



Contribution à la modélisation hydrologique : vers une évaluation plus intégrée du développement urbain durable

Katia Chancibault

► To cite this version:

Katia Chancibault. Contribution à la modélisation hydrologique : vers une évaluation plus intégrée du développement urbain durable. Hydrologie. Nantes Université, 2024. <tel-05014668>

HAL Id: tel-05014668

<https://univ-eiffel.hal.science/tel-05014668v1>

Submitted on 31 Mar 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES HDR

Spécialité : Météorologie, océanographie physique et physique de l'environnement

Par
Katia CHANCIBAULT

CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE : VERS UNE ÉVALUATION PLUS INTÉGRÉE DU DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE

Travaux présentés et soutenus à Bouguenais, le 18 juin 2024

Unité de recherche : Univ. Eiffel, GERS/LEE

Rapporteur.es avant soutenance :

Gislain LIPEME KOUYI	Professeur des Universités, INSA de Lyon
Bruno TASSIN	Directeur de recherche, Ecole des Ponts ParisTech
Zahra THOMAS	Professeure des Universités, Institut Agro Rennes-Angers

Composition du jury :

Gislain LIPEME KOUYI	Professeur des Universités, INSA de Lyon
Bruno TASSIN	Directeur de recherche, Ecole des Ponts ParisTech
Zahra THOMAS	Professeure des Universités, Institut Agro Rennes-Angers
Thierry LEBEAU	Professeur des Universités, Nantes Université
Sandrine ANQUETIN	Directrice de recherche CNRS, Institut des Géosciences de l'Environnement
Valéry MASSON	Ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et des Forêts Centre National de Recherche en Météorologie

Invité

Hervé ANDRIEU

Diplômes

- 2002 ♦ **Doctorat en Physique de l'Atmosphère**, Université Toulouse III, Paul Sabatier
Titre : *Etude numérique des orages supercellulaires en France.*
Prix Paul Sabatier 2003, Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse
- 1999 ♦ **DEA "Océan, Atmosphère, Biosphère"**, Université Toulouse III, Paul Sabatier
- 1998 ♦ **Maîtrise de Physique Appliquée, Mention Océan & Atmosphère**, Université de Toulon.

Parcours professionnel

- 2007 – ... ♦ **Chercheure** Université Gustave Eiffel, campus de Nantes.
initialement Laboratoire des Ponts et Chaussées puis IFSTTAR
- 2004 – 2006 ♦ **Contrat post-doctoral** CNRM, Météo-France, Toulouse.
Développement d'un système de modélisation couplée hydro-météorologique pour les crues-éclair.
- 2003 – 2004 ♦ **Contrat post-doctoral** LTHE, Université Joseph Fourier, Grenoble.
Validation hydrologique des précipitations simulées par un modèle non-hydrostatique. Application au cas du 8-9 septembre 2002, Cévennes, France. Développement d'un système de modélisation couplée hydro-météorologique pour les crues-éclair.

Projets nationaux

- 2024-2027 ♦ **Permépolis** ANR, coord. C. Le Guern (BRGM), 10 partenaires + Nantes Métropole participation.
- 2019-2023 ♦ **OPUR5** OPUR, co-coord. G. Chebbo (ENPC)
co-animation d'un axe et de deux actions.
- 2015-2019 ♦ **Piren-Seine 7** Piren-Seine, co-coord. N. Flipo (Mines Paris)
responsable de la partie Hydrologie Urbaine.
- 2014-2017 ♦ **HyClau** LCPC, co-coord. **K. Chancibault**, 9 partenaires.
- 2012-2014 ♦ **TrafiPollu** ANR, coord. L. Leclercq (IFSTTAR), 9 partenaires participation.
- 2010-2013 ♦ **VegDUD** ANR, coord. M. Musy (CRENEAU), 10 partenaires participation.
♦ **Ville Numérique** DIR-MEDDE, coord. CSTB, 12 partenaires participation.
♦ **RosenHy** EC2CO, co-coord. **K. Chancibault**, 15 partenaires
- 2008-2010 ♦ **AVuPUr** ANR, coord. I. Braud, 6 partenaires
responsable scientifique LCPC.
- 2003-2006 ♦ **Crues-éclair** PATOM-PNRH, coord. S. Anquetin
contrat post-doctoral.

Projets européens

- 2024-2026 ♦ **GreenStorm** DUT, coord. M-C Gromaire (ENPC), 14 partenaires (6 collectivités)
Responsable scientifique Univ. Eiffel, responsable d'un work package et d'une tâche.
- 2018-2023 ♦ **URBiNAT** H2020, coord. G. Canto Muniz (CES), 26 partenaires (7 collectivités)
co-responsable scientifiqueIRSTV durant les 3 premières années
- 2015-2019 ♦ **Nature4Cities** H2020, coord. Nobatek, 26 partenaires (4 collectivités)
responsable scientifique IFSTTAR, animation sous-tâche
- 2005-2006 ♦ **PREVIEW** GMES-FP6, coord. K. Kotroni, 58 partenaires
contrat post-doctorat
- 2004-2005 ♦ **AMPHORE** INTERREG IIIb-Medoc, coord. ARPA Piemonte, 10 partenaires
contrat post-doctorat
- ♦ **HYDROPTIMET** INTERREG IIIb-Medoc, coord. ARPA Piemonte, 13 partenaires
contrat post-doctorat

Publications - Synthèse

- 20 ♦ Articles dans revues internationales ou nationales, avec comité de lecture
- 1 ♦ Ouvrage scientifique
- 22 ♦ Communications avec actes dans un congrès international
- 8 ♦ Communications avec actes dans un congrès national
- 5 ♦ Communication données à l'invitation du Comité d'organisation dans un colloque national
- 16 ♦ Communications orales sans acte dans un congrès international ou national
- 2 ♦ Communication par affiche dans un congrès international ou national

Sélection de 5 Publications

- Stavropoulos-Laffaille, X. et al., 2018 ♦ Présente les premières études d'évaluation des nouvelles paramétrisations hydrologiques dans TEB (TEB-Hydro) sur de petits bassins urbains. Le calage du modèle est abordé. (*Article rang A*)
- Chancibault, K et al, 2019 ♦ Présente l'ensemble des travaux menés pour comprendre le fonctionnement du réseau d'assainissement à l'échelle de l'agglomération parisienne, dans l'objectif de le reconstruire en le simplifiant. L'outil de reconstruction qui a été développé initialement sur le territoire nantais et adapté pour cette application sur le territoire parisien est aussi présenté. Ces travaux sont primordiaux pour les travaux suivants sur Paris (Programme OPUR, Thèse Emilie Bernard). (*Rapport Hydrologie urbaine, du programme PIREN-Seine, VII*)
- Stavropoulos-Laffaille, X. et al., 2021 ♦ Présente l'effet des nouvelles paramétrisations hydrologiques pour le milieu urbain dans TEB, sur la simulation des flux de chaleur latente et sensible. Il s'agit surtout de voir comment le calage de la partie hydrologique peut agir sur la partie énergétique du modèle qui a été évaluée dans de nombreux contextes. (*Article rang A*)
- Tunqui Neira, J. et al., 2023 ♦ Pose les bases d'une typologie des ouvrages de gestion à la source, basée sur les fonctions et leur localisation. Ce travail est la base des développements dans TEB-Hydro pour la prise en compte de ce type d'ouvrages dans le modèle. (*Article rang A*)

Sélection de 5 Publications (suite)

- Chavez, S. et al, 2023 ◇ Présente les premiers travaux menés pour étudier les leviers et freins dans les documents d'urbanisme, vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique, en termes de gestion de l'eau. (*Article rang A*)

Encadrements de thèses

- 2021-2024 ◇ 1 thèse encadrée à 33%, codir. E. Gaume, A. Ruas.
Stratégies d'adaptation au changement climatique pour améliorer la gestion des eaux pluviales et le confort thermique : évaluation de scénarios d'aménagements à l'échelle de la métropole nantaise.
F. BETOU, contrat doctoral en cours (Betou et al., 2024)
- 2020-2024 ◇ 1 thèse encadrée à 33%, codir. N. Molines (B. De Gouvello)
Le Plan Local d'Urbanisme entre déterminisme et incertitude. Dans un contexte d'adaptation au changement climatique, quel levier pour la gestion alternative des eaux pluviales? Application au PLU métropolitain de Nantes Métropole.
S. CHAVEZ, recherche d'emploi, termine la rédaction (Chavez et al, 2023, 2024)
- 2019-2021 ◇ 1 thèse encadrée à 33%, codir. C. de Munck.
Réponse hydroclimatique de Paris et sa petite couronne.
E. BERNARD, Contrat post-doctoral en cours (Bernard et al., 2021, 2024)
- 2016-2019 ◇ 1 thèse encadrée à 33%, dir. H. Andrieu.
Pour une analyse des impacts du changement climatique sur l'hydrologie urbaine : modélisation hydro-microclimatique de deux bassins versants expérimentaux de l'agglomération nantaise.
X. STAVROPULOS-LAFFAILLE, CR DD, Cerema (Stavropulos-Laffaille et al., 2017, 2018, 2021)
- 2013-2015 ◇ 1 thèse, codirigée à 20%, dir. M. Buès, codir. M. Marchetti.
Contribution à la modélisation microclimatique des situations hivernales en milieu urbain.
A. KHALIFA (Khalifa et al., 2016, 2018)
- ◇ 1 thèse encadrée à 33%, dir. H. Andrieu
Contribution à la modélisation hydrologique à l'échelle de la ville : application sur la ville de Nantes.
A. ALLARD
- 2009-2011 ◇ 1 thèse, encadrée à 33%, dir. H. Andrieu.
Modélisation hydrologique des bassins versants périurbains.
C. FURUSHO, IR, INRAE (Furusho et al, 2013, 2014)

Encadrements de CDD

- 2020-2024 ◇ 1 CDD (chercheur), J-M Tunqui-Neira (4x 12 mois) (40%)
- 2022-2023 ◇ 1 CDD (chercheur), X. Stavropulos-Laffaille (12 mois) (50%)
- 2018 ◇ 1 CDD (IE), R. Bouzidi (12 mois) (60%)
- 2015-2016 ◇ 1 CDD (IE), Z. Lotfi (12 mois) (80%)
- 2011 ◇ 1 CDD (IE), J.-M. Brun (12 mois) (80%)

Encadrements de stages

- 2023-2024 ◇ Alternant Master II, A. Aloui (65%)

Encadrements de stages (suite)

- 2022 ◇ 3 stages de Master II et PFE, E.-M. Bouzine (2022) (30%), J. Le Roy-Lisneuf (2022) (50%) et Y. El Mouroudi (80%) (2022)
- 2021 ◇ 1 stage de Master I, S. Bendaoud & A. Marchal (2021) (30%)
- 2020 ◇ 2 stages de Master II, S. Chavez (2020) (15%) et A. Guézénoc (2020) (50%)
- 2019 ◇ 1 stage de Master II, S. Ourrai (2019) (50%)
- 2018 ◇ 1 stage de Master II, S. Shobair (2018) (50%)
- 2017 ◇ 1 stage PFE, C. Beauvais (2017) (50%)
- 2016 ◇ 1 stage de Master II, S. Bouarafa (30%)
- 2015 ◇ 2 stages de Master II, Z. Lotfi (2015) et M.-T. Mcharrat (2015) (80%)
- 2014 ◇ 2 stages de Master II, A. Abdykassymova (2014) (50%) et S. Essbai (2014) (80%)
- 2013 ◇ 1 stage de master I, A. Aidam (2013) (30)
- 2012 ◇ 2 stages de Master II et PFE, A. Allard (2012) et A. Poirier (2012) (80%)
- 2011 ◇ 1 stage de Master II, R. Guery (2011) (50%)
- 2010 ◇ 1 stage de Master II, A. Giangola-Murzyn (2010) (60%)
- 2009 ◇ 2 stages de Master I, Y. Baux (2009) et J. Guyot Tephane (2009) (80%)
- 2008 ◇ 2 stages Master II et PFE, C. Furusho (2008) et C. Leroux (2008) (50%)
- 2007 ◇ 1 stage de Master I, A.-S. Guilbaud (2007) (50%)

Jurys de thèse

- 2015 ◇ Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales : Application au bassin de l'Yzeron (130km²). M. LABBAS.
- 2016 ◇ Analyse et représentation des épisodes de caniculaires en zones urbaines denses : de la durée à la conception d'un indice de dangerosité. L. PINSON.
- 2023 ◇ Impact des séries chronologiques de pluies futures à horizon 2100 sur les déversements des réseaux d'assainissement. F. GOGIEN.
- 2024 ◇ Mise au point d'une méthodologie de déconnexion des eaux urbaines à l'échelle d'un bassin versant. V. MONTOYA CORONADO

Enseignements

- 2018-auj. ◇ **Master I Urban Environment**, Ecole Centrale de Nantes
Cours "Catchment hydrology", 12h eqTD
- 2015-auj. ◇ **Ingénieurs 2ème et 3ème années, option PhyCité**, Ecole Centrale de Nantes
Cours d'hydrologie de bassin versant et urbaine, 22h eqTD
- 2023 ◇ **Master II Analyse économique de Projets Environnement Mer Energie**, IAE Nantes
Cours d'hydrologie de bassin versant et urbaine, 4h30 eqTD
- 2021 ◇ **Ecologie urbaine du DSA d'architecte-urbaniste**, Ecole d'architecture de la ville & des territoires Paris-Est
Cours sur le confort thermique et la gestion des eaux pluviales en milieu urbain, dans un contexte de changement climatique, 4h30 eqTD
- 2009-2018 ◇ **Master II environnements urbains**, Ecole Centrale de Nantes
Cours d'hydrologie de bassin versant, 12h eqTD

Enseignements (suite)

- 2012 ♦ **Master II cartographie des risques**, Université de Nantes
Cours d'hydrologie de bassin versant et risques, 15h eqTD
- 2008 ♦ **Licence professionnelle Protection de l'Environnement**, Université de Nantes
Cours d'hydrologie de bassin versant, 12h eqTD
- 2003 ♦ **Formation permanente**, Université de Grenoble
Cours de météorologie, 6h eqTD

Expertise

- 2024 ♦ Comité d'expert-es de la stratégie départementale de Loire Atlantique d'adaptation au changement climatique
- 2023 ♦ Candidature par Point Focal français du GIEC comme experte pour le prochain rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les villes. Attente réponse.
 - ♦ GIEC Pays de la Loire - réunion avec le département de la Vendée sur la gestion quantitative de l'eau et le changement climatique.
- Depuis 2021 ♦ GIEC (Groupe interdisciplinaire d'experts sur le changement climatique) des Pays de la Loire.
- 2013-2023 ♦ UERA (Urban European Research Alliance).
- 2016-2017 ♦ PNACC2 (Plan National d'Adaptation au Changement Climatique).
 - ♦ ESCO artificialisation des sols.
- 2013-2015 ♦ Comité scientifique et technique du plan climat de Nantes Métropole.

Responsabilités collectives

- 2024 ♦ Participation au Comité de sélection d'un poste de maître de conférence à l'INSA.
- 2023 ♦ Animation scientifique interne Univ. Eiffel - Co-construction et co-animation d'un groupe sur la thématique des SfN pour une ville durable.
 - ♦ Participation au Comité de sélection d'un poste de maître de conférence à l'INSA.
 - ♦ Co-animatrice avec Nadège Blond (CNRS) de la modélisation au sein du SNO Observil.
 - ♦ Co-animatrice du groupe thématique ruissellement et changement climatique de la Fondation Eiffel.
- 2015-2023 ♦ Activité syndicale - Participation aux réunions avec le ministère au sujet de la mise en place du RIFSEEP/RIPEC pour les CRDD et DRDD.
- 2014-... ♦ Activité syndicale - Élu(e) au conseil de département GERS depuis sa création.
- 2018 ♦ Activité syndicale - Co-gestion des listes électorales des CR et DR du développement durable.
 - ♦ Activité syndicale - Participation au jury de recrutement d'un poste administratif à l'Univ. Eiffel.
- 2015 ♦ Activité syndicale - Gestion des listes électorales des CR et DR du développement durable.
- 2013-2014 ♦ Activité syndicale - Participation aux réunions bilatérales ou plénières avec le ministère, lors des négociations pour le décret de 2014 sur les dispositions des corps CRDD et DRDD.

Actions de vulgarisation

- 2023 ♦ Accord pour participer à la formation et à la sensibilisation des hauts cadres des Pays de la Loire en 2024, sur le changement climatique et ses impacts.

Actions de vulgarisation (suite)

- ◇ Semaine développement durable - campus univ. Eiffel de Nantes. Présentation sur l'ICU et le confort thermique.
- ◇ 1ère journée collective Angers TransitionS pour les agents de la métropole d'Angers - 2 ateliers de 40 personnes sur *La nature en ville : une solution pour améliorer la gestion des eaux pluviales et le confort thermique*. (GIEC PdL)
- ◇ Association Virage - présentation 1er et 2ème rapports du GIEC Pays de la Loire
- ◇ Association Saint-Sébastien Écologique et Solidaire - conférence-débat sur la gestion de l'eau durable en ville. (GIEC PdL)
- ◇ Présentation du 2ème rapport du GIEC Pays de la Loire à la Cité des Congrès d'Angers.
- ◇ Débat Changement climatique sur le Pays de Retz - présentation du 1er rapport du GIEC Pays de la Loire et discussions avec les élus.
- 2022-2023 ◇ Opération Passeport Recherche de Nantes Université, avec une classe de 1ère STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable), sur la thématique de l'eau et du développement durable.
- 2022 ◇ Fête de la Science - atelier sur le confort thermique avec Institut Agro d'Angers.
- ◇ Rencontres régionales (Pays de la Loire) des mobilités durables - Présentation 1er rapport du GIEC Pays de la Loire.
- ◇ Présentation du 1er rapport du GIEC Pays de la Loire, à l'Hôtel de Région.
- 2020 ◇ Fête de la Science - intervention (2 demi-journées) auprès de classes de 5ème et 4ème sur l'ICU et le confort thermique, avec Institut Agro d'Angers.

Remerciements

L'année du bac, au moment de réfléchir à mon orientation, comme nombre de lycéen.ne.s, je ne sais que choisir. Je sais que tout ce qui a trait à la nature, aux sciences de l'univers me plaît plus que le reste. Et je souhaite faire un métier pour lequel j'ai une motivation particulière. À cette époque l'astronomie m'attire plus particulièrement. Après une recherche des métiers possibles dans ce domaine et des études à poursuivre, je réalise qu'un doctorat serait nécessaire. Seulement voilà : je suis une jeune femme venant d'une famille où personne n'a jamais passé un diplôme au-delà de bac+2. Je décide donc que l'astronomie restera de l'ordre du hobby pour moi. Finalement, de pas en pas, me voilà à passer mon HDR... Ce parcours a évidemment été possible avec l'aide de nombreuses personnes que j'ai croisées. Qu'elles en soient sincèrement et chaleureusement remerciées ici.

Mes premières pensées vont à Michel Pirre, mon "prof" de physique à l'Université d'Orléans, durant mes deux années de DEUG (oui, ces années sont bien loin, pour nos étudiants et jeunes chercheurs, il s'agit des années L1 et L2). J'ai "osé" lui demander (il m'impressionnait beaucoup) alors que j'avais rejoint l'Université de Toulon et du Var pour suivre une licence (L3) de me permettre d'effectuer un stage dans son équipe, durant l'été 1997. En m'ouvrant même pour une courte période son laboratoire, il m'a permis de découvrir ce que pouvait être métier de la recherche, l'environnement de travail et l'ambiance d'un laboratoire, pour me donner envie de poursuivre dans ce milieu. Je me souviens d'une discussion dans son bureau sur un avenir éventuel dans la recherche : il avait pris le temps d'en discuter et même de me donner son avis (ma fierté m'empêche ici de vous faire part de ses conclusions au regard de mes résultats l'année précédente en physique).

Viennent rapidement ensuite, Evelynne Richard et Jean-Pierre Pinty, qui m'ont accueillie avec une grande gentillesse et une certaine patience au Laboratoire d'Aérologie, lors de stages d'un mois durant l'été 1998 et de 5 mois en 1999. Ces deux expériences ont fini de me convaincre que le métier de chercheur me permettrait de m'épanouir professionnellement.

Evidemment, mon directeur de thèse et mon encadrante, respectivement Jean-Philippe Lafore et Véronique Ducrocq, ont une bonne place dans ces remerciements. Il est fort probable que sans eux, je n'aurai jamais eu les moyens d'embrasser cette carrière. J'étais absolument admirative de l'engouement de Jean-Philippe pour ses sujets de recherche, sa faculté à expliquer les processus physiques et particulièrement ceux en lien avec la convection, alors que Véronique m'a transmise, je l'espère, une certaine rigueur scientifique. Elle m'a aussi consacré le temps nécessaire à la préparation aux concours que j'ai passés ensuite. J'essaie, aujourd'hui, de m'inspirer un peu d'eux, lors de l'encadrement des étudiants et jeunes chercheurs. Je n'oublie par Jean-Philippe Bougeault (que je n'ai jamais réussi à tutoyer, l'aura du professeur de dynamique en basse couche étant trop présente), car sans lui, je n'aurais probablement pas osé prendre le virage de l'hydrologie, après mon doctorat en physique de l'atmosphère.

Lors de mon séjour à Grenoble, j'ai particulièrement apprécié de travailler avec Sandrine Anquetin et Georges-Marie Saulnier : Georges-Marie pour son humour et sa patience à m'enseigner l'hydrologie et l'outil TOPMODEL (TOPODYN) et Sandrine, pour sa jovialité, son humeur toujours égale et sa gentillesse. Elle aussi a su faire preuve de patience

et me conseiller dans l'encadrement de mon premier stagiaire, mais surtout elle m'a aussi largement conseillée et supportée durant les périodes de concours. Nos discussions sur le métier de chercheur m'ont probablement préparée à ces dernières années et son caractère volontaire a été un exemple pour moi. Jean-Dominique Creutin, enfin, l'ami, le sage... Il a toujours été de bon conseil quant à mon parcours de recherche et j'ai adoré les moments passés à découvrir une autre vie grenobloise, accompagnés d'Odile, si adorable.

Au sein du Laboratoire Eau et Environnement, la liste des personnes à remercier est évidemment très longue. Les travaux présentés dans ce document sont bien sûr le fruit d'un vrai travail d'équipe où les compétences de chacune et chacun sont indispensables. Tout d'abord Hervé Andrieu (Chef de la Division Eau et Environnement, à mon arrivée en janvier 2007) qui a su me mettre très vite le pied à l'étrier avec le projet AVuPUR. Il a partagé rapidement sa vision de mon rôle au sein du laboratoire et ainsi a accompagné et suivi mes premiers pas au LCPC, puis à l'IFSTTAR, puis à l'Université Gustave Eiffel (!). Il a ainsi largement contribué à la construction de ce projet de recherche. Il a finalement tenu un rôle de mentor, si fréquent en recherche, en m'offrant à de nombreuses reprises, de belles opportunités de collaboration. Malgré son départ du laboratoire, nos échanges sur des questions de recherche ou d'organisation de recherche sont toujours les bienvenues ! Claude Joannis a été le directeur du Laboratoire à sa suite. Nous avons alors appris à nous connaître et nos discussions en fin de journée, alors que les couloirs s'étaient vidés, aussi bien sur mes travaux que sur le programme de l'opéra de Nantes, m'ont beaucoup manquées à son départ. J'apprécie encore nos échanges malheureusement trop peu fréquents. Véronique Ruban, à sa suite à la direction, a su apporter une gentillesse et une humanité, nécessaires à un travail en toute sérénité. Je n'oublie pas le dernier directeur en date, Pierre-Emmanuel Peyneau, qui fait preuve d'une belle implication dans les tâches administratives, dans le but de nous soulager ou nous aider à travailler. J'apprécie beaucoup sa patience et ses conseils lors de mes incursions fréquentes dans son bureau. Nos échanges lors de la pause-déjeuner sont aussi un vrai plaisir. Béatrice Bechet, collègue du LEE, mais aussi directrice de l'IRSTV, est impressionnante par son esprit de synthèse et sa vision de l'organisation de la recherche. Depuis plusieurs années, nous avons été amenées à collaborer dans plusieurs projets et ainsi à croiser nos disciplines. Travailler ensemble est un plaisir... malgré notre gestion du temps assez différente !

Alexandra Mosset m'accompagne depuis maintenant plusieurs années dans tous mes projets et encadrements de thèse et de stagiaires. J'apprécie infiniment notre collaboration grâce à une certaine complémentarité, avec son dynamisme, son enthousiasme constant, quelles que soient les pistes de travail que je lui propose, sa curiosité et son envie d'apprendre, sans parler d'une certaine joie de vivre qui fait beaucoup de bien. Alexandra a un don pour trouver tous les documents ou données dont on a besoin. Jules Sekedoua Kouadio, jeune chercheur, a fait preuve d'une grande générosité en me présentant à sa famille, lors d'une mission à Abidjan. J'espère de tout coeur que notre projet, très ambitieux en Afrique sub-saharienne verra le jour, car en plus de nous permettre de travailler ensemble, sur un sujet passionnant et tellement motivant, cela me permettra de découvrir une ville, un pays et une culture très riches. Marie-Laure Mosini et Leatitia Pineau, déjà présentes au laboratoire à mon arrivée, en plus de m'accueillir si gentiment en 2007, m'ont permis, par leurs compétences techniques, informatiques et sur le terrain nombre des résultats de ces travaux. Je me dois de citer au moins une fois Brigadoon, sinon Leatitia ne me le pardonnera pas ! Tous les collègues du LEE ont aussi joué un rôle, soit par proximité des

thématiques, comme Fabrice Rodriguez, toujours de bonne humeur et prêt à faire rire (dès notre première rencontre, le jour de mon arrivée), soit par amitié, comme Johnny Gasperi, avec qui une réelle complicité existe. Je sais qu'au moindre doute sur n'importe quel sujet, il est prêt à m'écouter, me conseiller. J'espère qu'il sait que la réciprocité est vraie. Et puis tous les autres collègues, croisés dans les couloirs, les réunions, à l'heure du déjeuner et parfois avec qui une collaboration ponctuelle est initiée : Olivier, Eric, Denis, Pauline, Liliane, Mathieu, Lionel, Pierre, Bernard, Frédérique... Sans oublier Sabrina, notre déesse des noeuds administratifs : merci, merci, merci pour ta patience avec moi.

Les jeunes chercheur.e.s que j'ai encadré.e.s, sans qui tous ces résultats seraient inexistants, tiennent une place particulière. Carina Furusho, qui a essuyé les plâtres de mon inexpérience en encadrement, caractérisée par une douceur et une gentillesse à toute épreuve, a fait preuve d'une grande rigueur scientifique, de beaucoup de curiosité et m'a impressionné par sa capacité de travail. Elle m'a fait l'honneur de me présenter sa famille au Brésil qui m'a accueillie si chaleureusement. Zineb Lotfi, avec qui j'aurais tellement aimé pouvoir poursuivre une collaboration d'une façon ou d'une autre, a démontré un réel talent pour la recherche, avec une autonomie et une capacité d'adaptation réelle. Xenia Laffaille, que j'ai encadrée pendant sa thèse, puis avec qui j'ai travaillé lors d'un contrat post-doctoral, a illuminé les couloirs de ses rires quasi quotidiens, en plus d'avoir fait preuve d'une réelle maturité durant sa thèse. Emilie Bernard, que j'ai encadré à distance, durant le confinement, a montré de réelles qualités d'apprentissage pour une discipline qu'elle connaissait très peu. Saray Chavez, une autre doctorante co-encadrée à distance m'a aussi impressionnée dans sa capacité à maîtriser des disciplines aussi distinctes que l'urbanisme réglementaire et la gestion des eaux pluviales. Elle a en plus une grande maîtrise du français : c'est appréciable au moment de relire un document de thèse aussi épais ! Enfin Florian Betou, dernier doctorant en date, qui est capable de faire preuve d'un tel calme et de gentillesse, même en période de stress : bravo pour cette dernière ligne droite et désolée pour mon accompagnement plus sporadique ces derniers mois...

Il est de coutume de remercier les membres du jury qui ont accepté de relire ces travaux. Je le fais avec d'autant plus de conviction que j'ai trouvé nos échanges lors de la soutenance, particulièrement riches et constructifs. Entendre vos critiques, vos questionnements puis les débats que nous avons pu avoir vont me permettre de poursuivre ces travaux avec une vision plus large.

Je n'oublie pas la famille et les amis si précieux, qui m'ont soutenue dans ce long parcours. D'abord mes parents bien sûr, qui m'ont inculqué, je crois, le sens du travail bien fait et l'importance des études. Ma soeur ensuite, trop contente de me rendre visite dans toutes les villes où j'ai atterri et qui tient son rôle de grande soeur comme personne, en m'épaulant dans ma maison et mon jardin. Enfin les amis à Toulouse puis à Nantes, avec ces derniers je vis et partage la musique et le chant notamment. Ils sont une source d'énergie, de joie et d'émotions irremplaçable.

Table des matières

A	Activités d'enseignements et de formation	7
1	Enseignements	8
2	Opération Passeport Recherche	9
3	Formation continue	9
B	Activités de recherche	11
I	Modélisation hydrologique en milieu périurbain : à l'interface hydrologie rurale et hydrologie urbaine	12
1	Poser les bases d'un modèle hydrologique pour les crues-éclair	12
1.1	Modéliser des débits à partir de précipitations simulées	13
1.2	Couplage d'un schéma de sol avec un modèle hydrologique	17
2	Modéliser le cycle de l'eau en milieu périurbain	20
2.1	Analyse du fonctionnement d'un bassin péri-urbain : la Chézine	20
2.2	Adaptation du modèle au milieu péri-urbain	22
2.2.a	Les processus pris en compte	22
2.2.b	Fonction de transfert : approche géomorphologique privilégiée	24
2.3	Applications et évaluation	27
2.3.a	Le bassin versant de la Chézine	27
2.3.b	Le bassin versant de l'Yzeron	30
3	Conclusion	31
II	Modélisation hydro-climatique en milieu urbain à l'échelle d'une agglomération : à l'interface hydrologie et microclimatologie urbaines	33
1	Adaptation d'un modèle de bilan d'énergie des surfaces urbaines à l'hydrologie urbaine	34
1.1	TEB-Hydro - la fonction de production : problématique d'une approche agronomique	34
1.2	Sensibilité du modèle à ses paramètres, pour un calage plus efficace	36
1.3	Évaluation hydroclimatique à l'échelle de petits bassins urbains	38
2	Mise en oeuvre de la modélisation hydro-climatique à l'échelle d'un territoire	40
2.1	De nouveaux développements pour des pré-traitements indispensables	43
2.2	Évaluation du modèle	44
2.3	Analyse hydro-climatique à l'échelle d'un territoire	45
3	Conclusion	47

III Les besoins d'un modèle hydro-climatique en données d'entrée : à l'interface hydrologie et géographie	49
1 Sensibilité de la modélisation aux données d'occupation du sol	49
1.1 Selon la base de données	49
1.2 Croiser les bases de données	50
2 Sensibilité de la modélisation à la texture de sol	52
3 Le réseau d'assainissement : quelles représentations possibles ?	54
3.1 TOHR : Outil de reconstruction d'un réseau d'assainissement simplifié à l'échelle d'une agglomération	55
3.2 Le réseau hydrographique du Grand Paris	57
3.3 Le réseau hydrographique de la ville de Nantes	61
4 Conclusion	64
IV Vers des études prospectives pour l'adaptation aux changements globaux : applications du modèle	66
1 Les solutions d'adaptation : vertes, grises, bleues...	67
1.1 Développement d'une classification des OGS pour la modélisation	67
1.2 La prise en compte de ces solutions dans le modèle TEB-Hydro	70
2 Les scénarios d'occupation du sol : à l'interface hydrologie et urbanisme	72
2.1 Les scénarios d'urbanisation et de désurbanisation : on construit partout ou on rase tout !	72
2.2 Les scénarios d'urbanisation plus élaborés	75
3 Prendre en compte le changement climatique	78
3.1 Étude des projections climatiques en région nantaise	78
3.2 Des projections de pluie adaptées au contexte urbain	79
4 Conclusion	80
C Projet de recherche	81
V Analyse des impacts des changements globaux à l'échelle d'une agglomération pour une adaptation durable	82
1 Mieux comprendre les impacts du changement climatique et de l'urbanisation croissante sur la gestion des eaux pluviales	82
1.1 Impacts de l'urbanisation	82
1.2 Impacts du changement climatique	83
1.3 Le risque hydrologique	86
2 Construire et évaluer les stratégies d'adaptation	86
2.1 Comprendre les effets des solutions d'adaptation combinées	86
2.2 Des scénarios réalistes adaptés au contexte local	87
2.3 Vers des outils plus appliqués	88
3 Se tourner vers le continent africain	89
4 Conclusion	91
Annexes	101
A Pré-traitement des débits	102

B	Approche régionalisée du calage	104
C	Publications	107

Table des figures

I.1	Pluviomètres, radars et bassins versants	14
I.2	Comparaison des pluies simulées	15
I.3	Comparaison des débits simulés	16
I.4	Schéma couplage entre ISBA et TOPMODEL	18
I.5	Comparaison des débits observés et simulés sur les Gardons, la Cèze et l'Ardèche	19
I.6	Le bassin versant de la Chézine au sein de la métropole nantaise	21
I.7	Débits spécifiques aux exutoires de la Chézine à Procé et Sautron en juillet et décembre 2009	23
I.8	Fonctions de transfert définies à partir de la méthode de la DPFT, pour les trois types d'évènements sur la Chézine.	25
I.9	Fonctions de transfert DPFT et Hayami, pour les évènements de type urbain, mixte et rural sur la Chézine.	26
I.10	Bilan en eau simulé par ISBA-TOPMODEL sur le bassin versant périrubain de la Chézine	28
I.11	Débits simulés et observés sur le bassin de la Chézine	29
I.12	Déversoirs d'orage existants et équivalents sur le bassin versant de l'Yzeron	30
II.1	Schéma TEB-Hydro	35
II.2	Effets des paramètres sur le drainage par le réseau	39
II.3	Bassins Rezé et Pin Sec	39
II.4	PBIAS flux de chaleur simulés et observés	40
II.5	Flux de chaleur horaires moyens simulés et observés	41
II.6	Teneurs en eau simulées et observées sur le Pin Sec	42
II.7	Rapport de Bowen des flux de chaleur mensuels moyens	42
II.8	Carte des vulnérabilités	46
III.1	Occupation du sol de la Chézine selon diverses bases de données	51
III.2	Schéma synoptique de la méthode de création de l'occupation du sol pour TEB	52
III.3	Incertitudes totales de la végétation basse (haut) et haute (bas) de la partition produite par BETOU et al. (2023). D'après SAVARY (2023).	53
III.4	Schéma des noeuds par maille	56
III.5	Réseaux et ouvrages interdépartementaux	58
III.6	Réseaux réels et reconstruits à l'échelle de Paris et sa petite couronne	59
III.7	Bassins versants délimités à l'échelle du Grand Paris	60
III.8	Évolution des surfaces contributives selon le régime de pluie	61

III.9 Réseaux réels et reconstruits à Nantes est	62
III.10 Fonctions largeur de bassins unitaire et d'eau pluviale à Nantes est	62
III.11 Réseaux d'assainissement réels et reconstruits de la métropole nantaise	63
IV.1 Tableau croisé pour la typologie des OGS	68
IV.2 Conceptualisation des processus d'une classe d'OGS	69
IV.3 Critères pour les ouvrages équivalents	70
IV.4 Conceptualisation de l'ouvrage équivalent A	71
IV.5 Schéma des compartiments dans une maille de TEB, avec les ouvrages équivalents	72
IV.6 Bilans en eau des scénarios VegDUD	74
IV.7 Démarche méthodologique d'analyse de contenu des PADD	76
IV.8 Cartographie du potentiel d'implantation d'une noue	77
IV.9 Anomalies des précipitations pour RCP4.5, RCP8.5 et divers couples GCM- RCM	78
V.1 Les scénarios SSP du 6ème rapport du GIEC (CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023)	84
B.1 Méthode de calage par régionalisation	105
B.2 Bassins versants Grand Paris	105

Liste des tableaux

II.1	Scores de TEB-Hydro	45
III.1	Bases de données de l'étude de sensibilité	50
A.1	Données fournies par les gestionnaires du réseau du Grand Paris	103
A.2	Données observées conservées pour le calage sur le Grand Paris	103

Liste des abréviations

ANR	Agence Nationale de la Recherche
AVuPUR	Projet de recherche financé par l'ANR (2010-2013) visant à étudier la vulnérabilité des bassins péri-urbains
BDTopo	La BD TOPO® (IGN) est une description vectorielle 3D (structurée en objets) des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique, exploitable à des échelles allant du 1 : 2 000 au 1 : 50 000
BNETD	Bureau National d'Etudes techniques et de Développement
CMIP5	"Coupled model intercomparison projects" phase 5 (WCRP, 2008-2013), pour fournir les données et études pour le 5ème rapport du GIEC
CNRM	Centre Nationale de la Recherche en Météorologie (Météo-France)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DEA	Diplôme d'études Appliquées
DEA	Direction de l'Eau et de l'Assainissement de la Seine-Saint-Denis
DEE	Division Eau et Environnement
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer
DO	Déversoir d'orage
DPFT	Différence Première de la Fonction de Transfert
DRIAS	Base de données des projections climatiques régionalisées à l'échelle de la France
DSEA	Direction de l'Environnement et de l'Assainissement du Val-de-Marne
DUT	"Driving Urban Transition", programme de recherche européen.
EAVT	Ecole d'Architecture de la Ville & des Territoires, Paris-est

EC2CO	ECosphère COntinentale et CÔtière : programme de recherche coordonné et géré par l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS
ENPC	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
ENSEMBLES	Projet de recherche européen (FP6, 2004-2009) (https://ensembles-eu.metoffice.gov.uk/ , visité en août 2023)
EuroCORDEX	Base de données des projections climatiques régionalisées du programme CORDEX (WCRP, depuis 2009) (https://www.euro-cordex.net/ , visité en août 2023)
FAO	Food and Agriculture Organization : Base de données mondiale sur les sols d'une organisation américaine
GCM	"Global Climate Model" - Modèle de climat global
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts du Climat
GIEC PdL	Groupe Interdisciplinaire d'Experts du Climat des Pays de la Loire
GreenStorm	Projet de recherche (2024-2026) financé par le programme DUT
H2020	Programme de Recherche Européen - Horizon 2020
HYDROPTIMET	Projet de recherche européen (2002-2004) financé par le programme INTERREG IIIB-Medoc, visant l' <i>Optimisation des instruments de prévision hydrométéorologique</i>
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Techniques des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGT	Institut de Géographie Tropicale
INPHB	Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISBA	Schéma des surfaces naturelles de la plateforme SURFEX (Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere)
ISBA-TOPMODEL	Modèle hydrologique de bassins versants naturels dédié aux crues-éclair puis étendu aux bassins versants péri-urbains
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEE	Laboratoire Eau & Environnement
LPG	Laboratoire de Planétologie et Géosciences de Nantes Université
LPPL	Laboratoire de Psychologie des Pays de la Loire, Nantes Université

ABRÉVIATIONS

LTHE	Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement
MAnIpUr	Projet de recherche interne Ifsttar/Univ. Eiffel, financé via le projet fédérateur Ville 2050 visant à élaborer une Méthodologie pour l'ANalyse d'ImPact des documents d'URbanisme en terme de gestion des eaux pluviales et du confort thermique (2019-2020)
MODELET	Projet de recherche "MODELisation multi-échelles de l'Eva-poTranspiration en milieu urbain", financé par l'OFB, visant à améliorer les schémas de modélisation de l'ET dans les modèles hydrologiques, en milieu urbain, en considérant une diversité d'échelles spatiales (de l'espace végétalisé urbain à la ville) (2022-2024)
Nature4Cities, N4C . .	Projet de recherche financé par l'Europe (H2020) (2016-2021) visant à étudier, par une approche multi-disciplinaire, les solutions fondées sur la nature en milieu urbain
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency : score pour caractériser la performance d'un modèle en termes de variance
OAP	Orientation d'Aménagement et de Programmation
OHM-CV	Observatoire hydro-météorologique Cévennes-Vivarais
ONAD	Office National de l'Assainissement et du Drainage de Côte d'Ivoire
OFB	Observatoire Français de la Biodiversité
OPUR	Observatoire des Polluants en milieu URbain
OCS GE	L'OCS GE (IGN) est une base de données de référence pour la description de l'occupation du sol de l'ensemble du territoire métropolitain et des départements et régions d'outre-mer (DROM)
OGS	Ouvrages de gestion à la source
PADD	Plan d'Aménagement et de Développement Durable
PBias	Pourcentage de biais : score pour caractériser la performance d'un modèle en termes d'écart
Permépolis	Projet de recherche financé par l'ANR (2024-2026) sur la dés-imperméabilisation des sols
PLUi ou PLUm	Plan Local d'Urbanisme intercommunal ou métropolitain
PNACC-II	2ème Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (2016-2017)
PNT	Polygone non typé, de la méthode de construction de données d'occupation du sol de BÉTOU et al., 2023
POPSU	Plateforme d'Observation des Projets et Stratégies Urbaines (https://popsu.archi.fr/ , visité en août 2023)

PRUDENCE	Projet européen "Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects" (FP5, 2001-2004) (https://ensemblesrt3.dmi.dk/ , visité en août 2023)
RCM	"Régional Climate Model" - Modèle de climat régional
RCP	"Representative Concentration Pathway" Scenarios de projection climatique issus du CMIP5
SAP	Section de l'Assainissement de Paris
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et de Prévision des Crues
SDA	Service Départemental de l'Assainissement des Hauts-de-Seine
SIAAP	Syndicat interdépartemental d'assainissement de l'agglomération parisienne
SNO	Système National d'Observation. L'ONEVU est partenaire du SNO Observil, dédié aux sites urbains.
SODEXAM	Société d'exploitation et de développement aéroportuaire, aéronautique et météorologique de la Côte d'Ivoire
SPC	Service de Prévision des Crues du SCHAPI
SR	Station de relèvement ou de relevage (selon le réseau)
SURFEX	Schéma de SURFace EXTernalisé (Météo-France)
SWI	Soil Wetness Index
SWMM	Storm Water Management Model
TEB	Schéma des surfaces urbaines de la plateforme SURFEX (Town Energy Balance)
TOHR	Outil de reconstruction des réseaux hydrographiques urbains (TOol for urban Hydrographic network Reconstruction)
TOPMODEL	Modèle hydrologique basé sur les données topographiques
URBiNAT	Projet de recherche financé par l'Europe (H2020) (2018-2023) visant à étudier les solutions fondées sur la nature
USR	Unité spatiale de référence (PÉTIT et al., p. d.)
UTC	Université Technologique de Compiègne
VegDUD	Projet de recherche financé par l'ANR (2013-2015) visant à étudier le rôle du Végétal dans le Développement Urbain Durable

Introduction

Parcours de recherche

Premières expériences

Mes premiers pas dans un laboratoire de recherche ont eu lieu l'été qui a suivi mon année de licence (aujourd'hui L3) PAMOA (physique appliquée mention océan et atmosphère) en 1997. C'était un travail d'un mois, au Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (L.P.C.E., aujourd'hui LPC2E) du CNRS, avec Michel Pirre. Ce stage m'a permis de découvrir l'environnement Unix et consistait à mettre à jour des bases de données sur des éléments chimiques. Cette première et courte expérience m'a donné envie de faire une nouvelle expérience de recherche, après ma maîtrise (aujourd'hui Master I) PAMOA, au sein du Laboratoire d'Aérodynamique, à l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), en 1998, avec Evelyne Richard. Ce stage à nouveau d'un mois a consisté à créer un site web pour un projet de recherche. Ces deux expériences, en marge de travaux de recherche proprement dits, m'ont permis de découvrir le monde académique et m'ont convaincue de faire un DEA (aujourd'hui Master II), pour orienter ma carrière vers la recherche. J'ai alors intégré le DEA Océan, Atmosphère, Biosphère de l'Université Paul Sabatier Toulouse III. J'ai effectué un stage de cinq mois, à nouveau au Laboratoire d'Aérodynamique de l'OMP, avec Jean-Pierre Pinty. L'objectif était de développer une paramétrisation microphysique froide pour le modèle Meso-NH, basée sur différents schémas de microphysique froide existants. Avec ce stage, j'ai découvert ce qu'était de développer sur plusieurs mois un petit projet de recherche, décomposé en plusieurs étapes : bibliographie, développement, évaluation des développements, rédaction d'un rapport et présentation. J'y ai pris un réel plaisir et j'ai souhaité poursuivre en doctorat.

Doctorat en physique de l'atmosphère

Cette possibilité m'a été offerte avec une bourse Météo-France, associée au sujet "Étude numérique des orages supercellulaires en France", sous la direction de Jean-Philippe Lafore et avec l'encadrement de Véronique Ducrocq, dans l'équipe Prévision Immédiate (PI) au sein du Groupe Météorologie de Meso-Echelle (GMME) du Centre National de Recherche en Météorologie (CNRM) à Toulouse. Ce travail de thèse a consisté à développer divers diagnostics propres à caractériser et mieux définir les supercellules, qui sont des orages violents souvent accompagnés de très fortes rafales de vent et de grêle ou de pluie intense et qui parfois peuvent engendrer des tornades. Ces orages sont très étudiés et bien connus aux Etats-Unis (en particulier dans la région des grandes plaines) mais beaucoup moins en France, alors qu'ils ne sont pas si rares. Il s'agissait donc d'étudier spécifiquement deux

cas observés en France, celui du 21 avril 1999, dans les Pyrénées Orientales et celui du 30 mai 1999, à Paris. Le premier a eu des conséquences économiques importantes dans le milieu agricole, en particulier sur le vignoble et les vergers du nord du département. Le deuxième a été responsable de trois décès ainsi que de plusieurs blessés. Dans les deux cas, les prévisions de Météo-France n'avaient pas mis en évidence un tel danger.

Ce travail de thèse s'appuyait à nouveau sur le modèle numérique Meso-NH. Cependant cette fois, les schémas de convection et les processus dynamiques étaient au coeur du sujet. Les modèles de prévision de l'époque n'étaient pas en mesure de simuler de tels phénomènes, en lien avec une résolution spatiale trop grossière, et un manque d'outils et d'indicateurs permettant de caractériser des conditions météorologiques propices au développement de tels phénomènes. Ces travaux ont alors permis d'étudier ces phénomènes observés en France, de les comparer à leurs homologues nord américains, d'appréhender la capacité de la future génération de modèles de prévision (de meso-échelle) à les simuler et de développer des outils d'aide à la prévision basés sur les conditions météorologiques propices à leur naissance.

En plus de l'intérêt du sujet novateur pour la France, ce travail m'a permis de développer encore mon goût pour la modélisation et le codage. J'ai de plus décidé, à l'issue de cette thèse, d'entamer une carrière en recherche et donc de faire un post-doctorat. La question de poursuivre à l'étranger s'est bien sûr posée. Sur les recommandations de Philippe Bougeault, directeur de GMME, j'ai fait le choix de dévier un peu de la physique de l'atmosphère, pour m'ouvrir à l'hydrologie. Après discussion avec mes encadrant.es et suite à une opportunité, mon choix s'est porté sur un post-doctorat au LTHE, à Grenoble, avec Sandrine Anquetin et Georges-Marie Saulnier.

