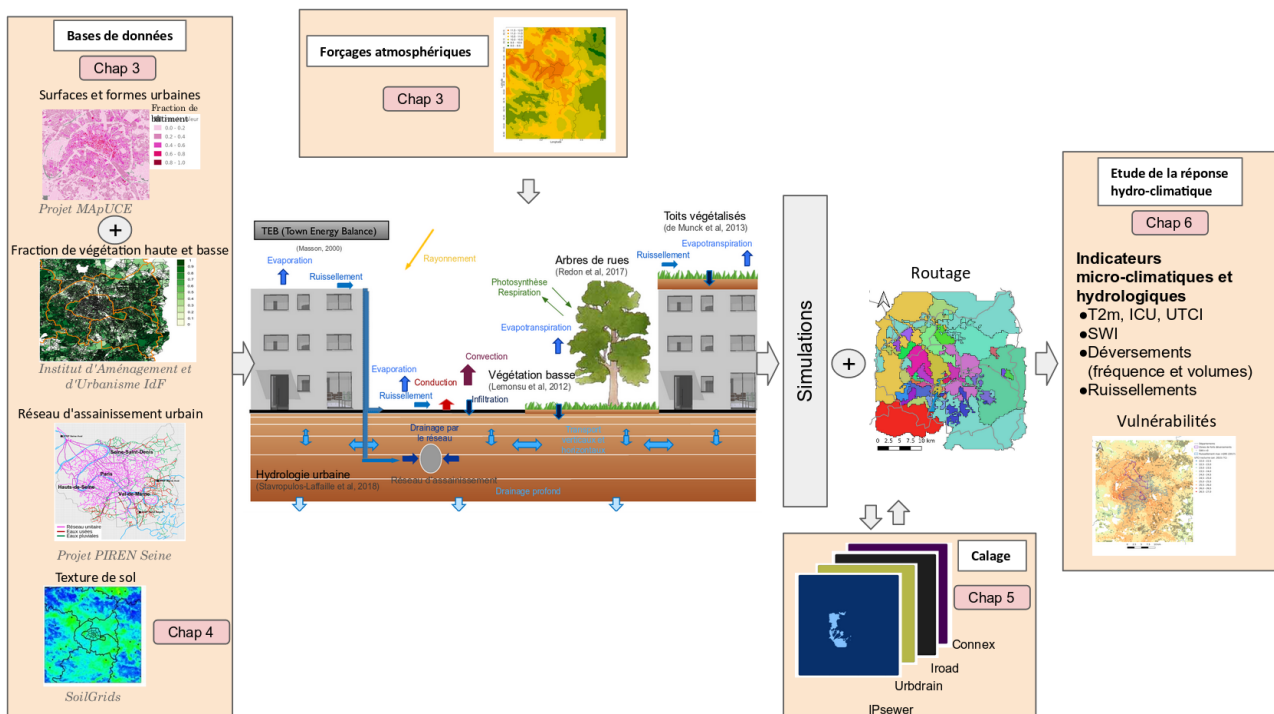


Figure 1 Représentation des étapes de la configuration de simulation avec la méthode

Enfin, ce sujet de thèse interroge sur les spécificités du domaine urbanisé de Paris et sa petite couronne, ses enjeux et ses vulnérabilités. Pour pouvoir les déterminer précisément, il s'agit de savoir : Quels résultats attendre de ce modèle ? Ce travail a donc pour objectif l'évaluation du

modèle hydro-climatique sur la base d'observations pour permettre d'identifier les forces et faiblesses du modèle couplé. Suite à cela, le modèle est appliqué sur le large domaine de Paris et sa petite couronne afin de caractériser la réponse hydro-climatique de cette zone. Le développement de méthodes et d'indicateurs permet d'évaluer la vulnérabilité hydro-climatique de la zone d'étude.

1. CONFIGURATION DE SIMULATION

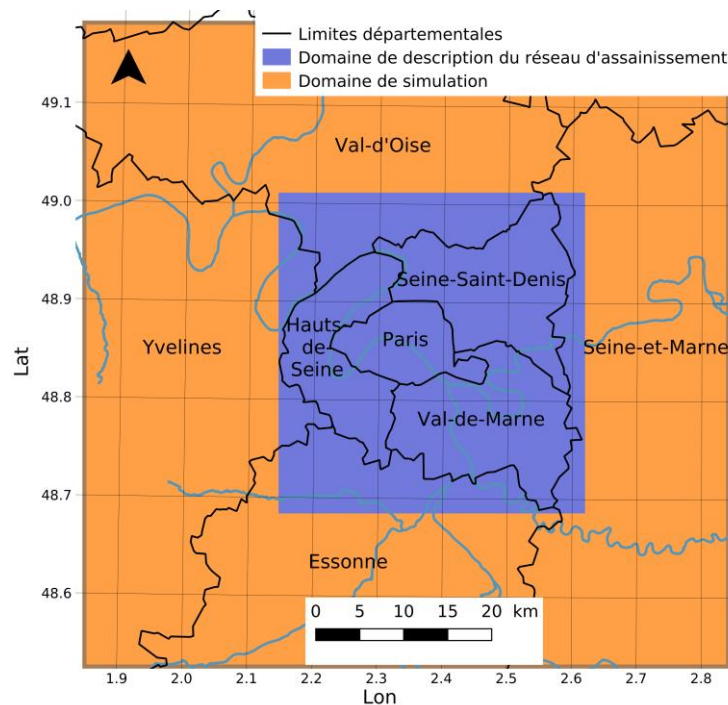


Figure 2 Domaine d'étude délimitant le domaine de simulation global (orange) et le domaine de description du réseau d'assainissement (bleu).

A) Le(s) domaine(s) d'étude

Pour mener cette étude hydro-climatique urbaine, c'est le domaine de Paris et sa petite couronne qui a été choisi en tant que plus grande agglomération française. Plusieurs projets ont déjà été menés sur ce territoire et des observations hydrologiques en réseau d'assainissement ont notamment été collectées (Piren-Seine, Phase 7).

La zone de Paris et sa petite couronne présente actuellement deux types de réseau :

- le réseau unitaire : transportant à la fois les eaux de pluie et les eaux usées (se trouve majoritairement sur la ville de Paris),
- le réseau séparatif : distinguant les réseaux d'eaux pluviales et d'eaux usées (plus récent et se trouve sur les départements de la petite couronne).

Certaines zones sont toutefois équipées de ces deux types de réseau à la fois. Le réseau d'assainissement urbain de Paris et sa petite couronne est géré par trois acteurs : la commune (collecte), le département (transfert), le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP, transfert et épuration) (Lotfi et al, 2016).

Deux domaines inclus sont représentés (Figure 2) : le plus grand constitue le domaine de simulation total, auquel il est fait référence sous la mention agglomération parisienne, le domaine en bleu comprenant Paris intra-muros et les trois départements limitrophes, sur lequel une description fine des caractéristiques du réseau d'assainissement est disponible (longueur, noeuds, maillages, déversements)

B) Le modèle TEB et les paramétrisations activées

Le modèle TEB est inclus dans la plateforme SURFEX (v8.1), pour simuler les zones urbaines. Après un lourd travail de phasage, pour regrouper dans une même version les différentes paramétrisations développées ces dernières années (TEB-veg, TEB-Tree, TEB-Hydro) La configuration des simulations permet d'utiliser le modèle TEB (Masson, 2000) avec les paramétrisations suivants activées :

- végétation basse et arborée (Lemonsu et al., 2012 ; Redon et al., 2017 ; Redon et al., 2020),
- hydrologie urbaine (Stavropoulos-Laffaille et al., 2018),
- l'UTCI (Fiala et al., 2012).

C) Création des forçages

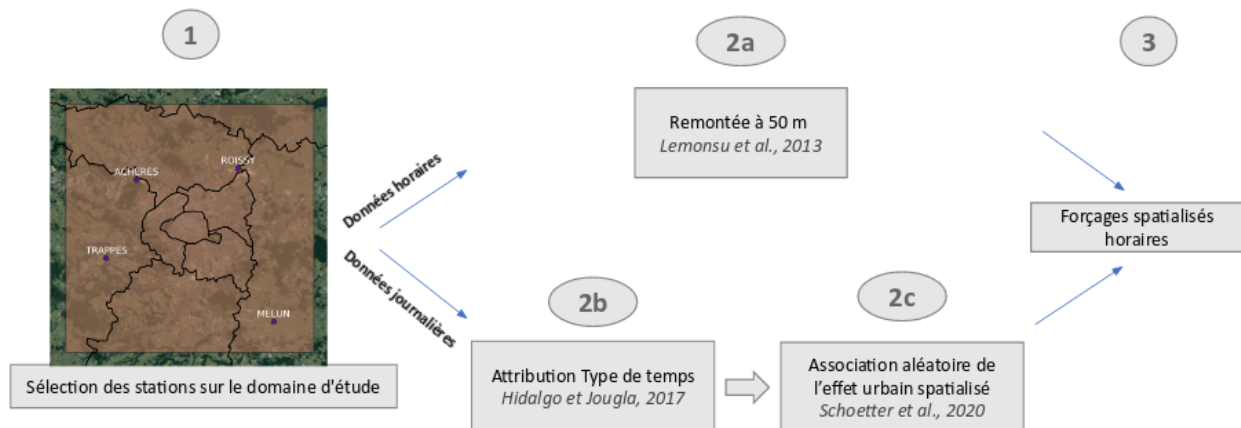


Figure 3 Schéma des étapes de construction des forçages atmosphériques.

Le modèle a besoin de connaître les caractéristiques météorologiques pour la période de simulation désirée. La méthode de création de ces forçages météorologiques adaptés à la zone d'étude, s'inspire de la méthode de descente d'échelle développée par Le Roy et al. (2021).

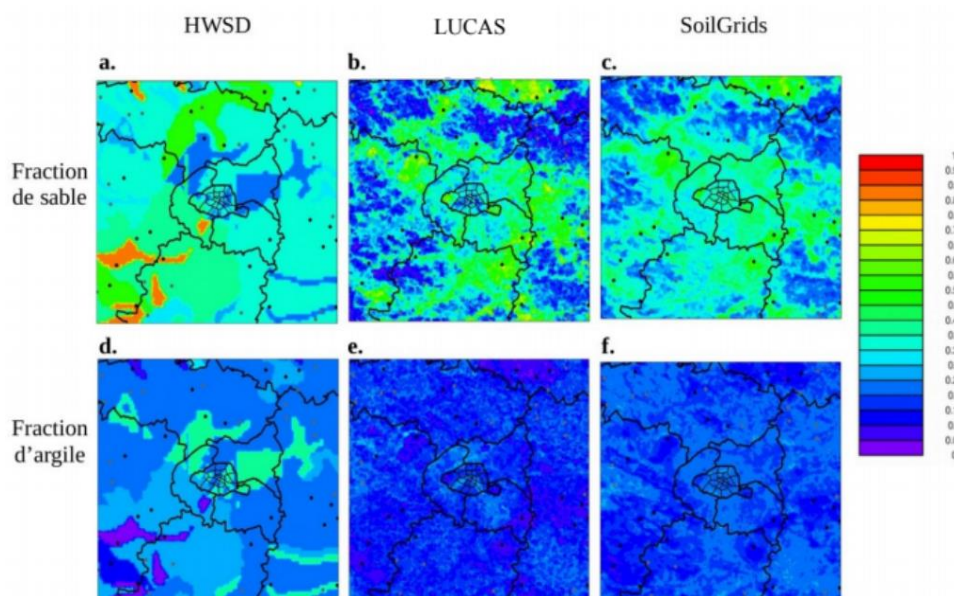


Figure 4 Fractions de sable (haut) et d'argile (bas) pour les bases de données HWSD, LUCAS et SoilGrids, à l'échelle du territoire de Paris et sa zone métropolitaine.

Pour cette étude, l'objectif est de produire des forçages en temps présent mais intégrant aussi les effets urbains sur les caractéristiques météorologiques fournies au modèle. Cette méthode a donc été

adaptée en prenant pour données d'entrée plusieurs points d'observations météorologiques relevées à des stations situées hors du milieu urbain et donc représentatifs de l'état de l'atmosphère en dehors de la ville. Ces données pourront être spatialisées avec cette méthode dans le but d'avoir une résolution spatiale (250 m) et temporelle (horaire) fine mais avec aussi l'importance d'intégrer l'effet urbain dans les données issues des stations météorologiques, comme cette méthode le propose.

D) Création des bases de données d'entrée

Une étude de sensibilité du modèle à la paramétrisation de la végétation en strate arborée ou herbacée et à la description de la végétation en entrée du modèle a été menée, sur un quartier toulousain : base de données métrique décrivant une seule couche de végétation unique ou une base de données à haute résolution (50 cm) avec une description de deux strates de végétation : végétation haute et basse. Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt de mobiliser la paramétrisation TEB-Tree et le besoin d'une description de la végétation urbaine détaillée (occupation du sol et strates) pour une simulation plus réaliste du micro-climat avec TEB.

Une étude de sensibilité du modèle à la texture de sol a permis de confirmer la sensibilité du modèle TEB à la texture de sol. Cette sensibilité est visible même pour des bases de données proches entre elles (SoilGrids et LUCAS). Il est donc important de porter une attention particulière au choix de la base de données de sol pour la modélisation hydro-climatique. En effet, cette étude montre que la texture de sol peut avoir un impact sur plusieurs caractéristiques hydrologiques, déduits des fonctions de pédotransfert du modèle, et par voie de conséquence sur les processus physiques auxquels ils sont reliés : la réserve utile des sols et donc de l'eau disponible pour les plantes, les infiltrations parasites d'eau dans le réseau d'assainissement urbain, le drainage d'eau vers les couches profondes du sol, le flux de chaleur latente ; certains de ces processus étant liés entre eux.