Expériences post-doctorales : vers l'hydrologie rurale

De mars 2003 à janvier 2007, j'ai effectué plusieurs contrats post-doctoraux. Le premier, au LTHE, à l'Université Joseph Fourier Grenoble I, a eu lieu dans le cadre d'un projet européen INTERREG IIIB Medoc. Il s'intéressait aux crues-éclair du sud-est de la France, à leur prévision plus particulièrement. L'objectif du contrat était de voir dans quelle mesure les précipitations simulées à meso-échelle pouvaient alimenter un modèle hydrologique pluie-débit, pour prévoir à courte échéance quantitativement et temporellement les pics de crue des quatre rivières touchées par l'évènement du 8-9 septembre 2002. Les pluies étaient simulées, par le modèle Meso-NH, à partir de différentes approches d'initialisation, développées dans l'équipe PI du GMME à Météo-France. Ces approches d'initialisation s'appuyaient sur des réflectivités radar, des températures de brillance infrarouge et des observations de surface, ou à partir de conditions initiales fournies par une analyse de grande échelle opérationnelle. De plus, un jeu de précipitations obtenu par krigeage des données enregistrées par le réseau de pluviomètres de Météo-France a aussi été produit. Ces différents jeux de précipitations ont alimenté le modèle pluie-débit TOPODYN, modèle développé au LTHE à partir du modèle TOPMODEL. Les débits ainsi simulés ont été comparés entre eux, mais n'ont malheureusement pu être comparés à des débits observés, qui nécessitaient d'être reconstruits suite à l'intensité de l'évènement. Cependant l'analyse des débits simulés a mis en évidence l'intérêt d'intégrer des informations de meso-échelle à l'initialisation des simulations des précipitations.

En parallèle, dans le cadre d'un autre contrat, cette fois national, du PATOM-PNRH

(CNRS), j'avais en charge le développement d'un couplage hydro-climatique entre les modèles météorologique Meso-NH et hydrologique TOPODYN. Ce travail a été poursuivi puis finalisé dans le cadre de deux contrats post-doctoraux supplémentaires national (PATOM-PNRH) et européen (6ème PCRD), cette fois à Toulouse, à nouveau dans l'équipe MICADO (anciennement PI) du GMME de Météo-France, de 2004 à 2006. Le couplage a pris la forme du développement d'une paramétrisation hydrologique, inspirée de TOPODYN, au sein du SVAT ISBA, déjà lui-même couplé à Meso-NH, afin d'introduire les écoulements latéraux de l'eau dans le sol et en surface. L'outil (ISBA-TOPMODEL) était ainsi capable de simuler des chroniques de débits en un nombre fini d'exutoires à l'échelle régionale.

Ces différents travaux m'ont ainsi permis d'élargir mes domaines de compétence en modélisation hydrologique (pluie-débit) et en transfert d'eau dans les sols, ainsi qu'en traitement et validation de données observées.

Poste statutaire en hydrologie urbaine

Soutenue et conseillée par mes divers responsables au LTHE et au CNRM, j'ai réussi en 2006, le concours de chargée de recherche de l'équipement (aujourd'hui CR du Développement Durable), au sein de la Direction Eau et Environnement (DEE) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Nantes. J'ai pris mon poste en janvier 2007, avec pour objectif de travailler en hydrologie urbaine. Ceci a donc mis un terme à mes travaux sur le couplage hydro-climatique (évaluation des développements) et m'a demandé de me former à nouveau à une nouvelle discipline, proche en termes de processus de l'hydrologie de bassins versants, mais assez éloignée en termes d'approches, d'outils et de méthodes. Les compétences acquises au cours de mes expériences passées en météorologie et hydrologie en milieu naturel, couplées aux compétences en hydrologie urbaine et en hydraulique présentes au sein de mon nouveau laboratoire, m'ont permis de développer mon projet de recherche, qui s'est précisé au cours de ces seize dernières années, en collaboration étroite avec Hervé Andrieu (directeur de la DEE puis de l'IRSTV). Ce projet vise aujourd'hui à produire et à évaluer des stratégies d'adaptation aux changements, qu'ils soient d'ordre climatiques ou en lien avec l'urbanisation croissante. L'évaluation se veut autant que possible intégrée : à la croisée d'au moins deux champs disciplinaires. Mes compétences m'ont bien sûr amenée à croiser les enjeux hydrologiques et microclimatiques. La modélisation est l'outil phare d'un tel projet, même si la question des observations est très présente.

Mon laboratoire d'accueil était, entre autres, novateur dans la modélisation du cycle complet de l'eau en milieu urbain, en ajoutant les interactions avec le sol, aux écoulements en surface et dans les réseaux d'assainissement. Il avait ainsi développé un modèle hydrologique urbain (URBS) à l'échelle du bassin versant urbain, encore peu courant dans la communauté. Mon recrutement avait pour objectif de poursuivre la modélisation hydrologique en milieu urbain mais à plus grande échelle.

L'outil en question devait donc être capable de fonctionner à l'échelle d'une agglomération, s'étendant sur plusieurs bassins versants, de différentes tailles. Le modèle devait alors représenter diverses occupations du sol, rurales et urbaines. De plus, l'objectif à long terme était de poser les premières pierres d'un outil pluridisciplinaire qui soit capable de croiser les différents regards qu'il est possible d'avoir sur l'objet ville. L'outil ne devait donc pas se limiter à la résolution d'un bilan hydrique. Puisque les bilans hydrique et énergétique sont très liés via le processus d'évapotranspiration (ou flux de chaleur latente)

nous avons alors choisi de travailler avec un outil qui résolve aussi le bilan énergétique, avec le même niveau de détails que le bilan hydrique.

Après l'étude de plusieurs modèles, le choix s'est porté sur la plateforme SURFEX (développée par Météo-France). Cet outil est destiné aux surfaces urbaines, et peut être appliqué à l'échelle des agglomérations. La représentation de la ville et les processus étaient donc adaptés à nos objectifs. SURFEX intègre également différents schémas de surface adaptés aux surfaces naturelles ou d'eau. Par ailleurs, déjà couplé aux modèles météorologiques opérationnels ou de recherche de Météo-France, il offrait de nombreuses possibilités d'évolutions tout en étant maintenu avec une équipe dédiée. Enfin, j'avais déjà acquis une certaine expérience avec cet outil durant mes travaux antérieurs. Le modèle de surface SURFEX semblait ainsi regrouper le plus de conditions. Dans le but d'étudier la ville de façon plus intégrée, en regardant les différents enjeux qui la traversent, cet outil constituait donc une première brique, en croisant les questions de gestion des eaux pluviales et de confort thermique.

Compte-tenu de mon expérience sur les schémas de sol, acquise durant mes contrats post-doctoraux, j'ai commencé mes travaux par le développement d'un modèle dédié aux bassins versants péri-urbains. Ces bassins alors encore peu connus des milieux de l'hydrologie urbaine ou "naturelle", combinent les différentes caractéristiques et fonctionnements de chaque milieu. En effet, en milieux urbain et naturel, la hiérarchie des termes du cycle de l'eau est différente. De plus, les bassins versants périurbains sont constitués de différents réseaux : naturels et artificiels, qui sont connectés via le réseau d'eau pluviale, mais aussi via les déversoirs d'orage. Les bassins versants périurbains sont donc des objets hydrologiques intégrateurs en termes d'occupation des sols, de processus hydrologiques. Ils se situent à l'interface de deux communautés d'hydrologie urbaine et "naturelle" ce qui en fait des objets d'étude intéressants. Le modèle ISBA-TOPMODEL a ainsi été modifié pour prendre en compte les zones urbaines, en particulier sur le calcul du bilan en eau. Ce travail a été réalisé dans le cadre de deux projets nationaux (ANR AVuPUR, EC2CO BVPU).

Les travaux ont ensuite été poursuivis avec les surfaces urbaines, dans le cadre du projet DGITM Ville numérique, qui visait à développer, à long terme, un outil dédié aux différents enjeux de la ville, par le biais du schéma TEB. Le bilan en eau a été enrichi pour atteindre le même niveau de détail que les bilans énergétique et radiatif du modèle (ANR VegDUD, deux thèses financées par l'Ifsttar). Ainsi, aujourd'hui, un outil de simulation de bilan énergétique et hydrique à l'échelle d'une agglomération est disponible pour représenter les écoulements de l'eau en surface, dans le sol et en réseaux (artificiels ou naturels). Il permet donc aussi de caractériser l'impact hydro-climatique du changement climatique (projet DUT Greenstorm) ou de l'évolution urbaine. Enfin, il permet d'évaluer diverses solutions ou stratégies d'adaptation du point de vue hydrologique (H2020 N4C) mais aussi énergétique (H2020 URBiNAT, thèse cofinancée par l'Université Gustave Eiffel et Météo-France, programme OPUR5). Dans le cadre d'une collaboration avec l'ENPC (OPUR5, WiseCities (I-SITE FUTURE)), de nouvelles paramétrisations ont été développées et sont en cours d'évaluation pour représenter ces diverses solutions d'adaptation, combinées entre elles (thèse financée par l'université Gustave Eiffel, projet ANR Permeopolis).

Ce type d'outil offre la possibilité de mieux comprendre l'impact de l'occupation du sol et en particulier de la végétation sur le confort thermique et la gestion des eaux

pluviales, par des modifications des données d'entrée. Mais cet usage m'a très vite conduit à questionner notre capacité à construire des scénarios réalistes, ayant du sens pour les gestionnaires et décideurs et capables de leur fournir des informations utiles et concrètes. En lien avec des échanges fréquents depuis plusieurs années avec les personnes en charge du volet adaptation du plan Climat de Nantes Métropole, j'ai souhaité croiser cette approche avec l'urbanisme réglementaire. En effet, les décideurs basent leur stratégie d'évolution de l'espace urbain sur divers documents réglementaires (PLUi, Plan Climat ...). L'objectif de travail peut donc être double : i) construire des scénarios d'adaptation réalistes, contraints ou non par les documents réglementaires, ii) évaluer les politiques publiques vis-à-vis de leurs objectifs de développement durable (concernant la gestion de l'eau pluviale et le confort thermique des citoyens). Cette partie de mon projet de recherche a démarré dans le cadre d'une collaboration avec Nathalie Molines de l'Université Technologique de Compiègne et Bernard de Gouvello du Cerema (Projet MAnIpUr, thèse financée par l'UTC).

Mes travaux passés et en cours mettent en évidence une façon originale et intégratrice d'aborder les sujets étudiés. Tout d'abord avec l'hydrologie, quel que soit le milieu, qui est abordée de façon continue et non événementielle et à plus grande échelle que ce qui était habituellement fait jusqu'ici. Ensuite en milieu urbain, grâce à des outils adaptés mais aussi grâce à l'ONEVU, le premier observatoire en milieu urbain qui a cherché à regrouper diverses disciplines en un même territoire. Je ne me suis pas contentée d'étudier les débits en rivière ou en réseau, mais aussi les flux énergétiques (chaleur latente et sensible) ainsi que l'humidité des sols. Enfin, en milieu périurbain et urbain, j'ai cherché à connecter les réseaux hydrographiques artificiels et naturels, en développant un outil de reconstruction d'un réseau hydrographique complet (TOHR) et en prenant en compte des ouvrages comme les déversoirs d'orage.

Le manuscrit

Mes travaux d'aujourd'hui sont le fruit de mes expériences passées. Des expériences variées, principalement inscrites dans le domaine des Sciences de l'Univers ou des Sciences Pour l'Ingénieur, mais appartenant à diverses communautés dont le vocabulaire, les approches et les outils peuvent être très différents.

Après une courte partie présentant mon activité en termes d'enseignement, une deuxième partie, divisée en quatre chapitres, vise à faire la synthèse de mes travaux de recherche depuis l'obtention de mon doctorat. Un dernier chapitre présente mon projet de recherche.

Ainsi, le premier chapitre relate les travaux en hydrologie du milieu rural au milieu périurbain, depuis la prévision des crues-éclair à partir de pluies simulées jusqu'à la compréhension du fonctionnement des bassins versants périurbains.

Le deuxième chapitre présente les travaux qui ont permis le développement d'un modèle hydroclimatique dédié à la ville où hydrologie et microclimat s'entrecroisent.

Le troisième chapitre est dédié aux études sur les données d'entrée nécessaires au modèle, leur construction et les besoins de précision. Les données d'occupation du sol, la texture de sol ou les réseaux d'assainissement y sont traités.

Le quatrième chapitre s'intéresse aux stratégies d'adaptation des villes aux changements globaux via les solutions d'adaptation à notre disposition ; les méthodes de construc-

tion de scénarios, pour comprendre le fonctionnement de ces solutions ; de stratégies, plus en lien avec les contraintes et les objectifs politiques locaux ; les projections climatiques.

Enfin le dernier chapitre présente le **projet de recherche** que je suis en train de développer et qui devrait orienter mes travaux des prochaines années.

Première partie

Activités d'enseignements et de formation

Activités d'enseignements et de formation

1 Enseignements

Depuis mon doctorat j'ai souhaité effectuer régulièrement des heures d'enseignement, afin de garder le contact avec les étudiants, sans empiéter trop sur mes activités de recherche.

Université de Grenoble

Durant mon contrat post-docotoral à l'université de Grenoble, j'ai eu l'opportunité de donner un cours en météorologie, dans le cadre de la formation permanente. Il s'agissait de décrire les bases de la météorologie, en reprenant quelques faits historiques, les principaux concepts utilisés et les outils pour la prévision météorologique, la formation des nuages et les différents types de nuages existants.

- 2003 Météorologie, Formation permanente. 6h eqTD

Université de Nantes

À mon arrivée au LCPC, à Nantes, Hervé Andrieu m'a rapidement fait bénéficier de quelques uns des cours qu'il assurait. J'ai aussi remplacé durant une année scolaire, mon collègue Fabrice Rodriguez (IDTPE, HDR). Les cours traitaient principalement d'hydrologie rurale en rappelant les bases du cycle de l'eau et en décrivant les différents processus impliqués, ainsi que de la notion de bilan hydrique. Et lorsque le nombre d'heures le permettait, les moyens de mesure étaient aussi abordés ainsi que les méthodes d'analyse des données. Pour certains cours, l'hydrologie urbaine a aussi pu être traitée.

- 2008 Hydrologie, licence professionnelle de protection de l'environnement – option géologie de l'aménagement. 12h eqTD
- 2012 Hydrologie, Master II cartographie et risques, 15h eqTD

J'ai par ailleurs fait une intervention de 3h (4.5 heqTD) auprès des étudiants de Master I et II Analyse économique de Projets Environnement Mer Energie (APEME) de l'école universitaire d'économie & de Management. L'objectif de l'intervention était de donner le vocabulaire et des notions en lien avec le cycle de l'eau naturel et urbain, le bassin versant et son fonctionnement, les réseaux d'assainissement.

École Centrale de Nantes

- 2009-2018 Hydrologie de bassin versant, Master II Environnement urbain. 12h eqTD
- Depuis 2018 Catchment hydrology, Master I Urban Environment. 12h eqTD
- Depuis 2015 Hydrologie de bassin versant et urbaine, Filière Ingénieur Option Phy-Cité : 22h eqTD

Enfin, suite à la création de l'université Gustave Eiffel, l'EAVT m'a contactée pour assurer une intervention traitant de l'adaptation au changement climatique. J'ai souhaité traiter les deux sujets à la fois - *confort thermique* et *gestion des eaux pluviales* - en lien avec les solutions d'adaptation fondées sur la nature qui peuvent impacter ces deux problématiques.

École d'Architecture de la Ville et des Territoires Paris-Est

- 2021 Confort thermique et gestion des eaux pluviales en milieu urbain, dans un contexte de changement climatique, DSA architecte-urbaniste, 4h, visio, 6h eqTD

2 Opération Passeport Recherche

En 2022, le laboratoire Eau & Environnement a été contacté par Nantes Université afin de répondre à un professeur de technologie, Emmanuel Segalen, qui souhaitait participer au passeport recherche autour du sujet de l'eau et de la ville durable. Je me suis proposée pour participer à ce projet. Mes collègues Alexandra Mosset et Laetitia Pineau, ainsi que le doctorant que j'encadre, Florian Betou, ont aussi participé. Cela a permis de faire découvrir aux élèves de 1ère STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable) du Lycée La Collinière à Nantes, les différents métiers de la recherche en présentant nos parcours mais aussi en leur faisant sentir un aspect de nos métiers, en lien avec l'observation des variables liées à la gestion des eaux pluviales en ville.

- Présentation des métiers de la recherche avec intervention dans leur classe, 2h
- Visite des sites expérimentaux de l'ONEVU dans les quartiers du Pin Sec et de Bottière-Chenaie, 2h

3 Formation continue

Alban Mallet, en charge du volet adaptation du plan climat de la Métropole de Nantes m'a demandé d'intervenir à deux reprises auprès :

- des agents des services de l'urbanisme sur la notion d'îlot de chaleur urbain : causes et conséquences, dans le cadre d'une journée de formation sur les enjeux de confort thermique, avec d'autres chercheuses de l'IRSTV.

- de l'agence en charge de la maîtrise d'œuvre de l'aménagement du quartier Bas-Chantenay à Nantes : Alban Mallet a parlé de changement climatique, d'atténuation et d'adaptation et a présenté le Plan Climat de la métropole. Puis je suis intervenue sur les solutions fondées sur la nature et leurs bénéfices sur la gestion de l'eau et le confort thermique.

Deuxième partie

Activités de recherche

Chapitre I

Modélisation hydrologique en milieu périurbain : à l'interface hydrologie rurale et hydrologie urbaine

Avant de pouvoir simuler les échanges et écoulements d'eau à l'échelle métropolitaine, qui nécessite d'introduire les processus hydriques urbains et le couplage des processus hydriques des milieux urbain et rural, la modélisation des bassins périurbains constitue une première étape. Le modèle ISBA-TOPMODEL a donc été choisi pour être i) enrichi des processus hydriques urbains prépondérants, ii) appliqué à l'échelle d'un bassin périurbain, iii) appliqué à des séries chronologiques de plusieurs années.

La première partie de ce chapitre traite des crues-éclair et reprend les développements autour du modèle ISBA-TOPMODEL pour la prévision des crues-éclair. La deuxième partie permet de comprendre le fonctionnement particulier d'un bassin versant périurbain (la Chézine), présente les développements du modèle ISBA-TOPMODEL pour le milieu périurbain ainsi que son évaluation, appliqué à deux bassins versants périurbains.

1 Poser les bases d'un modèle hydrologique pour les crues-éclair

Au début des années 2000, Météo-France a eu la responsabilité d'un service de prévision des crues (SPC) du SCHAPI, situé dans le sud-est de la France. Météo-France avait une expertise sur la compréhension des systèmes convectifs précipitants à l'origine des crues-éclair. En revanche, même si des compétences en hydro-agronomie et en hydrologie des grands aquifères existaient au CNRM, il n'y en avait pas sur l'hydrologie de surface de grands bassins versants. Mais des collaborations existaient avec le LTHE, dans le cadre de l'OHM-CV, depuis plusieurs années.

Météo-France cherchait donc à se munir d'une chaîne de prévision des crues-éclair dans le sud-est de la France. Au travers de différents projets où le LTHE et le CNRM collaboraient, j'ai donc contribué à cet objectif. Utiliser des pluies prévues pour la prévision des crues-éclair est nécessaire car cela permet d'augmenter les délais d'alerte, très courts pour ce type d'évènement hydrologique. En complément, le développement d'un outil de modélisation hydrologique des crues-éclair a été initié.

1.1 Modéliser des débits à partir de précipitations simulées

Les conséquences des crues-éclair, qui touchent le pourtour méditerranéen, ont un coût financier et parfois humain important pour la société. Comme leur nom l'indique, le délai entre la pluie et la montée des eaux peut être très court, limitant les possibilités d'évacuation et de mise en sécurité de la population. C'est pourquoi la prévision de ces crues, le plus tôt possible, est un objectif des SPC. Ainsi, le projet de recherche HYDROPTIMET a, entre autres, étudié la prévision des crues à partir de pluies prévues, dans la région des Cévennes (figure I.1), pour l'évènement du 8-9 septembre 2002 (Chancibault, ANQUETIN et al., 2006). Ce sont les résultats de ces travaux qui sont résumés ensuite.

Le modèle hydrologique utilisé est le modèle semi-distribué TOPMODEL (version TOPSIMPL, SAULNIER et al., 1997), modèle événementiel où le sol est considéré homogène. Ce modèle s'applique à l'échelle d'un bassin versant. J'ai étudié quatre bassins versants ainsi que cinq de leurs sous-bassins versants (figure I.1), dont les surfaces étaient comprises entre 200 et 2300 km^2 .

Après un calage et une évaluation du modèle sur seulement deux des bassins versants étudiés, par manque de données débitmétriques suffisantes, deux combinaisons de paramètres (*min* et *max*) ont été identifiées pour simuler une enveloppe *min* et *max* du débit, sur les bassins versants non calés.

Quant aux pluies simulées, à l'aide du modèle météorologique non-hydrostatique de meso-échelle MESO-NH, plusieurs configurations ont été étudiées. Le modèle météorologique :

- a les mêmes conditions initiales et aux limites que le modèle de prévision ARPEGE (ARP12) ;
- a des conditions initiales améliorées à l'aide de l'analyse des données de surface (AMA12) ;
- a des conditions initiales améliorées à l'aide de l'analyse des données de surface, des données radar et satellite (RAD12).

Le modèle hydrologique, forcé avec ces différents jeux de pluies simulées au pas de temps horaire, simule des débits, comparés ensuite à des débits de référence. Ces données de références ont été simulées à partir de champs pluvieux, obtenus par krigeage des mesures pluviométriques (YATES et al., 2006).

La mauvaise localisation du système convectif simulé par MESO-NH, quelle que soit la méthode d'initialisation du modèle, entraîne une large sous-estimation des pluies (figure I.2) et donc des pics de débits (figure I.3) pour les bassins versants les plus au sud et une surestimation pour les bassins au nord (St Martin d'Ardèche et Vogüé, non montré). Enrichir l'initialisation du modèle météorologique (à partir de données observées à meso-échelle) (AMA12 ou RAD12) permet de mieux localiser le système convectif mais seulement lors de sa première phase de vie. Les lames d'eau simulées sont augmentées mais encore sous-estimées, n'améliorant que légèrement les débits simulés. Ces procédures semblent aussi impacter positivement la dynamique temporelle de l'évènement hydrologique, avec un pic de débit simulé qui se rapproche dans le temps de celui observé ou du débit de référence.

Cette étude a donc montré les limites et les avantages de pluies simulées à meso-échelle quand les système de prévision étaient encore à une échelle supérieure. Même si les modèles à haute résolution (2.5km) améliorent la simulation de ce type d'évènements, les lames simulées restent sous-estimées, comparées aux mêmes lames d'eau observées. Cependant,

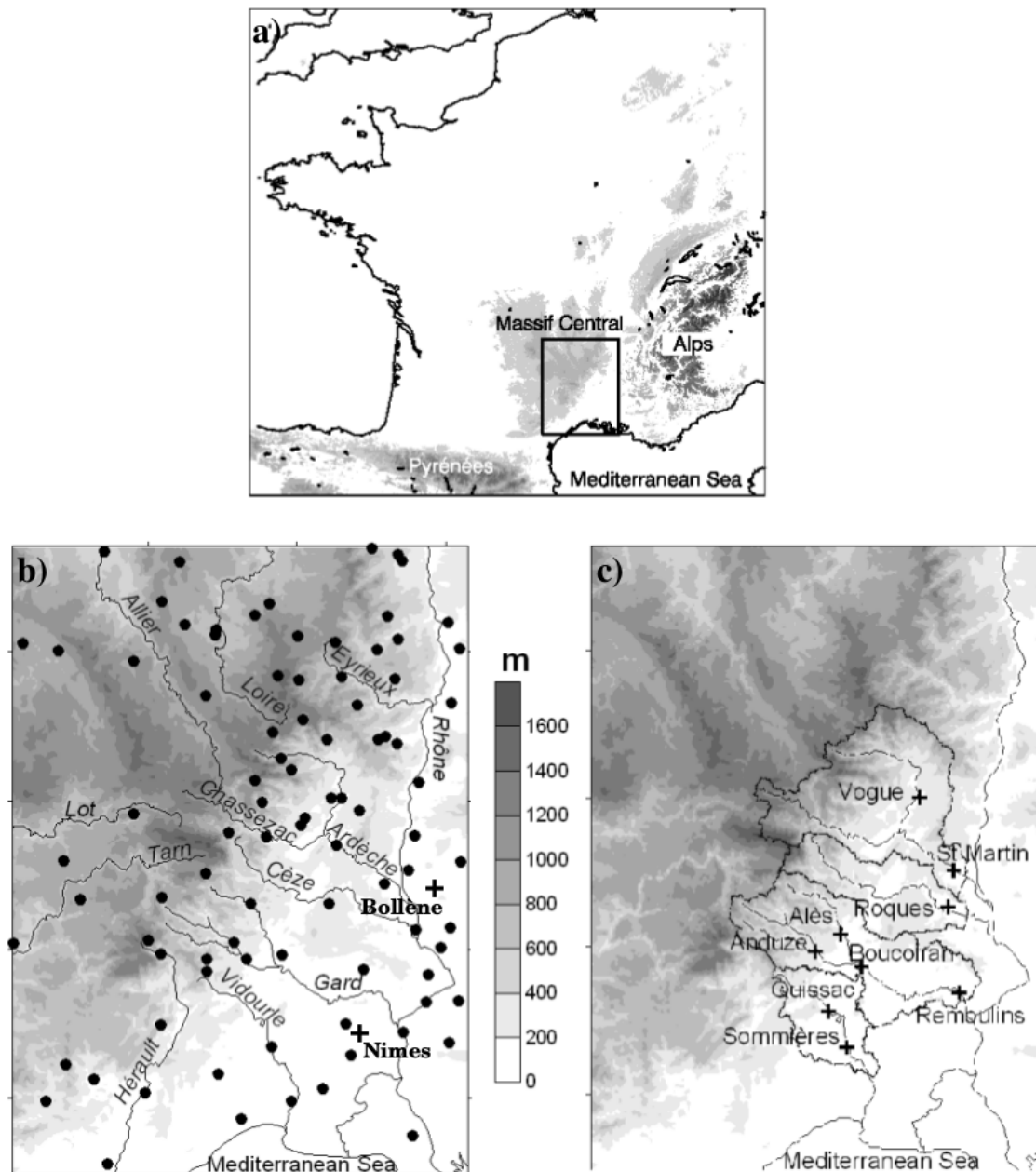


FIGURE I.1

(a) Carte de France métropolitaine, avec l'orographie (échelle de gris commune aux trois figures). Le rectangle délimite le domaine des figures (b) et (c). (b) Pluviomètres (ronds) et radars (croix) utilisés. (c) Les exutoires étudiés et la délimitation des bassins associés (croix). (Chancibault, ANQUETIN et al., 2006).

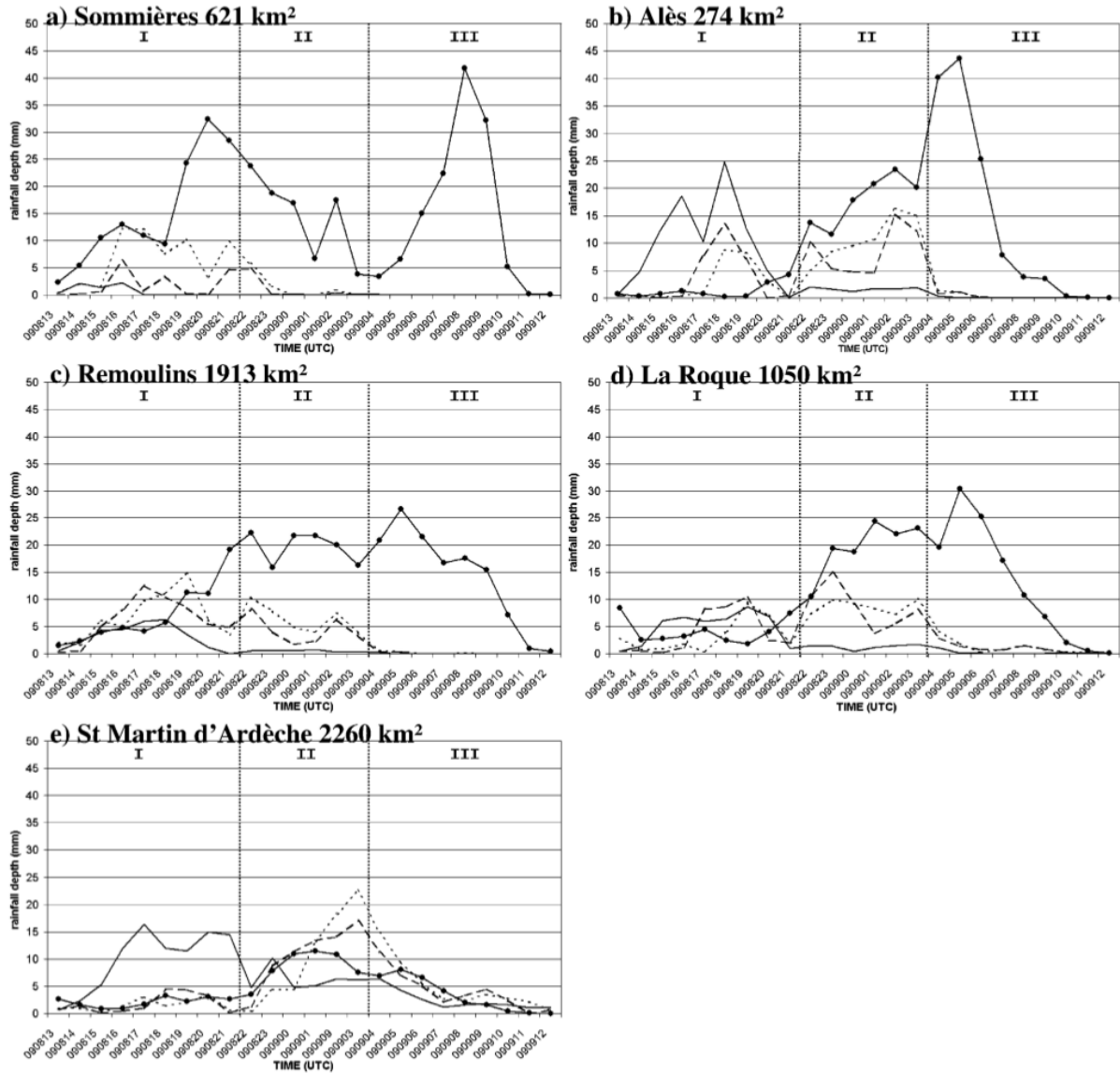


FIGURE I.2

Lames d'eau moyennées par bassin versant à partir des pluies observées krigées (trait plein avec ronds), et simulées ARP12 (trait plein), RAD12 (trait pointillé) and AMA12 (trait tireté) pour les bassins de (a) Sommières, (b) Alès, (c) Remoulins, (d) La Roque et (e) St Martin d'Ardèche du 8 Septembre 12 UTC au 9 Septembre 2002 12 UTC. Les trois phases du système convectif sont indiquées (I, II et III). (Chancibault, ANQUETIN et al., 2006).

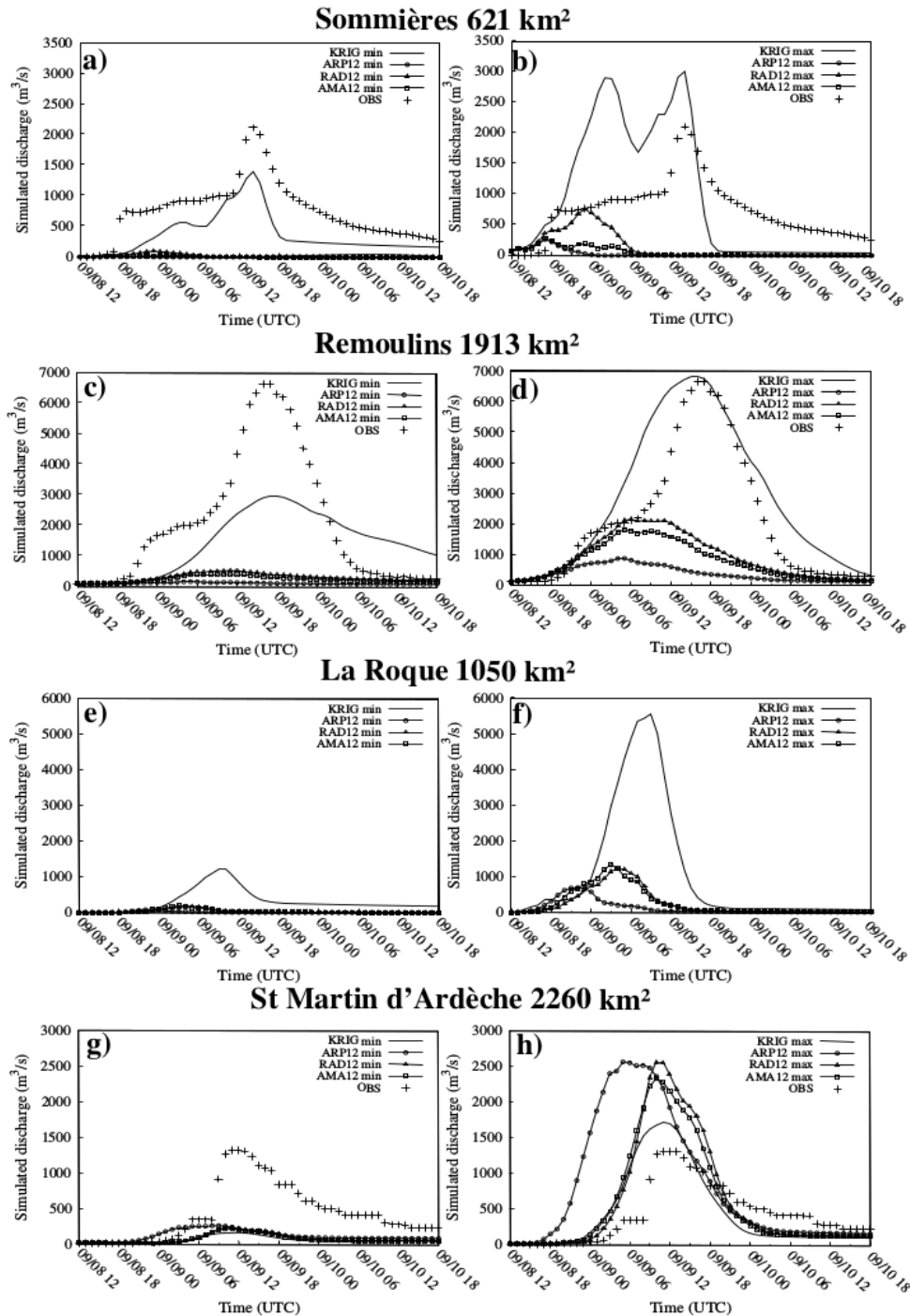


FIGURE I.3

Débits simulés avec la combinaison de calage *min* (gauche) et *max* (droite) à partir des pluies simulées ARP12 (symbole rond), RAD12 (symbole triangle) et AMA12 (symbole carré) et des pluies observées krigées (pas de symbole) pour les bassins de (a) et (b) Sommières, (c) et (d) Remoulins, (e) et (f) La Roque et (g) et (h) St Martin d'Ardèche, du 8 Septembre 12 UTC au 9 Septembre 2002 12 UTC. Les débits observés sont indiqués avec les croix. (Chancibault, ANQUETIN et al., 2006).

j'ai montré qu'un tel système de prévision des crues, basé sur des pluies simulées à méso-échelle, offrirait des informations utiles aux prévisionnistes, comme l'évolution temporelle du pic de débit. Cependant, la faible capacité du système à prévoir l'intensité du pic de débit, en lien avec la faible prédictibilité de ce type de systèmes convectifs, associé à la petite taille des bassins touchés par les crues-éclair, tend à montrer que ce système de prévision à méso-échelle pourrait être amélioré en le combinant à des approches statistiques, comme les prévisions d'ensemble. Cela permettrait, notamment, de prendre en compte les incertitudes inhérentes à cette approche.

1.2 Couplage d'un schéma de sol avec un modèle hydrologique

DUCROCQ et al. (2000) ont mis en évidence l'importance, pour certains systèmes convectifs précipitants, responsables des crues-éclair, d'une représentation précise de l'humidité des basses couches de l'atmosphère. Les modèles météorologiques étaient déjà couplés avec des schémas de sol, mais ces schémas, alors, n'avaient pas une représentation réaliste des sols saturés. Le schéma ISBA, schéma des sols naturels de la plateforme SURFEX de Météo-France a, en effet, tendance à minimiser l'humidité des sols en période humide et leur sécheresse en période sèche (GIANGOLA-MURZYN, 2010). Ainsi, ce couplage entre un modèle hydrologique et un schéma de sol avait pour but de bénéficier à la fois :

- au modèle hydrologique, en lui apportant une représentation des transferts d'eau dans le sol, ainsi qu'entre le sol et l'atmosphère, en lien avec l'impact de la végétation plus réaliste,
- au schéma de sol, en lui offrant une représentation plus réaliste de la distribution spatiale de l'humidité du sol par une approche sous-maille,
- au modèle météorologique, via le schéma de sol, en améliorant la prise en compte des situations de plus forte humidité des sols, sur l'humidité des basses couches.

De plus, Chancibault, ANQUETIN et al. (2006) ont montré que l'initialisation n'impacte que les premières heures de simulation. Un couplage complet permettrait donc de maintenir sur toute la période de simulation les bénéfices d'une humidité des basses couches plus réaliste.

J'ai donc développé le système couplé ISBA-TOPMODEL (figure I.4), dédié à la prévision des crues-éclair du pourtour méditerranéen (Chancibault, HABETS et al., 2006 ; BOUILLOUD et al., 2010 ; VINCENDON et al., 2010). Pour permettre ce couplage, le modèle TOPMODEL a été recodé dans la plateforme SURFEX et est, depuis la version 8.1 de SURFEX, une option disponible et accessible à la communauté.

Outre les grilles de résolutions différentes qu'il a fallu faire coïncider, à l'heure où les SIG étaient encore peu ou pas développés, les résolutions temporelles différentes, en lien avec la différence de résolution spatiale ont dû aussi être gérées. La variable d'échange entre les deux modèles est l'humidité du sol, traduite sous forme de teneur en eau volumique dans ISBA et de déficit en eau dans TOPMODEL.

BOUILLOUD et al. (2010) ont évalué le modèle couplé ISBA-TOPMODEL sur trois bassins versants de la zone Cévennes-Vivarais, lors de six événements de crue observés entre 2000 et 2004, après un calage sur quatre événements de crues entre 2001 et 2005. Les premiers avantages de ce couplage sont la diminution par deux du nombre de paramètres à caler (2 paramètres seulement). Ce couplage permet aussi de simuler plusieurs événements

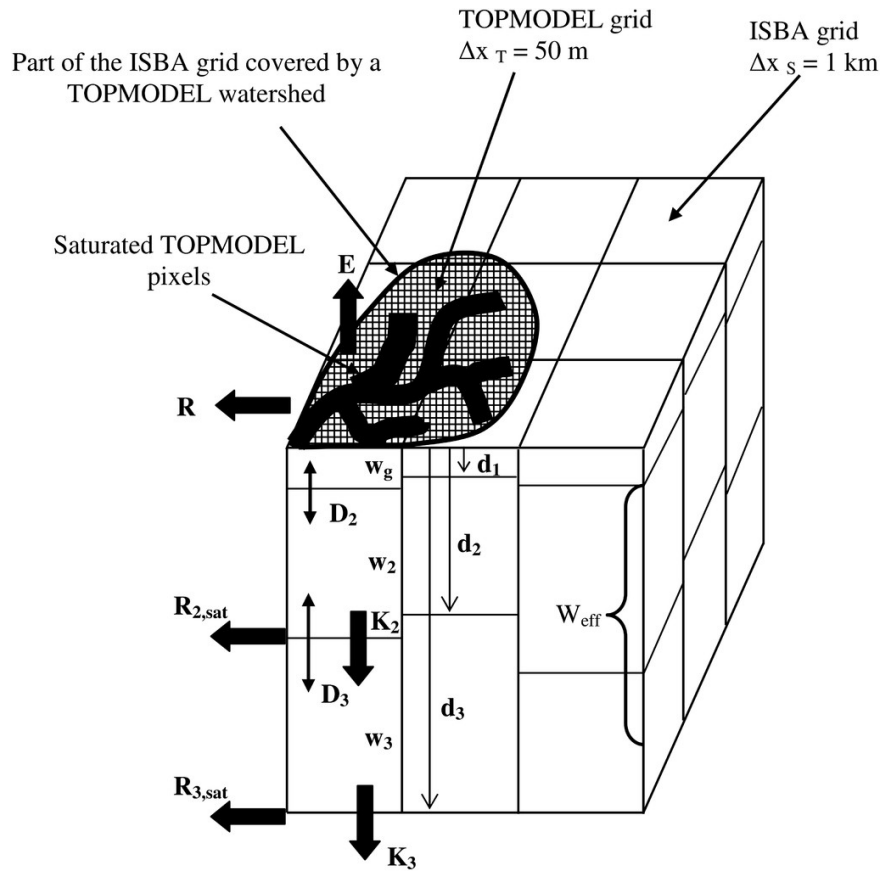


FIGURE I.4

Vue schématique du couplage entre ISBA et TOPMODEL. Les mailles horizontales de ISBA et TOPMODEL sont indiquées avec x_S et x_T , respectivement ; d_1 , d_2 , et d_3 sont les profondeurs de la couches de sol superficielle, de la zone racinaire et de la couche profonde ; D est pour la diffusion ; K le drainage gravitationnel ; w la teneur en eau volumétrique de chaque couche de sol ; R le ruissellement ; E l'évapotranspiration et W_{eff} pour la teneur en eau effective disponible pour les transferts latéraux (BOUILLOUD et al., 2010).

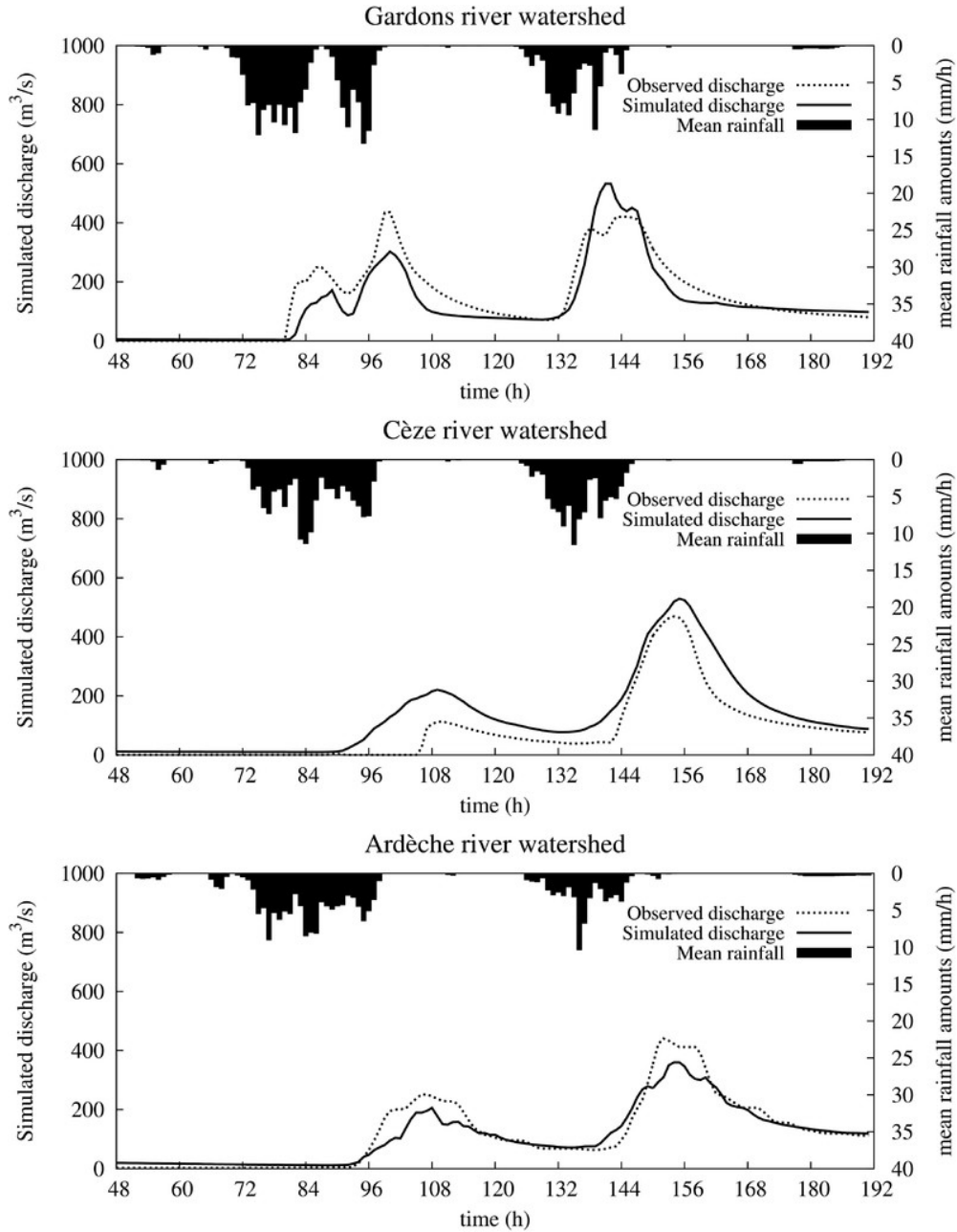


FIGURE I.5

Comparaison des débits observés (trait pointillé) et simulés (trait plein) de l'évènement de crue-éclair du 5 au 11 septembre 2005, sur les bassins versants du Gardon(haut), de la Cèze (milieu) et de l'Ardèche (bas) (BOUILLOUD et al., 2010).

de crue (trois en un mois), en continu et non plus seulement en mode évènementiel, sans avoir à faire de réinitialisation, en particulier concernant l'humidité du sol. Les résultats obtenus sont satisfaisants, sans génération de biais (figure I.5).

La comparaison de ISBA-TOPMODEL à ISBA seul et à TOPMODEL seul, pour six cas réels de crues dans la même région, avec des pluies radar observées en entrée des modèles, met en évidence les bénéfices du système couplé face à chaque modèle utilisé seul (VINCENDON et al., 2010). Comparativement à ISBA seul, les scores sont améliorés. L'amplitude et la temporalité de la crue sont similaires entre ISBA-TOPMODEL et TOPMODEL seul, mais la globalité de l'hydrogramme est meilleure avec le couplage.

2 Modéliser le cycle de l'eau en milieu périurbain

Le milieu urbain modifie le cycle de l'eau, par la multiplication de surfaces imperméabilisées, limitant l'infiltration de l'eau de pluie dans les sols ainsi que l'évapotranspiration et augmentant le ruissellement de surface. De plus, les sols urbains sont parcourus par de nombreuses tranchées, en plus des réseaux d'assainissement, multipliant et densifiant les chemins d'écoulement de l'eau, en surface et dans le proche sous-sol. Ceci conduit à des crues plus fréquentes et plus intenses et à des étiages plus longs et plus marqués (T. FLETCHER et al., 2013; JACOBSON, 2011). Les bassins versants périurbains regroupent des zones de type rural et des zones de type urbain. Par conséquent ils combinent des fonctionnements typiques urbains, avec une prépondérance du ruissellement de surface au dépend de l'infiltration et de l'évapotranspiration, et ruraux où l'évapotranspiration et l'infiltration sont majoritaires. Au début des années 2000, l'hydrologie urbaine et l'hydrologie de bassins versants étaient des disciplines distinctes. Ainsi les outils dédiés à l'urbain détaillent le transfert de l'eau en surface et en réseaux, mais simplifient les processus de transfert entre le sol et l'atmosphère (*i.e.* CANOE, URBS, SWMM). De plus ils fonctionnent généralement à l'échelle de bassins versants urbains qui sont de plus petite taille que les bassins versants naturels. À l'inverse les outils dédiés aux bassins versants naturels détaillent plus les échanges entre le sol et l'atmosphère, mais simplifient les transferts en surface et en rivière. Ainsi, les outils pour étudier ces bassins versants périurbains étaient peu développés au début des années 2000.