Cependant, la texture de sol n'est pas l'unique paramètre qui contrôle les processus hydrologiques : l'effet de l'occupation du sol (et notamment la densité de surfaces végétalisées urbaines) semble prédominant, mettant en exergue l'importance de fournir au modèle une description détaillée de cette dernière. La texture du sol joue toutefois un rôle important sur l'ensemble des processus hydrologiques. Dans le modèle TEB, l'utilisation d'une base de données moins riche en sable (SoilGrids) peut se traduire par des différences allant jusqu'à -0.5°C d'écart sur les températures maximales en ville et -1°C en périphérie (années 2001 à 2004) pour des bases de données qui présentent jusqu'à 35% la même classification de texture de sol (HWSD et SoilGrids).

2. CALAGE HYDROLOGIQUE

Afin d'utiliser le modèle TEB-Hydro sur le domaine de l'agglomération parisienne, il est nécessaire de caler certains paramètres hydrologiques pour représenter au mieux les caractéristiques du domaine étudié. Ce calage devra répondre à deux problématiques, celle d'un domaine urbain très grand composé de plusieurs bassins versants, et celle des limites des distributions spatiale et temporelle des observations disponibles.

Les paramètres ne représentant pas directement des processus physiques, ils intègrent, lors du calage, l'influence des caractéristiques moins bien connues, comme des grandeurs non mesurables ponctuellement ou non représentées dans le modèle, comme certains chemins ou vitesses d'écoulement de l'eau. Le calage permet de limiter les erreurs liées à des approximations ou un manque d'information de l'outil de modélisation.

Une quantité importante d'observations a été collectée grâce à plusieurs stages menés dans le cadre du projet PIREN-SEINE. Une étape de tri et de qualification de ces observations a été menée à la lumière des limites de représentation par le modèle de ces observations (qualification automatique

et experte, extraction du signal des eaux usées, évaluation du réalisme du réseau reconstruit aux points de mesures de débit)

Le calage hydrologique en milieu urbain est plus communément appliqué de façon uniforme sur les domaines étudiés. Des études de modélisation comparatives de plusieurs bassins versants urbains différents mais généralement non connectés ont déjà été menées (Bae et Lee, 2020), plus rares sont celles avec des bassins versants urbains connectés (Haghighatafshar et al., 2019). Sur un domaine aussi vaste que Paris et sa petite couronne, présentant également une forte hétérogénéité d'occupation du sol et d'altimétrie, il ne semble pas pertinent de caler toute la zone de manière uniforme. Face aux données débitmétriques collectées, le calage des bassins versants jaugés et à la fois celui associé aux bassins versants non jaugés doit donc être déterminé.

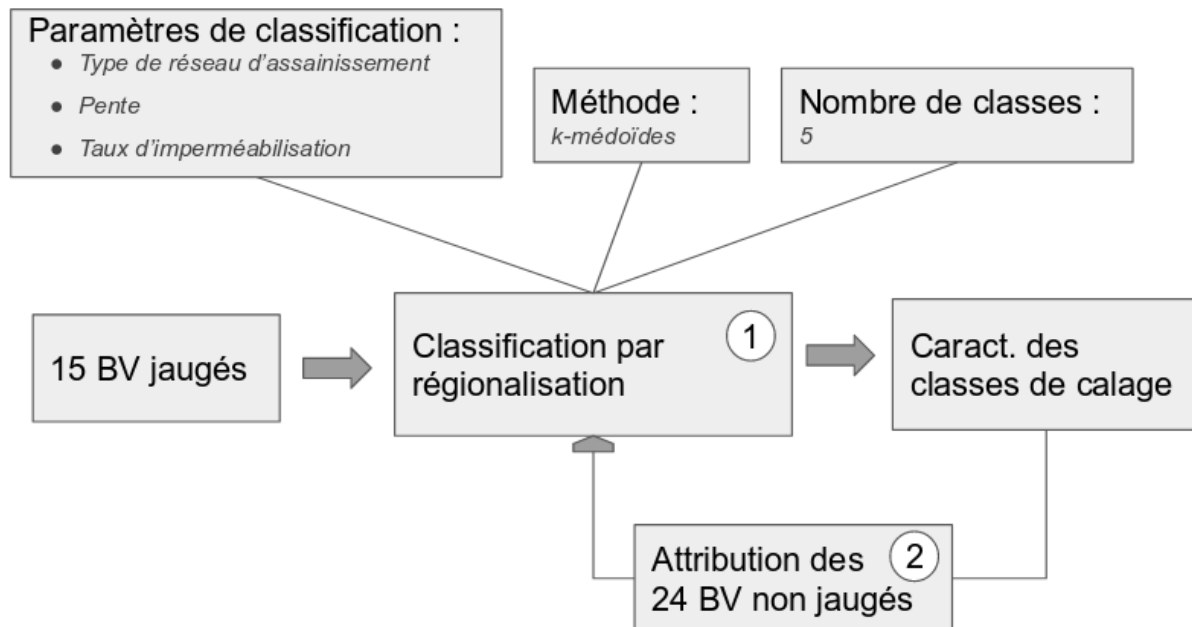


Figure 5 Schéma des étapes de la méthode de classification des bassins versants par régionalisation.

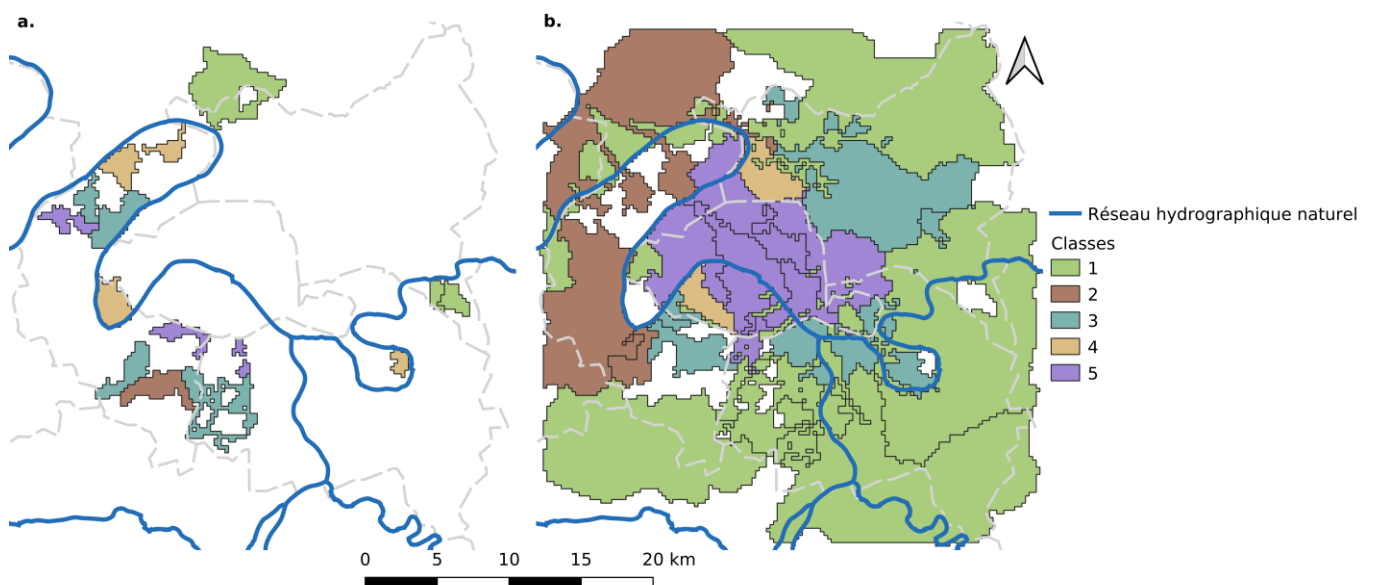


Figure 6 Localisation des bassins versants jaugés (a) et des bassins versants non jaugés (b) classés selon les critères listés dans le Tableau 1.

La méthode de calage par régionalisation, jamais utilisée en milieu urbain, vise la spatialisation des paramètres de calage, en utilisant une classification des bassins versants qui dépend de leur réponse hydrologique. Elle s'appuie alors sur l'hypothèse que les valeurs des paramètres de calage sont dépendantes des caractéristiques physiographiques du domaine. De cette façon, le calage est déterminé pour les bassins versants jaugés et par transposition, il est appliqué sur les bassins versants non jaugés, de la même classe, possédant à priori les mêmes propriétés impactant l'écoulement de l'eau, par exemple le taux d'imperméabilisation, la texture du sol, la pente (Flügel, 1995). Ceci implique donc que dans chaque classe se trouve au moins un bassin versant jaugé. La méthode est présentée dans la Figure 5 et les bassins versants jaugés et utilisés pour le calage sont identifiés dans la Figure 7.

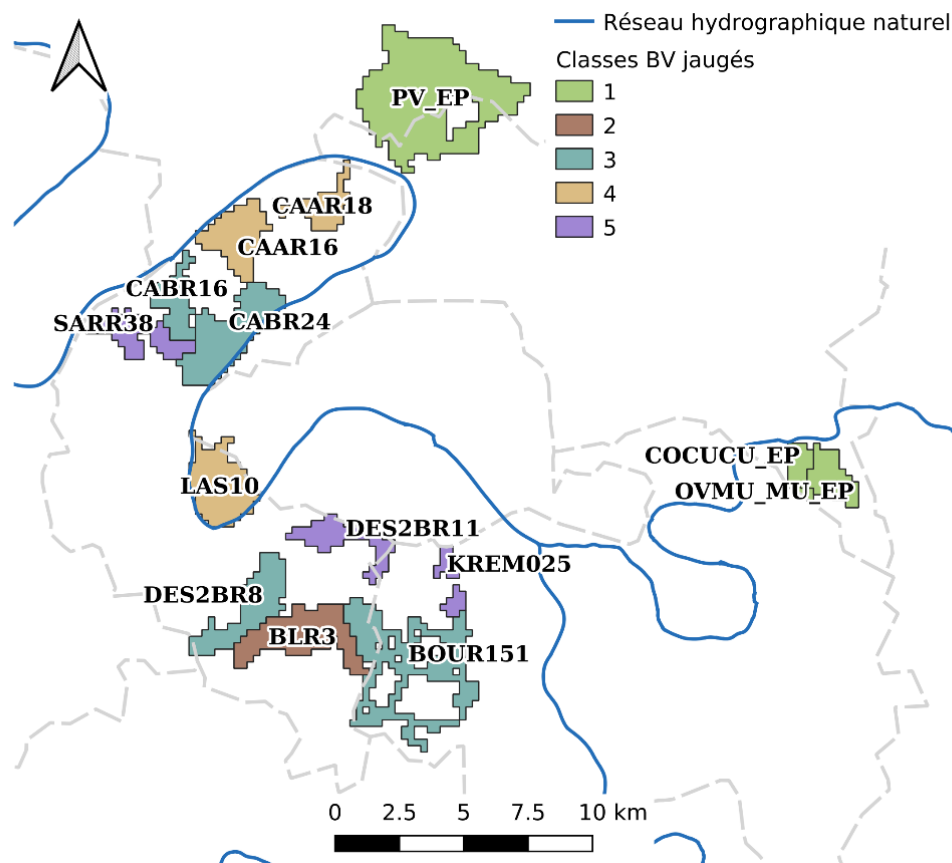


Figure 7 Identification des bassins versants jaugés et utilisés pour le calage. Les codes couleur indiquent la classe à laquelle ils appartiennent.

Tableau 1 Combinaisons des valeurs de paramètres de calage pour chaque classe. Les couleurs de chaque colonne correspondent aux couleurs de chaque classe de la Figure 6

	Classe 1	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Caractéristiques hydrologiques	Pentu Faible imperm. Eau Pluviale	Pentu Imperm. moyenne Unitaire	Peu pentu Imperm. moyenne Unitaire	Peu pentu Forte Imperm. Unitaire
IPsewer (-)	10	10	10	10
Iroad ($mm.s^{-1}$)	1e-3	1e-5	1e-5	5e-4
Urbdrain (-)	0	0	0	0
Connex (-)	0.6	0.7	0.9	0.9

Les valeurs des paramètres calés, par classe de bassins versants sont ainsi identifiés (Tableau 1).