2.1 Analyse du fonctionnement d'un bassin péri-urbain : la Chézine

Le bassin versant de la Chézine est localisé en très grande partie dans la métropole nantaise (figure I.6). La zone a un relief peu marqué. L'urbanisation de ce bassin versant périurbain s'organise en deux zones distinctes. À l'aval, comme pour de nombreux bassins périurbains, on trouve une urbanisation dense, mais aussi un noyau plus en amont, moins dense, de type plus résidentiel et d'activité. Au centre se trouvent des prairies et des boisements, principalement le long du cours d'eau. Et tout à l'amont, les cultures et maraîchages sont prédominants. Le bassin a été instrumenté par Nantes Métropole en 2001, en pluviomètre et débitmètre, respectivement au niveau du quartier des Dervalières et du parc de Procé. L'ONEVU, en lien avec le projet AVuPUR (BRAUD et al., 2011), a instrumenté l'amont du bassin, plus rural, à partir de l'été 2008. Les données débitmétriques des deux exutoires pour l'année 2009 ont été analysées (FURUSHO, 2011), permettant de mettre en évidence un fonctionnement saisonnier du bassin de la Chézine (figure I.7) : en

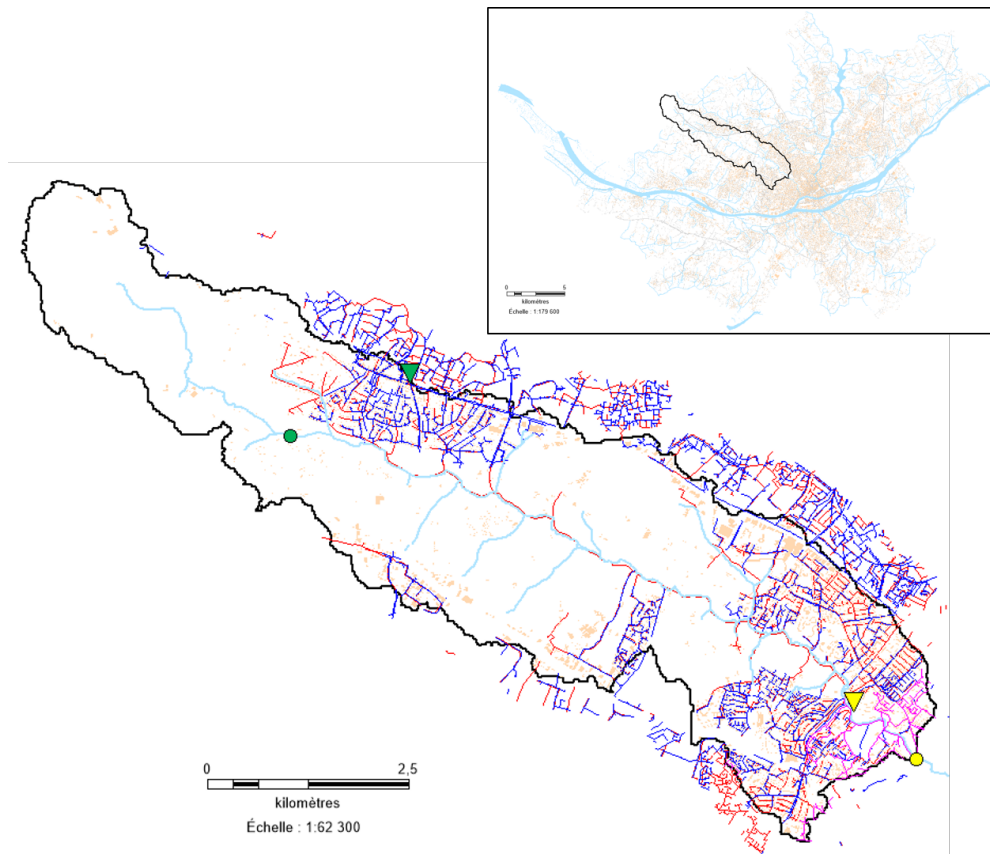


FIGURE I.6

Bassin versant de la Chézine avec le réseau d'assainissement d'eau pluviale (bleu foncé), d'eaux usées (rouge) et unitaire (fushia). Les capteurs gérés par Nantes Métropole au parc de Procé (jaune) et ceux de l'ONEVU à Sautron (vert) sont des pluviomètres (triangles inversés) et des débitmètres (ronds). Le bassin est localisé au sein de la métropole nantaise (encart) où la limite du bassin dont l'exutoire est au Parc de Procé est en noir, le bâti (BDTOPO) en orange, le réseau hydrographique (Nantes Métropole et BDTOPO) en bleu et la voirie (Nantes Métropole) en gris.

été (ou en période sèche) le bassin agit comme un bassin urbain où ce sont principalement les surfaces urbaines qui contribuent au débit à l'exutoire de Procé et en hiver (ou en période humide) la partie rurale contribue fortement au débit à Procé.

Mais le fonctionnement d'un bassin versant, quel qu'il soit, ne peut être déduit de l'étude d'une seule année. L'analyse des données fournies par Nantes Métropole de 2001 à 2007 a permis de sélectionner 36 événements hydrologiques facilement interprétables et pour lesquels la DPFT peut être appliquée (FURUSHO, ANDRIEU et al., 2014) :

- le hyétogramme présente une impulsion claire,
- l'hydrogramme n'est pas influencé par un événement précédent ou suivant trop proche.

En traçant le coefficient d'écoulement de chaque événement, qui caractérise la réponse du bassin à la pluie, en fonction du débit de base, qui informe sur les conditions initiales d'humidité du sol, les événements peuvent être décrits selon trois groupes. Un premier groupe est caractérisé par une faible réponse hydrologique (coefficient d'écoulement ≤ 0.07) dans un contexte d'humidité très faible des sols. Ces événements ne sont observés qu'en été. Le deuxième groupe se caractérise par une réponse hydrologique plus forte (coefficient d'écoulement > 0.07) dans un contexte de sols humides. Les événements pluvieux de ce groupe sont plus longs, rendant leur sélection plus difficile car les débits sont souvent influencés par un événement antérieur ou suivant. Le troisième groupe réunit les événements hydrologiques les moins fréquents, dont la réponse hydrologique est très forte (coefficient d'écoulement > 0.22) alors que les sols sont très humides (débit de base $\geq 0.5m^3.s^{-1}$).

Les coefficients de ruissellement et les pertes initiales des zones urbaines pour les trois groupes et des zones rurales pour les deuxième et troisième groupes sont estimés. Pour ces deux derniers groupes, les caractéristiques des zones urbaines de la Chézine ont été définies grâce à l'analyse des données débitmétriques et pluviométriques pour les mêmes événements observés sur le bassin versant des Gohards. Ce bassin a un taux d'imperméabilisation de 38% et est couvert à 100% de zones urbaines, selon la même définition ayant servi à définir le taux d'urbanisation de la Chézine (10%). Associé aux résultats obtenus sur les fonctions de transfert (partie I.2.2.b), ces résultats confirment les résultats obtenus pour un mois sec et un mois humide en 2009, à partir des débits spécifiques mesurés à Procé et à Sautron (zone rurale). Le bassin réagit comme un bassin urbain pour les événements du premier groupe, comme un bassin mixte (rural+urbain) pour les événements du deuxième groupe et tend à réagir comme un bassin versant rural pour les événements du troisième groupe. Il est ainsi démontré que, contrairement à ce que la collectivité pensait, les surfaces urbaines ne peuvent être seules responsables des crues de la Chézine qui parfois conduisent à des inondations en aval (plutôt l'hiver). Les surfaces rurales contribuent aussi aux crues, permettant ainsi aux urbanistes de Nantes Métropole de savoir que gérer l'eau de la zone amont rurale peut aussi aider à limiter les crues en aval.

2.2 Adaptation du modèle au milieu péri-urbain

2.2.a Les processus pris en compte

À partir de la connaissance du rôle des zones rurales dans le fonctionnement d'un bassin périurbain, le modèle hydrologique ISBA-TOPMODEL (figure I.4) peut être adapté à ce

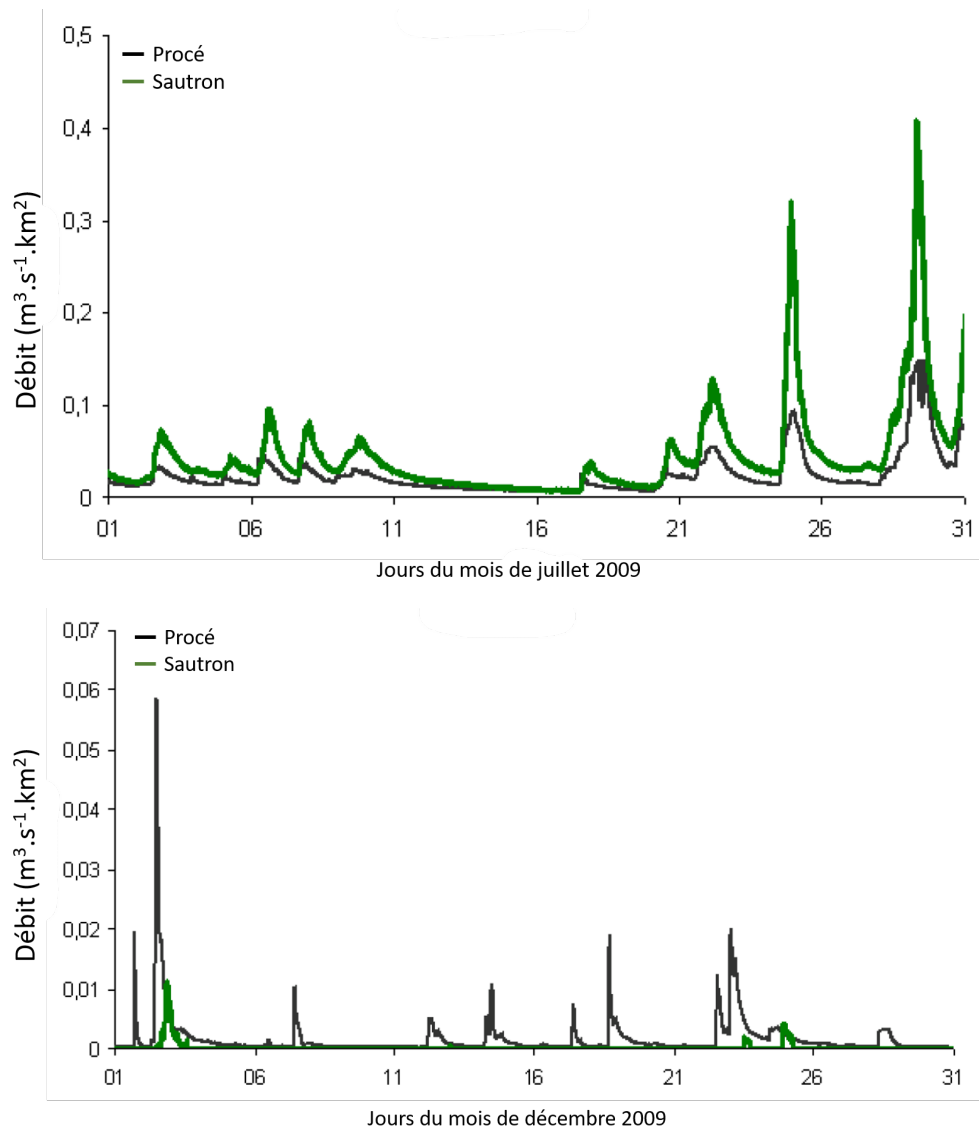


FIGURE I.7

Débits spécifiques aux exutoires de la Chézine à Procé (noir) et à Sautron (vert) en juillet 2009 (haut) et décembre 2009 (bas) (d'après FURUSHO, 2011).

type de bassin. La prise en compte de l'impact des zones urbaines sur le cycle hydrologique s'exprime selon deux éléments :

- les surfaces imperméabilisées connectées au réseau d'assainissement,
- le drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement, en lien avec un défaut d'étanchéité du réseau.

Pour le premier, un réservoir de stockage en surface est défini avec une capacité maximale (S_{imper}^{max} , mm) qui, une fois dépassée, contribue au ruissellement de surface, transféré à l'exutoire via le réseau d'assainissement d'eau pluviale et unitaire. De plus, un faible taux d'infiltration à travers ces surfaces est introduit (K_{imper} , $m.s^{-1}$), car aucune surface imperméabilisée en milieu urbain n'est jamais totalement étanche. L'introduction de ce taux d'infiltration conduit à une plus faible recharge en eau des sols. Quant au processus de drainage dans les réseaux, il a été inspiré du modèle URBS développé au sein de la Division Eau et Environnement (RODRIGUEZ, ANDRIEU et al., 2008), et adapté aux variables calculées au sein d'ISBA-TOPMODEL. Ainsi, la quantité des eaux infiltrées, processus implémenté dans la couche profonde d'ISBA (ISBA 3L) dépend de la longueur de réseau dans la maille, de la teneur en eau dans la couche et de la conductivité hydraulique du sol. La définition des surfaces urbaines est un point important des pré-traitements nécessaires à ce modèle, en lien avec les réseaux d'assainissement. Mais pour ce modèle, seule la connaissance de leur localisation et de leur type est demandée et généralement disponible dans les banques de données urbaines. Un calage des paramètres habituels de ISBA-TOPMODEL et de ceux nouvellement introduits est potentiellement nécessaire. Une étude de sensibilité permet d'identifier ceux auxquels le modèle est le plus sensible. Ces paramètres sont :

- le taux de décroissance exponentielle de la capacité hydraulique f ,
- le rapport entre l'épaisseur de sol d_c et la zone racinaire d_2 ,
- le taux des surfaces imperméabilisées effectivement connectées au réseau (SIE),
- la capacité maximale de stockage sur les surfaces imperméabilisées, (S_{imper}^{max}),
- le taux d'infiltration à travers les surfaces imperméabilisées, (K_{imper}).

Une étude de sensibilité du modèle à ces paramètres, grâce à une application sur la Chézine, a montré que les débits simulés sont principalement impactés par les paramètres qui déterminent les propriétés hydrauliques du sol et non ceux liés aux surfaces imperméabilisées (FURUSHO, Chancibault et al., 2013). Le calage de ISBA-TOPMODEL ne concerne donc que les deux paramètres f et d_c/d_2 .

2.2.b Fonction de transfert : approche géomorphologique privilégiée

Plusieurs approches sont possibles afin de décrire la distribution temporelle de la pluie nette à l'exutoire d'un bassin versant. Le chemin d'écoulement qu'emprunte l'eau jusqu'à l'exutoire et sa vitesse le long du parcours sont deux éléments majeurs pour définir le temps nécessaire à la pluie pour atteindre l'exutoire, depuis tout point du bassin. Les approches les plus complexes, basées sur des lois hydrauliques (i.e. de Barré de St Venant) nécessitent des informations et des données rarement disponibles à l'échelle de toute une ville. Lorsque dans un modèle le chemin d'écoulement est décrit sur la base d'une maille de résolution de l'ordre de la centaine de mètres, selon un pas de temps horaire, il n'est pas nécessaire de décrire la vitesse de l'écoulement précisément en tout point du chemin. Une approche plus simple, s'appuyant sur la distance de chaque point à l'exutoire et sur

une vitesse moyenne le long du parcours, permet d'estimer le temps de parcours nécessaire en cohérence avec le niveau de détails des autres processus.

Inspirée de la méthode utilisée avec TOPODYN (Chancibault, ANQUETIN et al., 2006), une approche similaire a été développée dans ISBA-TOPMODEL (BOUILLOUD et al., 2010), basée sur des vitesses d'écoulement distinctes entre les surfaces (versant, rivière et sous-sol), mais constantes dans le temps, quelle que soit la lame d'eau écoulée. Cette même approche a été modifiée pour prendre en compte les écoulements en réseau d'assainissement, pour la modélisation hydrologique de bassins périurbains (FURUSHO, Chancibault et al., 2010; ESSBAI, 2014).

Codé dans SURFEX, le transfert n'est que semi-distribué, car il ne permet de calculer un débit qu'en un nombre de points préalablement définis sur le réseau hydrographique (rivière ou réseau d'eau pluvial ou unitaire). De plus la contribution des eaux usées n'est pas prise en compte, dans la partie unitaire, à l'extrême aval du bassin versant de la Chézine.

Cette approche simple est tout-à-fait appropriée aux bassins versants de grande taille, pour lesquels les résolutions spatiales et temporelles sont moins fines. L'impact des processus hydrauliques, de fine échelle, comme les effets liés à la diffusion, sont alors estimés négligeables face aux effets de célérité.

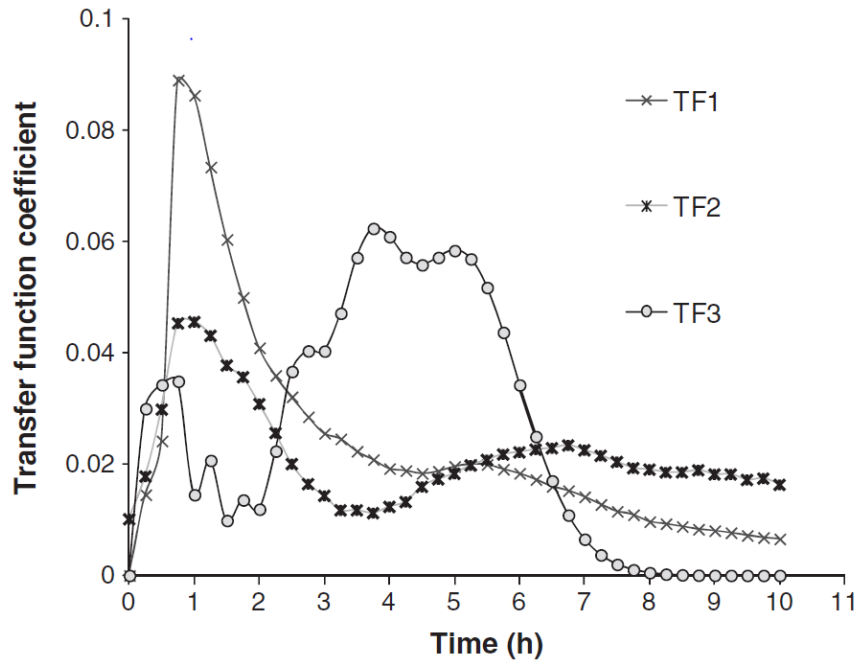


FIGURE I.8

Fonctions de transfert définies à partir de la méthode de la DPFT, basée sur les données observées, pour les événements de type urbain (TF1, croix), de type mixte (TF2, étoile) et de type rural (TF3, rond) sur la Chézine. (FURUSHO, Chancibault et al., 2013).

Cependant, pour un bassin versant de la taille de la Chézine, avec en plus un réseau hydrographique plus dense, en lien avec les réseaux d'eau pluviale et unitaires sur une partie du bassin, cette approche simple peut être problématique.

Une fonction de transfert, toujours géomorphologique, mais plus élaborée, a donc été appliquée à ce bassin versant. Elle fait l'hypothèse que la dynamique de propagation

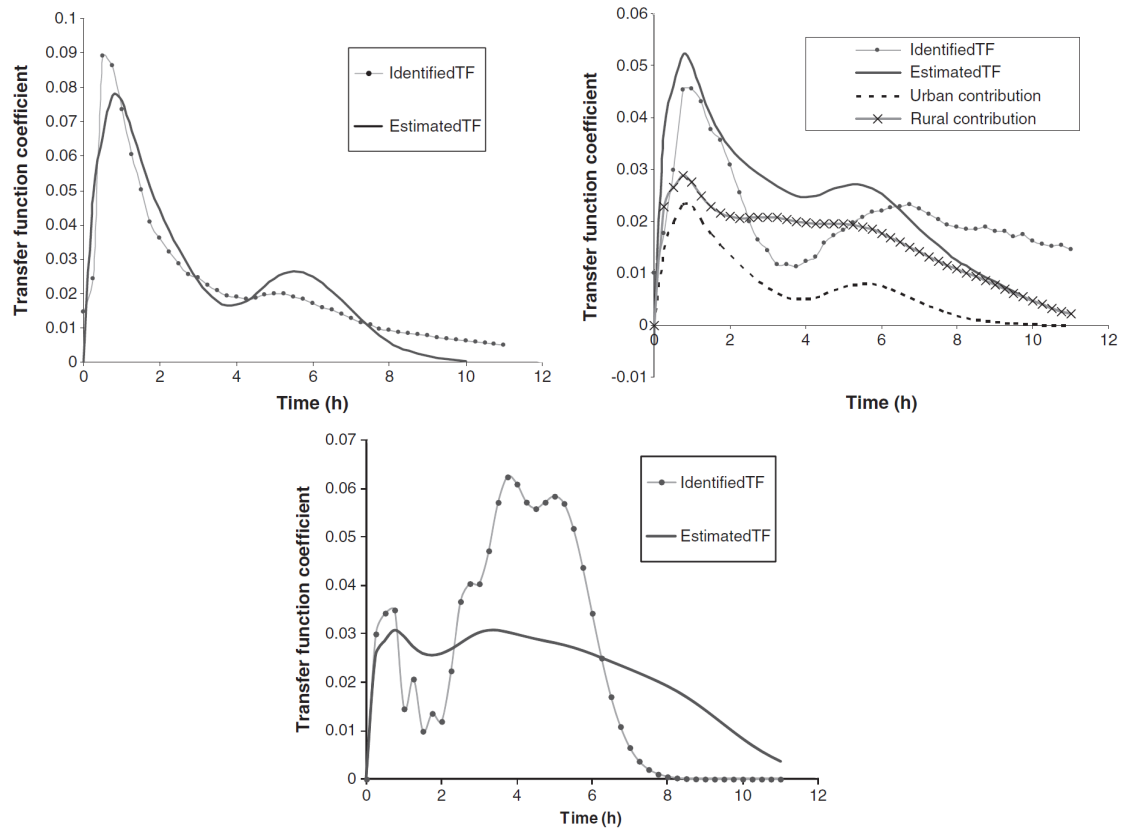


FIGURE I.9

Fonctions de transfert DPFT (ronds noirs) et Hayami (trait noir), pour les évènements de type urbain (haut gauche), mixte (haut droite) et ruraux (bas) sur la Chézine. Pour les évènements mixtes, les contributions urbaines (pointillés) et rurales (croix) sont tracées (D'après FURUSHO, Chancibault et al., 2013).

est différente sur versant, en rivière et en réseau. Le modèle de l'onde diffusante, avec la solution analytique de l'équation de diffusion de Hayami (HAYAMI, 1951) a été choisi, avec des célérités distinctes pour les versants, la rivière et le réseau et le paramètre de diffusion n'a été estimé que pour la rivière, le phénomène de diffusion ayant été estimé négligeable pour les écoulements en versant et en réseau (car plus courts). Nous appellerons cette fonction de transfert Hayami.

Le bassin versant de la Chézine (partie I.2.1) étant instrumenté par Nantes Métropole depuis 2011, il a été possible de déterminer une fonction de transfert de référence à partir des données observées via la méthode de la DPFT (DUBAND et al., 1993). C'est grâce à cette fonction de transfert de référence que les paramètres de célérité et de diffusion de la fonction de transfert simulée ont été estimés (figure I.8). Compte-tenu du fonctionnement identifié de la Chézine, caractérisé par trois type d'événements hydrologiques, une fonction de transfert de référence (figure I.9) et Hayami ont été calculées pour chacun des groupes d'événements, même si l'application de la DPFT pour le troisième groupe sort du domaine d'application normal, dû à un nombre trop limité d'éléments.

L'intégration de cette fonction de transfert dans SURFEX, permet de calculer les différentes contributions au débit, en un point sur la rivière ou en réseau. La figure I.9 met en évidence que cette approche permet de calculer correctement un débit, quel que soit le type d'évènement, à condition que les différentes contributions soient bien estimées.

2.3 Applications et évaluation

2.3.a Le bassin versant de la Chézine

Le modèle est appliqué sur le bassin versant de la Chézine du 1er août 2002 au 31 juillet 2010. La première année de la période n'est pas analysée : elle sert à équilibrer les différentes variables du modèle entre elles, permettant de limiter l'impact des incertitudes sur les données d'initialisation du modèle. Le calage est appliqué sur les trois années suivantes (2002-2005) avec des résultats très satisfaisants ($NSE = 0.79$ et $PBIAS = -2.19\%$). Cependant, le calcul de ces mêmes scores met en évidence une performance du modèle très variable selon les années ($0.51 < NSE < 0.85$ et $-15\% < PBIAS < 63\%$). Les très bonnes valeurs du $PBIAS$ sur toute la période de calage sont donc dûes au calcul du score à partir de valeurs relatives et non absolues. Il apparaît aussi que les scores ne sont mauvais que pour une seule année, la plus sèche de toute la période (1er août 2004 - 31 juillet 2005). Concernant les cinq années restantes, servant à évaluer le modèle, les scores restent donc satisfaisants ($NSE = 0.51$ et $PBIAS = 17.5\%$). Et le modèle montre des performances très variables selon les années ($0.49 < NSE < 0.73$ et $-7\% < PBIAS < 59\%$). L'analyse du bilan en eau (I.10) met en évidence une part (probablement trop) importante de l'évapotranspiration, qui est d'autant plus grande, les années sèches. Le ruissellement de l'eau sur les surfaces perméables est très faible, sauf les années les plus humides (2002-2003, 2006-2007). Il est aussi mis en évidence que le modèle tend à surestimer les sols secs et à sous-estimer les sols humides. Ce résultat est constant dans les différentes études menées avec ISBA et présentées dans ce document. Enfin, cette étude montre la variation du comportement des surfaces urbaines selon la saison (figure I.11).

La question d'utiliser le modèle hydrologique développé au sein du laboratoire plutôt qu'un autre modèle, pour des applications en milieu périurbain s'est bien sûr posée. Ainsi,

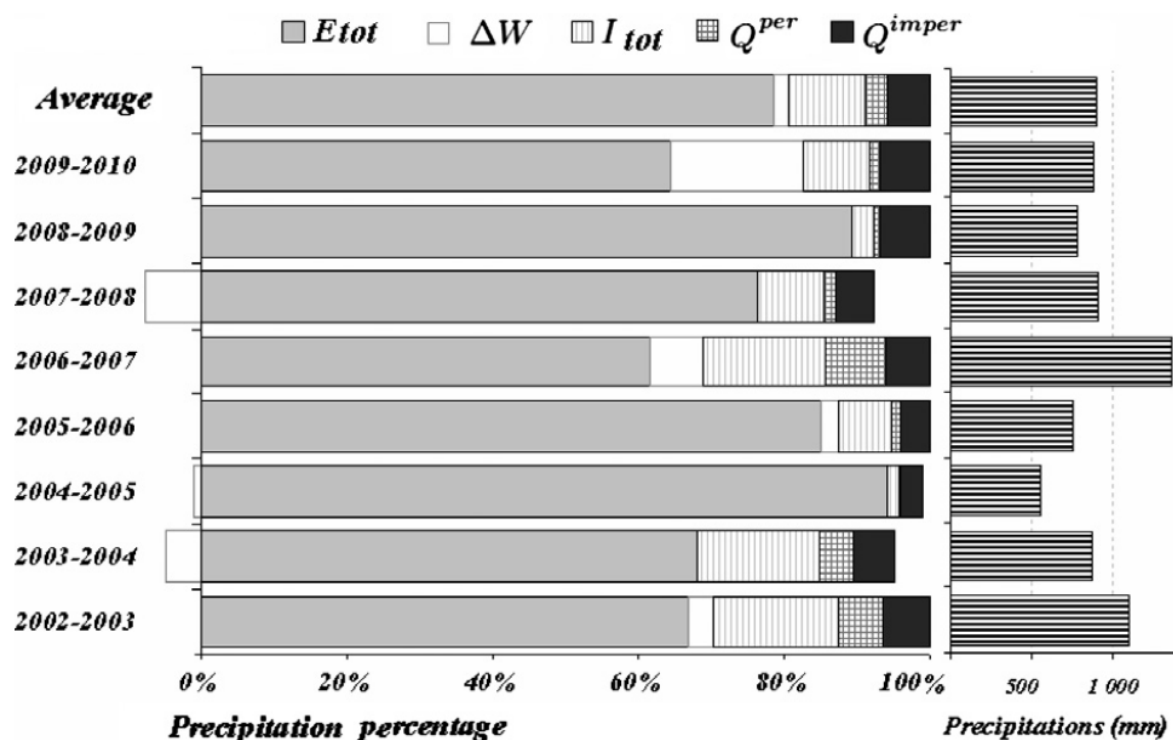


FIGURE I.10

Bilan en eau simulé par ISBA-TOPMODEL sur le bassin versant périurbain de la Chézine pour toute la période de 2002 à 2010 et chaque année individuellement. Le bilan en eau (%) est distribué entre l'évapotranspiration (gris clair), le stockage d'eau dans le sol (blanc), l'infiltration totale à travers la surface (rayures verticales), le ruissellement des surfaces perméables (quadrillé) et des surfaces imperméables (noir). Les précipitations sont indiquées à droite (rayures horizontales, en mm).

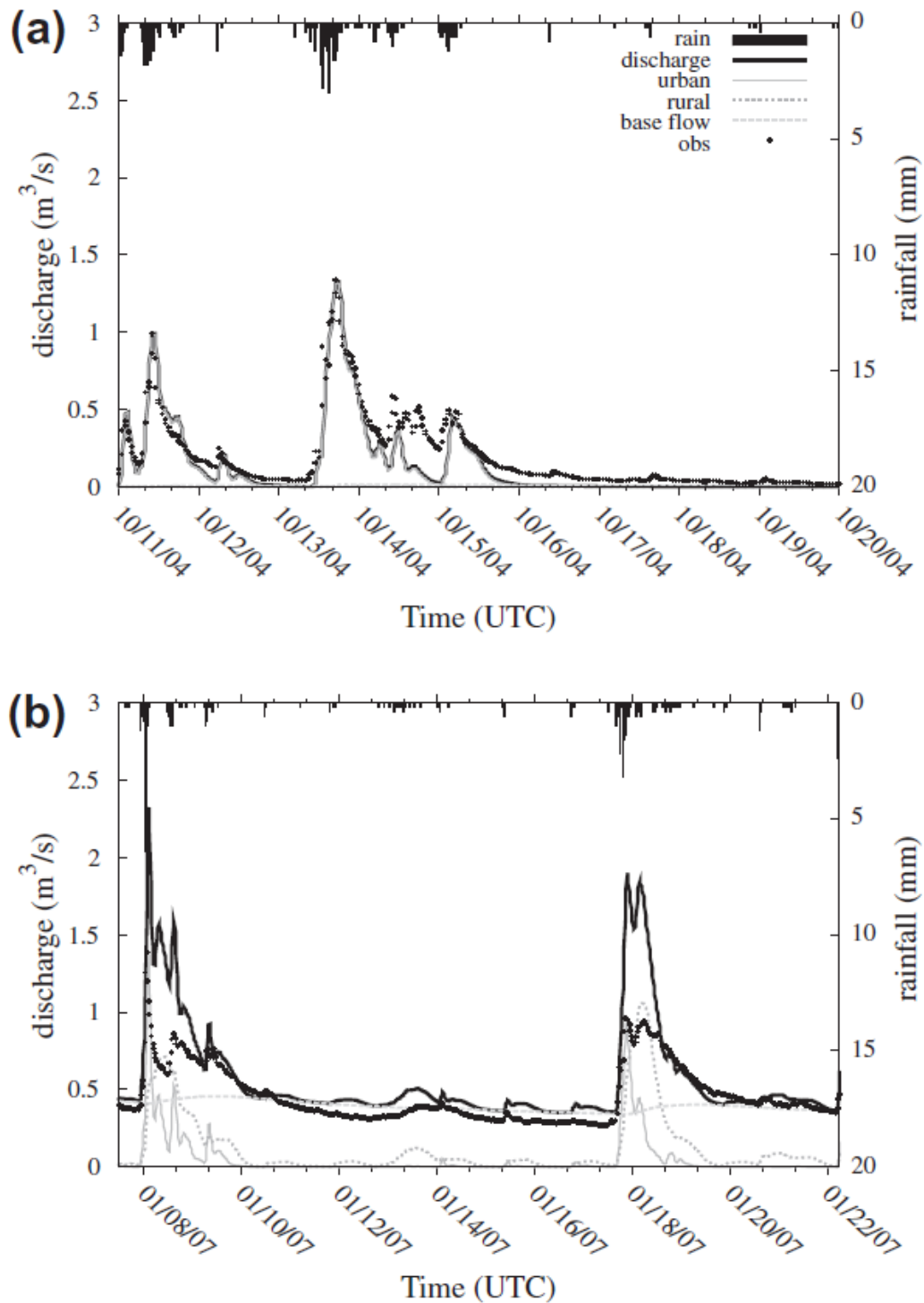


FIGURE I.11

Débits observés (points noirs) et simulés sur le bassin de la Chézine (a) en octobre 2004 et (b) en janvier 2007. Le débit simulé total (noir) est décomposé en contributions urbaine (gris clair), rurale (gris pointillés) et du sol (pointillé serré). La pluie est représentée en histogramme inversé. (GIANGOLA-MURZYN, 2010)

à l'occasion d'un stage (GUERY, 2011), une tentative a été faite d'adapter le modèle URBS (RODRIGUEZ, ANDRIEU et al., 2008) pour l'appliquer à la Chézine. Le modèle URBS est un modèle hydrologique dédié aux bassins versants urbains qui décrit le réseau d'assainissement explicitement et se base sur les parcelles cadastrales pour décrire l'espace, en connectant le bâti de chaque parcelle et le tronçon de voirie adjacent au tronçon de réseau d'assainissement correspondant. Il a ainsi été montré que le modèle n'était pas à même de reproduire la contribution rurale au débit à l'exutoire, conduisant à une forte sous estimation en période humide. De plus, le débit d'étiage en période sèche ou entre deux événements éloignés est sous-estimée, en raison d'une mauvaise représentation des écoulements d'eau dans le sol des zones non urbanisées.

2.3.b Le bassin versant de l'Yzeron

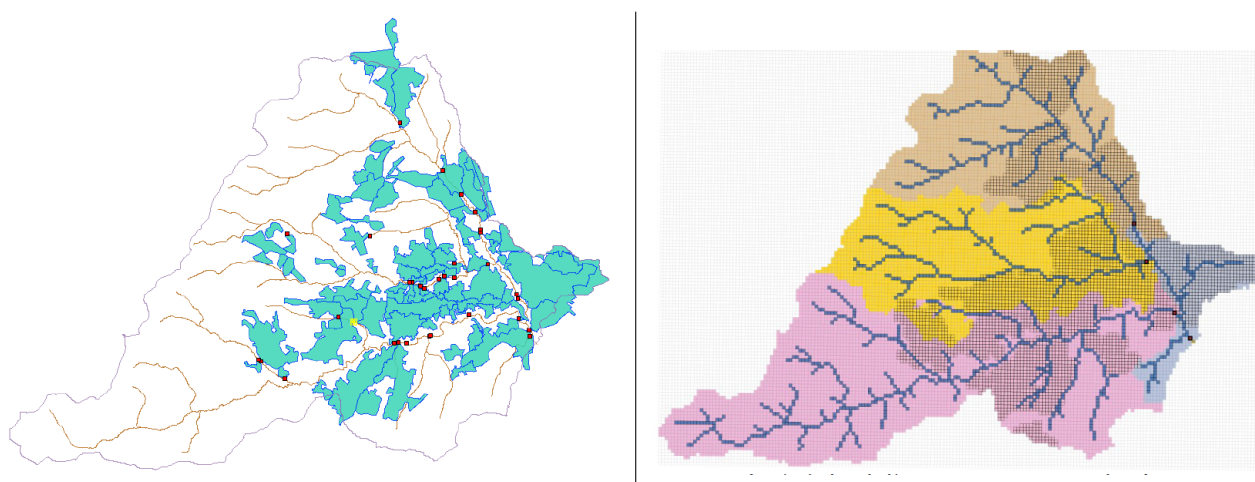


FIGURE I.12

A gauche, les 29 déversoirs d'orage existants (points rouges) et leurs bassins versants (vert) (LABBAS, 2015) et à droite les 4 déversoirs d'orage équivalents sélectionnés (carrés rouges) et leurs bassins versants (couleurs) sur la grille du MNT à 100m (gris clair), avec les pixels urbains (noir), sur le bassin de l'Yzeron (ESSBAI, 2014).

Le modèle ISBA-TOPMODEL ainsi développé a été appliqué à un autre bassin versant, celui de l'Yzeron, qui présente des caractéristiques différentes (FURUSHO, 2011). Ce bassin est soumis à un climat tempéré aux influences de climat méditerranéen, continental et océanique. Son exutoire à Taffignon délimite un bassin versant de 129 km^2 caractérisé par un relief très marqué. Il est, de plus, plus urbanisé que le bassin versant de la Chézine, avec 25% de zones urbaines, elles-mêmes imperméabilisées en moyenne à 41%. En outre ce bassin est principalement équipé d'un réseau d'assainissement unitaire, avec de nombreux déversoirs d'orage. Une première application a été faite, dans les mêmes conditions que la Chézine : le réseau unitaire a été considéré comme un réseau d'eau pluviale, surestimant ainsi la part contributive du bassin versant au débit de la rivière, lors des événements peu intenses. Notons que pour cette application, FURUSHO (2011) n'a pas mis en oeuvre de calage, mais s'est basée sur la littérature pour les paramètres f et d_c et sur les valeurs trouvées pour le bassin de la Chézine pour les autres. Compte tenu de ces conditions particulières, l'évaluation du modèle est plutôt encourageante avec des scores NSE et

PBIAS indiquant une simulation acceptable selon MORIASI et al. (2007), sur la période 2002-2008. Encore une fois, selon les années, l'évaluation est très variable avec des années pour lesquelles l'évaluation n'est pas satisfaisante.

En prenant en compte les déversoirs d'orage, permettant ainsi de ne plus considérer le réseau unitaire comme un réseau d'eau pluviale, ESSBAI (2014) a permis d'améliorer les performances du modèle sur ce bassin de l'Yzeron. Le code du routage a donc été modifié et a conduit à ce que chaque déversoir d'orage soit déclaré comme exutoire. En fonction d'une valeur seuil, à caler pour chaque déversoir, les débits au-dessus de cette valeur sont déversés, contribuant au débit calculé pour chaque déversoir. La part de débit inférieure à cette valeur seuil est transférée vers l'exutoire en aval.

De plus, la notion de déversoir d'orage équivalent a été créée. Elle consiste à diminuer le nombre de déversoirs à représenter explicitement, permettant de simplifier la phase de calage du modèle, en diminuant le nombre de paramètres à caler. Le débit d'un déversoir d'orage équivalent est donc la somme des débits de ce déversoir d'orage et des déversoirs d'orage amont. Plusieurs configurations ont été choisies : i) avec tous les déversoirs d'orage du bassin (29), ii) avec seulement le déversoir aval des biefs principaux (4) (figure I.12).

La configuration avec 4 déversoirs d'orage équivalents donne de bons résultats et permet même d'améliorer les performances du modèle obtenues par FURUSHO (2011). Ce concept des déversoirs équivalents sera repris par E. BERNARD (2021) (partie II.2.1).

3 Conclusion

Mes travaux sur la prévisibilité des crues-éclair à partir de pluies prévues m'ont permis d'acquérir des connaissances en hydrologie de bassins versants "naturels" (où les zones urbaines sont en fait négligées) et sur les outils numériques qui leur sont dédiés. J'ai ensuite croisé ces nouvelles compétences avec la plateforme utilisée pendant ma thèse, pour développer un modèle facile à coupler avec un modèle de prévision météorologique. J'ai ainsi ajouté les écoulements d'eau latéraux dans un modèle de transfert sol-végétation-atmosphère, par le couplage entre ce modèle et le modèle de prévision des crues-éclair découvert quelques mois plus tôt. Cela a permis de mettre à disposition de Météo-France un outil pour mieux identifier les ingrédients nécessaires à une meilleure prévision de ces crues, en particulier en termes de prévision des précipitations. Les compétences acquises en hydrologie ainsi que la maîtrise d'outils dédiés ont rendu possible les travaux sur les bassins périurbains. Il m'a fallu, malgré tout, me former à l'hydrologie urbaine, qui comprend les mêmes processus qu'en hydrologie "naturelle" mais avec une part différente dans le bilan hydrologique. J'ai donc acquis de nouvelles compétences sur le fonctionnement des réseaux d'assainissement, les ouvrages et leur impact sur le réseau hydrographique et les autres termes du cycle de l'eau. Les particularités des transferts d'eau du milieu urbain ont été ajoutées au modèle, permettant la simulation de bassins périurbains, sur de longues chroniques. Ces bassins sont des entités qui permettent donc d'intégrer le cycle de l'eau dans sa globalité. D'une part, spatialement, en combinant les caractéristiques particulières de deux milieux jusqu'ici généralement étudiés par des communautés disjointes. D'autre part temporellement en étudiant leur fonctionnement sur le long terme et non uniquement à l'échelle de l'évènement.

Valorisations & encadrements *

Nombre de contrats post-doctoral effectués	3 (46 mois)
Nombre de doctorant.es encadré.es	1
Nombre de stagiaires encadré.es	9
Nombre de projets associés	6
Nombre d'articles dans des revues avec comité de lecture	10
Nombre de com. avec actes dans un congrès international	5
Nombre de communications sans acte	3
Nombre de rapports techniques et scientifiques	2

* certains items peuvent être comptabilisés dans plusieurs chapitres

Chapitre II

Modélisation hydro-climatique en milieu urbain à l'échelle d'une agglomération : à l'interface hydrologie et microclimatologie urbaines

Si le modèle hydrologique ISBA-TOPMODEL adapté aux bassins périurbains permet de résoudre les bilans en eau en périphérie des villes, pour calculer des débits de rivière périurbaine, il n'est pas adapté aux bassins versants urbains, au centre des agglomérations. En effet sa prise en compte sommaire des réseaux d'assainissement, bien plus denses en zones urbaines, ne permettrait pas de reproduire de façon satisfaisante le débit en réseau d'assainissement. De plus, dans l'optique d'une approche plus intégratrice de l'étude de la ville, le bilan d'énergie des surfaces urbaines n'est pas résolu. Seul le bilan d'énergie des surfaces "naturelles" est réalisé.

Entre un milieu "naturel" avec des surfaces plus ou moins végétalisées et un milieu urbain caractérisé par une part importante de surfaces anthropiques, les différences de bilans énergétiques sont non négligeables. L'usage de matériaux anthropiques qui stockent la chaleur le jour et la restituent la nuit, la morphologie de la ville qui modifie les circulations d'air et multiplie les réflexions du rayonnement incident au sein des rues canyon, ainsi que les activités humaines, sources de chaleur, contribuent au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) (OKE, 1981, OKE, 1982, OKE, 1987). Certaines des solutions limitant ce phénomène sont classées parmi les solutions fondées sur la nature. Nombre d'entre elles s'appuient sur la végétation : elles introduisent alors des surfaces perméables et favorisent l'évapotranspiration et l'infiltration, l'albédo peut être plus faible et la végétation haute peut offrir de l'ombre (dans la rue et sur le bâti). Elles modifient ainsi le bilan radiatif, le bilan énergétique et le bilan en eau. Nombre d'entre elles peuvent donc aussi s'intégrer au système de gestion des eaux pluviales. En fait, la plupart de ces solutions impactent différents domaines (biodiversité, bien-être psychologique, santé...). Une évaluation pertinente de ces solutions nécessiterait donc de pouvoir prendre en compte les différents enjeux auxquels elles répondent. L'évaluation devient alors plus complexe. Les décideurs ne disposent toujours pas aujourd'hui d'outils réellement pertinents intégrant les différents enjeux.

Dans l'objectif de développer un tel outil (Projet Ville Numérique, MTES/DRI, 2010-2013), nous avons choisi, dans un premier temps, de coupler les bilans en eau et d'énergie, au sein d'un même modèle, conduisant à un modèle dit hydro-climatique (Convention cadre LCPC-Météo-France, depuis 2007 ; Projet Ville Numérique, 2010-2013 ; Projet ANR-VEGDUD, 2010-2013). Cette approche constituait alors une réelle originalité, reprise aujourd'hui par différentes équipes aux échelles de l'ouvrage et du quartier/bassin versant, mais encore pas (ou peu) à l'échelle d'une

agglomération.

Ce couplage résulte de l'amélioration du bilan hydrologique d'un modèle qui résout les bilans radiatif et énergétique des surfaces urbaines : le schéma de surface TEB (MASSON, 2000), inclus dans la plateforme SURFEX, à laquelle le modèle ISBA-TOPMODEL appartient. Les développements, présentés dans une première partie, ont consisté à prendre en compte plus spécifiquement les processus hydriques propres au milieu urbain pour l'étude de petits bassins. L'évaluation à petite échelle puis à grande échelle de ces nouveaux développements (première et deuxième parties) s'appuie sur une approche novatrice qui cherche à croiser des variables rarement étudiées sur un même territoire. La deuxième partie, dédiée à l'échelle supérieure, se termine par l'analyse hydro-climatique d'un territoire de grande échelle.

1 Adaptation d'un modèle de bilan d'énergie des surfaces urbaines à l'hydrologie urbaine

Le schéma de surface TEB (MASSON, 2000) appartient à la même plateforme (SURFEX) que ISBA et ISBA-TOPMODEL. Il a initialement été développé pour résoudre les bilans énergétique et radiatif des surfaces construites. Il représente la ville de façon simplifiée à l'aide d'une approche dite de "rue canyon" : dans chaque maille les paramètres décrivent une rue moyenne. Un bilan hydrologique simple, en surface, existait à l'origine. Il était couplé au bilan énergétique via le processus d'évapotranspiration (en lien avec le flux de chaleur latente dans le bilan d'énergie). Le modèle s'est ensuite enrichi d'un module permettant d'intégrer les surfaces "naturelles" urbaines, telles que les jardins et parcs, à l'intérieur de la rue canyon, pour prendre en compte l'impact de la végétation sur le bâti et la voirie et l'impact du bâti sur les surfaces "naturelles" (TEB-Veg, LEMONSU, MASSON et al. (2012)). Le sol est alors apparu dans TEB, mais seulement sous les "jardins". De plus, TEB-Veg ne concernait que la végétation basse. La végétation haute a été introduite ensuite (URB-Tree, E. REDON, LEMONSU, MUSY et al., 2014). Les travaux ont donc consisté à étendre le sol à toutes les surfaces urbaines, avec les transferts d'eau et d'énergie inhérents et à connecter les surfaces et le sol, au réseau d'assainissement pluvial et unitaire.

1.1 TEB-Hydro - la fonction de production : problématique d'une approche agronomique

TEB-Hydro (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018; Chancibault, LEMONSU et al., 2015; E. BERNARD, 2021) est un modèle hydro-climatique urbain, par évolution du modèle TEB-Veg (LEMONSU, MASSON et al., 2012), développé dans la plateforme SURFEX (MASSON, LE MOIGNE et al., 2013) (v7.3, puis v8.2). Il est aujourd'hui disponible en open source sous la version SURFEX V9. Il peut être appliqué à l'échelle de la ville ainsi qu'à l'échelle d'un grand quartier (ou bassin versant urbain). Comme SURFEX, TEB-Hydro est basé sur un maillage régulier avec une résolution de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Ce modèle peut être utilisé couplé avec d'autres modèles météorologiques ou en mode forcé par des données atmosphériques observées. Il combine deux schémas de surface (entre autres) : TEB (MASSON, 2000) et ISBA-DF (BOONE et al., 1999). Ces deux schémas fonctionnent tous deux selon une approche de tuilage intégré et décrivent les échanges d'énergie et d'eau entre le sous-sol, la surface et l'atmosphère, TEB étant dédié au milieu urbain et ISBA-DF au milieu naturel. Au sein de chaque maille, selon le type d'occupation du sol, le ou les schémas s'appliquent sur la fraction de maille correspondante. Au sein du milieu urbain, TEB-Veg distingue la surface occupée par du bâti, de celle occupée par des surfaces imperméabilisées (type voirie) et de celle occupée par de la végétation ou des sols nus (figure II.1). Avec TEB-Hydro, le sol a été ajouté sous le bâti et la voirie, et les flux d'eau

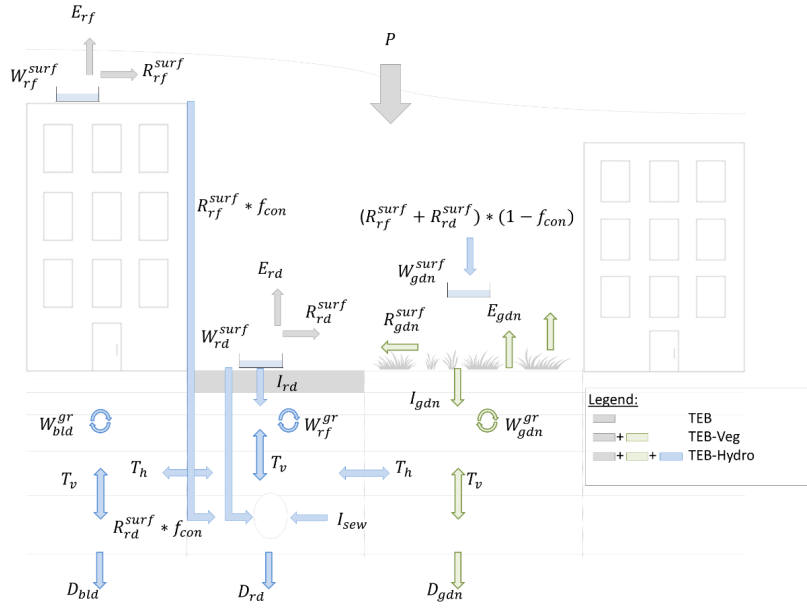


FIGURE II.1

Schéma des différents processus représentés dans TEB selon les versions TEB (MASSON, 2000) (gris), TEB-Veg (LEMONSU, MASSON et al., 2012) (vert) et TEB-Hydro (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018) (bleu). Les doubles flèches horizontales et verticales représentent les transferts d'eau horizontaux (T_h) et verticaux (T_v) respectivement entre deux compartiments ou entre deux couches de sol, au sein d'une maille. Les précipitations (P), l'évaporation et l'évapotranspiration (E), l'infiltration (I), le ruissellement de surface (R), le drainage profond (D) sont représentés par des flèches simples. La tenue en eau du sol (W^{gr}) et la lame d'eau interceptée en surface (W^{surf}) sont aussi indiquées. Les variables et processus au sein des compartiments jardin, voirie et bâti/toiture sont respectivement indiqués par les indices gdn , rd , bld/rf . Le nombre de couches de sol n'est qu'indicatif. D'après STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018.

et d'énergie ont été résolus par appel au schéma ISBA-DF, comme pour le sol sous les jardins (TEB-Veg) en adaptant les variables aux conditions aux limites (en surface). De plus, les réseaux d'assainissement ont été pris en compte :

- en collectant une partie des volumes ruisselés sur les surfaces imperméabilisées (selon la présence de réseaux unitaires ou d'eau pluviale),
- en drainant, via les réseaux présents, une partie de l'eau du sol sous la voirie, selon le niveau d'humidité du sol.

Le processus de drainage de l'eau du sol dans les réseaux d'assainissement (d'eau pluviale, unitaires ou d'eaux usées) a lieu normalement lorsque la nappe (quel que soit le type de nappe) affleure le réseau (BREIL et al., 1993). C'est pourquoi, ce processus se produit généralement en périodes humides, donc plutôt l'hiver à nos latitudes. Mais il n'est pas observé sur tous les territoires : le niveau des hautes eaux d'une nappe peut ne pas atteindre les réseaux d'assainissement ou dans d'autres cas, aucune nappe n'est réellement présente de façon pérenne.

Les bilans en eau calculés à partir d'observations montrent que la part d'eau infiltrée dans les réseaux peut représenter 20 à 30% de la pluie annuelle en certains endroits, selon les années. Ainsi, en 2014, à Nantes (bassin versant du Pin Sec), à partir des données de l'ONEVU (RODRIGUEZ, LE DELLIOU et al., 2020) ont montré que cette part s'élevait à 42% de la pluie totale annuelle. Le modèle ISBA-DF, modèle à base agronomique, ne permet pas de représenter l'évolution dans le temps de la profondeur de la nappe, il ne calcule que la teneur en eau du sol, à différentes profondeurs, au cours du temps. C'est pourquoi afin de mieux représenter le drainage de l'eau du sol par les collecteurs (ou leur tranchée), le drainage profond a été limité à l'aide d'un paramètre qui doit être calé. Cette limitation conduit à une augmentation de l'humidité du sol dans les basses couches, en particulier l'hiver, permettant d'augmenter la part du processus de drainage par les réseaux dans le bilan en eau du modèle. Mais, nous verrons plus loin que cela a des conséquences sur le bilan énergétique, en particulier le processus d'évapotranspiration.

Lors de sa thèse, que j'ai co-encadrée, E. BERNARD (2021) a amélioré les équations pour les transferts latéraux entre compartiments au sein d'une maille et a ainsi permis une fermeture de ce bilan à l'échelle du pas de temps numérique (plus court que le pas de temps de forçage). De plus, lors du phasage de TEB-Hydro (SURFEX v7.3) avec SURFEX v8.2, l'irrigation des surfaces végétalisées a été ajoutée. Cela a permis d'y ajouter la part de ruissellement des surfaces imperméabilisées qui ne rejoint pas les réseaux d'assainissement mais s'écoule vers les surfaces végétalisées.

Ainsi, le bilan en eau du modèle TEB-Hydro est désormais, au sein d'une maille sur une période donnée (en $kg.m^{-2}$) :

$$P + N + Ir_{gdn} = Et + R + D + I_{res} + I + \Delta S \quad (II.1)$$

et à l'échelle de chaque compartiment :
les jardins

$$P + N + Ir_{gdn} + (R_{bld} + R_{rd}) * (1 - f_{con}) = Et_{gdn} + R_{gdn} + D_{gdn} + \Delta S_{gdn} \quad (II.2)$$

la voirie (les surfaces imperméabilisées)

$$P + N = E_{rd} + R_{rd} + D_{rd} + I_{res} + I + \Delta S_{rd} \quad (II.3)$$

le bâti

$$P + N = E_{bld} + R_{bld} + D_{bld} + \Delta S_{bld} \quad (II.4)$$

avec les indices *bld*, *rd* et *gdn* respectivement pour les compartiments bâti, voirie et jardin, *P* la pluie, *N* la neige, *Ir_{gdn}* l'irrigation des jardins, *Et* l'évapotranspiration, *E* l'évaporation, *R* le ruissellement de surface, *D* le drainage profond (aussi appelé percolation), *I_{res}* le drainage de l'eau du sol par le réseau (unitaire, d'eaux usées ou d'eau pluviale), *I* le drainage de l'eau du sol dans le réseau d'eau usée, *ΔS* le stockage d'eau en surface et dans le sol, *f_{con}* la fraction des surfaces imperméabilisées connectées au réseau d'assainissement (unitaire ou pluvial).

Quant au bilan énergétique, il correspond à celui de LEMONSU, MASSON et al. (2012) et E. C. REDON et al. (2020).

1.2 Sensibilité du modèle à ses paramètres, pour un calage plus efficace

Les modèles hydrologiques ont cette particularité de nécessiter une phase de calage qui permet d'ajuster, de façon plus ou moins objective et plus ou moins méthodique, les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible. En effet, même pour un modèle hydrologique à base physique, il existe

le besoin de paramètres non physiques, impossibles à mesurer. Les modèles utilisés en météorologie ne nécessitent pas cette phase de calage, peut-être parce que ces modèles ne représentent pas ou peu d'espaces hétérogènes non visibles et sans discontinuité.

Ainsi, la phase de calage des modèles hydrologiques permet de déterminer la valeur d'un paramètre non mesurable ou non observable, mais surtout elle permet de corriger les nombreuses approximations inhérentes à tout modèle numérique, surtout pour des milieux fortement hétérogènes et difficilement descriptibles (*i.e.* les sols et particulièrement les sols urbains). Si cette étape est nécessaire, elle doit être malgré tout maîtrisée : il faut limiter le nombre de paramètres à caler. C'est pourquoi une étude de sensibilité préalable est indispensable. On ne cale que les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible.

Au cours des différentes phases de développement de TEB-Hydro que j'ai menées ou encadrées, des études de sensibilité des paramètres ajoutés ou dont l'équation avait été modifiée, ont été menées (ALLARD, 2015 ; STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018), principalement sur le débit en rivière ou en réseau et parfois sur le débit de drainage de l'eau du sol par le réseau. Le paramètre auquel le modèle est le plus sensible est évidemment le taux de connexion des surfaces imperméabilisées (f_{con}). Le flux maximal d'infiltration à travers la voirie (I_{rd}) ainsi que le coefficient (I_p) permettant de prendre en compte les problèmes d'étanchéité des collecteurs ont aussi été mis en évidence par ces études, tout comme le facteur limitant le drainage profond (D). Tous trois impactent le drainage de l'eau du sol par les réseaux. En revanche, les capacités maximales d'interception des toitures et voirie ne sont pas primordiales, même si elles jouent un rôle prépondérant pour les événements les plus fréquents. STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al. (2018) a aussi démontré les liens entre certains paramètres qui peuvent être à prendre en compte, selon la méthode de calage utilisée. Ainsi à l'aide d'un plan factoriel à deux niveaux 2^3 , les paramètres I_p et D interagissent fortement sur le drainage du sol dans les réseaux (figure II.2).

L'approche de calage que nous utilisons généralement est la méthode OFAT "One Factor At a Time" (MONTGOMERY, p. d.) : on définit une plage de valeurs, ainsi qu'un pas pour chaque paramètre à caler et on ne fait varier qu'un paramètre à la fois, de pas en pas. C'est donc une méthode assez coûteuse, qui ne tient pas compte des liens potentiels entre paramètres. Cela conduit à un jeu de simulations, donc à un jeu de variables simulées qui peuvent ensuite être comparées aux variables équivalentes observées, sur la même période. Pour la comparaison, nous utilisons souvent le PBias et le NSE (MORIASI et al., 2007). Si la période est suffisamment longue (une année est généralement utilisée en début de simulation pour permettre l'équilibrage du modèle et atténuer l'impact de variables d'initialisation peu fiables ou éventuellement méconnues), on peut en plus appliquer une approche croisée : la période est divisée en deux, la première sert au calage et la deuxième à l'évaluation, puis on inverse, la deuxième sert au calage et la première à l'évaluation (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018). Il faut bien sûr dans ce cas, s'assurer que les deux périodes sont d'égale durée. Si elles sont caractérisées par des conditions climatiques (années sèches/années humides) non équivalentes, cela peut alors permettre de vérifier la robustesse du calage : trouve-t-on le même quelle que soit la période ? Les évaluations sont-elles de même qualité ?

La mise en oeuvre du calage est basée sur la comparaison des débits observés et simulés dans le réseau d'eau pluviale à l'exutoire du bassin. Une première étude a eu lieu sur le petit bassin urbain de Rezé (4.7 ha) (figure II.3). Le LCPC a instrumenté ce bassin de 1993 à 1998 conduisant à une base de données continue de précipitations, de débit dans le réseau d'eau pluvial et de teneur en eau du sol (BERTHIER et al., 1999). Le bassin de Rezé est résidentiel, composé de maisons individuelles avec jardins privés. Le bassin est équipé d'un réseau séparatif dont le réseau d'eau pluviale draine 84% des surfaces imperméabilisées qui représentent 45% de la surface totale (BERTHIER et al., 1999 ; DUPONT et al., 2006). Sur ce bassin versant une étude préalable a permis de définir de

façon exhaustive la part des surfaces imperméabilisées effectivement connectées au réseau d'eau pluvial, ce paramètre n'est donc pas à caler. La combinaison de paramètres issue du calage est définie à l'aide du KGE (GUPTA et al., 2009), mais le paramètre D a dû être affiné avec l'aide du débit maximal de drainage de l'eau du sol dans le réseau d'eau pluvial, durant l'hiver 1994-1995, évalué par BERTHIER et al. (1999). Ainsi le KGE obtenu pour le calage et l'évaluation varie entre 0.82 et 0.57 respectivement pour les périodes 1 (septembre 1993 - août 1995) et 2 (septembre 1995 - août 1997) (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al. (2018)). La différence étant probablement liée au caractère plus humide de la première période et plus sec de la seconde, résultat déjà mis en évidence avec le modèle ISBA-TOPMODEL (Partie I.2.3.a). La plus faible performance du modèle en période sèche pourrait donc être attribuée au schéma de sol ISBA.

STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al. (2018) et STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al. (2021) ont aussi appliqué TEB-Hydro sur un autre petit bassin versant urbain nantais, le Pin Sec (31 ha). Le bassin est, au nord, plutôt de type résidentiel, alors qu'au sud, il est occupé par des barres d'immeubles (figure II.3). L'assainissement est de type séparatif, avec de mauvais branchements, identifiés lors d'une enquête menée par Nantes Métropole, en 2014. Les surfaces imperméabilisées occupent 51% de la surface et 61% d'entre elles ont été estimées connectées au réseau d'eau pluvial, selon une étude menée par Nantes Métropole. Ce bassin, instrumenté depuis 2006 (MESTAYER, BAGGA et al., 2011), en pluviomètre, débitmètres en réseau d'eau pluviale et d'eau usée, ainsi qu'en sondes TDR et piézomètres, est aussi équipé avec un mât, permettant le calcul de flux de chaleur sensible et latente (MESTAYER, Chancibault et al., 2011).

Les paramètres ont été calés, de la même façon que sur le bassin de Rezé, sur la période septembre 2010 - août 2012 (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018). La même combinaison de valeurs des paramètres que sur le bassin de Rezé a été obtenue (KGE=0.79). Deux combinaisons de valeurs de paramètres à caler identiques sur deux bassins versants d'une même région mais à des périodes distinctes et aux occupations du sol différentes, est un résultat encourageant, pour de futures études prospectives. En effet, dans les conditions d'une prospective, utiliser des modèles forcément calés sur des périodes antérieures, avec une occupation du sol potentiellement différente pose la question de la pertinence de tels modèles ou bien du calage.

1.3 Évaluation hydroclimatique à l'échelle de petits bassins urbains

Grâce à la présence simultanée de différents instruments de mesure de débit, de teneur en eau des sols, de flux de chaleur latente et sensible, sur le bassin du Pin Sec, le modèle TEB-Hydro a ainsi pu être évalué d'un point de vue hydro-climatique, en comparant ces diverses observations aux mêmes grandeurs simulées. La conjonction, assez rare, de ces différentes données sur un même site, permet i) une évaluation plus intégrée, en croisant les deux bilans énergétique et hydrologique et ii) d'analyser comment le nouveau bilan hydrologique impacte le bilan énergétique du modèle, qui a été largement évalué préalablement (MASSON, GRIMMOND et al., 2002; LEMONSU, GRIMMOND et al., 2004; LEROYER et al., 2010; E. REDON, LEMONSU et MASSON, 2020; SCHOETTER et al., 2020).

Afin d'augmenter le jeu de données de flux de chaleur, l'évaluation est menée sur la période janvier 2010 - décembre 2012, comprenant en partie la période de calage (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al., 2021).

De plus, les simulations de TEB-Hydro sont aussi comparées aux simulations de TEB-Veg (partie II.1). Entre les deux modèles, toutes les données initiales et d'occupation du sol ainsi que les paramètres communs sont les mêmes, sauf pour les paramètres contraints par TEB-Veg (capacités maximales d'interception des toitures et voiries à 1mm). Ainsi, les simulations de TEB-Veg permettent seulement les transferts d'eau et d'énergie entre le sol, la surface et l'atmosphère

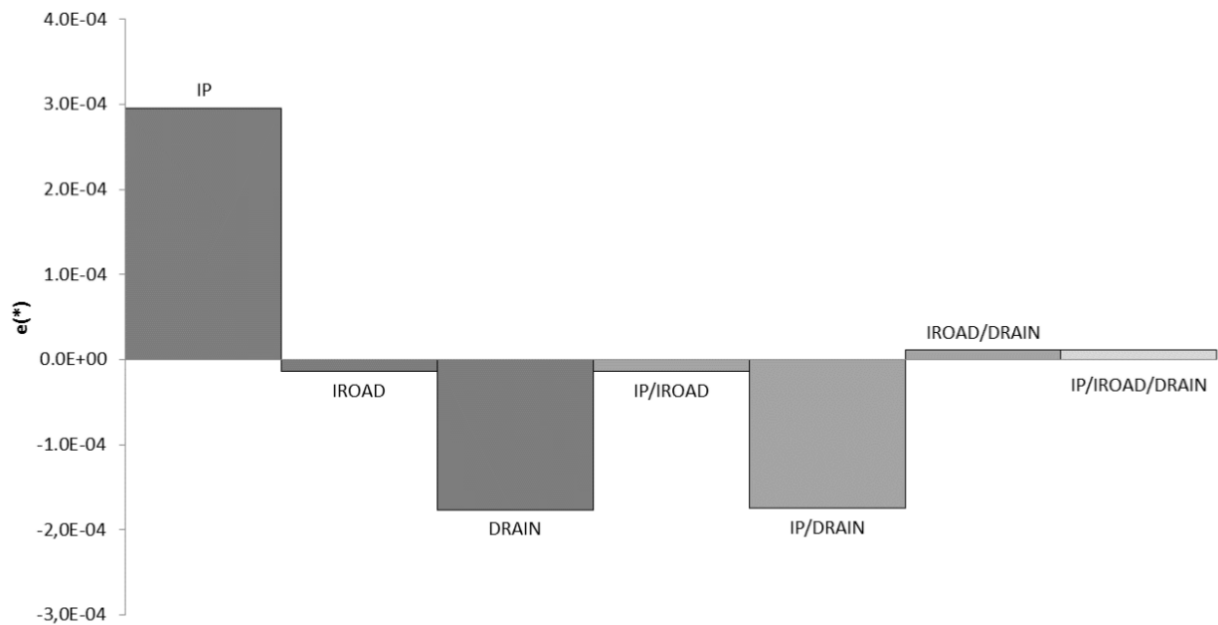


FIGURE II.2

Effet des paramètres IP (étanchéité des collecteurs), IROAD (infiltration à travers la voirie) et DRAIN (drainage profond) et leurs interactions sur le drainage de l'eau par les réseaux, simulées par TEB-Hydro, sur le bassin versant de Rezé. Gris foncé : principaux effets, gris moyen : effets de deuxième ordre et gris clair : effets de troisième ordre.
(STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018)

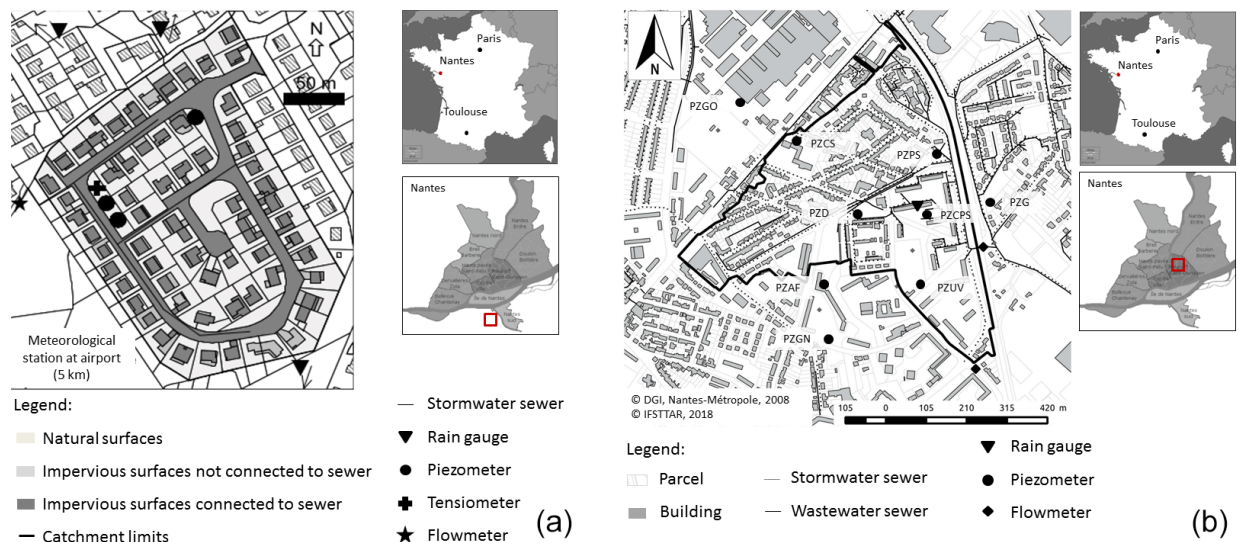


FIGURE II.3

a) Site expérimental de Rezé (D'après DUPONT et al., 2006), b) Site expérimental du Pin Sec. Les rectangles rouges indiquent la position de chaque bassin sur la carte de la commune de Nantes dans l'encadré du bas. (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, BRUN et al., 2018)

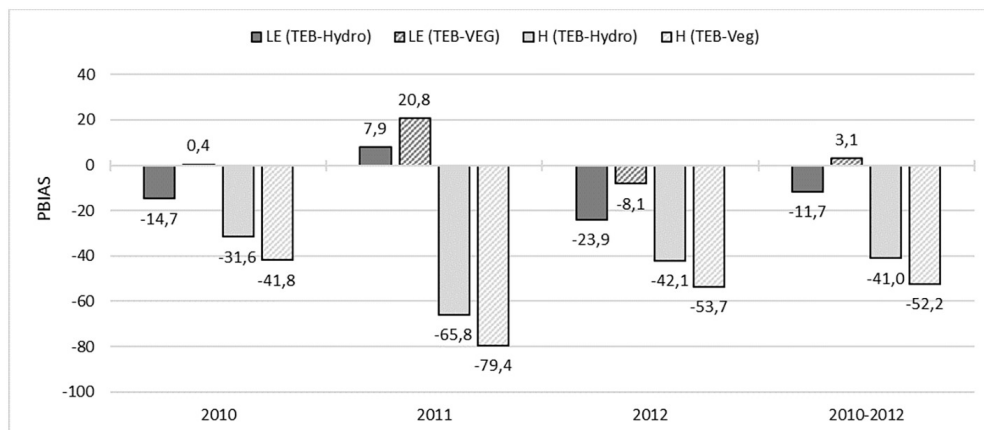


FIGURE II.4

Comparaison des valeurs de PBIAS calculés entre les flux de chaleur latente (gris foncé) et sensible (gris clair) observés et simulés par TEB-Hydro (non hachuré) et TEB-Veg (hachuré). La période totale 2010–2012 (droite) et chaque année (gauche) sont détaillées. (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al., 2021).

dans le compartiment jardin, alors que dans les autres compartiments ces transferts n'ont lieu qu'entre les surfaces et l'atmosphère. De plus, le ruissellement de surface n'est plus collecté par les réseaux et le drainage profond dans le compartiment jardin n'est pas limité.

Concernant les flux de chaleur, TEB-Hydro et TEB-Veg affichent une forte surestimation des flux de chaleur sensible (41% et 52%, respectivement), en particulier la nuit (figure II.4). Mais TEB-Hydro améliore les pics durant la journée, en particulier au printemps et en été (figure II.5). Globalement, TEB-Veg a de meilleurs résultats que TEB-Hydro sur les flux de chaleur latente (−3.1% contre 11.7%). Si en hiver TEB-Hydro améliore fortement la simulation des flux de chaleur latente c'est au printemps et en été qu'ils sont dégradés.

La comparaison des teneurs en eau des jardins, simulées par TEB-Hydro et TEB-Veg et observées, montre encore une fois que si la dynamique dans le temps est bien représentée, l'amplitude des variations de teneur en eau simulée par les modèles est trop faible (figure II.6). Elle l'est d'autant plus pour TEB-Hydro, qui a encore plus de difficultés que TEB-Veg à assécher les sols, au printemps et en été. Cela est dû à la limitation du drainage profond, mise en oeuvre dans TEB-Hydro. Cela montre que cette limitation, lors du calage, doit rester très faible, sinon il existe un risque de fortement dégrader le bilan énergétique.

La comparaison des rapports de Bowen pour les flux de chaleur observés et simulés par TEB-Hydro et TEB-Veg met en évidence malgré tout, l'apport des nouveaux développements pour améliorer le bilan en eau du modèle (figure II.7).

2 Mise en oeuvre de la modélisation hydro-climatique à l'échelle d'un territoire

Appliquer un modèle hydrologique à l'échelle d'un territoire, comme une agglomération, constitue un vrai défi. La taille du territoire implique que l'hypothèse forte que certains paramètres sont supposés homogènes, n'est plus tenable à cette échelle. Ainsi, les bassins versants étudiés peuvent avoir des comportements différents, alors que très peu sur le territoire sont généralement jaugés. De plus, coupler les processus multiplie les contraintes pour le modèle, rendant plus difficile son application.

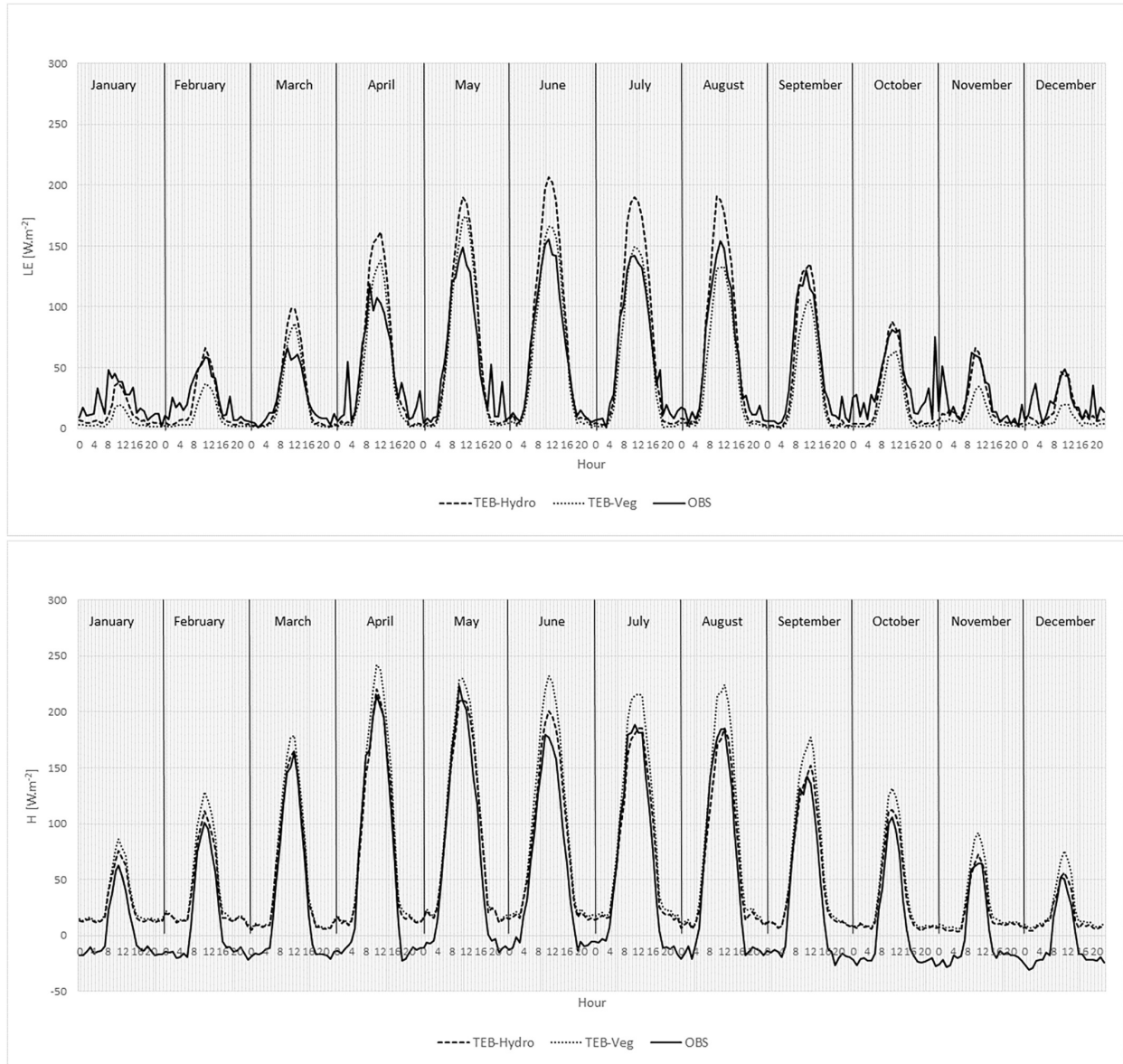


FIGURE II.5

Flux de chaleur latente (haut) et sensible (bas) horaires moyens par mois, de 2010 à 2012, simulés par TEB-Hydro (trait tireté) et TEB-Veg (trait pointillé) comparés aux observations (trait plein) (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al., 2021).

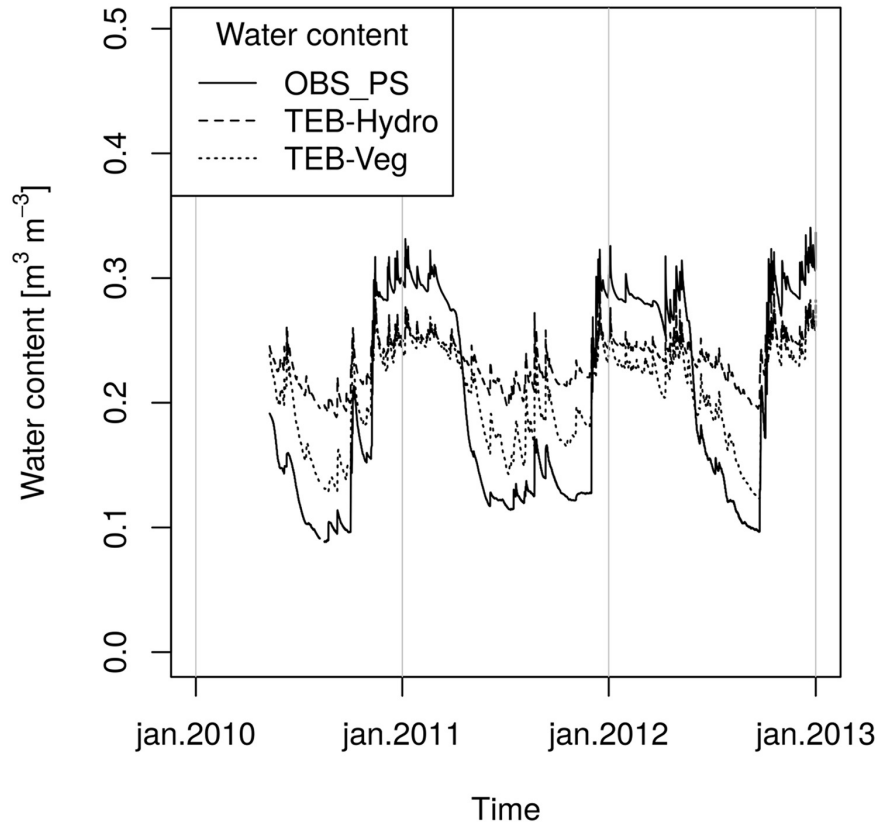


FIGURE II.6

Teneurs en eau observées (trait plein) et simulées par TEB-Hydro (tirets) et TEB-Veg (pointillés) de mai 2010 à décembre 2012 dans la sixième couche de sol du compartiment jardin (35cm de profondeur) (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al., 2021).

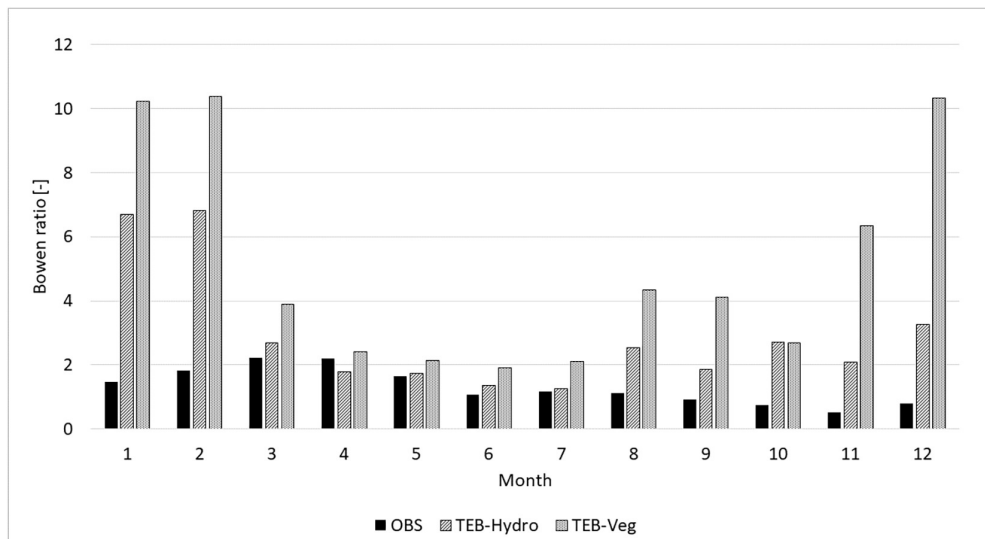


FIGURE II.7

Rapport de Bowen des flux de chaleur mensuels moyennés sur les trois années à partir des observations (noir), TEB-Hydro (gris hachuré) and TEB-Veg (gris). (STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al., 2021).

2.1 De nouveaux développements pour des pré-traitements indispensables

Appliquer un modèle hydrologique (ou hydroclimatique) à l'échelle d'une agglomération implique d'étudier plusieurs bassins versants en même temps. Ces bassins peuvent être de taille, pente et avec des occupations du sol différentes. Mais surtout ils peuvent être de nature différente : drainé par un réseau hydrographique strictement naturel ou strictement anthropique (d'eau pluviale ou unitaire) ou mélangeant les deux.

A l'échelle du Grand Paris (territoire appelé ainsi abusivement pour désigner la Ville de Paris et sa petite couronne constituée des départements des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne), une fonction de transfert simple a été choisie (E. BERNARD, 2021). La même approche géomorphologique mais sans le modèle de l'onde diffusive (partie I.2.2.b) a été appliquée. Cela est dû à la taille du domaine très large, au très grand nombre de bassins versants étudiés, qui demandaient en plus, un temps de calcul important. Par ailleurs, à l'occasion du phasage des paramétrisations hydrologiques de TEB dans la version 8 de SURFEX, le calcul des écoulements a été extrait de la plateforme et constitue désormais un post-traitement. Cela permet de faire tourner le code en mode parallélisé.

En revanche, la prise en compte des déversoirs d'orage avec la notion de déversoirs d'orage équivalents a été utilisée, permettant de prendre en compte le type de système d'assainissement (unitaire ou séparatif) (partie I.2.3.b). Cette approche présente plusieurs avantages. Le nombre de déversoirs d'orage, à l'échelle d'une agglomération, peut représenter un vrai frein pour la modélisation hydrologique, surtout du point de vue du nombre de paramètres à caler supplémentaires que cela implique. Le choix des déversoirs d'orage équivalents doit s'accompagner d'une connaissance assez fine de l'activité des déversoirs d'orage au cours d'une année. En effet, généralement dans une agglomération un nombre non négligeable de déversoirs d'orage ne déversent que très rarement. Cette connaissance, si elle s'appuie sur les équipes gestionnaires du réseau est d'autant plus riche.

Face à un si grand nombre de déversoirs d'orage (quatre-vingt huit), E. BERNARD (2021) a dû faire des choix quant aux déversoirs d'orage équivalents à sélectionner. Les informations collectées auprès des gestionnaires des réseaux d'assainissement et la qualité de la reconstruction des réseaux en amont ont été les critères principaux. Le choix a été fait de créer un déversoir d'orage équivalent par bassin versant jaugé et retenu pour le calage. La façon dont les débits seuils des déversoirs d'orage équivalents ont été estimés est décrite dans la partie suivante.

Pour caler le modèle, sur ces différents bassins versants, des données débitmétriques sont nécessaires. Compte-tenu des caractéristiques du modèle TEB-Hydro, les débits unitaires mesurés devront être pré-traités pour extraire le signal d'eaux usées et ne conserver que les eaux pluviales et le drainage de l'eau du sol par les réseaux (annexe A). Malheureusement, tout le territoire n'est pas couvert par suffisamment de capteurs permettant de n'avoir que des bassins jaugés. C'est pourquoi en s'inspirant des méthodes de calage par régionalisation en milieu rural, une nouvelle méthode de calage a été développée pour le milieu urbain (E. BERNARD et al., 2023) (annexe B).

Les scores obtenus, en période de calage, indiquent des performances peu satisfaisantes, selon les critères de MORIASI et al. (2007). Ce qui n'est pas très encourageant pour la phase d'évaluation à suivre, produite sur des périodes distinctes. Mais ces scores peu encourageants ne distinguent pas les faibles performances du modèle des erreurs de reconstruction du réseau (qui peuvent conduire à une surestimation ou sous estimation de la surface drainée), ni des modifications de fonctionnement du réseau, en lien par exemple avec des activités de maintenance.

2.2 Evaluation du modèle

Le modèle TEB, sur la base des valeurs des paramètres calés, a été appliqué sur l'agglomération parisienne, sur une période plus longue que celles de la phase de calage. E. BERNARD (2021) a comparé de nombreuses variables simulées par le modèle, mais non utilisées lors de la phase de calage, aux mêmes variables observées : températures minimales et maximales de l'air, humidité de l'air, déversements, température et humidité du sol, flux de chaleur latente et sensible et de conduction. Le débit a aussi été étudié. Ces analyses ont été menées à l'échelle du domaine de simulation, ou à l'échelle très locale de stations météorologiques, situées en périphérie de l'agglomération, en milieu peu urbanisé, voire rural.

L'évaluation des température et humidité de l'air simulées à 2m, à l'endroit des stations météorologiques, indique une bonne cohérence entre les simulations et les observations. La dynamique annuelle est bien représentée. Une légère surestimation, plus marquée sur le site rural, est observée. La comparaison maille à maille, avec une résolution de 1.4km , des températures minimales et maximales journalières simulées et observées (spatialisées par interpolation des données de stations de mesure de l'agglomération parisienne) met en évidence que la surestimation est principalement due aux températures minimales, en zone rurale l'été et urbaine l'hiver. Les températures maximales sont quant à elles surestimées en zone urbaine seulement l'hiver. Les surestimations sont comprises entre 1 et 2°C .

Les caractéristiques du sol, à l'endroit des stations météorologiques, indiquent une mauvaise représentation de l'humidité du sol, entre 0 et 20 cm de profondeur, avec une amplitude de l'humidité trop faible, limitant trop les humidités les plus fortes. Cependant la dynamique est bien représentée. Ce résultat a régulièrement été mis en évidence, lors des évaluation du schéma de sol ISBA, dans nos précédents travaux (parties I.2.3.a et II.1.3).

Les flux de chaleur latente sont sous estimés, en particulier l'été et de façon plus prononcée à la station rurale. Au contraire, les flux de chaleur sensible sont surestimés, dès le printemps.

Globalement les débits simulés sur les différents bassins versant retenus après la phase de calage donnent des scores NSE et $PBias$ insatisfaisants, selon les critères de MORIASI et al. (2007) (tableau II.1). Seuls deux bassins versants indiquent un $NSE > 60$ et un $-10\% < PBias < 10\%$. Et un bassin versant a un $NSE > 70$ mais un $Pbias$ proche de 25%.

Cependant, les critères de MORIASI et al. (2007), permettant de déterminer si un modèle est très bon, bon, satisfaisant ou non satisfaisant, sont-ils vraiment adaptés à une telle étude ? En effet, si les valeurs des scores obtenues ne sont pas à questionner, leur qualification en revanche mérite peut-être d'être revue au regard de la complexité de la zone étudiée, par sa taille, le nombre de bassins versants et leur diversité. En effet les études sur lesquelles MORIASI et al. (2007) se sont basées ne regroupent pas autant de sources d'incertitudes et donc d'erreurs potentielles. Peu de base de données encore aujourd'hui offrent une description complète et rigoureuse du réseau d'assainissement. Sa reconstruction, semi-automatique, nous le savons a été source d'erreurs (partie III.3.2. Nous avons fait le choix de limiter au maximum les corrections manuelles, afin d'évaluer la méthode de reconstruction, pour la modélisation hydrologique. Certains bassins versants sont ainsi très mal reproduits, en particulier au sein de Paris, ainsi qu'au sud des Hauts de Seine et dans le Val de Marne. Les données débitmétriques à notre disposition n'étaient pas toutes d'une qualité exemplaire ou bien mettaient en évidence des choix de fonctionnement du réseau variables sur les périodes étudiées (partie II.2.1), impossibles à prendre en compte dans la modélisation. Nombre de données ont été écartées. Cependant, nous avons parfois dû être moins exigeantes, face au besoin d'avoir un nombre suffisant de bassins versants jaugés pour mener à bien le calage. Enfin, simuler une zone aussi étendue avec un si grand nombre de bassins versants empêche de maîtriser dans le détail le fonctionnement de chaque bassin, comme cela peut-être le cas lors d'études avec un seul bassin versant.

Pour les études suivantes de ce type (BETOU, 2024), il apparaît primordial d'intervenir manuel-

Classe	Nom du bassin versant	NSE (-)	PBias (%)	R^2 (-)
1	OVMUMU EP	0.26	31.35	0.58
1	PV EP (2002)	0.68	-6.98	0.66
1	PV EP (2014)	0.21	4.66	0.64
3	DESB8	0.64	10.85	0.87
3	CABR16	0.02	13.01	0.71
3	CABR24	0.24	52.62	0.56
4	CAAR16	0.32	54.44	0.72
4	CAAR18	0.26	73.91	0.68
4	LAS10	0.32	77.06	0.73
5	DES2BR11	0.76	24.28	0.87
5	KREM025	0.34	77.53	0.69
5	SARR38	0.47	50.08	0.76

TABLE II.1 – Synthèse des scores obtenus pour TEB-Hydro, sur les différents bassins versants du Grand Paris. D'après E. BERNARD, 2021.

lement, lors de la reconstruction du réseau d'assainissement, si nécessaire. Cependant, avec cette étude, E. BERNARD (2021) a mis en évidence les capacités du modèle à simuler diverses variables, que peu de modèles sont capables de simuler en même temps, à cette échelle spatiale, en mode continu, sur de longues périodes.

2.3 Analyse hydro-climatique à l'échelle d'un territoire

L'objectif des développements dans le modèle TEB est de faire un pas vers une analyse plus systémique de la ville, en étudiant plusieurs enjeux à la fois. Cet outil est ainsi capable de caractériser la réponse d'un large territoire à un régime climatique ou à un forçage météorologique. Cela doit permettre de mieux identifier les risques auxquels ce territoire doit ou devra faire face, pour mieux en évaluer les stratégies d'adaptation. Cette approche systémique commence, avec cet outil, en couplant les bilans en eau et en énergie. STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al. (2021) ont d'abord montré comment le nouveau bilan en eau peut impacter le bilan énergétique, et conduit à limiter le paramètre de limitation du drainage profond, servant à mieux reproduire le drainage de l'eau du sol par les réseaux.

Suite au calage et à l'évaluation du modèle, E. BERNARD (2021) a fait un exercice délicat en croisant sur un même territoire des indicateurs hydrologiques et microclimatiques, à des échelles spatiales et temporelles différentes. Ainsi aux échelles saisonnières, l'humidité des sols (SWI), pour caractériser la sécheresse, l'intensité de l'ICU et l'UTCI (température perçue) pour le confort thermique l'été, les déversements du réseau vers le milieu naturel pour les enjeux de pollution et le ruissellement de surface pour la gestion des eaux pluviales ont été analysés, à l'échelle des domaines simulés. Et à l'échelle événementielle, les canicules de 2003 et 2015, ainsi que l'événement pluvieux record des 9 et 10 juillet 2017 ont été étudiés respectivement à l'échelle du domaine simulé et à l'échelle des bassins versants. Des cartographies de synthèse de la vulnérabilité du territoire ont été produites, en sélectionnant les indicateurs tels que le SWI, l'UTCI nocturne, la fréquence et le volume de déversement par bassin, selon des seuils définis, ainsi que le quantile Q95 de la lame d'eau ruisselée mas horaire (les 5% des mailles qui ruissellent le plus) lors de l'orage de juillet 2017, (figure II.8).

Une telle analyse croisée à différentes échelles et pour différents enjeux démontre l'intérêt d'un tel outil couplant les bilans hydrologique et énergétique du milieu urbain. En effet, avec ce

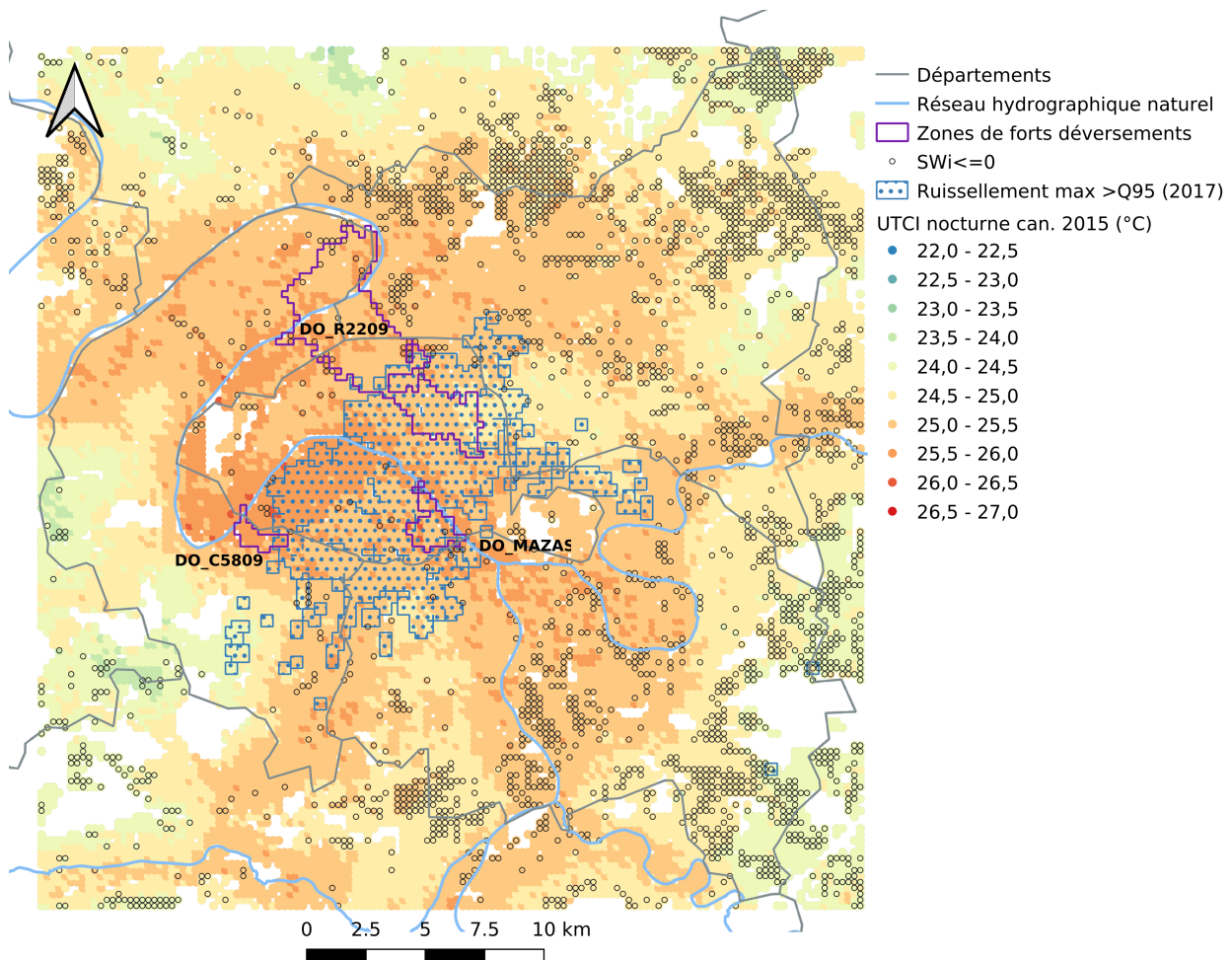


FIGURE II.8

Localisation des zones identifiées comme 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 supérieur au Q95 pour l'orage du 9 juillet 2017) et au stress thermique (UTCI maximal lors des nuits de la canicule 2015 du vert au rouge). (E. BERNARD, 2021).

type d'analyse et en augmentant le nombre d'évènements pluvieux importants, les gestionnaires et urbanistes peuvent identifier les zones les plus vulnérables du territoire. Cela peut les aider lors de la mise en place des documents réglementaires tels que le PLUi en identifiant plus précisément les objectifs à atteindre et les territoires où les cibler. Cette même analyse avec la prise en compte de stratégies d'adaptation telles que les solutions fondées sur la nature par exemple, permet en plus d'aider les décideurs à préciser le niveau de contrainte le plus adapté, selon les vulnérabilités à corriger.