3. ÉTUDE DE LA REPONSE HYDRO-CLIMATIQUE

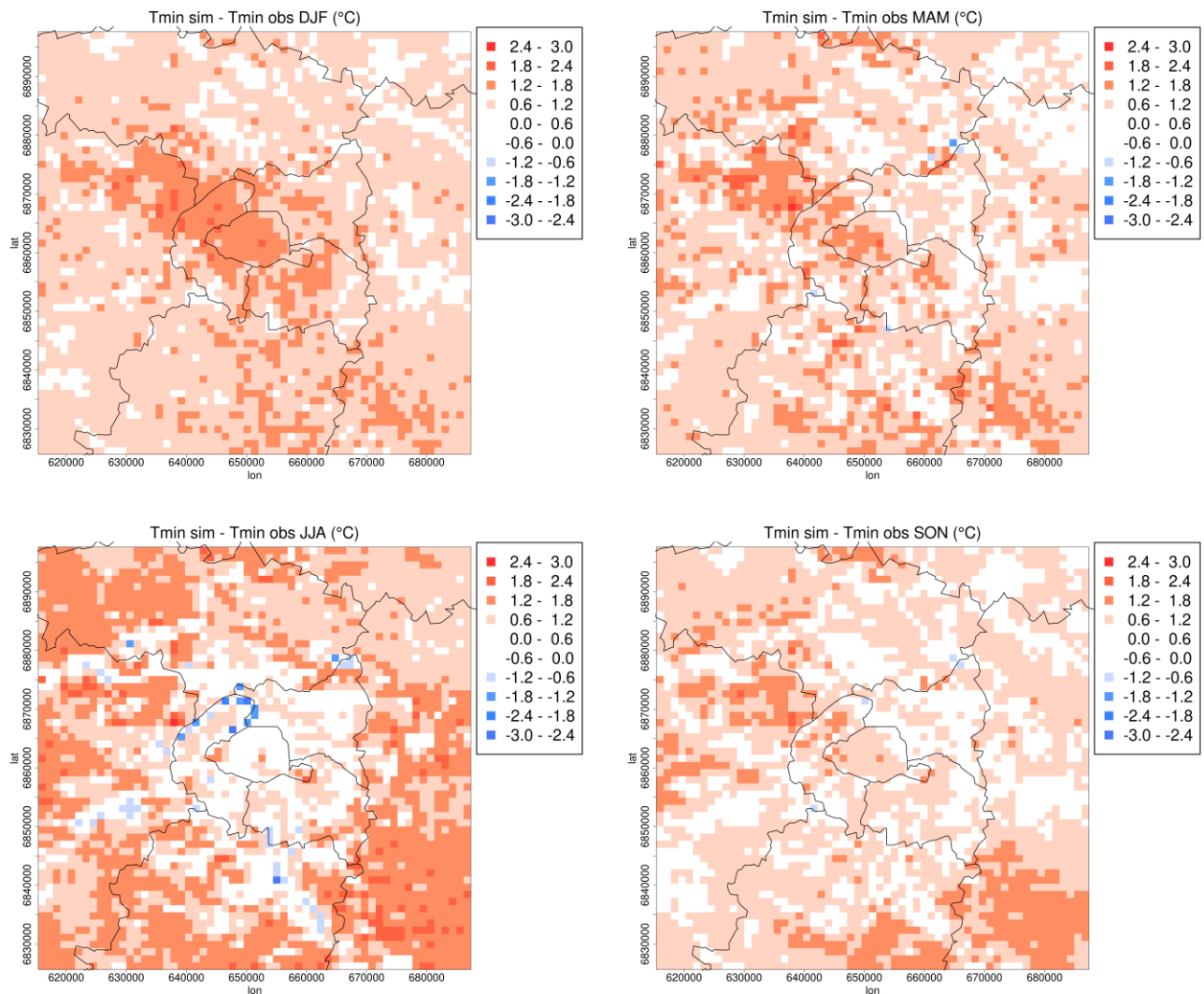


Figure 8 Différence entre les moyennes saisonnières (DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne) des températures minimales observées (Koukou-Arnaud et Brion, 2018) et simulées sur le domaine, de 2001 à 2017.

L'évaluation des résultats du modèle, à différentes échelles d'observation (domaine d'étude étendu, bassins versants, super sites), met en évidence que le modèle reproduit avec une fidélité acceptable les variables hydro-climatiques étudiées même si des biais subsistent. Ainsi, les températures sont surestimées, d'environ 2 °C pour les températures de l'air spatialisées minimales et maximales (Koukou-Arnaud et Brion, 2018) et d'environ 1.5 °C pour les températures ponctuelles des stations des supers sites. Une plus forte surestimation sur les températures minimales est à noter : l'analyse de l'ICU nocturne doit donc être faite avec précaution, car elle risque de mener à une sous-estimation de son intensité. Les surestimations des températures sont plus marquées en hiver, autant pour les températures minimales que maximales.

Les flux turbulents sont assez bien représentés malgré une sous-estimation du flux de chaleur latente au SIRTa. Il est possible que le modèle ne simule pas assez d'évapotranspiration, réduisant ainsi l'effet rafraîchissant sur la température de l'air, justement surestimée. Cela peut induire des niveaux de stress thermique plus élevés qu'en réalité.

La comparaison des débits observés aux exutoires des bassins versants jaugés aux débits simulés donne des scores globalement insatisfaisants selon les critères définis par Moriasi et al. (2007). Cependant, ces critères ne sont probablement pas adaptés à une telle étude où de nombreux bassins versants, drainés par différents types de réseaux d'assainissement ponctués d'ouvrages (DO, maillages) dont certains sont gérés manuellement. De plus, les débits observés utilisés pour la phase

de calage de certains paramètres, montrent pour quelques uns une qualité médiocre et pour d'autres un fonctionnement du réseau qui évolue dans le temps (en lien avec des travaux, de la maintenance ou une modification de la gestion des effluents). Ainsi, seulement un bassin versant (DES2BR8, Figure 9) présente un NSE supérieur à 0.50 et à la fois un PBias inférieur à 25 (Tableau 6.1) en valeur absolue. En revanche, quatre autres bassins versants ont toutefois un PBias au moins *Satisfaisant* (cercles, Figure 6.12).

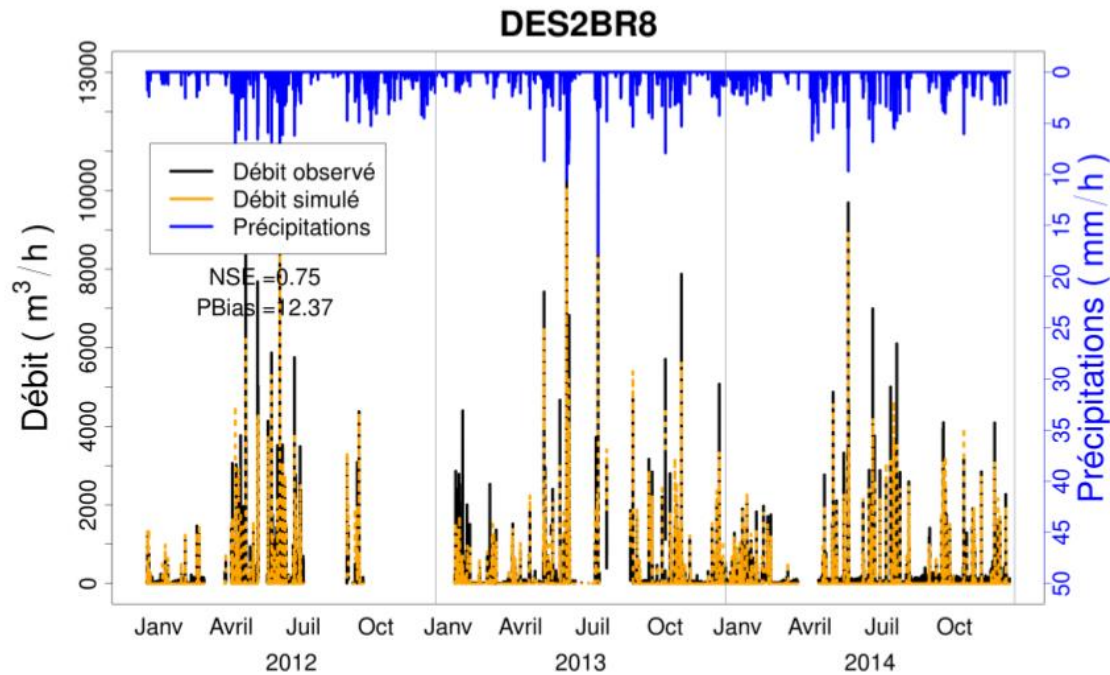


Figure 9 Hydrogrammes simulé (orange) et observé (noir) pour le bassin versant unitaire DES2BR8 de janvier 2012 à décembre 2014, en dehors de la période de calage. La pluie est en bleu. Les scores NSE et PBias, calculés à partir de ces mêmes débits sont indiqués.

Les bassins P117 et P119 sont situés dans la ville de Paris. Ils n'ont pas servi à la phase de calage car seule une année (2014) de données observées était disponible. Les scores qualifient la simulation de ces bassins versants d'*insatisfaisante*. Toutefois, ils sont du même ordre de grandeur et même meilleurs que d'autres bassins versants calés. Notons que ces bassins versants sont situés à l'aval de nombreux bassins versants (les erreurs dans la reconstruction et la simulation des débits des bassins versants amont peuvent se cumuler), plusieurs déversoirs et maillages sont également situés en amont de ces bassins versants (erreurs possiblement cumulées en lien avec la définition des seuils de déversements et le signal des eaux usées peut être moins clair et plus difficile à extraire). De plus Chancibault et al. (2019) avait identifié que la reconstruction du réseau de ces bassins versants n'étaient pas de bonne qualité, en lien avec des données descriptives du réseau de mauvaise qualité (altitude des regards).

Ainsi, TEB est meilleur pour reproduire les chroniques avec très peu de débit de temps sec (peu d'infiltrations). Sa difficulté à représenter les infiltrations de l'eau du sol dans les réseaux est probablement lié à un assèchement trop rapide du sol.

IDENTIFICATION DE ZONES VULNERABLES

La question qui a motivé cette partie est celle de la co-localisation ou non des vulnérabilités hydro-climatiques identifiées précédemment sur la zone (Figure 10). La cartographie de ces dernières ne met pas en exergue de zones où co-existent des vulnérabilités intenses de différents types. Cela peut être lié notamment à la méthode d'analyse choisie pour cette cartographie de ne considérer que les vulnérabilités maximales mais est aussi partiellement reliées à la localisation et aux délimitations des bassins versants déversants vers le milieu naturel. En effet, il n'y en pas au centre de Paris mais

seulement sur les limites du département 75 et leur prise en compte est très dépendante de la localisation réelle et dans la reconstruction des déversoirs d'orage plutôt que de l'occupation du sol. Les SWI inférieurs ou égaux à zéro sont majoritairement présents aux limites est du domaine (Seine-Saint-Denis et Val de Marine) donc plutôt éloignés des zones les plus urbanisées. Le ruissellement se produit sur les zones les plus imperméabilisées (bâtiments et routes), donc majoritairement sur la ville de Paris. Les UTCI sont maximaux sur les zones bâties avec les rapports d'aspects des rues (rapport de la hauteur sur la largeur du canyon urbain) les plus élevés. Cela peut être en lien avec un effet de piégeage radiatif dans le canyon (hauteur des bâtiments élevée) qui maintient des températures plus élevées sur ces zones.

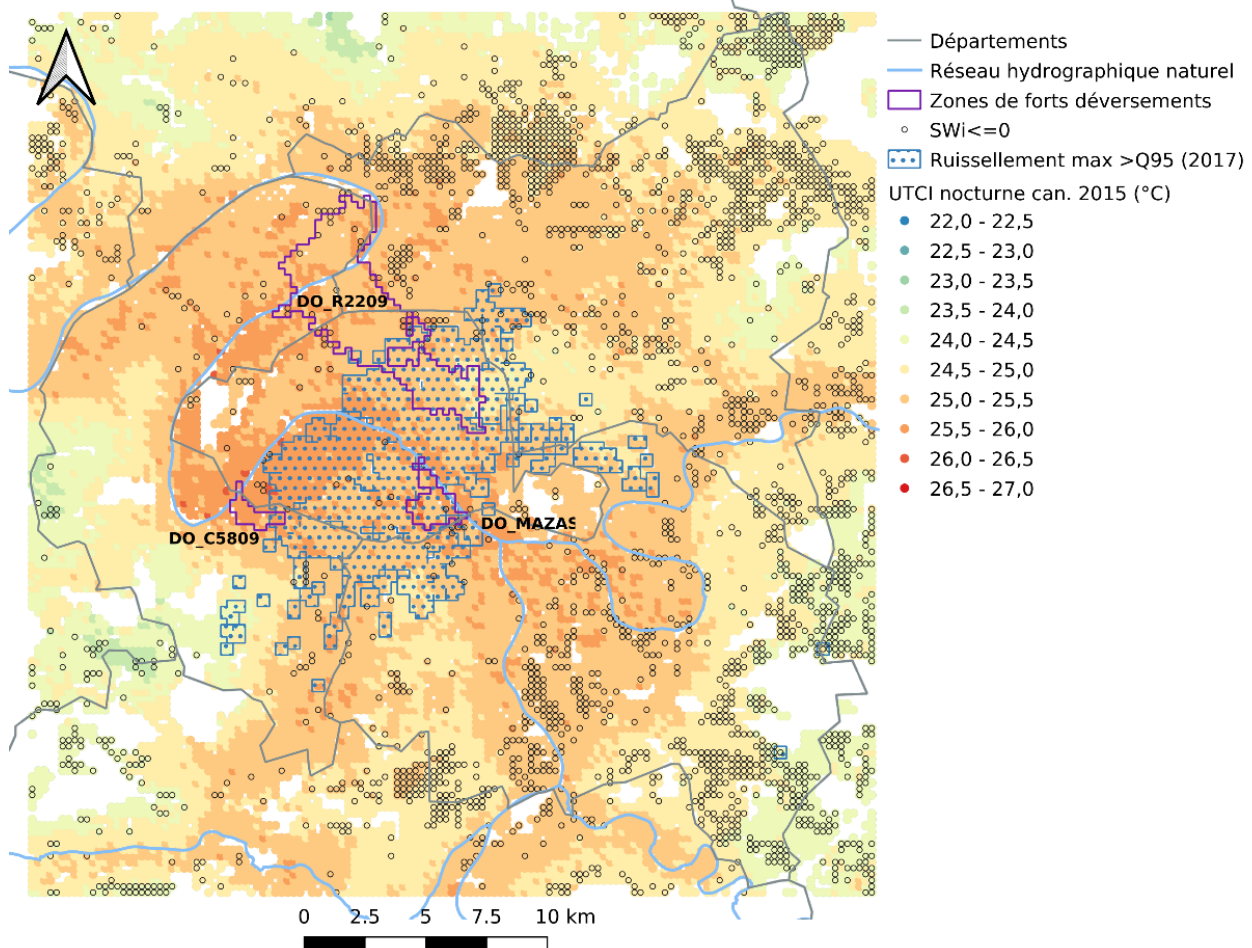


Figure 10 Délimitations des zones les plus vulnérables aux volumes et fréquences de déversement (violet), au stress hydrique (cercles noirs où le SWI est inférieur ou égal à 0), au ruissellement de surface (zone pointillée bleue où le débit est supérieur au Q95 pour l'orage du 9 juillet 2017) et au stress thermique (fond de carte représentant l'UTCI maximal lors des nuits de la canicule 2015).