3 Conclusion

Un modèle hydro-climatique, dédié aux villes, a été développé dans le cadre d'une collaboration étroite avec l'équipe VILLE de Météo-France/CNRS. Basé sur le modèle TEB, qui a, par ailleurs, connu diverses évolutions permettant d'améliorer le calcul des bilans énergétique et radiatif, ces développements ont permis l'amélioration de son bilan en eau des zones urbaines. Coupler les bilans hydrologique et énergétique, aussi détaillés l'un que l'autre dans un même modèle, devient essentiel, dans l'objectif d'évaluer les solutions diverses pour l'adaptation des villes à l'urbanisation croissante et au changement climatique.

Un premier travail d'évaluation du modèle à l'échelle d'un petit bassin versant a mis en évidence l'impact du nouveau bilan hydrologique sur le bilan énergétique. La difficulté de reproduire le processus de drainage de l'eau du sol par les collecteurs, avec un schéma de sol, fondé sur une approche agronomique, est mise en évidence avec le calage de l'un des paramètres qui peut altérer le flux de chaleur latente. Cependant, le flux de chaleur sensible est amélioré avec ces nouveaux processus.

Avec une application à l'échelle d'un large territoire, comme le Grand Paris, le modèle démontre la multiplicité des variables simulées et des indicateurs pouvant être calculés, aussi bien en continu sur de longues périodes qu'à l'échelle d'évènements extrêmes comme une canicule ou un orage intense. Le croisement des différents indicateurs pour différentes échelles temporelles peut permettre d'identifier les zones sensibles, voire à risque du territoire.

Avec le développement de cet outil, je poursuis les travaux entamés sur le milieu périurbain, par une approche intégrative spatiale et temporelle. La ville n'est plus étudiée sous un seul angle, oubliant ainsi les potentielles rétroactions d'un enjeu sur un autre. L'approche interdisciplinaire est ici privilégiée, par le croisement sur un seul territoire, à petite échelle (quartier) et à grande échelle (agglomération), de divers indicateurs. Ceci n'est bien sûr qu'une étape. Les solutions d'adaptation doivent pouvoir être simulées par le modèle. Par ailleurs, d'autres enjeux doivent être pris en compte (urbanisme, citoyens...) avec d'autres outils numériques, ou d'autres approches (enquêtes...)

Néanmoins, ce type d'outil nécessite un grand nombre de données, certaines facilement accessibles, alors que d'autres sont encore aujourd'hui peu disponibles. Il est alors important, pour ces données, d'identifier le niveau de détail et de précision nécessaires au modèle.

3. CONCLUSION

Valorisations & encadrements *

Nombre de post-doctorant.es ou CDD encadré.es	2
Nombre de doctorant.es encadré.es	4
Nombre de stagiaires encadré.es	2
Nombre de projets associés	3
Nombre d'articles dans des revues avec comité de lecture	4
Nombre de com. avec actes dans un congrès international	5
Nombre de com. avec actes dans un congrès national	3
Nombre de communications sans acte	6
Nombre de rapports techniques et scientifiques	2

* certains items peuvent être comptabilisés dans plusieurs chapitres

Chapitre III

Les besoins d'un modèle hydro-climatique en données d'entrée : à l'interface hydrologie et géographie

Ce modèle auquel j'ai contribué est capable de traiter, selon le même niveau de détails, les problématiques en lien avec la gestion des eaux pluviales et le confort thermique, en milieu urbain. Il permet d'analyser les enjeux présents ou ceux auxquels nous serons soumis, dans un futur plus ou moins proche (partie IV). Cependant, un tel outil devient complexe à mettre en oeuvre, en additionnant les contraintes inhérentes à chaque domaine. Ainsi il nécessite de nombreuses données en entrée, auxquelles il peut être sensible. Elles permettent de décrire l'occupation du sol, les réseaux hydrographiques naturels et d'assainissement (unitaire, eaux pluviales et eaux usées distincts) et le type de sol (argile, sable et limons). Par chance on a accès à de plus en plus de données en surface (images hyperspectrales, par exemple) et de plus en plus fines (images satellite à très haute résolution par exemple). Cependant, il reste encore des difficultés à construire les jeux de données d'entrée d'un tel modèle, par le choix des bases de données adéquates, ou par le croisement de celles-ci, par l'absence de données fiables en milieu urbain (texture de sol) ou par l'accès à des données sensibles et souvent mal renseignées (réseaux d'assainissement).

Par ailleurs, pour des études visant à évaluer l'impact d'une modification de l'occupation du sol, il est important de connaître la sensibilité du modèle aux différentes données d'entrée.

1 Sensibilité de la modélisation aux données d'occupation du sol

Le modèle ainsi développé peut être très sensible aux données d'occupation du sol que nous utilisons. Elles sont disponibles dans diverses bases de données dédiées ou non aux zones urbaines, à des résolutions spatiales variées. Bien souvent, il s'agit de croiser les bases de données entre elles sans qu'elles soient forcément cohérentes. Ces études de sensibilités ont été menées avec les différentes versions des modèles développés depuis ISBA-TOMODEL jusqu'à la version hydrologique de TEB.

1.1 Selon la base de données

POIRIER (2012) a étudié la sensibilité du modèle ISBA-TOPMODEL, à l'échelle du bassin versant de la Chézine. La plateforme SURFEX dispose d'une base de données ECOCLIMAP

(MASSON, CHAMPEAUX et al., 2003) qui a évolué depuis cette étude (FAROUX et al., 2013). Cette base de données, de résolution 1km, à l'échelle du globe, décrit le type d'occupation du sol et attribue un certain nombre de paramètres de surface nécessaires au modèle. Mais d'autres bases de données sont disponibles : Urban Atlas¹, Corinne Land Cover² et la base de données d'occupation du sol de Nantes Métropole, "OCS 2004" (tableau III.1).

Bases de données	Nombre de classes	Résolution spatiale ou plus petite entité	Année	Domaine couvert
ECOCLIMAP I	8	1km ²	2005	Monde
CLC 2006	8	250000m ²	2006	Europe
Urban Atlas	16	2500m ² (urbain) 10000m ² (rural)	2006	Monde
OCS 2004	25	500m ² (urbain) 2000m ² (rural)	2004	Nantes Métropole

TABLE III.1

Liste et caractéristiques des bases de données utilisées pour l'étude de sensibilité.
D'après POIRIER (2012).

La version de ISBA-TOPMODEL alors utilisée, nous obligeait à passer par la classification ECOCLIMAP, permettant d'initialiser ensuite plus facilement les paramètres secondaires en lien avec la végétation. Pour faciliter la comparaison entre les bases de données, une transposition de ces différentes bases de données dans la classification ECOCLIMAP (figure III.1) a dû être faite. Il apparaît qu'en plus d'une résolution très variable selon les bases de données, conduisant à une distribution différente de certaines classes, leur proportion diffère aussi clairement. La part des zones urbaines est plus faible avec ECOCLIMAP que pour les autres bases de données. Urban Atlas ne distingue pas les surfaces agricoles des prairies (French complex), contrairement aux autres bases de données. Enfin, la part de bois et forêts (Atlantique coast BF) est bien plus importante dans les bases de données les plus fines (Urban Atlas et OCS 2004).

Les simulations de la Chézine par ISBA-TOPMODEL à partir de ces différentes données d'occupation du sol et en initialisant les autres paramètres selon FURUSHO (2011) ont été produites. Le taux d'imperméabilisation défini pour les zones urbaines n'étant pas accessible pour certaines bases de données, il a été calculé à partir de la base de données de Nantes Métropole, conduisant à des incohérences sur certaines mailles. La comparaison des variables simulées par le modèle, selon le type de données d'occupation du sol utilisées, met en évidence la sensibilité du modèle en termes d'écoulements d'eau dans le sol (drainage profond et teneurs en eau des zones racinaire et profonde) et en surface (ruissellement rural et évapotranspiration). Ces processus sont en fait dépendants de paramètres secondaires définis à partir du type de végétation.

1.2 Croiser les bases de données

Les versions suivantes de la plateforme SURFEX permettent de ne plus passer systématiquement par la classification ECOCLIMAP. Il est donc possible de créer une description de l'occupation du sol, en termes de bâti, voirie, végétation urbaine haute et basse, végétation rurale et surfaces d'eau, à partir de différentes bases de données, puis l'outil, si on le souhaite, complète les valeurs de divers paramètres non renseignés, sur la base des données fournies par ECOCLIMAP,

1. <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2006>

2. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>

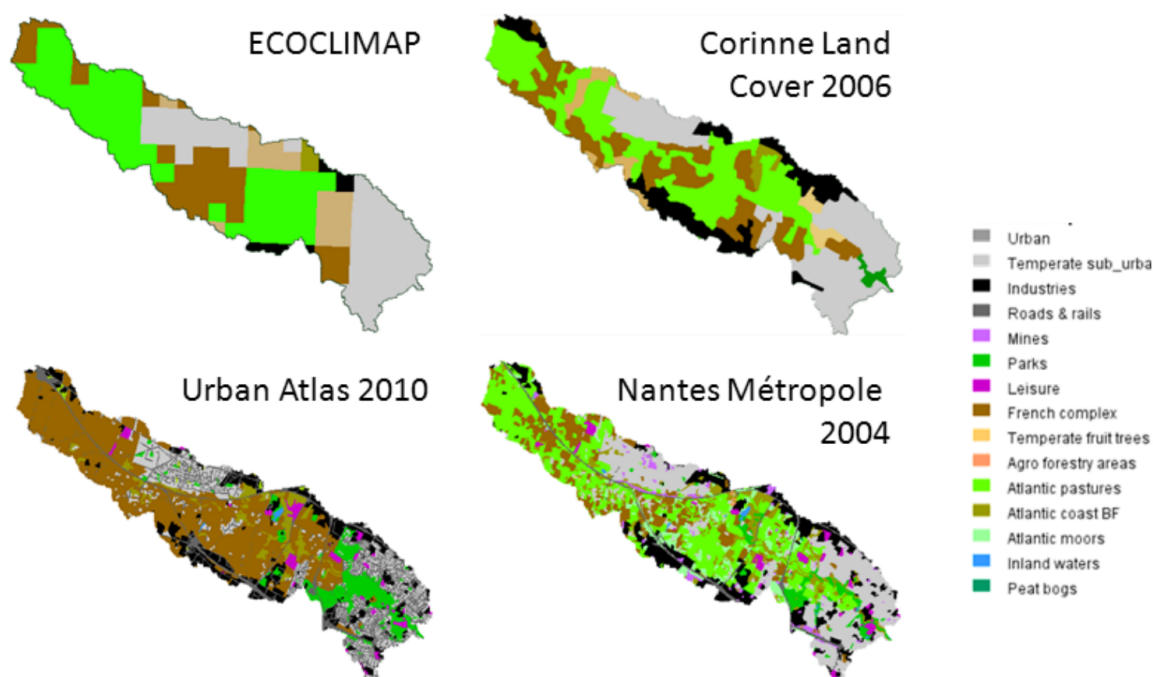


FIGURE III.1

Occupation du sol de la Chézine selon les bases de données ECOCLIMAP 2003, Corinne Land Cover 2006, Urban Atlas 2006 et la base de données de Nantes Métropole, après traduction selon la classification ECOCLIMAP. (Chancibault, RODRIGUEZ et al., 2014).

en lien avec l'occupation du sol fournie. ALLARD (2015) a ainsi décrit le territoire nord-est nantais, à partir des bases de données de Nantes Métropole, de l'IGN et de la BD Carthage et d'images satellite SPOT 2004 et QuickBird 2006 (LONG et al., 2014). Ces images satellite ont permis de mieux décrire la végétation urbaine, encore peu présente dans les bases de données. La classification des îlots urbains en USR de BOCHER et al. (2018) a aussi été utilisée.

BETOU et al. (2023) qui visent à étudier la réponse hydroclimatique de toute l'agglomération nantaise ont dû développer une méthodologie de construction de l'occupation du sol, plus élaborée. En effet, ne disposant pas de données satellite à l'échelle de tout le domaine étudié, ils ont créé une partition de l'occupation des sols à fine échelle à partir de bases de données nationales et publiques de l'IGN (BDTopo (2021) et OCS GE (2022)), une image hyperspectrale analysée mais ne couvrant qu'une partie du territoire (LAUNEAU et al., 2017), un modèle numérique de hauteur sur l'emprise de l'image hyperspectrale, la base de donnée de la collection végétale de Nantes Métropole mais qui ne couvre que le domaine public.

Après une mise en correspondance des différents thèmes de chaque source et leur hiérarchisation (choix de la source retenue si thème commun), les polygones vides résultants (Polygones non typés) ont été identifiés. Dans un premier temps, un taux surfacique de bâti, de voirie, de végétation basse et de sol nu, pour chaque PNT a été calculé avec l'aide de l'image hyperspectrale sur son emprise. Les taux d'occupation du sol de ces PNT ont été moyennés par USR (PETIT et al., p. d.), permettant ensuite de les appliquer à tout le territoire, en dehors de l'emprise de l'image hyperspectrale. La végétation haute, qui peut recouvrir la voirie et la végétation basse, a été identifiée de la même façon, avec l'aide du MNH, à l'échelle de l'image hyperspectrale. Elle a ensuite été extrapolée, sur la base des USR, en dehors de cette emprise (figure III.2).

Dans le cadre de son stage de master II, SAVARY (2023) a caractérisé l'incertitude de cette

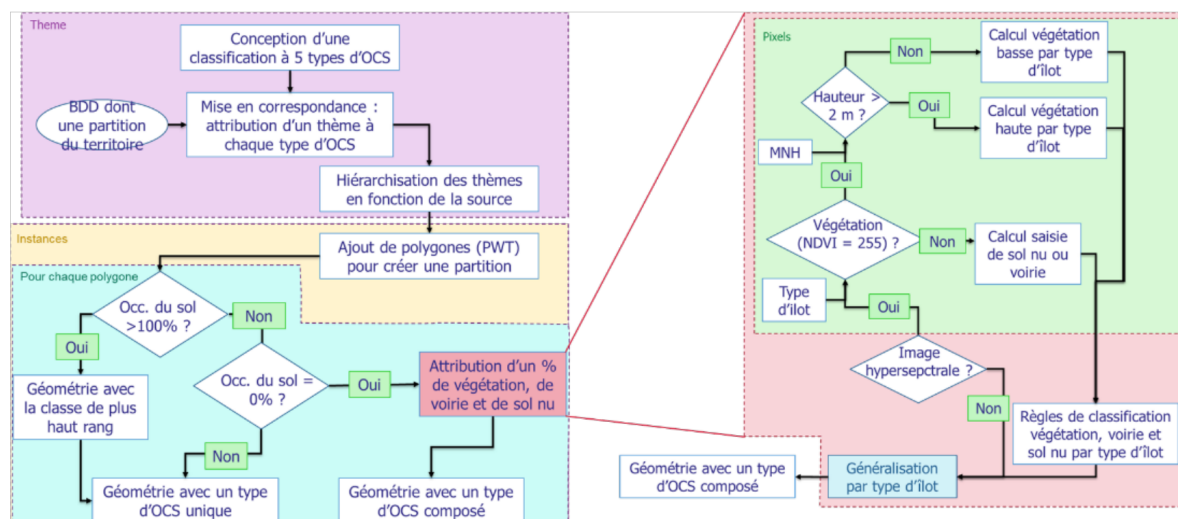


FIGURE III.2

Schéma synoptique de la méthodologie développée, pour créer une partition de l'occupation du sol à l'échelle de métropole nantaise. (BETOU et al., 2023.

partition de l'occupation du sol (figure III.3). Il apparaît que les incertitudes supérieures à + ou - 10% sont quasi inexistantes pour la végétation basse et plus présentes pour la végétation haute (surestimation). L'étude de la sensibilité du modèle TEB-Hydro à ces incertitudes met en évidence que le modèle y est peu sensible, indiquant que la partition a un niveau de qualité adapté au modèle. En revanche, dans une perspective de scénarios d'aménagement, cela donne une première idée d'une modification minimale (d'environ 10%) à analyser. La question étant si cette valeur de seuil est propre à ce modèle ou due à des raisons physiques.

Xenia Stavropoulos-Laffaille, en contrat post-doctoral en 2023 (projet MODELET), a aussi construit une partition de l'occupation du sol, à l'échelle d'un secteur de ville situé dans le nord-est de la ville de Nantes. L'objectif n'étant pas d'utiliser à priori les bases de données nationales, mais d'utiliser les meilleures données disponibles et la période étudiée étant centrée sur 2010-2012, les données d'occupation du sol produites par BETOU et al. (2023) n'ont pu être utilisées. Ainsi, elle a croisé la base de données parcellaire de Nantes Métropole (2013), la BDCarthage et l'image hyperspectrale (2015). Encore une fois, les incohérences entre les bases de données utilisées ont dû être prises en compte.

2 Sensibilité de la modélisation à la texture de sol

La texture du sol (fractions de sable, d'argile et de limon) impacte principalement les fonctions de pédo-transfert du modèle et c'est donc plus particulièrement le schéma de sol ISBA qui y est sensible. Ainsi GIANCOLA-MURZYN, 2010 a étudié la sensibilité du modèle ISBA-TOPMODEL à cette texture de sol, sur le bassin versant périurbain de la Chézine. A l'origine, sans donnée plus précise, le modèle utilise la base de données FAO, qui produit une texture de sol homogène à l'échelle du bassin. Des prélèvements de sols en divers endroits du bassin versant mettent en évidence des textures variant du limon sableux à un limon fin voire très fin alors que la FAO indique une texture de limon. GIANCOLA-MURZYN, 2010 a ainsi montré que pour un taux d'argile très faible (4%) ou moyen (entre 15 et 25%), la variation du taux de sable (respectivement de 55% à 72% et de 4% à 48%) n'a que peu d'impact sur les processus hydriques du modèle. En revanche, pour un taux de sable important (proche de 50%), la variation du taux d'argile a un impact sur

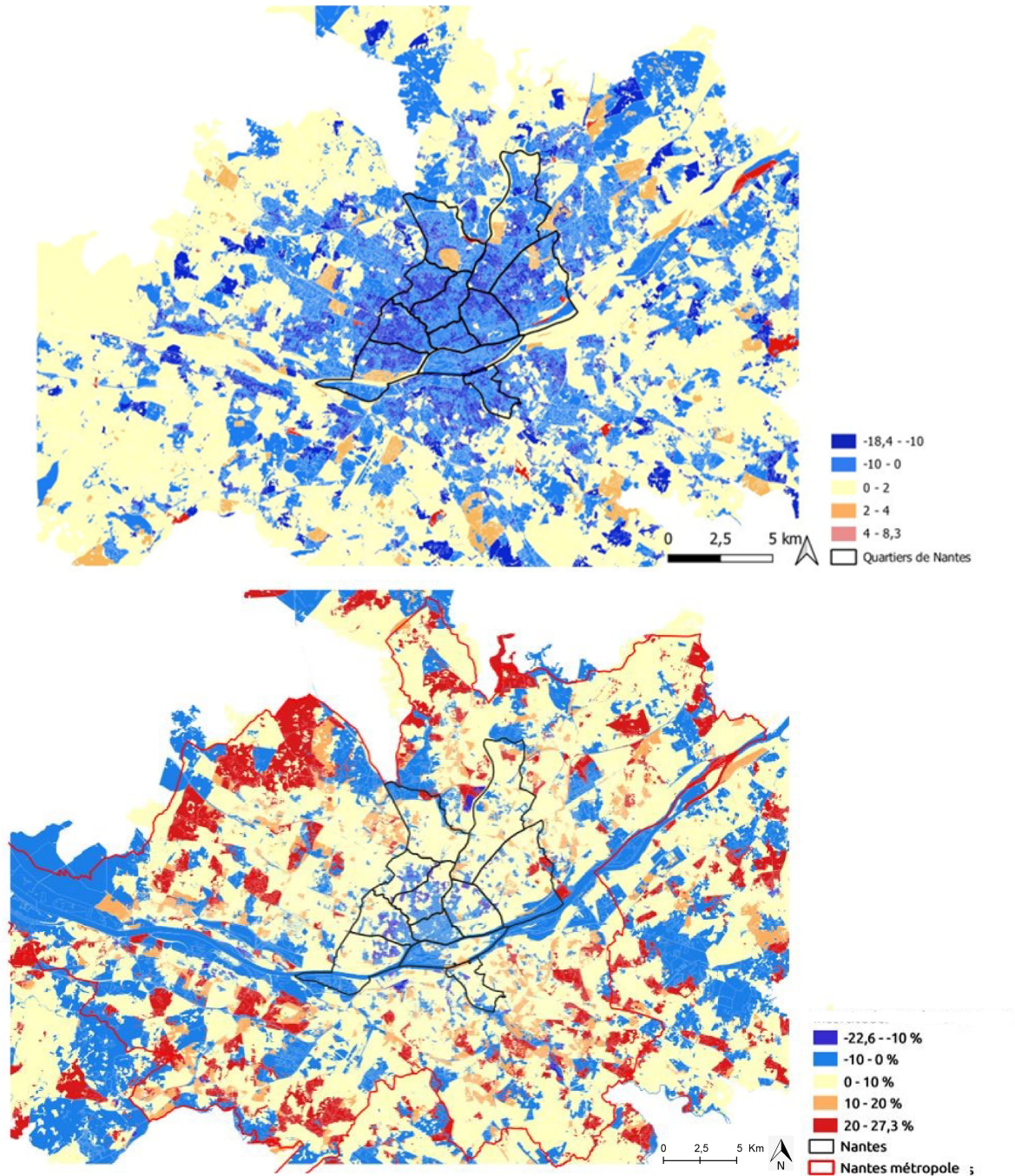


FIGURE III.3 – Incertitudes totales de la végétation basse (haut) et haute (bas) de la partition produite par BÉTOU et al. (2023). D'après SAVARY (2023).

3. LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT : QUELLES REPRÉSENTATIONS POSSIBLES ?

le débit de base, mais pas sur le pic de débit.

En utilisant différentes bases de données pour alimenter TEB, appliqué au Grand Paris, E. BERNARD (2021) confirme la sensibilité du modèle à la texture de sol et démontre l'importance de choisir une base de données de texture de sol la plus réaliste possible. Celles qui ont été étudiées sont :

- HSWD, nouvelle base de données de la FAO (FAO et al., 2012), de résolution 1 km, sur le premier mètre de profondeur. Elle couvre tout le globe.
- LUCAS, base de données européenne, à 500m de résolution, sur les 20 premiers centimètres de sol.
- SoilGrids, base de donnée mondiale, à 250m de résolution sur 7 profondeurs jusqu'à 2m. Cette base de données a été produite en Europe sur la base des données de LUCAS.

Cette sensibilité est visible même pour des bases de données proches entre elles (SoilGrids et LUCAS). La texture de sol peut avoir un impact sur plusieurs caractéristiques hydrologiques, déduites des fonctions de pédotransfert du modèle, et donc sur les processus physiques auxquels elles sont reliées. Ainsi, la réserve utile des sols peut être modifiée, impactant les plantes en particulier durant les périodes où l'eau est plus rare. Le drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement urbain, en lien avec le drainage gravitaire de l'eau dans le sol, est aussi impacté par la texture du sol via le potentiel matriciel et la conductivité hydraulique à saturation (E. BERNARD et al., 2023).

3 Le réseau d'assainissement : quelles représentations possibles ?

Le réseau d'assainissement contraint les écoulements de l'eau en milieu urbain. Les écoulements produits en surface comme le ruissellement rejoignent majoritairement ce réseau (d'eau pluvial ou unitaire), ainsi que les écoulements dans le sol, via les tranchées dans lesquelles ces réseaux reposent. Il collecte une part de l'eau du sol, dans les couches saturées, via le drainage. Ce réseau d'assainissement constitue donc le réseau hydrographique en milieu urbain, mais pas exclusivement. En effet le réseau d'assainissement est connecté de différentes manières au réseau hydrographique naturel. Le réseau d'eau pluviale se jette directement dans les cours d'eau, rivières et fleuve qui parcourent la ville. Les réseaux d'eaux usées et unitaires collectent et transportent les effluents vers la STEU, qui rejette les eaux traitées vers le réseau hydrographique naturel. Le réseau unitaire peut se déverser dans les rivières urbaines, lors de la mise en fonction des déversoirs d'orage dans le but de soulager la STEU, en cas d'événements pluvieux intenses. Les réseaux d'eaux usées sont plus rarement équipés en déversoirs d'orage. Notons que la réglementation limite toujours plus les volumes déversés vers le milieu naturel. Prendre en compte ces divers réseaux est donc primordial.

Plusieurs possibilités ont été étudiées. Avec ISBA-TOPMODEL, nous avons fait le choix de prendre en compte ce réseau hydrographique complexe (naturel, séparatif et unitaire) de façon implicite (FURUSHO, Chancibault et al., 2010). Le réseau est reproduit à l'échelle du MNT de résolution de 20m, par creusement (RODRIGUEZ, BOCHER et al., 2013). Pour le modèle TEB, nous avons choisi de le considérer comme un graphe orienté, mais en cohérence avec la résolution du modèle. Ainsi, un outil de reconstruction de ce graphe a été développé. Il permet d'obtenir un graphe arborescent, orienté, complet mais simplifié (en densité, principalement).

Pour le transfert des écoulements simulés par TEB-Hydro (partie I.2.2.b), il faut connaître les temps de parcours de chaque maille jusqu'à son exutoire direct et éventuellement jusqu'à son exutoire secondaire. L'exutoire secondaire existe dans le cas de la présence d'un déversoir

d'orage ou d'un maillage qui détourne, de temps en temps seulement, une partie des effluents. Malheureusement, les banques de données urbaines ne sont que trop rarement renseignées par le graphe orienté et arborescent des réseaux d'assainissement. Les ouvrages constituant d'un réseau d'assainissement sont bien localisés (conduites, regards, déversoirs d'orage, stations de pompage ou de refoulement) et leurs caractéristiques sont plus ou moins renseignées. Hélas, la connexion topologique de ces ouvrages entre eux est souvent manquante.

3.1 TOHR : Outil de reconstruction d'un réseau d'assainissement simplifié à l'échelle d'une agglomération

Un outil a donc dû être développé, en se basant sur les informations disponibles dans la plupart des banques de données urbaines, pour établir ces connexions topologiques. Par ailleurs, TEB-Hydro, comme tout modèle fonctionnant sur de grands domaines, simplifie fortement l'occupation du sol, en le segmentant à l'aide d'une grille à mailles régulières. L'outil doit donc simplifier le réseau d'assainissement, à l'échelle de la grille de TEB-Hydro et produire le graphe arborescent orienté du réseau hydrographique complet, comprenant le réseau d'assainissement (séparatif et unitaires) et le réseau hydrographique naturel en prenant en compte leurs connexions (via les déversoirs d'orage). Plutôt que de s'appuyer sur les méthodes de simplification existantes (ALLARD, 2015), il a été décidé de simplifier le réseau, en même temps que sa reconstruction.

Le graphe arborescent orienté est construit à partir d'un jeu de nœuds, associé à chaque maille de la grille, connectés les uns aux autres par des arcs. Les nœuds sont issus du jeu de données des regards du réseau existant. Les arcs orientés du graphe sont basés sur les pentes et sur l'élément cible du réseaux reconstruit (cours d'eau ou STEU). Dans la suite, nous appellerons ce graphe orienté produit par TOHR, le réseau reconstruit.

Les principes de TOHR s'inspirent des règles de base de construction d'un réseau d'assainissement. Ainsi les distances sont limitées en favorisant les arcs les plus courts entre deux nœuds et en cherchant à se rapprocher de la STEU ou du réseau hydrographique. Les écoulements gravitaires sont favorisés, sauf en cas de présence d'un ouvrage spécifique (stations de pompage, de relèvement ou de refoulement). Les déversoirs d'orage sont connectés au réseau naturel le plus proche en aval. Les STEU constituent des exutoires finaux des réseaux unitaires et d'eaux usées.

Enfin, la reconstruction du réseau d'assainissement unitaire et d'eaux usées est dissociée de celle du réseau séparatif d'eau pluviale, car ces réseaux sont généralement non connectés. De plus, les réseaux unitaires étant plus anciens et généralement au centre de l'agglomération alors que les réseaux séparatifs sont plus récents et se trouvent souvent en périphérie. Il est ainsi prévu que le réseau d'eaux usées puisse se connecter au réseau unitaire avant de rejoindre la STEU, mais l'inverse n'est pas possible. Cette dernière règle est valide dans la plupart des agglomérations françaises de taille moyenne ou grande. Les travaux qui ont porté sur l'agglomération parisienne ont conduit à revoir cette règle (LOTFI, Chancibault et al., 2016a, LOTFI, Chancibault et al., 2016b).

Cette reconstruction s'articule finalement en trois étapes distinctes :

- i) la sélection des nœuds du réseau reconstruit parmi les regards existants, au sein d'une maille de la grille choisie, permettant la simplification du réseau, si nécessaire ;
- ii) la connexion des ouvrages spéciaux aux nœuds (DO, SR), qui ne sont connectés qu'aux réseaux d'eaux usées et unitaires (les stations de relevage du réseau d'eau pluviale ne sont donc pas considérées, ceci pouvant présenter une difficulté, selon la zone étudiée) ;
- iii) la connexion des nœuds entre eux, selon la règle d'un graphe arborescent : chaque nœud peut avoir plusieurs connexions amont mais une seule connexion aval.

3. LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT : QUELLES REPRÉSENTATIONS POSSIBLES ?

Une dernière phase consiste à projeter le graphe sur la grille du modèle hydrologique, ayant servi à simplifier le réseau reconstruit. Cette étape produit les limites des bassins versants définis par un nombre limité d'exutoires préalablement choisis. Elle associe de plus à chaque maille les informations nécessaires pour le routage des écoulements simulés par TEB-Hydro. N'oublions pas qu'une compréhension approfondie du fonctionnement du réseau que l'on souhaite reconstruire est nécessaire préalablement, auprès des équipes gestionnaire du réseau.

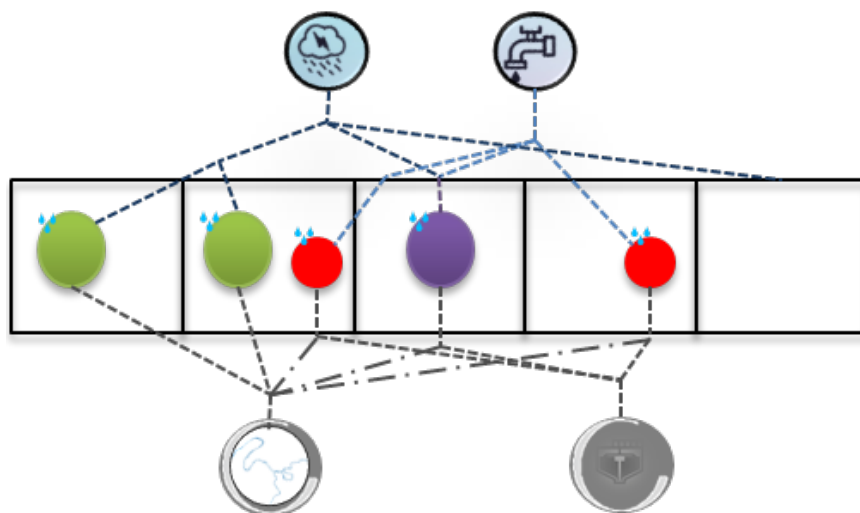


FIGURE III.4

Schéma des différentes configurations possibles des nœuds eau pluviale (vert), eaux usées (rouge), unitaires (violet) par maille, leurs sources (précipitations et eaux usées) et leurs exutoires finaux (réseau hydrographique naturel ou STEU). Les tirets indiquent les connexions standard et les tirets-pointillés les connexions potentielles (ALLARD, 2015).

Pour construire cet outil de reconstruction des réseaux (TOHR), des règles de fonctionnement ont préalablement été établies (figure III.4) :

- un seul système (unitaire ou séparatif) peut être connecté à une maille, le séparatif est généralement privilégié,
- un seul nœud par type de système d'assainissement est connecté à une maille (le plus bas dans la maille),

A l'issue de la reconstruction du réseau d'assainissement, nous obtenons un graphe orienté tenant compte des différents types de réseaux hydrographiques naturels et artificiels ainsi que de leurs connexions. Pour garantir la connexion de toutes les unités de collecte (les mailles de la grille) sur la zone, l'algorithme D8 (O'CALLAGHAN et al., 1984) est utilisé.

L'évaluation des réseaux ainsi reconstruits est délicate. Il y a bien sûr l'évaluation visuelle, mais qui est rendue plus ardue par la simplification souhaitée du réseau reconstruit. On compare alors deux éléments de toute façon différents, même si ils reproduisent les mêmes fonctions. C'est pourquoi une évaluation pertinente de la reconstruction d'un réseau, même simplifié peut cibler les fonctions plutôt que le réseau lui-même. Ainsi, comparer les aires drainées de deux réseaux différents peut permettre d'identifier certaines erreurs de reconstruction. Certaines agglomérations disposent des bassins de collecte de leur territoire (en eaux usées et/ou eaux pluviales). Cela n'est pas systématique. L'aire drainée par le réseau réel peut alors être déduite manuellement à partir d'une bonne connaissance et compréhension du fonctionnement du réseau. Ceci peut difficilement être fait à grande échelle, sans l'accès au graphe orienté qui permet un traitement automatique.

Enfin, l'évaluation peut encore être approfondie grâce à la traduction du graphe arborescent orienté, qu'il soit réel ou reconstruit, en une fonction largeur (KIRKBY, 1976). Celle-ci se rapproche de la fonction de transfert d'un bassin versant, sous certaines conditions, en particulier de vitesses constantes. Comparer les fonctions largeur de deux réseaux peut alors permettre de caractériser, dans une certaine mesure, l'impact potentiel des erreurs de reconstruction du réseau sur la simulation du débit. Cette approche nécessite donc le graphe orienté réel du réseau. Pour la fonction largeur, la simplification du réseau reconstruit peut être facilement prise en compte en ne comptabilisant que les regards sélectionnés pour le réseau reconstruit, dans la fonction largeur du réseau réel. Les deux fonctions largeur peuvent alors être identiques, si les connexions sont justes, malgré la simplification. L'outil de reconstruction de réseau d'assainissement a été développé dans un premier temps sur la base du jeu de données fourni par Nantes Métropole (ALLARD, 2012 ; ALLARD, 2015) puis enrichi et adapté dans le cadre du projet PIREN-Seine (Phase VII, 2015-2019) (LOTFI, Chancibault et al., 2016b ; Chancibault, MOSSET et al., 2019). Cette dernière version de l'outil a été appliquée à nouveau à l'échelle de Nantes Métropole, mais avec des données mises à jour depuis par la Métropole et de meilleure qualité.

3.2 Le réseau hydrographique du Grand Paris

La chaîne de transport des effluents depuis chaque parcelle jusqu'à une STEU, sur la zone étudiée est particulière car à trois niveaux : i) communal, ii) départemental et iii) interdépartemental. Par conséquent, les gestionnaires - et donc les interlocuteurs - sont multiples. Compte-tenu, de plus, de la taille du territoire (Paris et sa petite couronne) défini car étant celui auquel l'assainissement parisien (SIAAP, figure III.5) est organisé, nous avons choisi de nous affranchir du réseau communal, le réseau départemental étant assez dense pour couvrir presque toute la zone (LOTFI, Chancibault et al., 2016b). Ainsi, il a fallu prendre en considération cette chaîne de transport à travers la hiérarchisation des réseaux : le réseau départemental transfère les effluents vers le réseau interdépartemental, l'inverse ne pouvant se produire.

Ceci a conduit à une procédure de reconstruction en trois étapes (LOTFI, Chancibault et al., 2016b) :

- i) reconstruction du réseau interdépartemental, qui est de fait le réseau structurant du territoire.
- ii) Reconstruction de chaque réseau départemental séparément, mais à chaque fois connecté au réseau interdépartemental préalablement reconstruit.
- iii) Assemblage de tous les réseaux départementaux et interdépartemental en un seul jeu de données cohérentes (identifiants, pas de doublons, ...)

Une autre des particularités du réseau de Paris et sa petite couronne est l'existence de très nombreux maillages. On signifie par maillage une diffuence, c'est-à-dire un point du réseau d'assainissement où il est possible d'avoir deux destinations aval des effluents modifiant ainsi potentiellement (mais pas systématiquement) l'exutoire final des eaux, en particulier des eaux usées (/unitaires). Grâce à l'étude du réseau et aux entretiens avec les gestionnaires, certains maillages ont été ajoutés au réseau reconstruit pour le rendre plus conforme au fonctionnement réel du réseau (et parfois un maillage a été ajouté pour corriger une erreur de reconstruction, difficile à corriger autrement). Ces maillages sont finalement pris en compte dans la reconstruction et dans le calcul du routage, comme les déversoirs d'orage, sauf qu'ils ne sont pas connectés au réseau hydrographique naturel.

Les réseaux départementaux des Hauts-de-Seine (BEAUVAIS, 2017), de la Ville de Paris (OURRAI et al., 2019), du Val de Marne et de la Seines-Saint-Denis (Chancibault, MOSSET et al., 2019)

3. LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT : QUELLES REPRÉSENTATIONS POSSIBLES ?

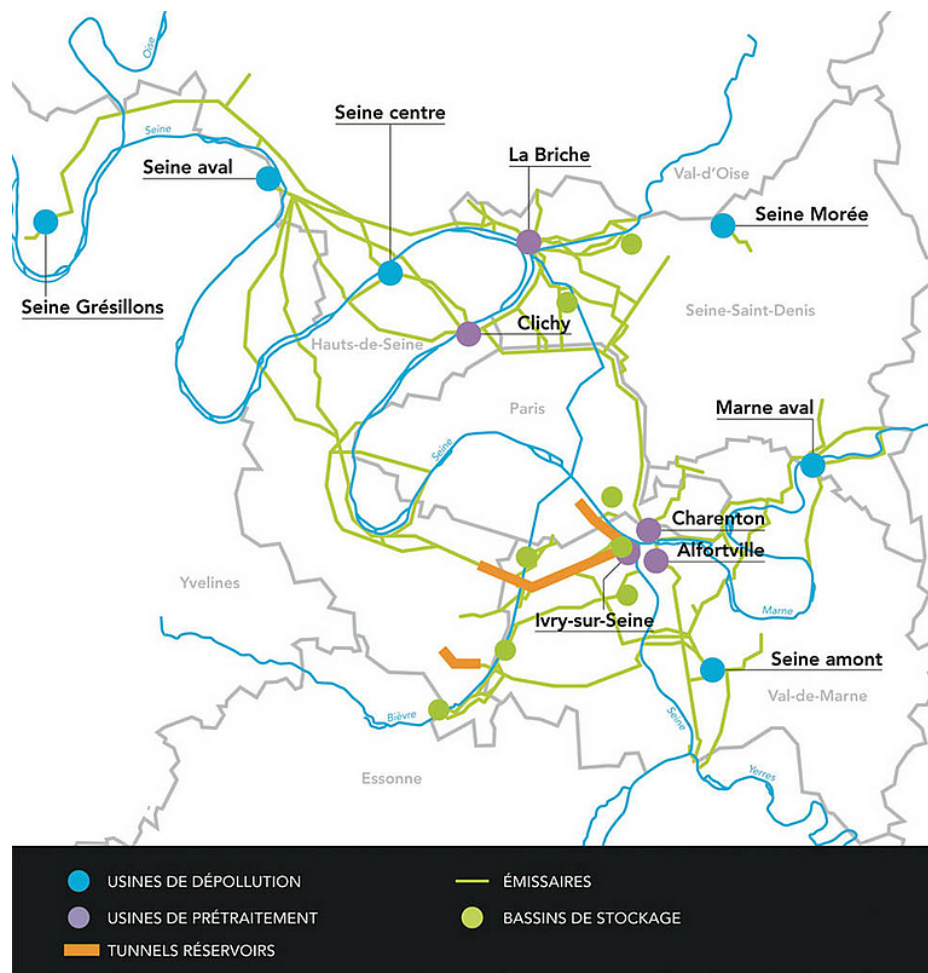


FIGURE III.5 – Réseaux et ouvrages interdépartementaux constitués des émissaires (traits verts), des tunnels réservoir (traits orange), des bassins de stockage (ronds verts), des usines de pré-traitement (ronds mauves) et des STEU (ronds bleus). <https://www.siaap.fr/le-siaap/missions/presentation/>

ont ainsi été reconstruits puis fusionnés (figure III.6). L'évaluation de la reconstruction montre des résultats variables selon les zones. Ainsi, le sud des Hauts-de-Seine est reconstruit de façon satisfaisante (comparaison des aires drainées). Le Val-de-Marne est assez complexe à reconstruire, avec la présence d'un système mixte (systèmes unitaire et séparatif qui se chevauchent ou sont proches) en certains endroits. La partie séparative de Seine-Saint-Denis donne aussi des résultats satisfaisants et la partie unitaire des résultats encourageants en de nombreux endroits. En revanche la Ville de Paris a été plus difficile à reconstruire, avec au nord-est, à l'intérieur du périphérique et au sud de nombreux mauvaises connexions. Mais la qualité des données ne nous a pas permis d'améliorer la reconstruction de façon automatique, malgré l'utilisation du réseau à l'échelle communal. Des échanges supplémentaires avec les gestionnaires seraient nécessaires.

Une fois le réseau reconstruit projeté sur la grille initiale (correspondant à celle de la modélisation hydrologique visée) et un certain nombre de points du réseau sélectionnés, les limites de bassins versants sont identifiables (figure III.7).

L'application sur un territoire comme Paris et sa petite couronne, en plus de permettre de généraliser les développements initiés à plus petite échelle, permet aussi d'élargir les applications possibles d'un tel outil. En plus de fournir les données nécessaires au routage des eaux au modèle

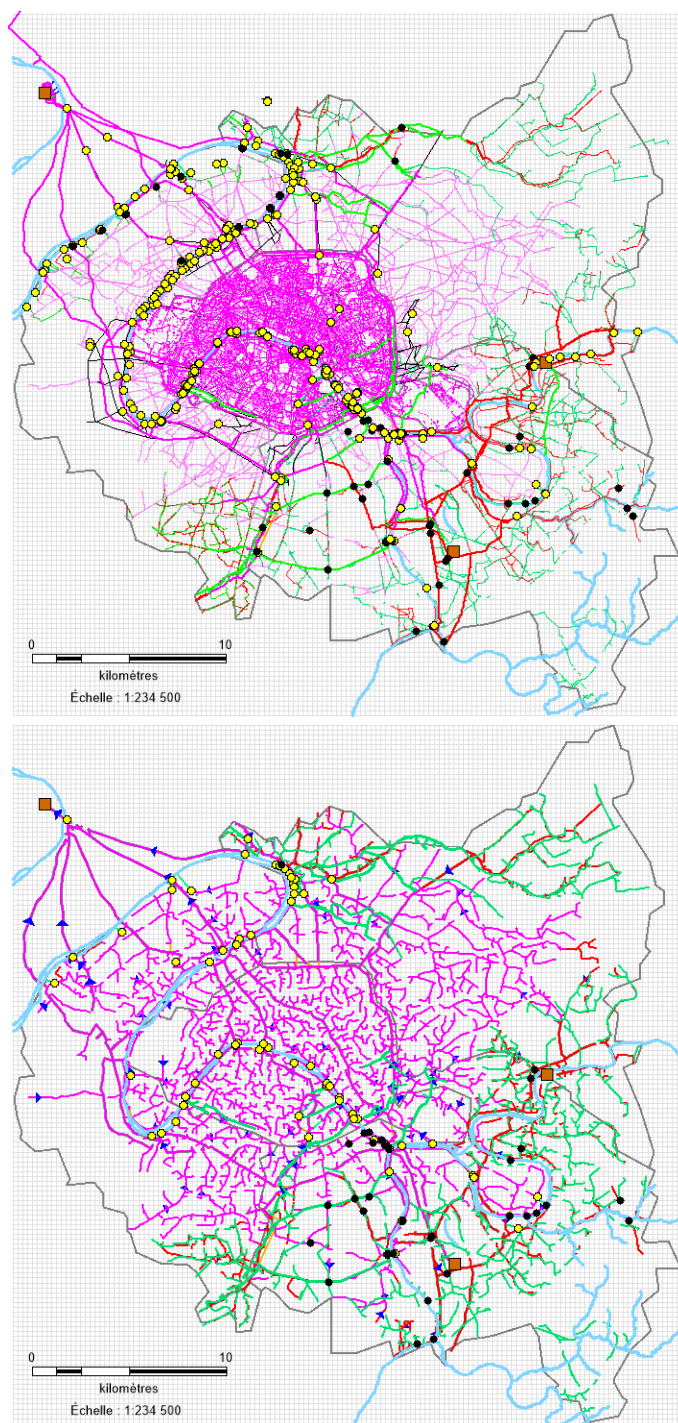


FIGURE III.6

Réseaux réels (haut) et reconstruits avec TOHR (bas) : collecteurs unitaires (fuschia), eaux usées (rouge) et pluvial (vert), interdépartementaux (épais) et départementaux (fin) sont identifiés. Les déversoirs d'orage (ronds jaunes), les STEU (carrés marron), les stations de relèvement (ronds noirs) et les maillages (traits orange) sont indiqués. Les réseaux réels sont les réseaux interdépartementaux et départementaux fournis par le SIAAP et les Conseils départementaux des Hauts-de-Seine, de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne et le réseau communal fourni par la Ville de Paris.