L'UTCI est inversement dépendant du contenu en eau du sol, l'augmentation du stress thermique est donc liée à l'augmentation du stress hydrique. L'augmentation des surfaces végétalisées urbaines arborées ou en végétation basse augmente la corrélation entre l'UTCI et le SWI. Ce résultat est lié à une plus importante captation d'eau dans le sol et donc également l'augmentation de l'évapotranspiration diminuant la température de l'air, mais aussi à l'effet d'ombrage associé à la présence d'arbres.

Les bassins versants avec de forts et fréquents déversements sont ceux avec un maximum de surfaces imperméabilisées et avec un taux élevé de connexion de ces surfaces au réseau d'assainissement. Sur ces bassins versants, moins d'eau est ruisselée vers les jardins. Pourtant, leurs sols urbains s'assèchent plus difficilement jusqu'à des seuils critiques comme ceux rencontrés sur les départements de la petite couronne. Cela semble s'expliquer par peu de végétation sur ces zones et donc peu de pertes en eau par évapotranspiration. Les seuils de stress hydrique les plus élevés sont donc plutôt découplés des vulnérabilités hydrologiques maximales (ruissellement et déversements) qui sont localisées en milieu urbain.

Les zones de ruissellement les plus intenses sont localisées sur Paris et entrecoupent des zones d'UTCI élevés ainsi qu'une partie des bassins versants avec de forts déversements. Finalement, c'est au niveau d'un bassin versant, le DO_MAZAS (sud-est de Paris, 13^{ème} arrondissement), que les quatre vulnérabilités étudiées se recoupent (maximum d'UTCI, de déversement, de ruissellement, ainsi qu'une maille atteignant un stress hydrique).

Il serait désormais intéressant de déterminer plus précisément les raisons menant à de fortes vulnérabilités sur ces zones. Cela permettrait de proposer et d'évaluer avec ce même modèle des stratégies d'aménagement dans le but de diminuer l'intensité de ces vulnérabilités mais aussi leur concomitance spatiale et/ou temporelle.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette thèse a visé à étudier la réponse de la zone de Paris et sa petite couronne du point de vue du lien entre le microclimat urbain et l'hydrologie urbaine au stimuli de forçages météorologiques. La zone de Paris et sa petite couronne est étudiée sur une période de dix-sept années. Étudier les problématiques d'hydrologie et de microclimat urbains dans le cadre d'un couplage, associé à un territoire de cette taille en font un travail original et représentent une certaine prouesse.

Pour cela, il a donc été nécessaire de coupler les derniers développements du modèle TEB permettant une représentation détaillée des processus hydrologiques et des interactions microclimatiques entre le bâti et la végétation arborée urbaine. Une configuration de modélisation complexe et détaillée a été mise en place avec ces paramétrisations dans le modèle urbain. Une attention particulière a été apportée aux bases de données à fournir en entrée du modèle, notamment dans le but d'atteindre le niveau de description requis dans ces récentes paramétrisations. Plusieurs études, préalables à la simulation proprement dite de la réponse hydro-climatique du territoire, ont été menées :

- des études de sensibilité du modèle à la précision de la description de la végétation urbaine ainsi qu'à la texture du sol, pour mieux connaître les impacts de ces caractéristiques sur les résultats de simulation,
- un calage hydrologique du modèle, afin de fixer les paramètres hydrologiques qui sont difficilement connus et hétérogènes à l'échelle d'un territoire urbain aussi grand.

Ainsi le modèle a pu être évalué à l'aide d'observations à la fois spatialisées et localisées disponibles sur plusieurs années. Consécutivement, la localisation et les caractéristiques des vulnérabilités hydrologiques et climatiques majeures de la zone ont été identifiées.

Des améliorations peuvent être apportées dans la méthode de calage. Il serait nécessaire de disposer de davantage de bassins versants jaugés correspondant aux caractéristiques que le modèle est capable de représenter, en menant un travail expert approfondi sur chacun des bassins versants étudiés. Cela passe par une meilleure compréhension de chacun des bassins versants à travers leur gestion et leur fonctionnement. Le réseau d'assainissement reconstruit peut être amélioré à certains endroits, notamment plus particulièrement sur la ville de Paris. Enfin, la classification pour regrouper les bassins versants peut être améliorée en étudiant d'autres critères à intégrer.

Cette étude met aussi en évidence le besoin de disposer de plus d'observations et de meilleure qualité. Le calage hydrologique pourrait également bénéficier de plus de données ou avec des périodes de disponibilité plus longues. Enfin, l'évaluation du modèle a montré la faible disponibilité de stations mesurant à la fois les flux turbulents, les températures et humidités de l'air mais aussi celles du sous-sol. C'est une problématique importante pour la modélisation notamment en milieu urbain.

La configuration de modélisation établie pendant cette thèse et l'identification des zones de vulnérabilité hydro-climatiques pourront servir de base et être approfondis pour le développement

de scénarios d'aménagement. Ces scénarios pourraient notamment s'appuyer sur la végétalisation, pour obtenir les avantages combinés du rafraîchissement des ambiances et de l'amélioration de la gestion des eaux pluviales en augmentant les surfaces d'infiltration, limitant alors leur ruissellement et leur collecte par les réseaux. Connaître précisément les risques hydro-climatiques (stress thermique des habitants, stress hydrique des végétaux, pollution liée aux déversements) associées spécifiquement à chaque quartier pourrait intéresser des décideurs pour réaménager au mieux et plus efficacement ces zones dans le but de limiter les risques encourus par la population.

Enfin, ces travaux peuvent servir de base pour une étude de la zone et de ses vulnérabilités en changement climatique, les forçages météorologiques pour le scénario en RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway) étant maintenant disponibles pour 41 combinaisons de RCM (Regional climate Model) - GCM (General Circulation Model) du projet EURO-CORDEX (travail de Benjamin Le Roy, CNRM). Il serait toutefois important avant de les utiliser directement, de mener un travail sur la représentation de ces précipitations en contexte de changement climatique. Elles ont peu été étudiées dans la méthode de création de ces forçages en climat futur, leur résolution spatiale (12 km) et temporelle (3h) sont trop importantes pour les études d'impact hydro-climatiques urbaine dont les processus sont étudiés à plus fine échelle.

VALORISATION

Manuscrit de thèse

Bernard É., 2021, Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Université Paul Sabatier - Toulouse III, soutenue le 13 décembre 2021.
Directrice de thèse : Cécile de Munck ; co-directrice : Katia Chancibault.

Publications dans des revues à comité de lecture

Bernard, É., de Munck, C. & Lemonsu, A. Sensitivity of the TEB model to the parameterization and accuracy of urban vegetation database. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
Soumis en 2021

Conférences

Bernard, É., Chancibault, K., de Munck, C. & Mosset, A. A new hydro-climate model for urban water management including nature based solutions: a preliminary application on Paris metropolitan area. Second International Conference "Water, Megacities and Global Change", Dec. 2020, PARIS, France. 12 p. *Long abstract accepté pour conférence EAUMEGA2020 publié sous HAL : hal-0312486*

Bernard, É.; de Munck, C.; Chancibault, K.; Mosset, A. & Lemonsu, A. Définition d'un cadre de modélisation hydro-climatique à l'échelle de Paris et sa petite couronne *9èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU)*, 2021, 2

Bernard, É.; Chancibault, K.; de Munck, C.; Mosset, A. & Lemonsu, A. Hydro-climatic response of Paris Metropolitan area through TEB-Hydro model simulation: multi-catchment calibration and evaluation, *International Conference on Urban Drainage 2021 (ICUD2021)*, 2021, 3

BIBLIOGRAPHIE

Bae, C. & Lee, D. K. (2020). Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 44, 101412. <https://doi.org/https://doi-org-s.docadis.upstlse.fr/10.1016/j.ijdr.2019.101412>

Chancibault, K., Mosset, A., Lotfi, Z., Beauvais, C., Shobair, S., Ourrai, S., Linca, J.-C., Rabier, A., Vernin, N., Oget, M., Belin, M.-M., Azimi, S., Bethouart, F., Bedrane, A., Lehoucq, C., Roux,

- C., Rocher, V., Joannis, C. & Chebbo, G. (2019). Rapport de synthèse PIREN-Seine, phase VII (2015-2019). Vol. 3 : Hydrologie urbaine : Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne (Research Report). IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. <https://doi.org/10.26047/PIREN.rapp.synth.2019.vol3>
- Chapman, S., Watson, J. E. M., Salazar, A., Thatcher, M. & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures : a systematic review. *Landscape Ecology*, 32 (10), 1921-1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>
- de Munck, C., Lemonsu, A., Masson, V., Bras, J. L. & Bonhomme, M. (2018). Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, 23, 260-286. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.003>
- Faggi, A. M., Krellenberg, K., Castro, R., Arriaga, M. & Endlicher, W. (2008). Biodiversity in the Argentinean Rolling Pampa Ecoregion : Changes Caused by Agriculture and Urbanisation. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_25
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B. & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International journal of biometeorology*, 56 (3), 429-441.
- 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*, 12 (7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2014.916314>
- Flügel, W.-A. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9 (3-4), 423-436.
- Haghighatafshar, S., Yamanee-Nolin, M. & Larson, M. (2019). A physically based model for mesoscale SuDS – an alternative to large-scale urban drainage simulations. *Journal of Environmental Management*, 240, 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.037>
- Helliwell, J. F., Layard, R., Sachs, J. & De Neve, J. E. (2020). World happiness report 2020.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021 : The physical Science Basis (rapp. scient.). Intergovernmental panel on climate change.
- Joshi, D. n. & Joshi, A. (2015). Role of Urban Trees in Amelioration of Temperatures. *International Journal of Research Studies in Bioscience*, 3.
- Koukouni-Arnaud, R. & Brion, D. (2018). Optimal interpolation of daily temperatures around Paris, taking into account urban fraction. *International Conference of Urban Climate ICUC*, 10.
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E. & Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5 (6), 1377-1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Lemonsu, A., Koukouni-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L. & Masson, V. (2013). Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic Change*, 116 (3-4), 679-692. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0521-6>
- Lemonsu, A., Viguie, V., Daniel, M. & Masson, V. (2015). Vulnerability to heat waves : Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, 14, 586-605.
- Leopold, L. B. (1968). Hydrology for urban land planning - A guidebook on the hydrologic effects of urban land use. <https://doi.org/10.3133/cir554>
- Le Roy, B., Lemonsu, A. & Schoetter, R. (2021). A statistical-dynamical downscaling methodology for the urban heat island applied to the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics*, 56 (7-8), 2487-2508. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05600-z>
- Lotfi, Z., Chancibault, K., Joannis, C., Andrieu, H., Chebbo, G., Azimi, S. & Rocher, V. (2016a). Fonctionnement du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII. (rapp. tech.).

- Liu, X., Huang, Y., Xu, X., Li, X., Li, X., Ciais, P., Lin, P., Gong, K., Ziegler, A. D., Chen, A., Gong, P., Chen, J., Hu, G., Chen, Y., Wang, S., Wu, Q., Huang, K., Estes, L. & Zeng, Z. (2020). High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. *Nature Sustainability*, 3 (7), 564-570. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0521-x>
- Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94 (3), 357-397. <https://doi.org/10.1023/a:1002463829265>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885-900.
- Nirupama, N. & Simonovic, S. P. (2007). Increase of flood risk due to urbanisation : A Canadian example. *Natural Hazards*, 40 (1), 25-41.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), 1-24.
- Pelorosso, R. (2020). Modeling and urban planning : A systematic review of performance-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101867. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101867>
- Power, A. L., Tennant, R. K., Jones, R. T., Tang, Y., Du, J., Worsley, A. T. & Love, J. (2018). Monitoring Impacts of Urbanisation and Industrialisation on Air Quality in the Anthropocene Using Urban Pond Sediments. 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00131>
- Qiu, G. Y., Li, H. Y., Zhang, Q. T., Chen, W., Liang, X. J. & Li, X. Z. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 12 (8), 1307-1315. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- Redon, E., Lemonsu, A. & Masson, V. (2020). An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8. 0). *Geoscientific Model Development*, 13 (2), 385-399.
- Redon, E. C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B. & Musy, M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, 10 (1), 385-411. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>
- Stavropoulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Brun, J.-M., Lemonsu, A., Masson, V., Boone, A. & Andrieu, H. (2018). Improvements of the hydrological processes of the Town Energy Balance Model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2018, 1-28. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-39>
- Stavropoulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Andrieu, H., Lemonsu, A., Calmet, I., Keravec, P. & Masson, V. (2021a). Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model : Towards an assessment tool for nature based solution performances. *Urban Climate*, 39, 100925. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100925>
- UN. (2018). Revision of world urbanization prospects. United Nations : New York, NY, USA.