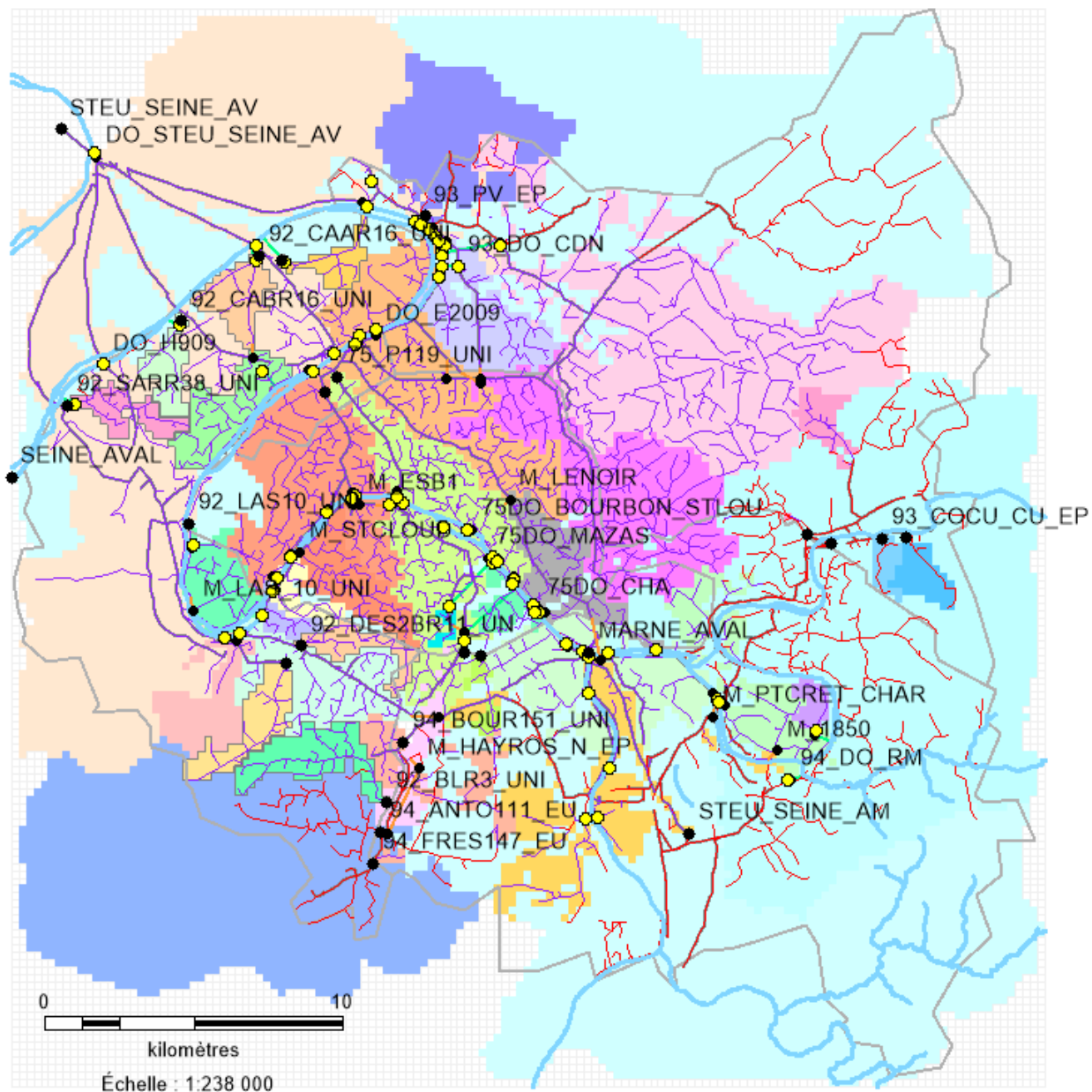


FIGURE III.7

Bassins versants délimités (surfaces colorées) selon les exutoires sélectionnés (points noirs et jaunes), sur le réseau reconstruit (EP (vert), EU (rouge), unitaire (fuschia)), DO (points jaunes), maillages (orange) ou sur le réseau hydrographique naturel (bleu), à l'échelle de Paris et sa petite couronne.

hydrologique TEB-Hydro, TOHR permet d'analyser à grande échelle la connexion des surfaces, selon le type de pluie qui peut déterminer la mise en fonction ou non de certains ouvrages (DO, maillages) (figure III.8).

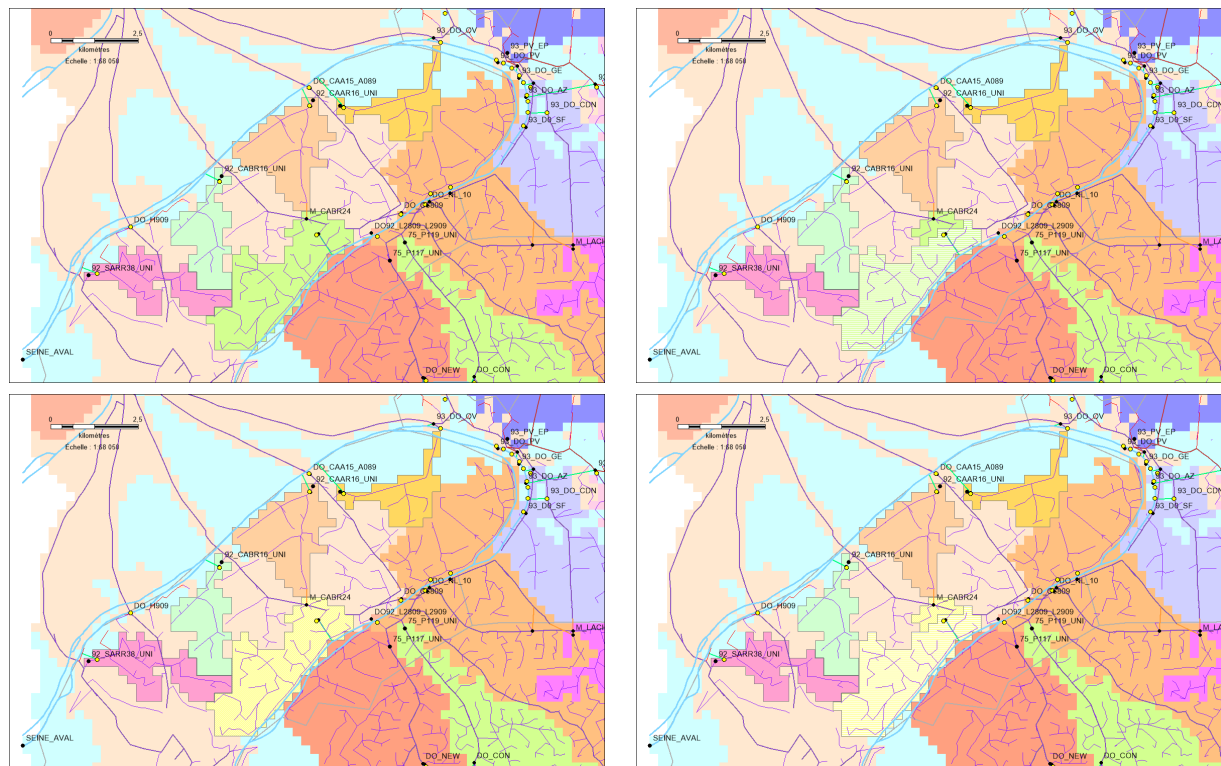


FIGURE III.8 – Évolution des surfaces contributives selon le régime de pluie. En fonctionnement normal, le bassin versant CABR24 (surface vert clair) s'écoule en totalité vers l'émissaire CAB (en haut à gauche) alors qu'en cas de forte pluie si tous les DO s'actionnent, la surface (hachurée en vert) contribue aux écoulements vers le CAB ainsi qu'aux écoulements en Seine (en haut à droite). En cas de mise en fonction du maillage, le bassin CABR24 (en jaune) contribue aux écoulements vers le CAB, mais aussi au débit mesuré en CAAR16 (en bas à gauche). Et si en plus les DO s'activent, alors la surface (hachurée en jaune) contribue aux écoulements vers CAB, vers CAAR16 et dans la Seine (en bas à droite).

Finalement, cette procédure, basée sur un réseau structurant auquel connecter le reste du réseau peut être appliquée sur des agglomérations de plus petite taille, où un réseau structurant est toujours présent, permettant ainsi d'améliorer la reconstruction.

3.3 Le réseau hydrographique de la ville de Nantes

Les premiers développements du modèle TOHR ont été faits sur la base des données fournies par Nantes Métropole et datant de 2013 (ALLARD, 2012; ALLARD, 2015). Ce jeu de données déjà très riche montrait cependant des incohérences entre les données, en particulier concernant les altitudes des radiers. Dans cette première version du code, ALLARD (2015) a tenté une approche un peu complexe, où la connexion des noeuds entre eux, dépendait des différents paramètres déjà

3. LE RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT : QUELLES REPRÉSENTATIONS POSSIBLES ?

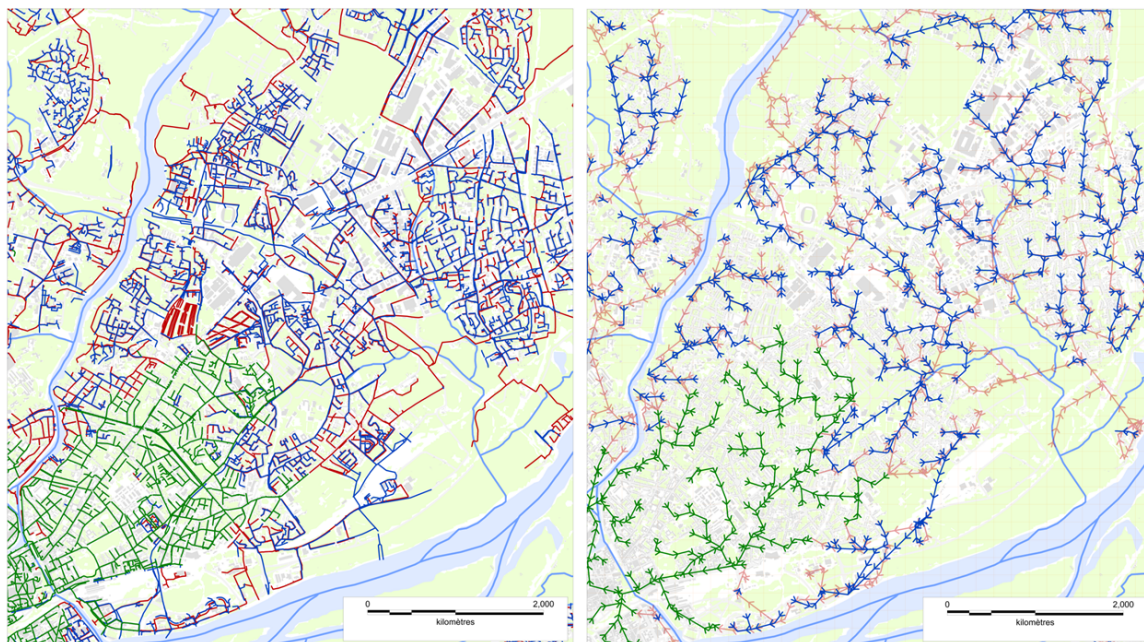


FIGURE III.9 – Comparaison des réseaux d'assainissement réels (à gauche) et reconstruits (à droite) unitaires (vert), d'eau pluviale (bleu foncé) et d'eaux usées (rouge), dans la partie est de la ville de Nantes. En fond de carte, le réseau hydrographique naturel (bleu clair) et les bâtiments sont représentés. (ALLARD, 2015)

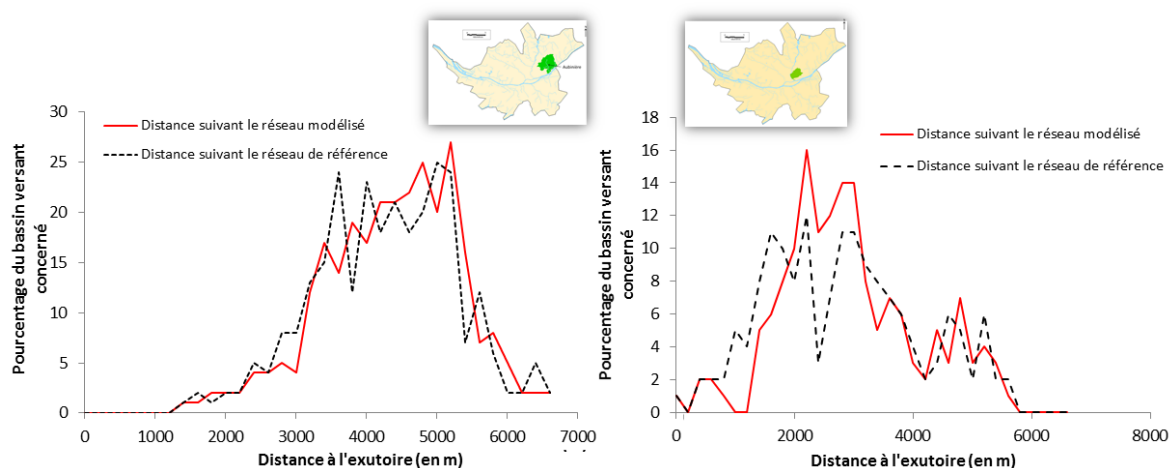


FIGURE III.10 – Comparaison des fonctions largeur des réseaux d'assainissement réels (noir pointillé) et reconstruits (rouge) d'un bassin versant d'eau pluviale (à gauche) et unitaire (à droite), dans la partie est de la ville de Nantes. Le bassin correspondant est localisé, dans chaque vignette. (ALLARD, 2015)

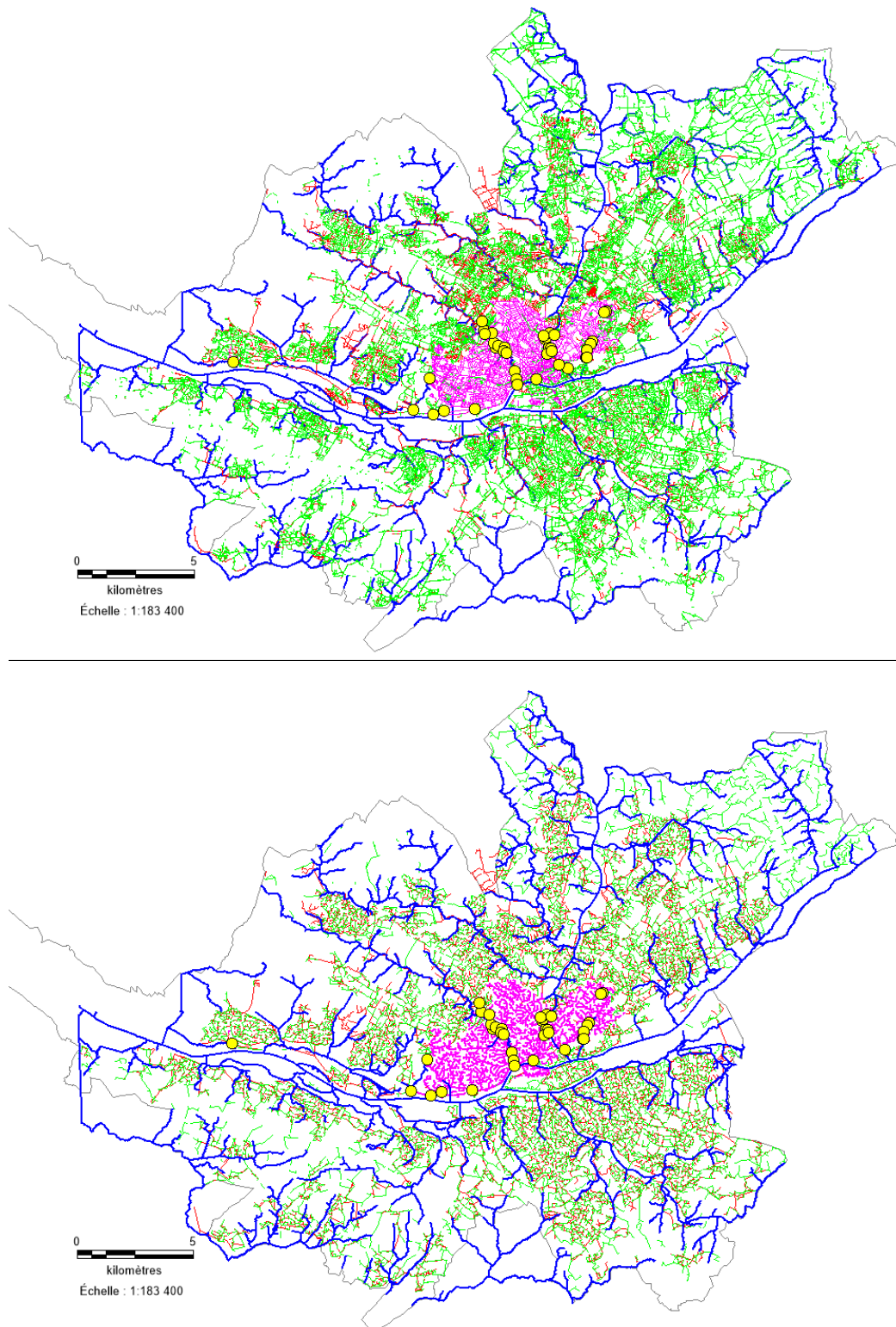


FIGURE III.11

Réseaux d'assainissement d'eau pluviale (vert) et unitaire (rose) réels (haut) et reconstruits (bas) de la métropole nantaise. Le réseau hydrographique (bleu) est issu de la BD Carthage. D'après BETOU (2024).

décrits (pente, distance à la STEU et distance entre les noeuds) mais qui pouvaient être pondérés, selon des coefficients à ajuster.

L'évaluation de la reconstruction du réseau d'assainissement de Nantes a été faite visuellement, mais la comparaison entre les réseaux réels et reconstruits est rendue difficile par la simplification de la reconstruction (résolution de la grille : 200m) (figure III.9). Comme les bassins de collecte n'ont pu être obtenus, l'évaluation a été faite à partir de fonctions largeur sur deux bassins versants d'eau pluviale (17 km^2) et unitaire (6 km^2) (figure III.10). La reconstruction du réseau du bassin d'eau pluviale est plutôt satisfaisante, avec les plus gros écarts à environ 4km de l'exutoire. En revanche, sur le bassin unitaire, les écarts de la reconstruction avec le réseau réel sont plus importants. Au-delà, de 4km la reconstruction semble plus satisfaisante. Ainsi, pour ce dernier bassin, la reconstruction du réseau d'assainissement risque de conduire à une surestimation du pic de débit.

Dans le cadre du projet MANIpUr, GUÉZÉNOG (2020) a ensuite appliqué la version simplifiée de TOHR (LOTFI, Chancibault et al., 2016b). Cette application, basée sur une grille de résolution de 200m, à l'échelle de la zone métropolitaine au sud de la Loire, a montré la difficulté de bien reconstruire le réseau pluvial, majoritairement séparatif sur cette zone. La zone en question est en effet drainée par de nombreux petits cours d'eau, conduisant à un réseau d'eau pluvial assez dense. Ainsi, une grille de résolution de 100m semblait plus appropriée.

Pour l'étude hydro-climatique de l'agglomération nantaise, (BÉTOU, 2024), la reconstruction du réseau d'assainissement complet à l'échelle du territoire métropolitain a donc été faite avec une résolution à 100m (figure III.11).

4 Conclusion

Connaître l'occupation du sol de façon détaillée est primordial pour l'application d'un modèle hydro-climatique, même pour un modèle dédié à l'échelle du territoire. En France, nous avons la chance d'avoir à notre disposition diverses bases de données de bonne qualité et avec une résolution pertinente pour nous permettre d'alimenter un tel modèle. Cependant, le croisement de diverses bases de données est souvent nécessaire, impliquant des pré-traitements assez lourds. Les données de végétation sont celles qui encore aujourd'hui manquent, surtout sur le domaine privé. En effet de plus en plus de bases de données locales, voire régionales se développent, mais parfois elles se limitent au domaine public. Pourtant les images satellite et aéroportées se développent de plus en plus. Le potentiel d'avoir des bases de données de la végétation plus complètes et systématiques, sur tout territoire, dans les prochaines années, est donc grand. Ainsi, la région Pays de la Loire prévoit très prochainement de renseigner la végétation à l'échelle du département de la Loire Atlantique, à partir de mesures Lidar.

L'autre donnée difficile à obtenir, car sensible, est celle concernant le réseau d'assainissement. Il faut convaincre les collectivités gestionnaires de partager ces données et encore souvent, les bases de données sont incomplètes ou parsemées de nombreuses erreurs ou d'incertitudes. Mais un outil de reconstruction d'un graphe orienté et arborescent du réseau hydrographique complet (urbain et naturel) a été développé. Il permet d'une part de synthétiser le fonctionnement du réseau (mise en action ou non des déversoirs d'orage et impact sur les surfaces drainées) et d'adapter la résolution du réseau à l'usage final de ce réseau.

Les différents travaux portant sur la construction de données nécessaires au modèle hydro-climatique mais aussi à la sensibilité du modèle à ces données (incertitudes ou modification) est complémentaire des travaux menés jusqu'ici. Ces travaux permettent de nuancer les conclusions issues des simulations du modèle, en prenant en compte l'incertitude de certaines données d'entrée. Mais aussi, ils nous aident à identifier vers quel niveau minimal d'évolution de l'occupation du sol on doit tendre, à partir de laquelle la sensibilité du modèle est négligeable.

Valorisations & encadrements *

Nombre de post-doctorant.es ou CDD encadré.es	3
Nombre de doctorant.es encadré.es	3
Nombre de stagiaires encadré.es	8
Nombre de projets associés	5
Nombre d'articles dans des revues avec comité de lecture	1
Nombre de com. avec actes dans un congrès international	8
Nombre de com. avec actes dans un congrès national	3
Nombre de communications sans acte	3
Nombre de rapports techniques et scientifiques	6

*certains items peuvent être comptabilisés dans plusieurs chapitres

Chapitre IV

Vers des études prospectives pour l'adaptation aux changements globaux : applications du modèle

Les processus hydrologiques étant développés dans le modèle et évalués, les solutions d'adaptation doivent à leur tour être intégrées, pour permettre la mise en oeuvre des applications du modèle. L'objectif *in fine* est pour rappel, l'évaluation des stratégies d'adaptation au changement global (urbanisation et changement climatique), déclinées en scénarios d'aménagement. L'adaptation en question ici doit s'inscrire dans une démarche d'atténuation du changement climatique, mais qui n'est pas abordée dans ces travaux, car faisant appel à d'autres compétences.

Certaines des solutions d'adaptation à disposition des décideurs existent déjà dans le modèle : toitures végétalisées (DE MUNCK et al., 2013), végétation urbaines comme arbres de rue, parcs (LEMONSU, MASSON et al., 2012). Cependant, le panel des solutions étant bien plus large, nombre d'entre elles manquaient encore. C'est pourquoi un travail important sur les solutions diverses à notre disposition aujourd'hui, par le biais des processus hydriques en jeu, a été mené dans le cadre d'une collaboration avec le LEESU (ENPC) (partie 1). Une réflexion sur la meilleure façon de représenter ces divers ouvrages dans un modèle comme TEB (échelles ouvrage/maille, connexion hydrique au sol, échanges énergétiques) a permis leur développement au sein du modèle. Leur évaluation est encore en cours.

La diffusion de ces solutions à l'échelle d'une ville ou d'un secteur de ville représente un autre défi. L'élaboration des scénarios d'adaptation, basés sur les différentes solutions à disposition des décideurs est une vraie problématique. Des méthodologies, pour développer les scénarios les plus pertinents, au regard des enjeux visés, mais aussi en tenant compte des particularités de la zone ciblée doivent être développées. Depuis des scénarios simples de végétalisation, avec une considération limitée des contraintes et caractéristiques du territoire étudié, jusqu'à la prise en compte des objectifs politiques des collectivités, déclinés dans les documents réglementaires, les approches évoluent (Partie 2).

Enfin l'évaluation de ces solutions ou ensemble de solutions ne peut se limiter à l'analyse de leurs performances sans la prise en compte du changement climatique. Ainsi, l'étude du climat futur, au travers des données des projections climatiques et de leur adaptation aux besoins temporels du modèle est présentée dans la partie 3.

1 Les solutions d'adaptation : vertes, grises, bleues...

Les solutions d'adaptation en question ici sont centrées sur les ouvrages de gestion à la source (OGS) (T. D. FLETCHER et al., 2015) qui permettent pour la plupart de limiter ou à minima de ralentir l'écoulement des eaux pluviales vers le réseau d'assainissement séparatif pluvial ou unitaire. Certaines peuvent même contribuer à un rapprochement vers le bilan en eau naturel, localement. Dans ce dernier cas, les processus de stockage et d'infiltration ou de stockage et d'évapotranspiration sont privilégiés. Ces dernières solutions s'appuient souvent sur la désimperméabilisation des surfaces, par la végétation et peuvent être appelées solutions vertes ou bleues quand le stockage d'eau est visible, car en surface. Mais il reste les solutions "historiques", maçonnées, généralement plus tournées vers le stockage en surface ou en souterrain, et non connectées au sol. Ce sont les solutions grises.

Les solutions vertes et bleues appartiennent à la grande famille des solutions fondées sur la nature, concept développé en Europe. Elles font partie des solutions d'adaptation aux changements globaux de plus en plus prisées. La difficulté avec ces solutions est qu'elles n'impactent pas que la gestion des eaux pluviales, mais aussi le confort thermique, les relations sociales, l'organisation des services des collectivités, la santé etc. Une évaluation pertinente nécessite par conséquent, d'englober tous les enjeux auxquelles elles répondent, ce qui est, encore aujourd'hui, (quasi) inexistant, même à l'échelle de l'ouvrage. De plus, ces solutions s'intègrent à un territoire et c'est la multiplication des différents types de solutions (vertes, grises, bleues) qui constitue la meilleure stratégie d'adaptation aux changements globaux. C'est pourquoi un modèle numérique, croisant plusieurs enjeux (*i.e.* gestion des eaux pluviales et confort thermique) et représentant ces différentes solutions est un des outils nécessaires pour améliorer l'évaluation de ces solutions. L'intégration de ces diverses solutions au sein de notre modèle hydro-climatique est donc une étape nécessaire pour pouvoir évaluer les stratégies d'adaptation des villes.

1.1 Développement d'une classification des OGS pour la modélisation

En gestion des eaux pluviales, ces solutions prennent divers noms (techniques alternatives, ouvrages de gestion à la source, solutions fondées sur la nature) et ne suivent pas une nomenclature bien précise. Ainsi, le terme de noue ne permet pas de savoir quel est le processus privilégié : transport, infiltration ou stockage. C'est pourquoi il existe de nombreuses typologies à disposition dans la littérature scientifique et technique (T. D. FLETCHER et al., 2015 ; ASKARIZADEH et al., 2015 ; CHOCAT et al., 2022). Cependant, ces typologies ont souvent été développées à des fins opérationnelles. Ainsi, par exemple les fonctions hydrologiques font rarement partie des critères de base. De plus, elles ne sont pas exhaustives et donc peu adaptées pour l'application d'un modèle à grande échelle. Afin de développer un schéma au sein du modèle TEB, reproduisant les écoulements d'eau et dans une moindre mesure les flux énergétiques propres à ces OGS, une typologie a dû être développée (TUNQUI NEIRA et al., 2023b).

Elle se base sur deux critères, importants dans un modèle hydrologique et en particulier le modèle TEB. Tout d'abord la fonction permettant la gestion du ruissellement collecté par l'ouvrage (réduction ou régulation) et déclinée en processus majoritaire (stockage, évapotranspiration, exfiltration...). L'autre critère est le type de structure de l'ouvrage (ouvert ou enterré) décliné en processus permettant la gestion du ruissellement collecté (percolation à travers un substrat, alimentation par surface minérale perméable...) (figure IV.1).

Les classes de cette typologie ont ensuite été formées en fonction des couches, ces couches pouvant être optionnelles (figure IV.1). Pour chaque classe d'OGS, une conceptualisation des processus à prendre en compte au sein de la classe a pu être produite, selon l'approche réservoir

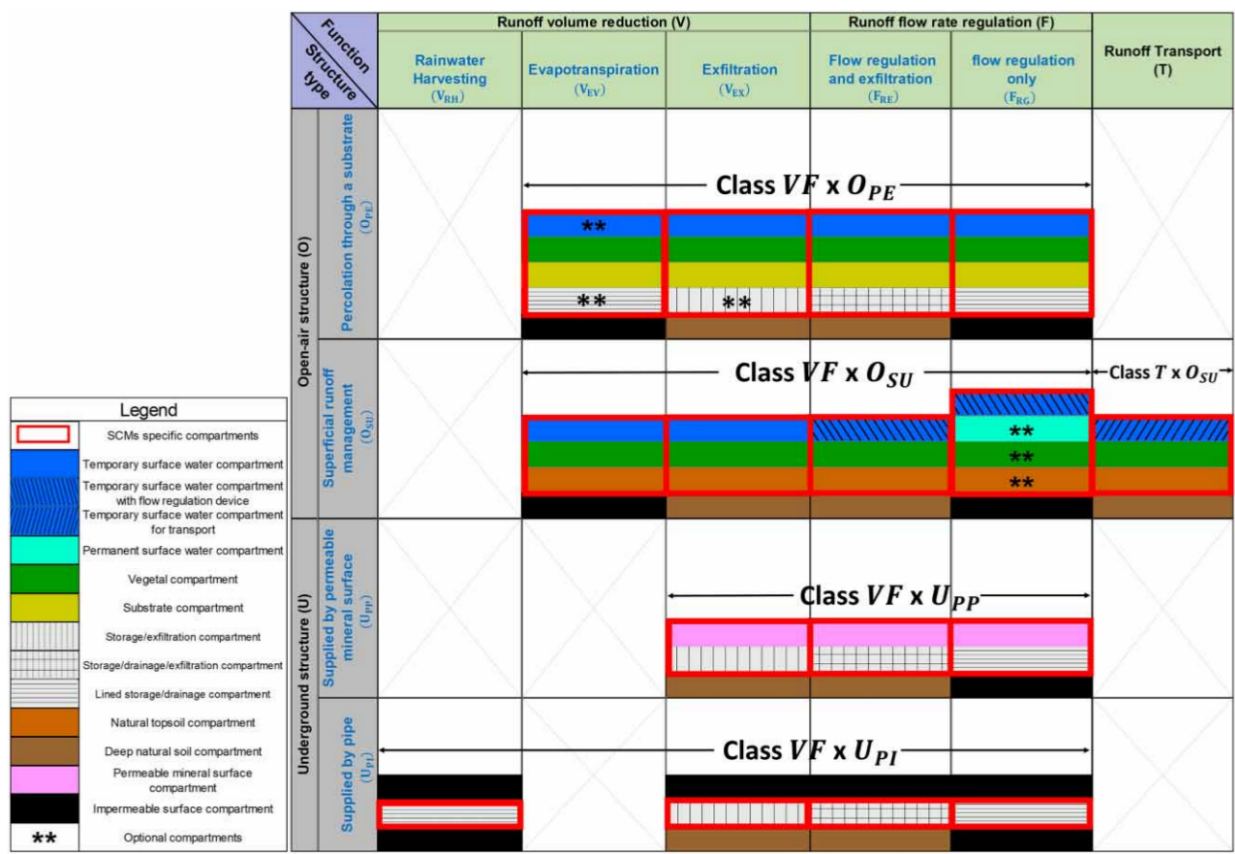


FIGURE IV.1

tableau croisé entre les deux principaux critères (fonction et type de structure) sur lesquels cette typologie d'OGS se base. Les compartiments de couleur dans les rectangles rouges constituent les différentes couches de l'OGS. Celles en dehors sont complémentaires pour un meilleur référencement des OGS. Les classes pouvant être formées pour une représentation synthétique de la conceptualisation des processus hydrologiques et réactifs des différents groupes d'OGS sont indiquées. (D'après TUNQUI NEIRA et al., 2023b)

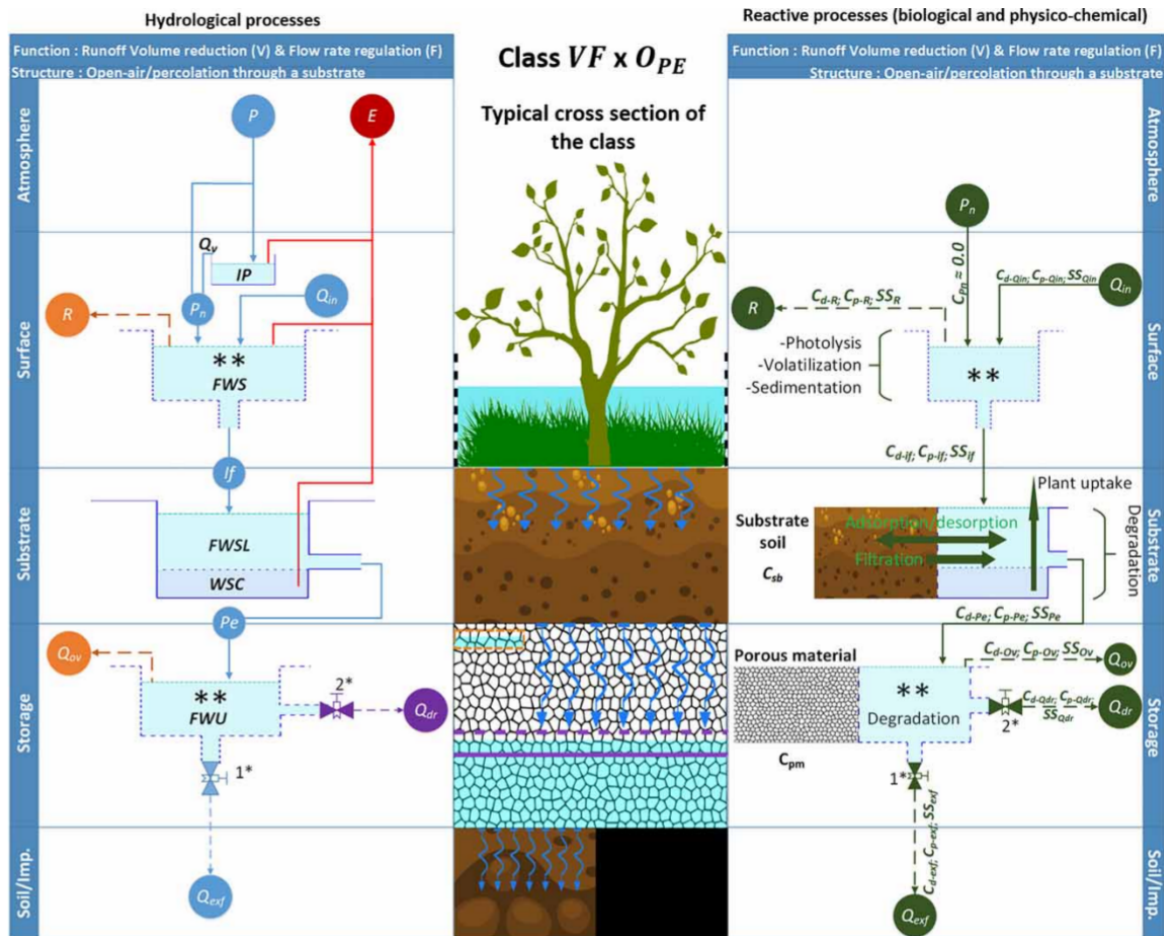


FIGURE IV.2

Conceptualisation des processus hydrologiques, biologiques et physico-chimiques de la classe $VF \times O_{PE}$ (voir figure IV.1). Les deux astérisques indiquent que le réservoir peut être optionnel. (D'après TUNQUI NEIRA et al., 2023b)

(TUNQUI NEIRA et al., 2023b). La figure IV.2 donne un exemple pour la classe $VFxO_{PE}$ de la figure IV.1.

1.2 La prise en compte de ces solutions dans le modèle TEB-Hydro

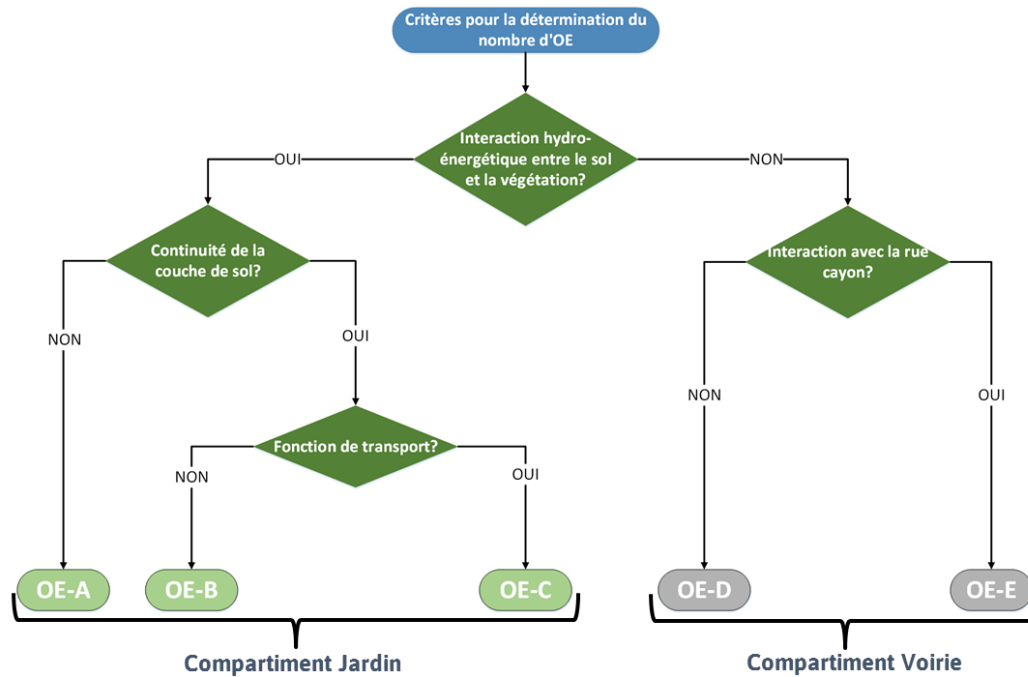


FIGURE IV.3

Critères utilisés pour former les ouvrages équivalents (D'après TUNQUI NEIRA et al., 2023a).

Il s'agit de réussir à prendre en compte au sein du modèle, un très grand nombre d'OGS, dans leur diversité d'application. En effet, le nom d'un OGS ne renseigne pas forcément sur son fonctionnement opérationnel. Ainsi une noue par exemple peut être un ouvrage où l'infiltration est privilégiée, limitant voire supprimant la fonction de transport ou au contraire être avant tout une noue de transport avec très peu d'infiltration. Le nature du sol, l'aire drainée amont, la densité d'urbanisation, sont autant de facteurs déterminant les fonctions opérationnelles d'un OGS. Ainsi dans la typologie, un même type d'OGS, mais avec des fonctions différentes (infiltration, transport, régulation...) peut être dans différentes classes.

Représenter chacun des OGS dans leur diversité d'application au sein d'un modèle fonctionnant à l'échelle de grands bassins versants urbains voire de la ville, est un vrai défi. Mais la typologie nous a permis de synthétiser ces différentes fonctions, pour regrouper les différents groupes d'ouvrages (un groupe d'OGS correspond à une case du tableau, figure IV.1) et constituer des ouvrages équivalents (OE). Pour cela, des critères ont été déterminés, basés sur les fonctions des OGS, mais aussi sur des critères en lien avec le fonctionnement du modèle hydro-climatique (figure IV.3). Cinq types d'ouvrages équivalents résultent de cette analyse. Grâce à la typologie et aux compartiments identifiées pour chaque groupe d'OGS, ainsi qu'aux schémas de conceptualisation des classes d'ouvrages, les réservoirs ou modules à considérer, les flux d'eau entre ces réservoirs et les flux entrants/sortants du système, ont pu être déterminés (figure IV.4). Le développement des schémas de ces ouvrages équivalents a conduit à la création de cinq nouveaux compartiments au sein du modèle (figure IV.5), encore en cours d'évaluation.

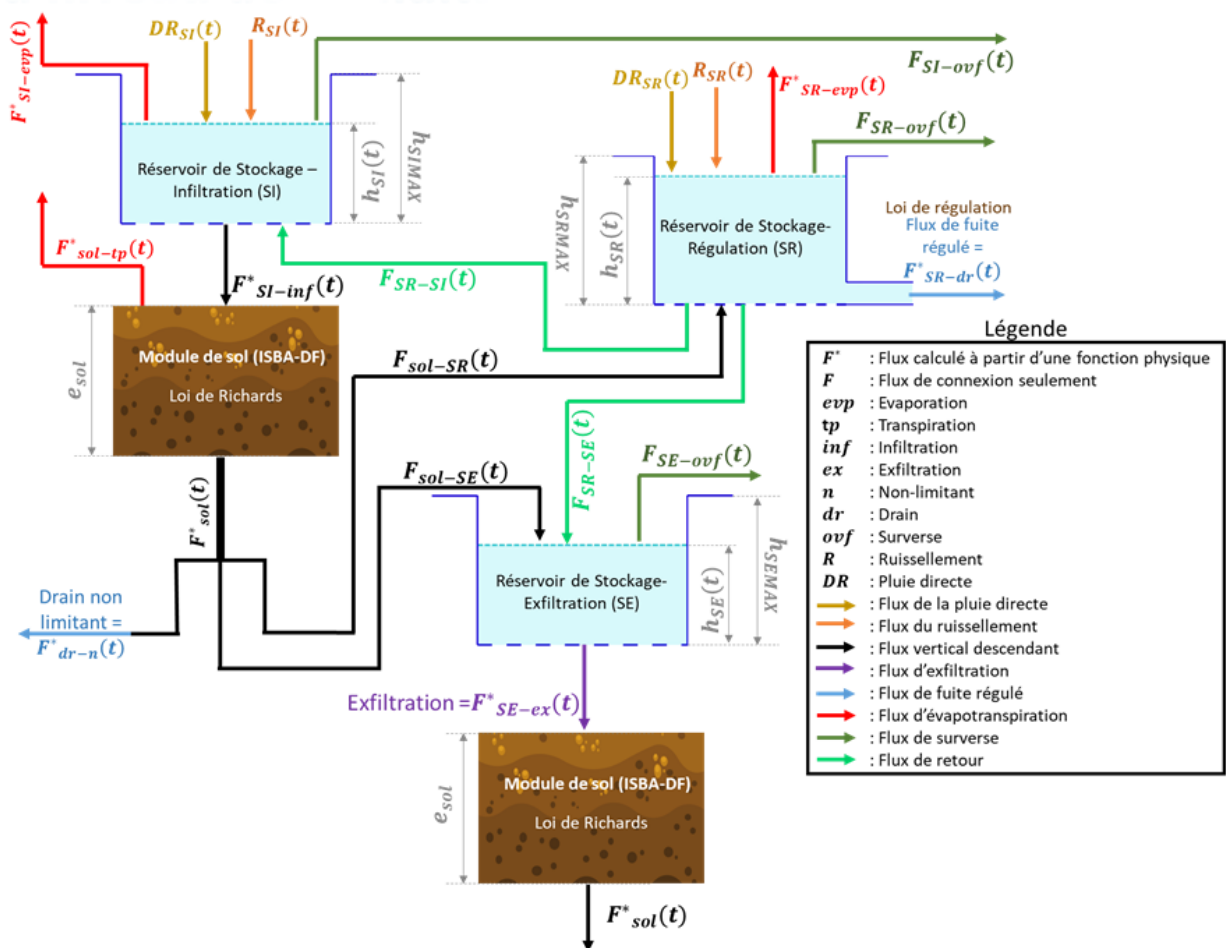


FIGURE IV.4

Conceptualisation par une approche réservoirs de l'ouvrage équivalent A dans TEB. Les réservoirs utilisant un schéma existant (ISBA-DF) sont indiqués. Les différents types de flux sont distingués grâce aux couleurs selon la légende et les abréviations utilisées sont aussi explicitées (D'après TUNQUI NEIRA et al., 2023a).

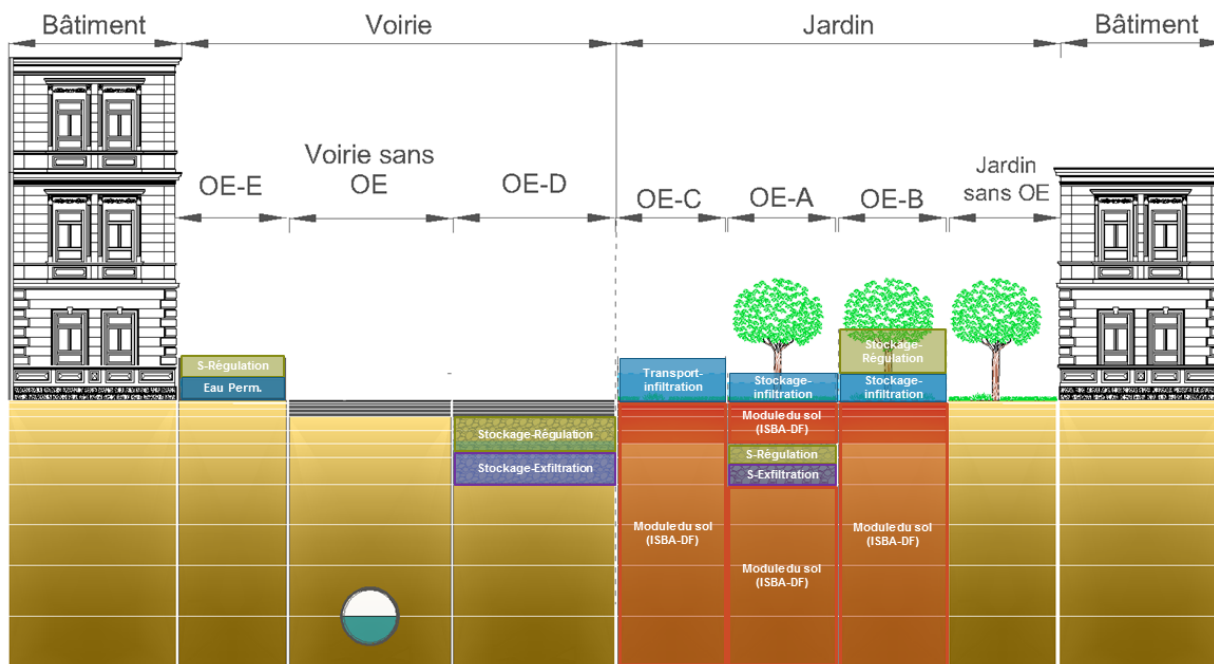


FIGURE IV.5

Schéma des différents compartiments existants dans TEB, avec l'ajout des compartiments propres à chaque ouvrage équivalent. (D'après TUNQUI NEIRA et al., 2023a)

2 Les scénarios d'occupation du sol : à l'interface hydrologie et urbanisme

On peut initialiser les modèles hydro-climatiques à partir de données d'occupation du sol en cherchant à représenter au mieux la réalité présente ou passée. Dans ce cas, il s'agit de reproduire à l'aide du modèle, le fonctionnement d'un territoire, en temps présent ou d'une période passée. On peut aussi initialiser un modèle avec des données d'occupation du sol "potentielles" - dans le sens possibles - dans le futur ou simplement autres que celles existantes, dans le but de mieux comprendre l'impact de l'occupation du sol sur le fonctionnement du bassin ou de la zone étudiée ou encore d'évaluer des stratégies futures d'aménagement. Dans le premier cas, les jeux de données peuvent ne plus chercher à avoir un quelconque lien avec la réalité. C'est la diversité de jeux de données testés qui peut aider à identifier les facteurs impactant le fonctionnement hydro-climatique du territoire. Dans le second cas, il est préférable de trouver des moyens de garder un lien avec la réalité, même future. Nous avons alors à notre disposition les documents d'urbanisme, sur lesquels les villes s'appuient pour programmer et encadrer les aménagements futurs.

2.1 Les scénarios d'urbanisation et de désurbanisation : on construit partout ou on rase tout !

Même sans la prise en compte des ouvrages de gestion à la source dans le modèle, certaines solutions pouvaient déjà être étudiées. FURUSHO (2011) a ainsi produit un scénario simple sur le bassin de la Chézine, dans le but d'évaluer l'impact de l'urbanisation du bassin sur son fonctionnement hydrologique. Elle a alors considéré toutes les mailles du bassin comme rurales, supprimant toute l'imperméabilisation, et appliqué cette configuration à la période passée déjà étudiée. Il ap-

paraît qu'en été la Chézine rurale ne réagit quasiment plus aux évènements pluvieux, alors qu'en hiver, les pics de débits sont supérieurs à ceux simulés avec la Chézine périurbaine. Elle confirme ainsi que la partie rurale contribue au débit en période humide et que c'est la partie urbaine qui contribue en période sèche (partie I.2.1).

Avec le modèle TEB, dans le cadre du projet VegDUD, ALLARD (2015) est allé un peu plus loin dans la conception de scénarios d'occupation du sol. Avec le modèle TEB-Hydro, de la version SURFEX v7.3, la végétation urbaine (basse et haute) était prise en compte dans le modèle, mais avec un bilan radiatif incomplet pour la végétation haute. De plus, il existait un schéma pour les toitures végétalisées (DE MUNCK et al., 2013). L'objectif de ces scénarios étaient de comprendre l'impact de la végétation en milieu urbain, sur les écoulements d'eau et les flux énergétiques. Le domaine étudié couvrait le secteur nord est de la métropole, déjà très végétalisé (44%). Le choix a donc été de modifier l'occupation du sol, en diminuant la part de végétation globale (GARDEN), en remplaçant les surfaces végétalisées par de la voirie (tout en conservant le même rapport végétation haute/basse) et en supprimant tous les arbres (NOTREE), remplacés par de la végétation basse. Un scénario voyait sa part globale de végétation augmenter, par rapport au scénario de référence, par l'ajout de toitures végétalisées (GREENROOF). Pour ce dernier scénario, une réflexion a eu lieu sur le type de bâtiments à équiper en toitures végétalisées ou pas. Il a été décidé de végétaliser tous les bâtiments d'une maille (contrainte due à l'outil), mais pas toutes les mailles systématiquement. Le choix des mailles à équiper en toitures végétalisées a été basé sur le type de bâtiments majoritaires dans la maille, sachant qu'on a privilégié les bâtiments publics, dans le cadre d'une politique volontariste de l'état et de la collectivité, ainsi que les bâtiments collectifs (car plus probablement équipés d'une toiture terrasse que les maisons individuelles).

La comparaison des bilans en eau de chaque scénario avec le scénario de référence (figure IV.6) a mis en évidence l'impact global de la végétation sur la baisse du ruissellement de surface, conséquence de l'augmentation de l'évapotranspiration et de l'humidité des sols (qui se traduit dans le modèle par une augmentation du drainage profond). Mais aussi de l'impact des arbres sur l'évapotranspiration (qui peut conduire au rafraîchissement de l'air localement) et par suite à la limitation importante de l'humidité des sols.

Ces scénarios même simples ont eu le bénéfice de rappeler que la revégétalisation des villes, en particulier par les arbres, doit s'accompagner d'une réflexion sur la gestion des eaux pluviales, à l'échelle de l'année. En effet, les projections climatiques et l'actualité aujourd'hui, mettent en évidence la fréquence et l'intensité accrues des périodes sans pluie, même dans le nord ouest de la France. Ce message a été transmis régulièrement ensuite au sein du ministère du développement durable dans le cadre de réunions diverses et de lors ma participation au PNACC-II.

Dans le cadre du projet Nature4Cities, ces mêmes données et scénarios ont été utilisés pour analyser les relations générales pouvant exister entre des indicateurs hydrologiques (écarts de pic de débit, de volumes d'eau ruisselés) et des paramètres caractérisant l'occupation du sol et plus particulièrement le gain ou la perte de taux de végétation, en lien avec un projet d'aménagement. Ces relations simplifiées devaient ensuite permettre le développement d'un outil simplifié pour les techniciens et agents des collectivités, afin d'évaluer leurs futurs projets d'aménagement, vis-à-vis des enjeux ciblés. Deux relations ont pu être produites, à partir des seules simulations faites sur le territoire nantais. Malheureusement, le partenaire en charge du développement de l'outil sur internet incluant ces relations n'a pu aller au bout du développement. Grâce à l'application de TEB à l'échelle du Grand Paris (E. BERNARD, 2021) et la future application à l'échelle de la métropole nantaise (BETOU, 2024), la multiplication des cas d'étude permettra de poursuivre ce travail.

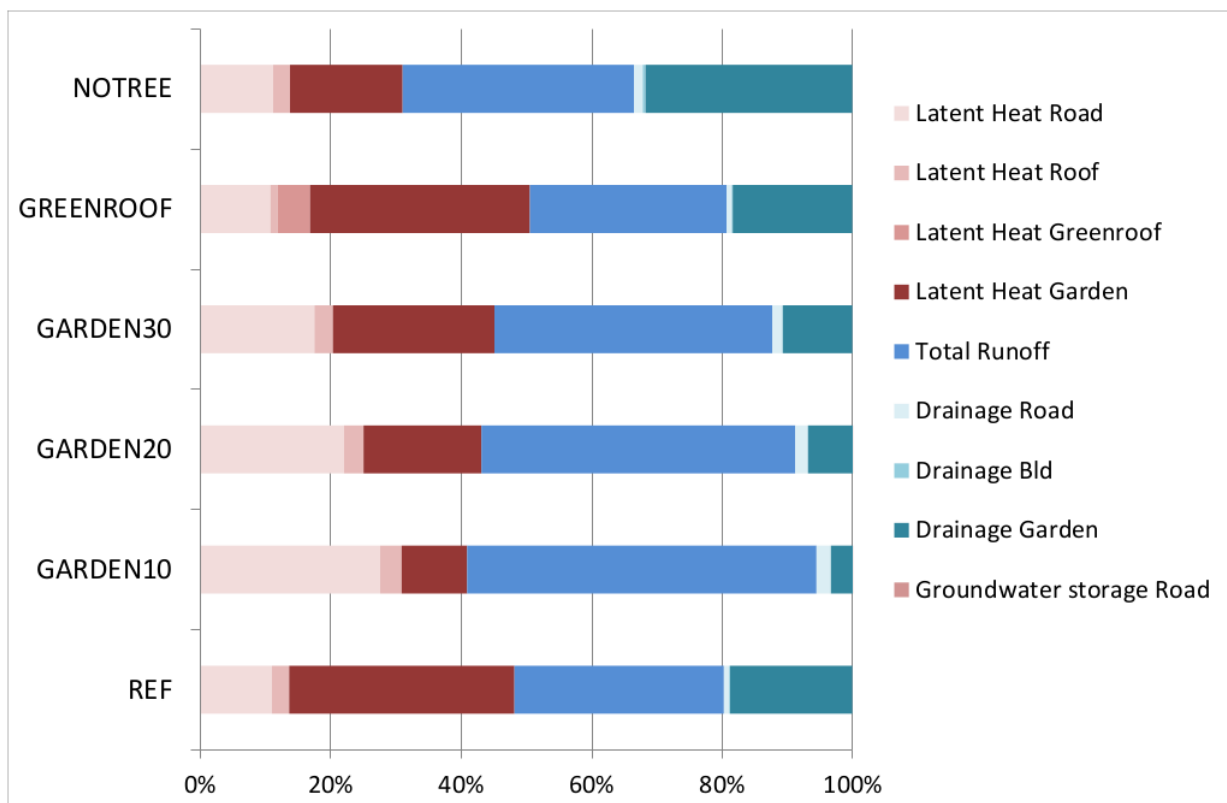


FIGURE IV.6

Bilans en eau à l'échelle du domaine pour le scénario de référence (REF), les scénarios de diminution de la végétation globale à $X\%$ (GARDENX), la suppression des arbres (NOTREE) et l'ajout des toitures végétalisées (GREENROOF). Les couleurs distinguent les différents termes des bilans en eau (Chancibault, BOZONNET et al., 2015).

2.2 Les scénarios d'urbanisation plus élaborés

Après ces différentes expériences de création de scénarios d'occupation du sol, l'envie de pouvoir analyser des scénarios plus réalistes est venue. Cette nécessité est aussi née grâce aux échanges récurrents avec les collectivités (Nantes, Départements du Grand Paris, autres villes partenaires des projets européens) et autres décideurs. Par ailleurs, la façon dont les documents d'urbanismes, en particulier les PLUi ou PLUm pour les métropoles, sont développés me semblaient d'une telle complexité que je me demandais dans quelle mesure les collectivités réussissaient à vraiment promouvoir leurs objectifs de développement durable à travers ces documents. D'autant qu'avec l'expérience du projet POPSU sur les îlots de chaleur urbains, j'ai réalisé que les autres enjeux (techniques, sécurité, organisation des services, financiers) étaient souvent prioritaires face aux enjeux de développement durable.

Une convention-cadre entre l'Ifsttar et l'UTC m'a permis de revoir Nathalie Molines (MdC, AVENUES, rencontrée lors du projet VegDUD), urbaniste, qui avaient les mêmes interrogations. Et dans le cadre du montage du projet Wise-Cities, les discussions sur ce sujet, avec Bernard De Gouvello (CSTB/ENPC puis DR au Cerema), ont aussi permis de converger vers une vision proche de l'intérêt de construire des scénarios d'aménagement, en lien avec les réalités du terrain.

Nous avons alors initié tous les trois une collaboration, d'abord financée par l'Université Gustave Eiffel (projet MAnIpUr, CHAVEZ, 2020), puis N. Molines a obtenu une bourse de thèse financée par l'UTC (CHAVEZ, 2024), encore en cours. Ces travaux ont porté sur l'analyse des documents d'urbanisme constituant le PLUm, de la métropole nantaise (PADD, règlements écrit et graphique, le zonage pluvial, les OAP de secteur d'aménagement et les OAP sectorielles). A l'issue de ces travaux, il s'agit de permettre d'une part, d'évaluer le PLUm, en caractérisant dans quelle mesure la métropole a réussi à intégrer les objectifs de développement durable (en particulier en lien avec les enjeux d'adaptation aux changements globaux) inscrits dans le PADD, dans le règlement. D'autre part, il s'agit d'aider à la construction de scénarios d'aménagement futurs, cohérents avec les documents d'urbanisme réglementaires.

Pour la première étape, CHAVEZ, MOLINES, Chancibault et DE GOUVELLO (2023) and CHAVEZ, MOLINES, Chancibault et GOUVELLO (2024) ont couplé différents outils automatiques d'analyse, appliqués au PADD (figure IV.7). Une analyse lexicométrique a tout d'abord permis d'identifier les grands thèmes du discours, puis une analyse thématique a mis en exergue les intentions et enfin des entretiens avec différents acteurs de la création du PLUm ont permis de confirmer ou non les hypothèses faites lors des deux étapes précédentes. Cette étude a ainsi mis en évidence les principaux thèmes discursifs de la métropole nantaise, permettant d'initier une réflexion sur la posture adaptative de la collectivité.

Dans la deuxième étape, une analyse détaillée du règlement écrit, du zonage pluvial, des AOP sectorielles et de secteur d'aménagement a été menée. La synthèse de chacune de ces analyses a été faite à l'aide d'indicateurs, appliqués à chacune des 23 solutions d'adaptation vertes ou grises sélectionnées. Le croisement de ces indicateurs, pour les différents documents, avec le règlement graphique a permis une représentation spatiale des contraintes ou leviers induits par les documents, pour chacune des solutions étudiées (exemple pour les systèmes de biorétention infiltrants et drainés, figure IV.8). Les indicateurs calculés et les cartographies produites permettent à la collectivité d'identifier les faiblesses et forces de leur documents réglementaires d'urbanisme : certains résultats les ont ainsi surpris. BETOU (2024), sur la base de ces cartographies et des indicateurs calculés, sera plus à même de définir des stratégies d'adaptation aux changements globaux plus réalistes que ce qui a pu être étudié jusqu'ici.

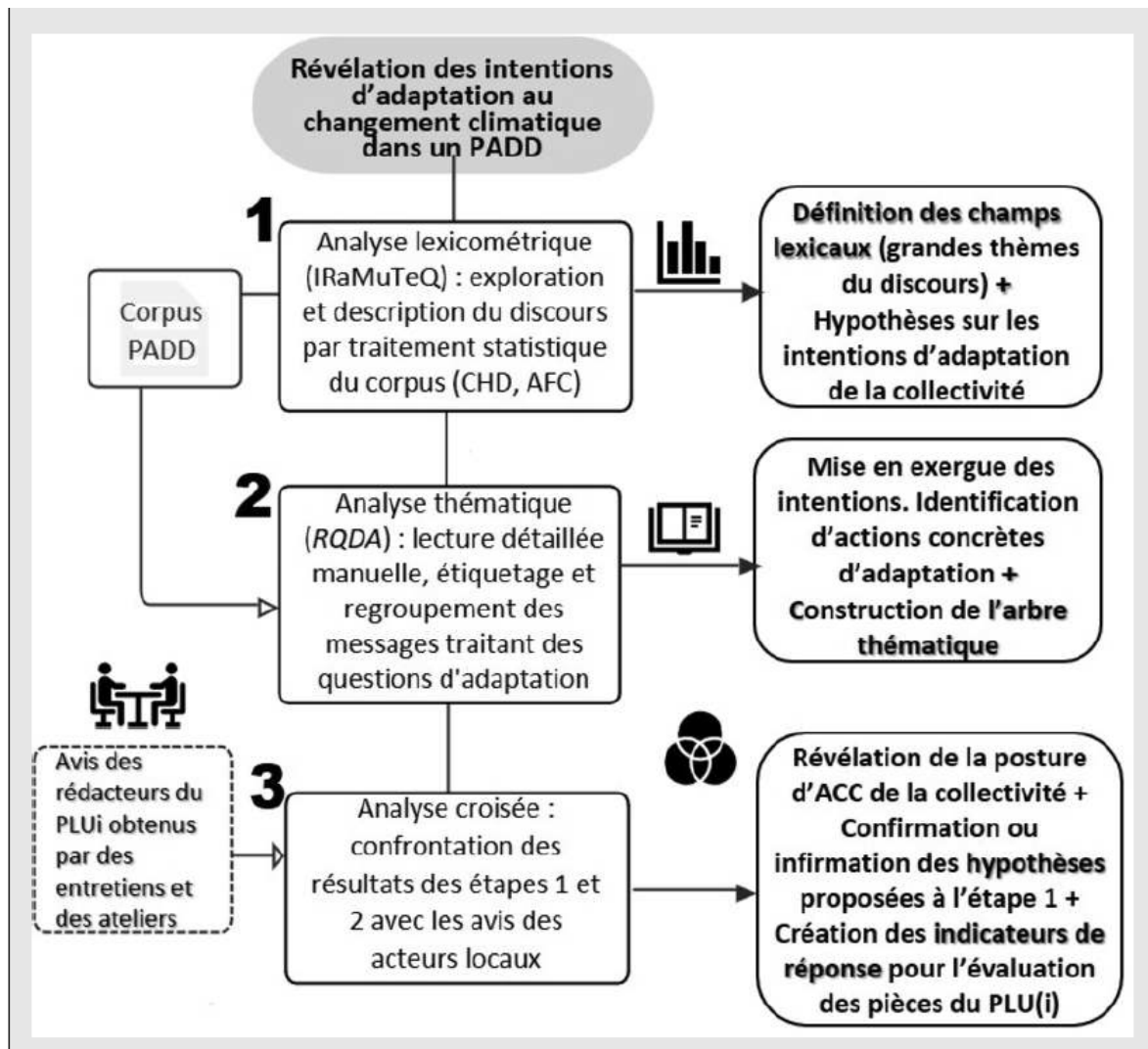


FIGURE IV.7

Démarche méthodologique d'analyse de contenu des PADD (CHAVEZ, MOLINES, Chancibault et DE GOUVELLO, 2023).

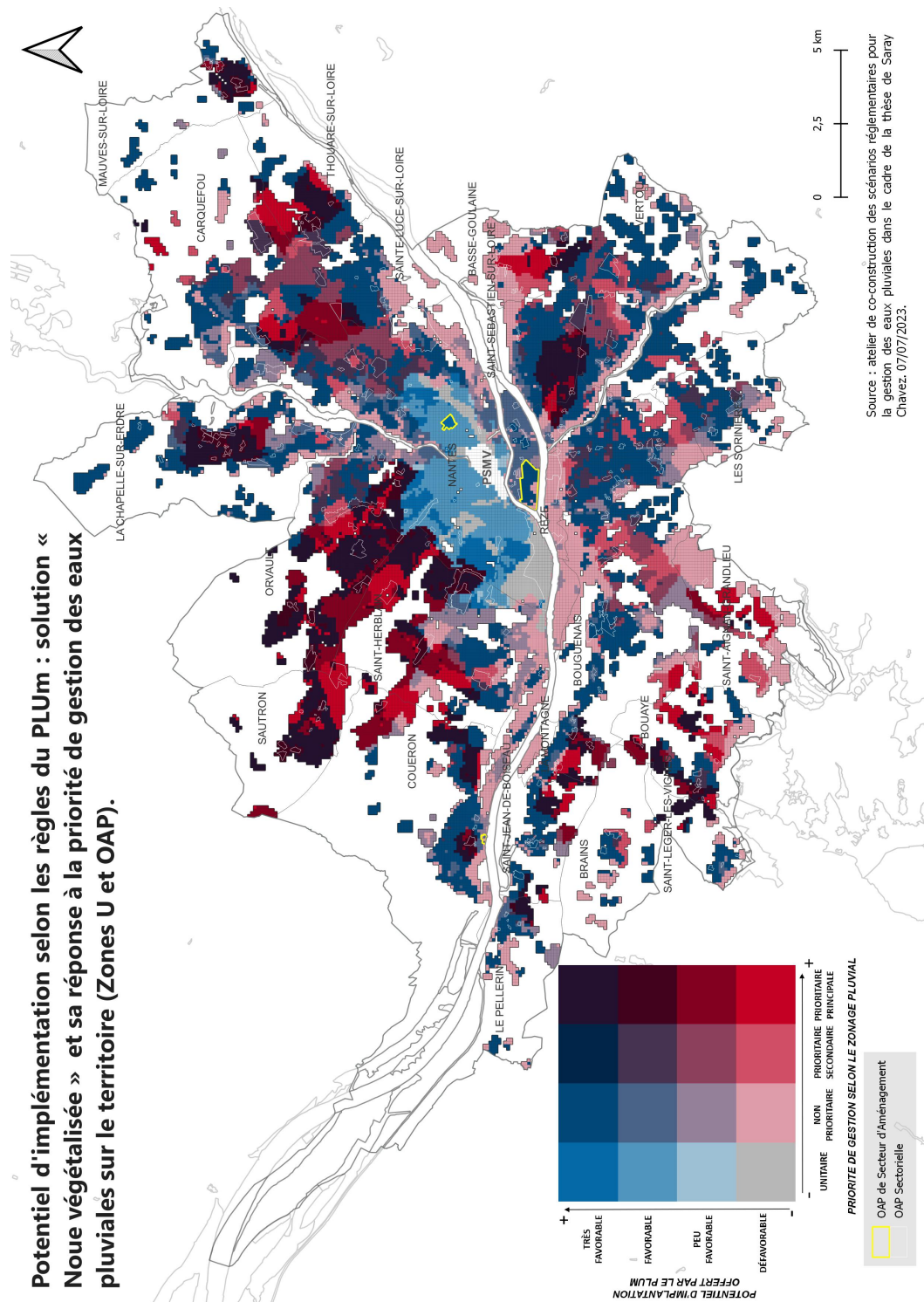


FIGURE IV.8

Potentiel d'implantation de la solution "noue végétalisée", selon les règles du PLUm (zones urbaines ou à urbaniser) et sa réponse aux enjeux identifiés par le zonage pluvial (CHAVEZ, 2024).

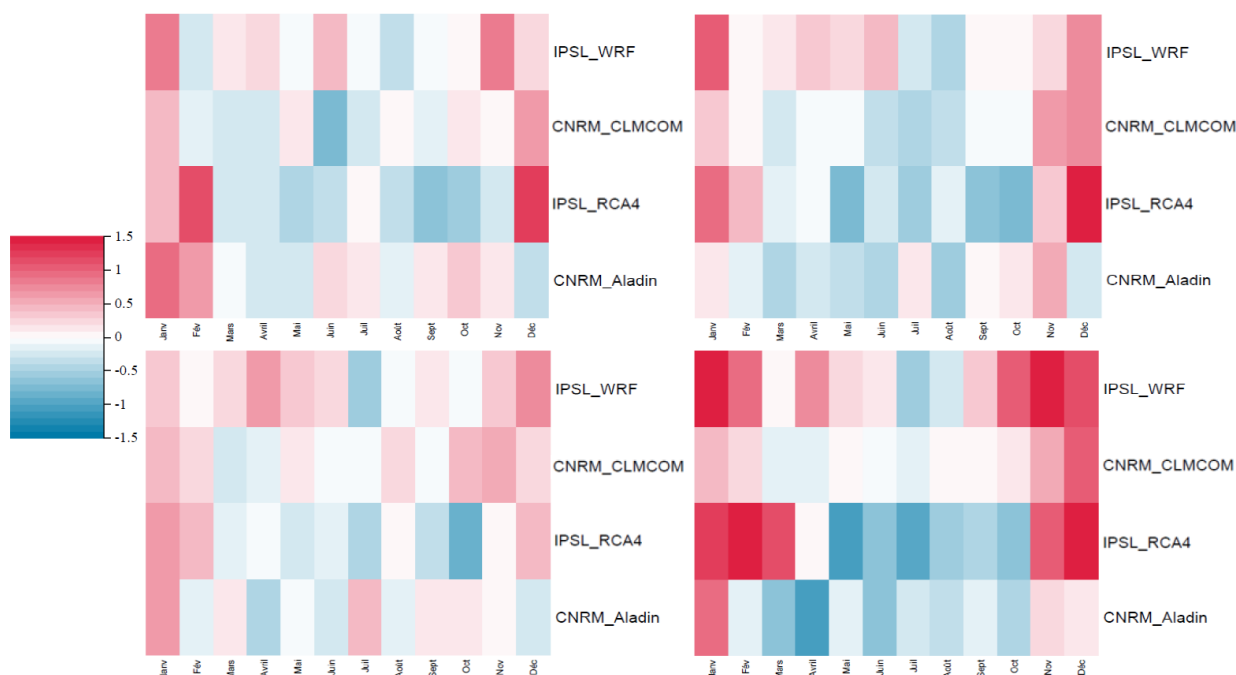


FIGURE IV.9

Anomalies des précipitations (mm/j) par rapport à la période 1976-2005 (futur – passé) pour 4 couples de modèles GCM-RCM, selon les scénarios d'évolution RCP4.5 (haut) et RCP8.5 (bas) et les horizons futurs 2021-2050 (gauche) et 2071-2100 (droite) (D'après LOTFI, 2015).

3 Prendre en compte le changement climatique

Aborder le changement climatique dans mon projet était presque naturel et évident. Tout d'abord compte-tenu des sujets de recherche développés depuis mon doctorat. Ce sujet entre évidemment en résonance avec l'actualité mais aussi cela me permet de faire un lien avec ma formation initiale plus tournée vers les sciences de l'atmosphère (depuis la licence jusqu'à mon doctorat). Si les outils développés et les sujets abordés ne permettent pas facilement de traiter le volet atténuation du changement climatique mais plutôt le volet adaptation, les solutions doivent malgré tout toujours se placer dans une perspective d'atténuation du changement climatique. Après une première étude visant à caractériser les projections climatiques dans la région nantaise, un travail sur la désagrégation des pluies a été conduit.

3.1 Étude des projections climatiques en région nantaise

Faire de la prospective sans prendre en compte le changement climatique n'a évidemment aucun sens. Savoir comment le prendre en compte, nécessite de caractériser son signal à l'échelle du territoire étudié. Ainsi LOTFI (2015) a étudié les projections climatiques, sur la région nantaise. Un premier travail a été d'identifier les bases de données à notre disposition, de les sélectionner puis d'extraire et sauvegarder les données nécessaires. Elle a pour cela analysé les bases de données PRUDENCE, ENSEMBLES, EuroCORDEX et DRIAS et a finalement sélectionné les deux dernières, pour la résolution des projections simulées à l'échelle régionale et la disponibilité des derniers scénarios, les RCP. A la fin du stage, la base de données EuroCORDEX a été intégrée au portail DRIAS.

Pour une analyse la plus complète possible, deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) et sept couples de modèles du climat GCM-RCM ont été étudiés. Les périodes à moyen terme (2021-2050) et long terme (2071-2100) ont été comparées à la période historique (1976-2005), avec l'aide de divers outils statistiques (courbes intensités-durée-fréquence et quantiles) et des cartes thermiques, appliquées sur les variables de précipitations et température de l'air à 2m, extraites sur un ensemble de 24 mailles centré sur Nantes.

Des tendances futures robustes ont pu être constatées. Comme attendu, l'évolution future de la température est confirmée quels que soient les modèles (GCM ou RCM), avec une augmentation plus forte pour le scénario RCP8.5 et à long terme. Cependant, à l'échelle mensuelle interannuelle, on retrouve des augmentations plus ou moins marquées selon les modèles. Les projections des précipitations sont moins robustes avec des écarts importants pour les événements peu fréquents à extrêmes, selon les modèles et les scénarios. Quant à l'échelle mensuelle interannuelle, les tendances peuvent être contradictoires selon les modèles, d'autant plus à long terme (figure IV.9). Les études d'impact du changement climatique, même dans le quart nord-ouest de la France, nécessitent donc l'utilisation des projections issues de divers couples GCM-RCM, en plus d'une diversité des scénarios proposés par le GIEC.

3.2 Des projections de pluie adaptées au contexte urbain

STAVROPULOS-LAFFAILLE (2019) a permis de faire un premier pas en vue d'appliquer le modèle TEB-Hydro en climat futur. Ce modèle nécessite des variables météorologiques en plus des précipitations et de la température de l'air, qui ne sont pas systématiquement disponibles dans les bases de données à notre disposition, ou du moins, pas pour tous les modèles ni pour tous les scénarios. De plus, les données de projection ne sont disponibles habituellement qu'au pas de temps journalier, parfois au pas de temps de 3h, alors que notre outil nécessite un forçage avec un pas de temps maximal horaire. C'est pourquoi une désagrégation temporelle est nécessaire. Nous avons donc fait le choix d'appliquer une méthodologie initialement développée au CNRM, pour des études en climat urbain avec le modèle TEB (HIDALGO et al., 2014). Cette désagrégation temporelle s'appuie sur une approche statistique de classification par type de temps. A partir d'un jeu de données d'une période passée, au pas de temps horaire agrégée au pas de temps journalier, l'approche permet d'extraire un signal horaire moyen (cycle moyen centré), pour chaque variable, par type de temps et par saison. Une variable journalière est ensuite désagrégée en données horaires, en décalant le signal horaire moyen pour retrouver la valeur journalière.

Appliquée à des données passées (2008-2017), utilisées en forçage du modèle TEB-Hydro, STAVROPULOS-LAFFAILLE (2019) a mis en évidence que si pour les variables météorologiques qui suivent globalement en effet un cycle journalier (comme la température de l'air à 2m, l'humidité de l'air, les rayonnements) l'approche est satisfaisante, elle n'est bien sûr pas adaptée pour les pluies (pour lesquelles elle n'a pas été développée). Les cumuls mensuels sont légèrement sous-estimés, conduisant à une sous estimation des volumes d'eau mensuels s'écoulant dans les réseaux d'assainissement. En revanche les intensités maximales journalières sont fortement sous-estimées. Cette approche ne permet donc pas, par exemple, de mener des études d'impact du changement climatique sur les déversements qui sont des processus à seuils, ni plus généralement sur les événements extrêmes, qui peuvent être intéressants pour les gestionnaires du réseau d'assainissement d'une ville. De plus, les simulations ont montré que limiter les événements pluvieux les plus forts en produisant des événements pluvieux peu intenses plus fréquents conduit à une forte augmentation des flux de chaleur latente, particulièrement entre mai et octobre.

BOUZINE (2022) a ainsi cherché à modifier l'outil, pour permettre une désagrégation plus réaliste des pluies et BETOU (2024) travaille encore à l'adaptation de l'approche pour l'étude des pluies en zone urbaine.

4 Conclusion

L'usage d'un modèle numérique permet de se jouer de la réalité en simulant une autre réalité ("et si ?") ou bien le passé ou encore un potentiel futur. Il permet aussi d'étudier des situations non réalistes mais qui permettent de comprendre le fonctionnement d'un système ou les interactions entre divers systèmes sur un même territoire. Si développer des scénarios non réalistes, dépendant d'un protocole scientifique, en lien avec l'objet d'étude ou les processus à analyser est assez simple et donc depuis longtemps utilisé, construire des scénarios d'aménagement futurs, donc réalistes, en parcourant le champs des possibles devient plus complexe. Il faut absolument, en tant qu'hydrologue, travailler avec des experts d'autres disciplines de la ville : urbanistes, architectes, sociologues. Comme première étape, la collaboration avec le domaine de l'urbanisme par l'étude des documents réglementaires a semblé pertinente. Une méthodologie a été développée, à l'échelle de la métropole nantaise, permettant de cartographier, par zone, le potentiel d'utiliser les solutions étudiées : en tant que solution utile selon les enjeux identifiés et en tant que solution favorisée ou non par les règles d'urbanisme. Ces cartographies constituent un outil fondateur, pour la construction de divers scénarios futurs d'aménagement.

Enfin, regarder vers le futur sans questionner l'impact des évolutions du climat n'a plus trop de sens aujourd'hui. C'est pourquoi des travaux ont été initiés afin de permettre de construire des chroniques de variables météorologiques, en lien avec les projections climatiques. Ces travaux devraient permettre de poursuivre ce sujet dans les années à venir.

Valorisations & encadrements

Nombre de post-doctorant.es ou CDD encadré.es	3
Nombre de doctorant.es encadré.es	2
Nombre de stagiaires encadré.es	6
Nombre de projets associés	7
Nombre d'articles dans des revues avec comité de lecture	3
Nombre de com. avec actes dans un congrès international	5
Nombre de communications sans acte	10
Nombre de chapitres d'ouvrages	3

* certains items peuvent être comptabilisés dans plusieurs chapitres

Troisième partie

Projet de recherche

Chapitre V

Analyse des impacts des changements globaux à l'échelle d'une agglomération pour une adaptation durable

Les travaux menés ces quinze dernières années m'ont permis d'identifier divers enjeux actuels et futurs des villes, ainsi que les imbrications qui existent entre ces enjeux. Mon activité passée et future reste plus centrée sur les aspects environnementaux, plus spécifiquement en lien avec l'eau. Mais pour un regard pertinent sur ces enjeux hydrologiques en milieu urbain, il est nécessaire, désormais, de considérer leurs liens avec le confort thermique des habitants, mais aussi avec l'urbanisme, les contraintes sociales, techniques, économiques...

Ce projet s'appuie donc sur les travaux passés, présentés dans la partie B de ce document afin d'initier de nouvelles voies. Il se présente en trois parties, chacune s'appuyant sur le modèle TEB, au centre de mes travaux depuis une dizaine d'années. Les développements faits autour du modèle seront ainsi valorisés. Cependant, les observations produites à l'ONEVU ou par d'autres observatoires (SNO Observil) ou celles fournies par les équipes gestionnaires des collectivités, restent essentielles. D'une part, ce projet vise à toujours approfondir les connaissances des processus en jeu, à mieux comprendre les connexions entre la gestion des eaux pluviales, le changement climatique, l'urbanisation et le confort thermique. D'autre part, ce projet s'intéresse à développer de nouvelles méthodes pour essayer de mieux répondre aux enjeux des changements globaux que subiront les villes, et de contribuer à des outils plus simples d'utilisation. Enfin, ce projet vise à étendre les territoires urbains étudiés vers l'Afrique subsaharienne, à la fois pour mettre à disposition nos outils et approches aux zones les plus touchées par le changement global et pour anticiper les futures conditions météorologiques que l'Europe connaîtra en adaptant nos outils et méthodes à des conditions plus sévères.

1 Mieux comprendre les impacts du changement climatique et de l'urbanisation croissante sur la gestion des eaux pluviales

1.1 Impacts de l'urbanisation

La bibliographie est riche concernant l'impact de l'urbanisation sur le bilan hydrologique d'un bassin versant. Il est reconnu que l'urbanisation, par l'imperméabilisation des surfaces, engendre

des crues plus fréquentes et plus intenses, limite la recharge des nappes (T. FLETCHER et al., 2013 ; BECHET et al., 2017 ; MUSZ-POMORSKA et al., 2022). Elle est aussi abondante quant à l'impact du changement climatique sur les pluies et par suite sur la gestion des eaux pluviales urbaines : les incertitudes sont ici plus mises en avant (ARNBJERG-NIELSEN et al., 2013). Il existe aussi des études, moins nombreuses, qui visent à étudier les impacts du changement climatique sur les pluies, combiné à l'urbanisation croissante (LI, STRONG et al., 2023 ; BONNEAU et al., 2021 ; YANG et al., 2021).

Les travaux menés jusqu'ici sur le développement du modèle hydroclimatique TEB et les simulations produites à l'échelle du Grand Paris (E. BERNARD, 2021) et prochainement produites à l'échelle de la métropole nantaise (BETOU, 2024) vont pouvoir être exploitées. Je souhaite, en effet, approfondir notre compréhension de l'impact de l'urbanisation sur le fonctionnement des bassins versants urbains. Les larges territoires étudiés dans le cadre des thèses précitées permettent de couvrir une grande gamme de bassins versants de tailles et d'occupation du sol variées, avec divers taux d'imperméabilisation, systèmes d'assainissement, textures de sol... Des effets de seuil pourraient apparaître, sur certains paramètres et faire ressortir ainsi des processus majeurs, sous certaines conditions. Par ailleurs, les régimes de pluies appliqués pourraient aussi être une donnée d'entrée à faire varier.

1.2 Impacts du changement climatique

Quant au changement climatique, il s'agit de poursuivre les travaux déjà entamés. De nouvelles projections climatiques ont été produites, avec le 6ème rapport du GIEC (CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023), sur la base de nouveaux scénarios SSP (O'NEILL et al., 2014). Un travail de collecte et de mise en forme des données, à l'échelle de la région nantaise (suites travaux thèse BETOU, 2024) et parisienne (projet GreenStorm, DUT, 2023), devra être fait, à partir de la base de données EuroCordex ou quand elles seront disponibles sur la base de données DRIAS. En analysant ces données, corrigées, il sera possible d'analyser quels seront les changements climatiques, en termes de pluie (régime, événements extrêmes) et de température à l'échelle de la région.

Ces données permettront de produire des chroniques de données adaptées aux besoins de modèles comme TEB, afin d'évaluer l'impact hydro-climatique du changement climatique, à l'échelle d'une agglomération. A moyen terme, les territoires étudiés seront nantais et parisien, afin de bénéficier des travaux déjà menés sur ces territoires en temps présent. Une désagrégation temporelle est tout d'abord nécessaire. La méthode de désagrégation développée par HIDALGO et al. (2014) a été enrichie par BETOU (2024) pour permettre une désagrégation temporelle pertinente de la pluie, au même titre que les autres variables météorologiques. L'approche analogue est conservée, mais la notion de cycle moyen journalier n'est pas appliquée pour les pluies. Les jours de pluie et les jours de temps sec sont ainsi traités différemment. Les approches par analogie sont couramment utilisées dans les méthodes de désagrégation (BÁRDOSSY et al., 2016 ; LI, JOHNSON et al., 2017 ; CARREAU et al., 2019). Elles permettent une application simplifiée et donnent des résultats pertinents, à l'échelle d'une longue période, idéalement 30 ans. La difficulté réside donc dans l'obtention d'une chronique de données suffisamment longue, en temps présent. L'autre inconvénient de ce type d'approche est l'hypothèse que les événements futurs, pluvieux ou thermiques, sont de même type que ceux du passé, seule leur distribution entre le passé et le futur pouvant réellement varier. Ainsi les événements exceptionnels du futur, pas encore rencontrés dans le passé, seront mal représentés par ce type de méthode. Par exemple pour la pluie, la durée d'un événement futur exceptionnel pourrait être mal estimée. L'intérêt de bien désagréger les événements pluvieux, en particulier de réussir à reproduire des durées réalistes, est de pouvoir reproduire des fréquences et des volumes de déversement pertinents, pour permettre aux collectivités d'établir des stratégies d'adaptation au changement climatique appropriées.

1. MIEUX COMPRENDRE LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'URBANISATION CROISSANTE SUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES

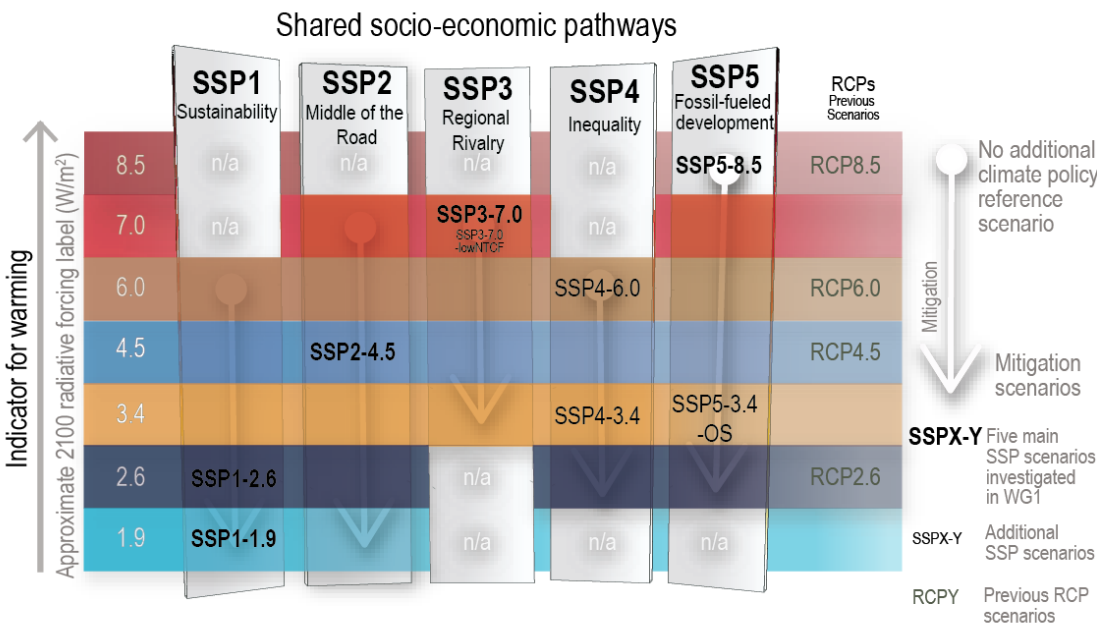
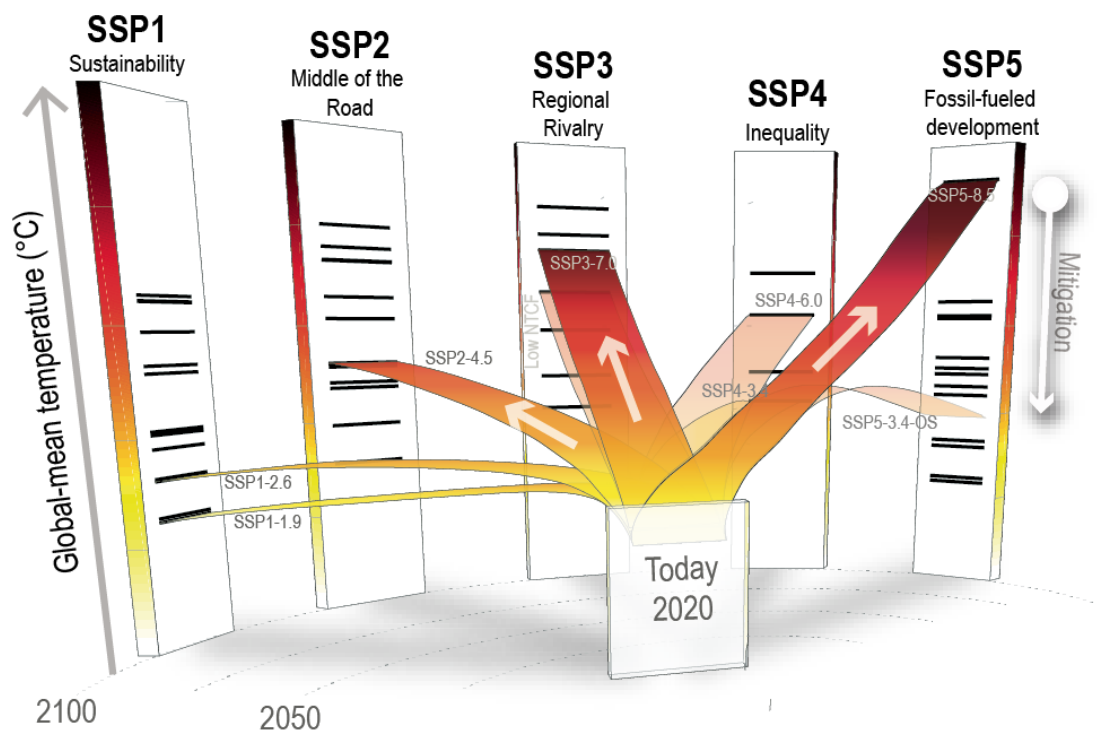


FIGURE V.1 – Les scénarios SSP du 6ème rapport du GIEC (CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023), avec leur évolution en température (haut) et forçages radiatifs respectifs (bas). Les scénarios RCP des précédents rapports sont aussi indiqués (bas).

Une désagrégation spatiale peut aussi être utile. A l'image de ce qui est mis en oeuvre dans la thèse de BÉTOU (2024), en temps présent, la désagrégation spatiale des forçages météorologiques (température, rayonnement, humidité) permet de mieux représenter les phénomènes d'îlot de chaleur. En effet, sans le couplage de SURFEX avec un modèle météorologique, la rétroaction des surfaces urbaines sur l'atmosphère, au-dessus de la canopée urbaine n'est pas prise en compte. Cette désagrégation spatiale doit alors s'appuyer sur la signature de la ville, sur les variables météorologiques. L'approche développée par J. BERNARD et al. (2017), basée principalement sur l'occupation du sol, a été utilisée, mais seulement sur les périodes propices aux îlots de chaleur urbains. En dehors de ces périodes, aucune désagrégation spatiale n'est appliquée. La variabilité spatiale des pluies peut être un facteur important sur la réponse des bassins versants en général, et urbains en particulier. Cependant prendre en compte la variabilité spatiale des pluies futures est complexe et source de grandes incertitudes. Les projections climatiques de pluie sont elles-même, encore aujourd'hui, sources d'une forte incertitude. Les tentatives de désagrégation spatio-temporelles dynamiques, à l'aide de modèles météorologiques (nesting) de mesoéchelle à forte résolution (de quelques kilomètres), ne sont pas des approches encore suffisamment satisfaisantes : les intensités maximales, les étendues spatiales ou encore la localisation des systèmes précipitants convectifs restent difficiles à simuler, malgré la résolution explicite de la convection. C'est pourquoi, les approches stochastiques sont privilégiées. Leur utilisation s'accompagne de nombreuses simulations d'un même événement, dans le but de balayer le champs des possibles. Or le modèle hydro-climatique développé est un modèle très gourmand en temps de calcul, lorsqu'il est appliqué sur les territoires de grande taille visés (agglomérations), même sur serveur de calcul performant.

Par conséquent, l'étude de l'impact hydro-climatique du changement climatique, avec un tel outil, nécessite de réfléchir à comment couvrir les types d'évènement souhaités (intensité, étendue spatiale, durée) tout en limitant les temps de calcul. L'analyse de l'impact de l'urbanisation sur la réponse des bassins versants, pour différents événements et régimes de pluie pourrait nous aider à mieux estimer les incertitudes sur la réponse d'un bassin versant soumis à une pluie homogène. Ainsi, cela aiderait à s'affranchir de la simulation d'un grand nombre de situations, en caractérisant l'incertitude des simulations obtenues en temps futur, avec une pluie homogène. Balayer les différents scénarios proposés par le GIEC, et simulés par plusieurs couples GCM-RCM (CMIP6), pour chacun de ces scénarios est la méthode à adopter pour étudier rigoureusement les impacts du changement climatique. Cela permet de prendre en compte un certain nombre d'incertitudes inhérentes à ce type d'études. Dans le cas d'un outil très gourmand en temps de calcul, cette méthode devient difficile à mettre en place. Il existe alors une autre façon d'étudier l'impact du changement climatique : il s'agit de construire une seule chronique de données futures, sur la durée de la période choisie, issues des projections climatiques existantes. Le choix des événements à représenter dans cette chronique est alors en lien avec les objectifs de l'étude et les enjeux du territoire étudié. Ainsi, si la collectivité s'interroge sur les conséquences du changement climatique pour son système d'assainissement, face au risque des événements pluvieux extrêmes, on peut construire la chronique dans ce sens. Une analyse statistique des divers scénarios produits par différents couples GCM-RCM nous renseigne sur les évolutions de distribution des événements pluvieux, éventuellement sur les évolutions quant aux alternances de périodes humides et sèches (si cela a un impact sur la réponse du système) et on choisit alors une chronique qui représente la réponse la plus risquée. Ou bien, on préfère représenter la distribution moyenne ou la plus partagée par les modèles, pour le scénario choisi. On cherche donc à raconter une histoire et à en étudier les impacts. L'analyse préalable d'un grand nombre de chroniques (scénarios et modèles GCM-RCM) permet d'anticiper et d'explicitier les faces cachées d'une telle étude.

1.3 Le risque hydrologique

Un point qui intéresse particulièrement nombre de collectivités en matière de gestion des eaux pluviales, dans le contexte du changement climatique, réside dans les événements extrêmes. Les pluies extrêmes, qui pourraient être plus fréquentes et plus intenses dans le futur, peuvent conduire au phénomène de crues et parfois d'inondations. Différents phénomènes peuvent provoquer ces inondations. La rivière qui traverse une zone urbaine à l'aval, peut déborder par contribution des surfaces "rurales" à l'amont, suite à des sols déjà très humides. Dans ce cas, les surfaces urbaines peuvent ne contribuer qu'à minima ou pas à l'inondation. Une inondation peut aussi avoir lieu, dans les rues, par débordement des réseaux d'assainissement. Enfin, des inondations peuvent aussi être causées par une topographie particulière (cuvette), au sein d'une ville, qui concentre le ruissellement de surface venant de l'amont tout en limitant leur évacuation vers l'aval, dans une zone restreinte. Dans les deux derniers cas, la zone urbaine et sa capacité à produire du ruissellement de surface sont en cause.

Au Laboratoire Eau & Environnement, si nous avons d'une part la pratique des modèles hydrauliques pour des zones peu urbaines (O. Payrastre, IDTPE) et d'autre part celle des modèles hydrologiques urbains, nous ne disposons pas, actuellement de l'expérience pour des modèles hydrauliques dédiés au milieu urbain, capable de simuler les zones inondées suite à une accumulation trop importante de ruissellement de surface en zone urbaine. C'est pourquoi O. Payrastre, dans le cadre d'une collaboration avec le Cerema sud-est, a le projet de monter en compétences sur ce type d'outils. Nous envisageons, ensuite, à moyen terme, de coupler nos outils en forçant par exemple le modèle hydraulique avec le ruissellement de surface produit par le modèle hydrologique urbain TEB. Le modèle hydraulique se charge du transfert du ruissellement en surface, avec l'aide d'une information plus précise et détaillée de la topographie et du dédale de rues et de bâti, sur des zones plus petites que la ville. Cette configuration permettrait ainsi de mieux comprendre certains phénomènes d'inondation que les collectivités expérimentent déjà et de les aider à déterminer avec quelle fréquence elles les expérimenteront dans le futur. Les stratégies d'adaptation au changement climatique, visant à limiter ces phénomènes d'inondation par accumulation du ruissellement de surface pourront à terme aussi être évaluées. Il sera possible de définir le niveau de service des différentes stratégies, selon le type d'évènement pluvieux, en lien avec sa période de retour.

En lien avec ce projet sur les crues urbaines et plus généralement avec mes travaux sur l'adaptation au changement climatique, O. Payrastre et moi animons un groupe thématique sur le ruissellement et le changement climatique, dans le cadre de la Fondation Eiffel.

2 Construire et évaluer les stratégies d'adaptation

2.1 Comprendre les effets des solutions d'adaptation combinées

Face aux incertitudes sur les projections de précipitations, les solutions fondées sur la nature présentent un atout : leur multifonctionnalité. Par multifonctionnalité, j'entends que nombre d'entre elles peuvent répondre à plusieurs enjeux à la fois : gestion de l'eau et confort thermique, comme cela l'a déjà été indiqué, mais aussi isolation thermique des bâtiments, bien-être des habitants, liens sociaux, biodiversité...

Cependant, ce n'est pas un seul type de solution qui permettra aux collectivités de s'adapter aux changements globaux, mais une diversité de solutions : les solutions vertes et bleues (SfN), mais aussi les solutions grises déjà en oeuvre et les évolutions de pratiques des services des collectivités et des citoyens. Si la ville a évolué rapidement ces dernières décennies, d'un point de vue démographique, en s'étalant et/ou se densifiant, de nombreux quartiers évoluent peu et lentement. Ainsi les quartiers historiques, souvent denses, offrent peu d'espaces à désimperméabiliser

et de configurations à même d'accueillir des solutions en surface : éventuellement les solutions de stockage enterrées seront à privilégier, ainsi que les solutions sur bâti (toitures végétalisées, murs végétalisés). La diversité des quartiers appelle à une diversité de solutions adaptées. Ainsi, les ouvrages plus gourmands en espace comme les bassins d'orage, infiltrants ou pas, pour les quartiers périphériques, alors que des ouvrages plus petits mais qui peuvent être multipliés peuvent voir le jour dans les quartiers résidentiels (jardins de pluie, noues de transport ou infiltrantes). Enfin, selon les caractéristiques du sol, les solutions infiltrantes peuvent être à privilégier ou au contraire à bannir. Si elles sont privilégiées quels seront les impacts sur les infiltrations parasites dans le réseau d'assainissement ?

On voit bien que les stratégies potentielles sont multiples, diverses et à adapter au contexte local. De plus, leurs connexions entre elles rendent l'évaluation de leur performances plus compliquées : les déversements de l'une peuvent alimenter une autre solution. Quels impacts en situation d'événements pluvieux qui se succèdent ? A partir de quel période de retour, le système fonctionne finalement comme le système historique (système d'assainissement standard) ? De plus, lorsqu'on essaie d'étudier les performances multiples de diverses solutions combinées entre elles, l'exercice se complexifie encore. GUNAWARDENA et al. (2017) met ainsi en évidence la synergie potentielle de solutions vertes et bleues en termes de rafraîchissement urbain, mais note aussi des configurations contre productives, où, les arbres en bord de bassin peuvent bloquer l'air humide de fin d'été durant la nuit et rendre la zone peu confortable.

Après la poursuite de l'évaluation des différents types d'ouvrages de gestion à la source, pris en compte dans TEB (partie IV.1), différentes combinaisons d'OGS pourront être simulées et analysées, en fonction de la morphologie du quartier, du régime de pluie et du climat. Les analyses pourront en effet porter sur les performances hydriques mais aussi thermiques. Un travail sur les indicateurs et en particulier d'indicateurs combinant divers enjeux permettrait une évaluation plus intégrée de ces ouvrages. Le travail mené sur la typologie des bassins versants (partie V.1.1) compléterait l'analyse proposée ici.

Des travaux engagés avec le LPPL dans le cadre de l'IRSTV et du projet URBiNAT (BENDAOUZ et al., 2021, LISNEUF, 2022, BUROV et al., 2024), ont visé à mieux comprendre l'impact de la nature en ville, sur la perception des habitants, en général et plus particulièrement en termes de confort thermique. Les indicateurs utilisés pour tenter de caractériser la température ressentie par les habitants, ne prend pas en compte les aspects psychologiques. Ainsi, l'histoire thermique de la personne, ainsi que le sentiment de contrôle sur sa présence dans le lieu ont montré une influence sur le ressenti de la température. Ces travaux pourraient être poursuivis pour enrichir certains indicateurs existants et compléter l'analyse plus intégrée de ces solutions fondées sur la nature.

2.2 Des scénarios réalistes adaptés au contexte local

Évaluer les performances de stratégies développées par la collectivités nécessite aujourd'hui la prise en compte dans le futur du changement climatique. Ce changement climatique devrait très probablement se caractériser par des périodes de sécheresse plus longues. Or, introduire toujours plus de végétation en ville exacerbera les difficultés de ressource en eau durant les périodes sèches. L'actualité de ces dernières années met déjà en avant les problèmes rencontrés dans de plus en plus de régions françaises avec la limitation de l'usage de l'eau pour certaines activités, comme l'arrosage des jardins et donc aussi de la végétation en ville, par la collectivité. Les conséquences d'une restriction en eau sur les services rendus par la végétation, et en particulier sur les bénéfices en termes de rafraîchissement durant les vagues de chaleur, doivent être étudiées et identifiées. Ce travail a été initié dans le cadre d'un co-encadrement de stage (EL MOUROUDI, 2022) avec l'Institut Agro d'Angers, autour de la rue canyon à l'échelle 1/3 instrumentée sur leur campus et la mise en oeuvre de TEB, pour ce cas d'étude. L'Institut Agro d'Angers travaille à caractériser comment

la limitation d'eau pour les plantes impacte leurs performances en rafraîchissement. Poursuivre la collaboration avec eux, aurait donc pour but d'étudier dans quelle mesure le modèle est capable de prendre en compte ce phénomène. Nous verrons ainsi si nous pouvons dans de futures études utiliser le modèle hydro-climatique TEB pour étudier des situations de sécheresse intenses et prolongées qui peuvent impacter la végétation en milieu urbain et ses services écosystémiques. Cela est nécessaire pour aller plus loin dans l'évaluation hydro-climatiques de stratégies d'adaptation au changement climatique.

La construction de scénarios réalistes de diffusion des OGS, à l'échelle d'une agglomération, dans l'objectif de s'adapter aux changements globaux (en lien avec l'urbanisation et le dérèglement climatiques), doit être poursuivie. Après la méthodologie développée par CHAVEZ (2024) (partie IV.2.2), sur la base de l'analyse des documents réglementaires constitutifs du PLUm de la métropole nantaise, l'analyse des résultats obtenus pour les 23 OGS étudiés doit être approfondie. Elle contribuera au développement d'une méthodologie qui permette la construction (semi-)automatique de scénarios d'aménagement. Ce travail devrait pouvoir être initié avec BÉTOU (2024) et ALOUI (2024) qui croiseront ces résultats avec les enjeux hydro-climatiques identifiées grâce aux simulations produites à l'échelle de l'agglomération, sur une période d'environ vingt ans. Les cartographies et tableaux d'indices initialement produits pourront donc être affinés, par OGS. Des règles, basées sur les indices, permettront de dessiner plusieurs scénarios d'aménagement qui seront ensuite simulés et évalués par le modèle hydro-climatique. L'évaluation se fera sur un certain nombre d'indicateurs qui pourraient être définis en lien avec les services de la collectivité, dans le cadre du projet Permépolis. Toute cette méthodologie d'analyse de documents réglementaires jusqu'à la construction et l'évaluation de scénarios de diffusion de ces OGS devrait être généralisée, dans le cadre d'OPUR6, par son application sur un autre territoire que l'agglomération nantaise (région parisienne). Les contraintes techniques et sociales pourraient venir enrichir la méthode.

2.3 Vers des outils plus appliqués

La multiplication des applications de TEB sur diverses agglomérations (d'ores et déjà nantaise et parisienne) fournira un grand nombre de données sur une large variété de bassins versants urbains. Les travaux prévus (V.1.1) permettraient aussi de mettre en évidence des lois simples reliant l'occupation du sol au débit à l'exutoire d'un bassin versant, ou autre indicateur à déterminer, en lien par exemple avec les déversements du réseau unitaire vers le milieu naturel. De premières investigations faites dans le cadre du projet Nature4Cities ont mis en évidence de telles relations, plutôt robustes, entre le taux de végétalisation et la variation moyenne du débit de pointe pour les jardins et pour les toitures végétalisées. Ces relations ont été mises en évidence à partir de l'analyse de simulation de bassins versants et sous-bassins versants nantais, sur une période de 18 mois (2010-2012), avec les modèles TEB et URBS (coll. F. Rodriguez, IDTPE, LEE). Ces travaux doivent être approfondis et confirmés, grâce au plus grand nombre de bassins versants étudiés depuis, et à des périodes beaucoup plus longues. La distinction entre régimes de pluie sera peut-être nécessaire, pour que cet outil soit utile dans un contexte de changement climatique. En effet, avec la connaissance ou l'hypothèse de l'évolution des distribution des pluies futures (en lien avec la notion de période de retour, par exemple), les services gestionnaires pourraient s'intéresser aux événements extrêmes qui les intéressent, si les lois évoluent selon les plages d'intensités ou de cumuls de pluie. Ce travail devrait probablement s'inscrire dans le programme OPUR6, en cours de montage. Une collaboration avec le Cerema (Jérémie Sage, équipe TEAM, avec qui je co-animerai un thème) est en discussion et permettrait de mener une analyse conjointe avec les deux outils TEB et URBS, afin de rendre les lois simplifiées identifiées plus robustes, avec certains bassins versants communs ou non aux deux modèles.

3 Se tourner vers le continent africain

Les différents travaux menés au sein de l'IRSTV dans le cadre de projets nationaux ou européens, sur les solutions d'adaptation, nous ont permis d'acquérir de robustes connaissances et de développer de nombreux outils ou approches. Les futurs projets déjà acquis ou en construction vont encore enrichir ou du moins asseoir ces connaissances. C'est pourquoi il est temps que l'IRSTV se tourne vers d'autres continents et en particulier l'Afrique afin de faire bénéficier aux pays du sud les résultats de nos recherches, par le transfert d'outils, approches et méthodes aux chercheurs, opérationnels et aux institutions. De plus le continent africain connaît, depuis plusieurs décennies, une urbanisation galopante, avec 40% de sa population qui vit en ville et qui dépassera les 50% en 2050 (UNITED NATIONS et al., 2019). D'autre part nombre de pays en Afrique subissent déjà les effets parfois dramatiques du changement climatique (inondations, recul du trait de côte, évolution des régimes de pluie, augmentation des températures...).

En février 2020, dans cet objectif d'une collaboration internationale avec les pays de la zone subsaharienne, Jules Kouadio (IR, LEE) et moi, avons participé à la conférence internationale des géographes de Côte d'Ivoire dont la thématique était le changement climatique en zone subsaharienne. La présentation de nos travaux issus des projets Nature4Cities et URBiNAT a permis d'initier des échanges avec des chercheurs (IRD, IGT), et des agents de l'état de différents organismes ou services (BNETD, SODEXAM, Ministère de l'environnement). Les présentations de cette conférence ainsi que les échanges initiés, nous ont confortés dans l'idée que la zone subsaharienne présentait un véritable intérêt mutuel et en particulier la Côte d'Ivoire. Outre les liens personnels de Jules Kouadio avec son pays natal et sa facilité à rencontrer et échanger dans un esprit de confiance, avec les potentiels partenaires ivoiriens et plus largement, subsahariens, la Côte d'Ivoire fait face à d'immenses enjeux urbains. Abidjan est la deuxième ville la plus peuplée du continent avec un taux d'urbanisation qui a augmenté de 32% en 1975 à plus de 52% en 2021 (ONU, 2023). De nombreux quartiers d'Abidjan font ainsi face à des phénomènes d'inondation, de plus en plus fréquents, concomitamment avec le changement climatique. La région a déjà enregistré une hausse des températures, par rapport à la période de référence 1961-1990. Et les moyennes intermodèles, avec une faible dispersion, prévoient pour le scénario RCP8.5 des hausses pour la région de l'ordre de $1^{\circ}C$ à moyen terme (2040-2070) et de $2^{\circ}C$ à la fin du siècle (2070-2100).

Ainsi, ce projet vise de façon plus large à étudier la problématique des changements globaux pour les villes subsahariennes dans un objectif de villes plus durables. En débutant en Côte d'Ivoire, ce projet vise par une approche transposable, à s'étendre ensuite aux autres pays de la zone. Le rapprochement avec le LMI NEXUS, auquel nombre de partenaires participent déjà, sera nécessaire. L'idée d'avoir la possibilité de découvrir un nouveau contexte institutionnel, géographique, climatique et s'y adapter est également un facteur moteur de notre démarche. En effet, outre le fait de partager nos connaissances avec le sud, nos approches et outils développés en Europe, devront être adaptés au contexte climatique local plus chaud et plus intense, et seront ainsi enrichis et peut-être mieux adaptés au futur contexte climatique en Europe. Il est enfin question de pouvoir participer à la formation de jeunes chercheurs africains, en collaboration avec les universités locales. Trois piliers constitueront le socle de ce travail : une coopération forte et renforcée avec les chercheurs locaux, un montage institutionnel en matière de formation et la recherche d'une adéquation constante avec les réalités et les besoins des populations locales. Ce travail ne pourra bien entendu pas se faire sans l'implication au départ des autorités locales.

Lors des périodes successives de confinement en 2020 et 2021, la mise en oeuvre de ce projet de collaboration franco-ivoirienne a été ralentie. Cependant, les équipes de l'IRSTV ont été informées, lors d'une réunion qui a conduit chaque partenaire à faire part de son intérêt pour le projet et même certains à vouloir s'impliquer plus. Ainsi, un noyau pour l'animation et la coordination scientifique, s'est formé avec en plus de Jules Kouadio et moi-même, Thierry Lebeau (PU, LPG)

et Olivier Payraastre (LEE). Depuis, nous avons effectué plusieurs déplacements en Côte d'Ivoire, nous permettant de construire un consortium de divers équipes ivoiriennes des universités Nangui Abrogoua et Félix Houphouët Boigny d'Abidjan, Jean Lorougnon Guédé de Daloa, de l'INPHB à Yamoussoukro et françaises de l'IRSTV (université Gustave Eiffel, Nantes Université, université de Nîmes, Institut Agro d'Angers), de l'IRD (université Paul-Valéry, Montpellier III). Le BNETD est aussi un partenaire privilégié et nous travaillons à nous rapprocher de la SODEXAM et l'ONAD.

Les thématiques couvertes par les différents partenaires identifiées ont été organisées en sous-groupes, afin de permettre les premières collaborations par la mise en place de stages avec des étudiants ivoiriens et français. Des sujets ont été déjà identifiés, entre partenaires ivoiriens et français et des demandes de financement sont en attente de réponse. Une fois les premiers liens entre équipes initiés, des sujets de thèse pourront être définis ainsi que des demandes de financement plus ambitieux soumises. Ces groupes thématiques ont pour but de faciliter les premières collaborations, mais l'objectif à moyen terme est bien de travailler sur des sujets interdisciplinaires. Mais il nous a semblé plus judicieux d'arriver à cet objectif par étape. C'est pourquoi, le périmètre de ce projet très ambitieux car couvrant à la fois les enjeux de :

- climat,
- transport,
- pollution de l'air, de l'eau et des sols,
- crues,
- constructions durables,
- plastiques et déchets,
- assainissement,
- pratiques et usages des citoyens,
- perception des habitants sur les défis environnementaux,
- gestion foncière,
- ...

n'est pas encore précisément défini. L'objectif est qu'il s'organise en sous-projets, pluridisciplinaires, en lien avec les appels à projets existants. La cohérence des questions scientifiques abordées et la coordination entre les projets sera assurée par le noyau déjà en place, qui pourra s'élargir ou du moins évoluer avec le temps.

Les premiers sujets de stage envisagés, pour lesquels des financements sont en attente de réponse, visent à établir les données déjà existantes, à qui peuvent être mises à disposition pour permettre une première analyse des différents enjeux du territoire (Abidjan et peut-être Yamoussoukro et Daloa). Une fois l'analyse de divers enjeux établie, les travaux se tourneront vers l'étude de solutions potentielles et de leur évaluation, avec l'aide des approches et méthodes développées ou pratiquées par chacun des partenaires. Enfin, ces résultats devront être partagés avec les collectivités et agents techniques, ainsi que les citoyens via les associations de quartier, pour arriver à une version enrichie des solutions possibles. *In fine*, ces travaux pourront servir à l'établissement de supports techniques (guides, cartographies) et de communication. Ils serviront aussi à contribuer aux formations proposées aux étudiant.es ivoirien.nes, via les formations déjà prises en charge par les partenaires impliqués ou par des support de cours mis à disposition.

4 Conclusion

Les travaux passés ont permis à la fois le développement d'outils, la construction de méthodologies et la prise de conscience des enjeux auxquelles les villes font face. Ainsi pour les années futures, mon projet s'en nourrit et s'appuie sur les outils développés (TEB et analyse réglementaire) dans l'objectif d'offrir un cadre de construction et d'évaluation de scénarios d'adaptation des villes au changement climatique couplé à l'urbanisation croissante. Tout d'abord, le modèle hydro-climatique TEB, déjà appliqué sur de nombreux bassins versants urbains en région parisienne et nantaise, permettra d'approfondir nos connaissances sur l'impact de l'urbanisation sur la réponse de ces bassins, par une approche typologique. L'impact du changement climatique sur leur réponse, sera aussi analysée, selon la même approche, par régime de pluies. Pour cela un travail d'analyse des dernières projections climatiques à disposition sera préalablement nécessaire. Ces typologies serviront à plus long terme à la construction d'outils simplifiés, pour les bureaux d'étude ou agents techniques. En parallèle, une méthodologie de construction de scénarios d'aménagement réalistes pour l'adaptation des villes au changement global sera développée. Les contraintes réglementaires, techniques et sociales, en plus des enjeux locaux hydro-climatiques, seront prises en compte. Au préalable, l'évaluation des derniers enrichissements de TEB, avec la représentation des OGS, sera poursuivie. Enfin, la mise en oeuvre d'un consortium franco-ivoirien, en cours de construction, permettra d'étudier les villes subsahariennes, qui subissent déjà fortement divers impacts du changement global. La Côte d'Ivoire est la porte d'entrée de la zone ciblée. Elle sera le lieu d'application des outils et méthodes présentées dans ce document, avec ceux des autres partenaires français et ivoiriens.

Ce projet est un projet ambitieux, qui s'étalera probablement plus loin que les cinq prochaines années, en fonction des financements obtenus. Cependant, les collaborations initiées depuis plusieurs années et les projets qui démarrent en 2024 en assurent le financement et la mise en oeuvre d'une part importante (Permépolis, GreenStorm, OPUR6).

Bibliographie

- ALLARD, A. (2012). « Construction du réseau de drainage de la partie est de l'agglomération Nantaise ». Mém. de mast. Mémoire de fin d'étude de l'Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes.
- (2015). « Contribution à la modélisation hydrologique à l'échelle de la ville : Application sur la ville de Nantes ». Thèse de doct. Ecole Doctorale SPIGA de l'Ecole Centrale de Nantes.
- ALOUÏ, A. (2024). « Evaluation des développements des ouvrages de gestion à la source dans le modèle hydro-climatique TEB et construction de scénarios de diffusion de ces ouvrages, à l'échelle d'une agglomération. » Mém. de mast. Master II Eaux de surface, Ressource, Gestion et Aménagement, de l'Université de Lorraine, Metz.
- ARNBJERG-NIELSEN, K., P. WILLEMS, J. OLSSON, S. BEECHAM, A. PATHIRANA, I. BÄCKLÖW GREGERSEN et al. (juil. 2013). « Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems : a review ». In : *Water Science and Technology* 68.1, p. 16-28. DOI : 10.2166/wst.2013.251.
- ASKARIZADEH, A., M. RIPPY, T. D. FLETCHER, D. L. FELDMAN, J. PENG, P. BOWLER et al. (2015). « From Rain Tanks to Catchments : Use of Low-Impact Development To Address Hydrologic Symptoms of the Urban Stream Syndrome. » In : *Environ Sci Technol.* DOI : 10.1021/acs.est.5b01635.
- BÁRDOSY, A. et G. G. S. PEGRAM (2016). « Space-time conditional disaggregation of precipitation at high resolution via simulation ». In : *Water Resources Research* 52.2, p. 920-937. DOI : <https://doi.org/10.1002/2015WR018037>.
- BEAUVAIS, C. (2017). « Reconstruction du réseau hydrographique du département des hauts-de-Seine en vue d'une modélisation hydrologique ». Mém. de mast. Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage.
- BECHET, B., Y. LE BISSONNAIS, A. RUAS, A. AGUILERA, M. ANDRÉ, H. ANDRIEU et al. (2017). *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols. Déterminants, impacts et leviers d'action*. Rapp. tech. INRAE.
- BENDAOU, S. et A. MARCHAL (2021). *Projet de recherche Urbinat : confort thermique et représentation de l'eau des habitants d'un quartier*. Rapp. tech. Université de Nantes.
- BERNARD, E., K. Chancibault, C. D. MUNCK et A. MOSSET (2023). « A new methodology for calibrating a urban hydrological model dedicated to large multi-catchment area. » In :
- BERNARD, E. (2021). « Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne ». Thèse de doct. Ecole doctorale « Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace », Université Paul Sabatier Toulouse III.

- BERNARD, É., K. Chancibault, C. de MUNCK et A. MOSSET (2021). « Calage multi-bassins versants du modèle hydrologique TEB-Hydro à l'échelle du Grand Paris. » In : *9èmes Journées Doctorales d'Hydrologie Urbaine*.
- BERNARD, É., C. de MUNCK, K. Chancibault et A. MOSSET (2021). « Hydro-climatic response of Paris metropolitan area through TEB-Hydro model simulation : multi-catchment calibration and model evaluation. » In : *15th Internationale Conference on Urban Drainage*, online.
- BERNARD, J., M. MUSY, I. CALMET, E. BOCHER et P. KERAVEC (nov. 2017). « Urban heat island temporal and spatial variations : Empirical modeling from geographical and meteorological data ». en. In : *Building and Environment* 125, p. 423-438. DOI : 10.1016/j.buildenv.2017.08.009.
- BERTHIER, E., H. ANDRIEU et F. RODRIGUEZ (1999). « The Rezé Urban Catchments Database ». In : *Water Resources Research* 35.6, p. 1915-1919. DOI : 10.1029/1999WR900053.
- BETOU, F., A. RUAS, K. Chancibault et E. GAUME (2023). « Construction d'une base de données d'occupation des sols urbains à fine échelle pour l'étude de stratégies d'adaptation fondées sur la nature. » In : *Cybergéo*. submitted.
- BETOU, F. (2024). « Stratégies d'adaptation au changement climatique pour améliorer la gestion des eaux pluviales et le confort thermique : évaluation de scénarios d'aménagements à l'échelle de la métropole nantaise. » Thèse de doct. Ecole Doctorale Matière, Molécules, Matériaux et Géosciences, Nantes Université.
- BOCHER, E., G. PETIT, J. BERNARD et S. PALOMINOS (2018). « A geoprocessing framework to compute urban indicators : The MAPUCE tools chain ». In : *Urban Climate* 24, p. 153-174. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.008>.
- BONNEAU, J., F. BRANGER, H. CASTEBRUNET et G. LIPEME-KOUYI (2021). *Construction et analyse par modélisation de scénarios de gestion quantitative à différentes échelles et robustesse des ouvrages à la source face aux changements globaux*. Rapp. tech. INRAE.
- BOONE, A., J.-C. CALVET et J. NOILHAN (1999). « Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force-Restore Method ». In : *Journal of Applied Meteorology* 38.11, p. 1611-1630. DOI : 10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2.
- BOUILLOUD, L., K. Chancibault, B. VINCENDON, V. DUCROCQ, F. HABETS, M. SAULNIER et al. (2010). « Coupling the ISBA land surface model and the TOPMODEL hydrological model for Mediterranean Flash-Flood forecasting : description, calibration and validation ». In : *Journal of Hydrometeorology* 11, p. 315-333. DOI : 10.1175/2009JHM1163.1.
- BOUZINE, E. M. (2022). *Désagrégation temporelle des projection de pluies pour étudier l'impact du changement climatique sur la gestion des eaux pluviales urbaines*. Rapp. tech. Master Mathématiques et Application parcours ingénierie mathématique et Data Science de l'Université de Mulhouse.
- BRAUD, I., F. BRANGER, K. Chancibault, C. JACQUEMINET, P. BREIL, B. CHOCAT et al. (2011). *AVuPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) : rapport scientifique final du projet ANR-07-VULN-01*.
- BREIL, P., C. JOANNIS, G. RAIMBAULT, F. BRISSAUD et M. DESBORDES (1993). « Drainage des eaux claires parasites par les réseaux sanitaires. De l'observation à l'élaboration

- d'un modèle prototype. » In : *La Houille Blanche* 79.1, p. 45-58. DOI : 10.1051/lhb/1993005.
- BUROV, A., K. Chancibault, G. FLEURY, S. HERPIN, J. L. ROY-LISNEUF, A. SAPIN et al. (2024). « Co-Creating Healthy Corridors using Nature-Based Solutions. » In : sous la dir. de G. C. M. AND. H2020, URBiNAT e-book 2. Chap. How Nature-based Solutions promote Health & Wellbeing. P. 28.
- CARREAU, J., N. BEN MHENNI, F. HUARD et L. NEPPEL (2019). « Exploiting the spatial pattern of daily precipitation in the analog method for regional temporal disaggregation ». In : *Journal of Hydrology* 568, p. 780-791. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.023>.
- Chancibault, K., S. ANQUETIN, V. DUCROCQ et G.-M. SAULNIER (2006). « Hydrological evaluation of high-resolution precipitation forecasts of the Gard flash-flood event (8-9 September 2002) ». In : *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 132, p. 1091-1117. DOI : 10.1256/qj.04.164.
- Chancibault, K., E. BOZONNET, I. CALMET, A. LEMONSU, M. MUSY et F. RODRIGUEZ (2015). « Scénarios de végétalisation de la ville de Nantes : évaluation énergétique, microclimatique et hydrologique ». In : *Les bienfaits de la végétation dans nos villes et nos villages*. Caen, France.
- Chancibault, K., F. HABETS, G. SAULNIER, V. DUCROCQ et S. ANQUETIN (2006). « A hydro-meteorological high-resolution coupled system for flash-flood forecasting ». In : *2nd International Symposium on Quantitative Precipitation Forecasting and Hydrology*. Boulder, CO, USA.
- Chancibault, K., A. LEMONSU, J.-M. BRUN, C. D. MUNCK, A. ALLARD, V. MASSON et al. (2015). « Improving the water budget in the urban surface scheme TEB for a better evaluation of green infrastructures for adaptation purposes ». In : *9th International Conference on Urban Climate*. Toulouse, France.
- Chancibault, K., F. RODRIGUEZ, H. ANDRIEU, E. BOCHER, J. BOUYER, F. BRANGER et al. (2014). *Projet Rosenhy, résultats et perspectives, rapport scientifique détaillé du programme EC2CO*.
- Chancibault, K., A. MOSSET, Z. LOTFI, C. BEAUVAIS, S. SHOBAIR, S. OURRAI et al. (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., 51 p. DOI : 10.26047/PIREN.rapp.synth.2019.vol3.
- CHAVEZ, S. (2020). « Impact du PLUm sur le champ des possibles en matière de mise en œuvre de dispositifs améliorant la gestion hydrothermique des espaces urbains : le cas nantais. » Mém. de mast. Master Aide à la décision en aménagement urbain et régional, Université de Franche Comté.
- (2024). « L'eau comme levier d'adaptation aux changements climatiques : méthodologie pour la construction de scénarios réalistes et réglementairement compatibles ». Thèse de doct. Ecole doctorale "Sciences pour l'Ingénieur" de l'Université Technologique de Compiègne.
- CHAVEZ, S., N. MOLINES, K. Chancibault et B. de GOUVELLO (2024). « Planning for climate change with the best of intentions... Analyzing discourses of plans and planners to highlight adaptation approaches. » In : *ARTICULO*. accepted.

- CHAVEZ, S., N. MOLINES, K. Chancibault et B. DE GOUVELLO (2023). « Documents d'urbanisme et adaptation au changement climatique : éclairage des intentions grâce à la lexicométrie ». In : *Revue d'économie régionale et urbaine* Juin.3, p. 433-458.
- CHOCAT, B., F. CHERQUI, B. AFRIT, G. BARJOT, M. BOUMAHDI, P. BREIL et al. (2022). « Contribution à une meilleure explicitation du vocabulaire dans le domaine des solutions dites « alternatives » de gestion des eaux pluviales urbaines. » In : *T.S.M.*
- CLIMATE CHANGE (IPCC), I. P. on (2023). « Framing, Context, and Methods ». In : *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, p. 147-286. DOI : 10.1017/9781009157896.003.
- DE MUNCK, C., A. LEMONSU, R. BOUZOUIDJA, V. MASSON et R. CLAVERIE (2013). « The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB ». In : *Geoscientific Model Development* 6.6, p. 1941-1960. DOI : 10.5194/gmd-6-1941-2013.
- DUBAND, D., C. OBLED et J. RODRIGUEZ (1993). « Unit hydrograph revisited : an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification ». English. In : *Journal of Hydrology* 1, p. 115-149.
- DUCROCQ, V., J.-P. LAPORE, J.-L. REDELSPERGER et F. ORAIN (2000). « Initialization of a fine-scale model for convective-system prediction : A case study ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 126.570, p. 3041-3065. DOI : <https://doi.org/10.1002/qj.49712657004>.
- DUPONT, S., P. MESTAYER, E. GUILLATEAU, E. BERTHIER et H. ANDRIEU (2006). « Parameterization of the urban water budget with the Submesoscale Soil Model. » In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45.4, p. 624-648. DOI : 10.1175/JAM2363.1.
- EL MOUROUDI, Y. (2022). *Méodélisation climatique d'une rue canyon arborée*. Rapp. tech. Poltech'Nantes. Projet de fin d'étude.
- ESSBAI, S. (2014). « Prise en compte du réseau unitaire dans le modèlele ISBA-TOPMODEL : application sur le bassin versant péri-urbain de l'Yzeron ». Mém. de mast. Master II Sciences et Techniques des Environnements Urbains de l'Ecole Centrale de Nantes.
- FAO et IIASA (2012). *HARMONIZED WORLD SOIL DATABASE version 2.0*. Rome et Laxenburg.
- FAROUX, S., A. T. KAPTUÉ TCHUENTÉ, J.-L. ROUJEAN, V. MASSON, E. MARTIN et P. LE MOIGNE (2013). « ECOCLIMAP-II/Europe : a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models ». In : *Geoscientific Model Development* 6.2, p. 563-582. DOI : 10.5194/gmd-6-563-2013.
- FLETCHER, T., H. ANDRIEU et P. HAMEL (2013). « Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters : A state of the art ». In : *Advances in Water Resources* 51. 35th Year Anniversary Issue, p. 261-279. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>.
- FLETCHER, T. D., W. SHUSTER, W. F. HUNT, R. ASHLEY, D. BUTLER, S. ARTHUR et al. (2015). « SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage ». In : *Urban Water Journal* 12.7, p. 525-542. DOI : 10.1080/1573062X.2014.916314.

- FURUSHO, C. (2011). « Modélisation hydrologique des bassins versants périurbains ». Thèse de doct. Ecole Doctorale SPIGA de l'Ecole Centrale de Nantes.
- FURUSHO, C., H. ANDRIEU et K. Chancibault (2014). « Analysis of the hydrological behaviour of an urbanizing basin ». In : *Hydrological Processes* 28, p. 1809-1819. DOI : 10.1002/hyp.9706.
- FURUSHO, C., K. Chancibault et H. ANDRIEU (2010). « Runoff generation on a urbanizing river basin ». In : *Novatech - 7th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management*. Lyon, France.
- (2013). « Adapting the coupled hydrological model ISBA-TOPMODEL to the long-term hydrological cycles of suburban rivers : evaluation and sensitivity analysis ». In : *Journal of Hydrology* 485, p. 139-147. DOI : 10.1016/j.jhydro1.2012.06.059.
- GIANGOLA-MURZYN, A. (2010). « Etude de sensibilité du couplage ISBA-TOPMODEL : Sensibilité aux paramètres de sol sur le bassin versant de la Chézine ». Mém. de mast. Master II Géo-Environnement de l'Université de Nantes.
- GUERY, R. (2011). « Modélisation hydrologique du bassin versant périurbain de la Chézine : Application et adaptation du modèle URBS dédié au milieu urbain ». Mém. de mast. Master II Géo-Environnement de l'Université de Nantes.
- GUÉZÉNO, A. (2020). « Reconstruction du réseau d'assainissement de la partie sud de Nantes Métropole dans le cadre de l'étude de solutions d'adaptation à l'urbanisation et au changement climatique ». Mém. de mast. Ecole supérieure des géomètres et topographes.
- GUNAWARDENA, K., M. WELLS et T. KERSHAW (2017). « Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity ». In : *Science of The Total Environment* 584, p. 1040-1055. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>.
- GUPTA, H. V., H. KLING, K. K. YILMAZ et G. F. MARTINEZ (2009). « Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling ». In : *Journal of Hydrology* 377.1, p. 80-91. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydro1.2009.08.003>.
- HAYAMI, S. (1951). « On the propagation of flood waves ». English. In : *Disaster Prevision Research Institute Bulletin* 1, p. 1-16.
- HIDALGO, J., V. MASSON et C. BAEHR (2014). « From daily climatic scenarios to hourly atmospheric forcing fields to force Soil-Vegetation-Atmosphere transfer models ». In : *Frontiers in Environmental Science* 2, p. 40. DOI : 10.3389/fenvs.2014.00040.
- JACOBSON, C. R. (2011). « Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments : A review ». In : *Journal of Environmental Management* 92.6, p. 1438-1448. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.018>.
- JOANNIS, C., M. AUMONT et F. HAMIPOUD (2003). « La validation des résultats de mesure en temps différé - Exemple des débits en réseau d'assainissement. » In : *Journées des Sciences de l'Ingénieur du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées*.
- KIRKBY, M. J. (1976). « Tests of the random network model, and its application to basin hydrology ». In : *Earth Surface Processes* 1.3, p. 197-212. DOI : <https://doi.org/10.1002/esp.3290010302>.
- LABBAS, M. (2015). « Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales : Application au bassin de l'Yzeron (130km²). » Thèse de doct. Université Grenoble Alpes.

- LAUNEAU, P., Z. KASSOUK, F. DEBAINE, R. ROY, P. G. MESTAYER, C. BOULET et al. (2017). « Airborne hyperspectral mapping of trees in an urban area ». In : *International Journal of Remote Sensing* 38.5, p. 1277-1311. DOI : 10.1080/01431161.2017.1285080.
- LEMONSU, A., C. S. B. GRIMMOND et V. MASSON (2004). « Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City : Marseille ». In : *Journal of Applied Meteorology* 43.2, p. 312-327. DOI : [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0312:MTSEB0>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0312:MTSEB0>2.0.CO;2).
- LEMONSU, A., V. MASSON, L. SHASHUA-BAR, E. ERELL et D. PEARLMUTTER (2012). « Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas ». In : *Geoscientific Model Development* 5.6, p. 1377-1393. DOI : 10.5194/gmd-5-1377-2012.
- LEROYER, S., J. MAILHOT, S. BÉLAIR, A. LEMONSU et I. B. STRACHAN (2010). « Modeling the surface energy budget during the thawing period of the 2006 Montreal Urban Snow Experiment ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49.1, p. 68-84.
- LI, J., F. JOHNSON, J. EVANS et A. SHARMA (2017). « A comparison of methods to estimate future sub-daily design rainfall ». In : *Advances in Water Resources* 110, p. 215-227. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.020>.
- LI, J., C. STRONG, J. WANG et S. BURIAN (2023). « An Event-Based Resilience Index to Assess the Impacts of Land Imperviousness and Climate Changes on Flooding Risks in Urban Drainage Systems ». In : *Water* 15.14. DOI : 10.3390/w15142663.
- LISNEUF, J. (2022). *Étude des variables psychologiques, météorologiques et environnementales en lien avec le confort thermique urbain en extérieur*. Rapp. tech. Master II Psychologie Sociale, du Travail et des Organisations, Nantes Université.
- LONG, N., A. BELLEC, E. BOCHER et G. PETIT (2014). « Influence of the methodology (pixel-based vs object-based) to extract urban vegetation from VHR images in different urban zones ». In : *5th Geobia Conference*.
- LOTFI, Z. (2015). « Analyse des données de température et de précipitations issues des scénarios de changement climatiques : impact à l'échelle de la ville de Nantes. » Mém. de mast. Stage de Master II Sciences et Techniques des Environnements Urbains de l'Ecole Centrale de Nantes.
- LOTFI, Z., K. Chancibault, C. JOANNIS, H. ANDRIEU, G. CHEBBO, S. AZIMI et al. (2016a). *Fonctionnement du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII*. Rapp. tech.
- (2016b). *Reconstruction du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII*. Rapp. tech.
- MASSON, V., C. S. B. GRIMMOND et T. R. OKE (2002). « Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities ». In : *Journal of Applied Meteorology* 41.10, p. 1011-1026. DOI : [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2).
- MASSON, V., P. LE MOIGNE, E. MARTIN, S. FAROUX, A. ALIAS, R. ALKAMA et al. (2013). « The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes ». In : *Geoscientific Model Development* 6.4, p. 929-960. DOI : 10.5194/gmd-6-929-2013.

- MASSON, V. (2000). « A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 94.3, p. 357-397. DOI : 10.1023/A:1002463829265.
- MASSON, V., J.-L. CHAMPEAUX, F. CHAUVIN, C. MERIGUET et R. LACAZE (2003). « A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models ». In : *Journal of Climate* 16.9, p. 1261-1282. DOI : [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2).
- MESTAYER, P., I. BAGGA, I. CALMET, G. FONTANILLES, D. GAUDIN, J. LEE et al. (2011). « The FluxSAP 2010 hydroclimatological experimental campaign over an heterogeneous urban area ». In : *11th European Meteorological Society Annual Meeting-10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*.
- MESTAYER, P., K. Chancibault, L. LEBouc, L. LETELLIER, M. MOSINI, F. RODRIGUEZ et al. (2011). « FluxSAP 2010 experimental campaign over an heterogeneous urban zone, Part 1 : heat and vapour flux assessment ». In : *14th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*.
- MONTGOMERY, D. C. (p. d.). *Design and Analysis of Experiments*. Sous la dir. d'A. S. UNIVERSITY. John Wiley & Sons Inc.
- MORIASI, D. N., J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGNER, R. D. HARMEL et T. L. VEITH (2007). « Model evaluation guidelines for system quantification of accuracy in watershed Simulation ». In : *Transactions of the ASABE* 50.3, p. 885-900. DOI : 10.13031/2013.23153.
- MOSSET, A., K. Chancibault et E. BERNARD (2021). *Extraire le signal d'eau pluviale d'un hydrogramme unitaire*. Revue annuelle Brigadoon.
- MUSZ-POMORSKA, A. et M. K. WIDOMSKI (oct. 2022). « Analysis of the impact of the degree of catchment sealing on the operation of drainage system ». In : *Applied Water Science* 12.11, p. 253.
- O'NEILL, B. C., E. KRIEGLER, K. RIAHI, K. L. EBI, S. HALLEGATTE, T. R. CARTER et al. (fév. 2014). « A new scenario framework for climate change research : the concept of shared socioeconomic pathways ». In : *Climatic Change* 122.3, p. 387-400.
- O'CALLAGHAN, J. et D. MARK (1984). « The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. » In : *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28, p. 328-344. DOI : 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
- OKE, T. R. (1981). « Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island - Comparison of Scale Model and Field Observations ». In : *JOURNAL OF CLIMATOLOGY* 1.3, p. 237-&.
- (1982). « The energetic basis of the urban heat island ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108.455, p. 1-24. DOI : 10.1002/qj.49710845502.
- (1987). « Boundary Layer Climate ». In : Routledge. Chap. 8, p. 262-303.
- ONU (2023). *Rapport Habitat Côte d'Ivoire*. Rapp. tech. Organisation des Nations Unies.
- OURRAI, S., A. MOSSET, K. Chancibault et G. CHEBBO (2019). *Réseaux d'assainissement complets mais simplifiés de Paris et sa petite couronne : modélisation, évaluation et analyse*. Rapp. tech. Livrable du Programme PIREN-Seine, phase VII.

- PETIT, G. et E. BOCHER (p. d.). *La base de données MApUCE. Focus sur les données socio-économiques*. URL : https://hal.science/hal-02008382/file/Base_MApUCE_donnees_socio_eco.pdf.
- POIRIER, A. (2012). « Impact de la résolution des données d'occupation du sol sur la Modélisation hydrologique d'un bassin versant périurbain : Application au bassin versant de la Chézine ». Mém. de mast. Stage de Master II Géo-Environnement de l'Université de Nantes.
- REDON, E., A. LEMONSU, M. MUSY, V. MASSON, C. D. MUNCK et K. Chancibault (2014). « Modelling of urban vegetation as a thermal regulator and management of associated water resources for neighbourhood to city-scale applications ». In : *3rd International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island*. Venice, Italy.
- REDON, E. C., A. LEMONSU, V. MASSON, B. MORILLE et M. MUSY (2020). « Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0 ». In : *Geoscientific Model Development* 10.1, p. 385-411. DOI : 10.5194/gmd-10-385-2017.
- REDON, E., A. LEMONSU et V. MASSON (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) ». In : *Geoscientific Model Development* 13.2, p. 385-399.
- RODRIGUEZ, F., H. ANDRIEU et F. MORENA (2008). « A distributed hydrological model for urbanized areas – model development and application to case studies. » English. In : *Journal of Hydrology* 351, p. 268-287.
- RODRIGUEZ, F., E. BOCHER et K. Chancibault (2013). « Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties ». In : *Journal of Hydrology* 485, p. 54-67. DOI : 10.1016/j.jhydro1.2012.11.023.
- RODRIGUEZ, F., A.-L. LE DELLIOU, H. ANDRIEU et J. GIRONAS (2020). « Groundwater Contribution to Sewer Network Baseflow in an Urban Catchment-Case Study of Pin Sec Catchment, Nantes, France ». In : *Water* 12.3. DOI : 10.3390/w12030689.
- ROUHIER, L., F. GARAVAGLIA, M. LE LAY, T. MICHON, W. CASTAINGS, N. LE MOINE et al. (2018). « Tailor-made spatial patterns for hydrological model parameters combining regionalisation methods ». In : *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2018, p. 1-23. DOI : 10.5194/hess-2018-342.
- SAULNIER, G.-M., K. J. BEVEN et C. OBLED (1997). « Digital elevation analysis for distributed hydrological modelling : reducing scale dependence in effective hydraulic conductivity values ». In : *Water Resources Research* 33.9, p. 2097-2101.
- SAVARY, L. (2023). « Sensibilité d'un modèle hydro-climatique aux données d'occupation du sol : application à l'échelle de la métropole nantaise ». Mém. de mast. Stage de Master II Géo-Environnement de l'Université de Nantes.
- SCHOETTER, R., Y. T. KWOK, C. de MUNCK, K. K. L. LAU, W. K. WONG et V. MASSON (2020). « Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-v9. 0 and Meso-NH-v5. 3 for modelling the urban climate of high-rise cities ». In : *Geoscientific Model Development* 13.11, p. 5609-5643.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, J.-M. BRUN, A. LEMONSU, V. MASSON, A. BOONE et al. (2018). « Improvements of the hydrological processes of the Town Energy Balance Model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact

- assessment ». In : *Geoscientific Model Development Discussions* 2018, p. 1-28. DOI : 10.5194/gmd-2018-39.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X. (2019). « Pour une analyse des impacts du changement climatique sur l'hydrologie urbaine : Modélisation hydro-microclimatique de deux bassins versants expérimentaux de l'agglomération nantaise ». Thèse de doct. Ecole doctorale "Sciences Pour l'Ingénieur : Génie civil".
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, H. ANDRIEU, A. LEMONSU, I. CALMET, P. KERAVEC et al. (2021). « Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model : Towards an assessment tool for nature based solution performances ». In : *Urban Climate* 39, p. 100925. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100925>.
- TUNQUI NEIRA, J. M., M.-C. GROMAIRE, K. Chancibault et G. CHEBBO (2023a). « Modélisation des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant dans TEB. » In : *Séminaire scientifique OPUR5*. Ecole des Ponts ParisTech, Champs-sur-Marne.
- TUNQUI NEIRA, J. M., M.-C. GROMAIRE, K. Chancibault et G. CHEBBO (2023b). « Toward a comprehensive functional typology of stormwater control measures for hydrological and water quality modeling purposes ». In : *Blue-Green Systems* 5.1, 16 pages. DOI : 10.2166/bgs.2023.026.
- UNITED NATIONS, D. o. E. et P. D. SOCIAL AFFAIRS (2019). *World Urbanization Prospects : The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. Rapp. tech. United Nations.
- VINCENDON, B., V. DUCROCQ, G.-M. SAULNIER, L. BOUILLOUD, K. Chancibault, F. HABETS et al. (2010). « Benefit of coupling the ISBA land surface model with a TOP-MODEL hydroogical model version diedicated to Mediterranean flash-floods ». In : *Journal of Hydrology* 394, p. 256-266. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2010.04.012.
- YANG, L., G. NI, F. TIAN et D. NIYOGI (2021). « Urbanization Exacerbated Rainfall Over European Suburbs Under a Warming Climate ». In : *Geophysical Research Letters* 48.21. e2021GL095987 2021GL095987, e2021GL095987. DOI : <https://doi.org/10.1029/2021GL095987>.
- YATES, E., S. ANQUETIN, V. DUCROCQ, J.-D. CREUTIN, D. RICARD et K. Chancibault (2006). « Point and areal validation of forecast precipitation fields ». English. In : *Meteorological Applications* 13.1, p. 1-20. DOI : 10.1017/S1350482705001921.

Annexes

Annexe A

Pré-traitement des données débitmétriques du réseau unitaire

Dans le but de pouvoir comparer les débits simulés à des débits mesurés, pour la phase de calage du modèle puis pour la phase d'évaluation, les débits mesurés sur le réseau unitaire, par les équipes de gestion du réseau, doivent être pré-traités. La part des eaux usées doit être extraite, pour ne conserver que la part des eaux pluviales et de l'eau du sol drainée par les réseaux. Les eaux provenant de la surface, en lien avec le lessivage de la voirie est supposée négligeable, par manque d'information. Les différents services des quatre départements en charge des réseaux départementaux et interdépartementaux du Grand Paris, nous ont fourni de nombreuses données (tableau A.1)

Après un travail conséquent de validation des données fournies, une première sélection des stations a été faite en fonction de :

- la qualité de la donnée parfois déjà identifiée par les gestionnaire, mais pas toujours cohérente avec nos objectifs de modélisation ;
- selon la qualité du réseau reconstruit en amont de la station de mesure.

Dans le réseau unitaire, les effluents se composent de différentes eaux :

- les eaux usées, présentes tout le temps, mais de façon variable selon le jour et selon l'heure de la journée ;
- les eaux claires, par temps de pluie, collectées par ruissellement ou par mauvais branchement ;
- les eaux claires parasites d'infiltration, en période humide, lorsque la nappe affleure les collecteurs. Mais toutes les villes ne sont pas soumises à ces eaux claires parasites d'infiltration.

Le modèle hydrologique que nous avons développé, représente toutes ces contributions sauf les eaux usées. C'est pourquoi, selon l'approche de JOANNIS et al. (2003), les débits mesurés en réseau unitaire doivent être pré-traités. Pour cela, dans le cadre de la thèse de E. BERNARD (2021), nous avons testé et calé l'approche d'extraction du signal d'eaux usées proposée dans l'outil Wiski (Kisters) utilisé pour la gestion de la base de données Brigadoon (MOSSET et al. (2021)).

Enfin, pour les déversoirs d'orage, la notion de déversoir d'orage équivalent a été utilisée (partie II.2.3.b) afin de simplifier la phase de calage. Ainsi, les bassins versants jaugés des Hauts-de-Seine, très instrumentés en déversoirs d'orage, ont tous été simplifiés à l'aide d'un seul DO équivalent par bassin (É. BERNARD, Chancibault et al., 2021 ; É. BERNARD, MUNCK et al., 2021) dont le débit mesuré est la somme des débits des DO amont du bassin. Les stations finalement retenues pour le calage sont listées dans le tableau A.2.

TABLE A.1 – Synthèse des données débitmétriques et pluviométriques fournies par les différents services de gestion des réseaux d'assainissement départementaux et interdépartementaux de Paris et sa petite couronne. D'après E. BERNARD, 2021

Départements gestionnaires (Service de gestion)	Nombre de stations	Période
Ville de Paris (SAP)	2 points de transfert	2014
Hauts-de-Seine (SDA) <i>Ensemble des stations</i>	33 points de transfert 73 déversoirs d'orage 18 pluviomètres	2012-2018
Seine-Saint-Denis (DEA) <i>Sélection des stations en lien avec la DEA</i>	10 points de transfert (dont 3 EP) 4 déversoirs d'orage 7 pluviomètres	2000-2018
Val de Marne (SDEA) <i>Ensemble des données</i>	2 points de transfert 11 déversoirs d'orage 31 pluviomètres	2002-2007 2002-2008

TABLE A.2 – Synthèse des données débitmétriques et pluviométriques conservées pour le calage du modèle pour l'étude de Paris et sa petite couronne. D'après E. BERNARD, 2021.

Départements gestionnaires (Service de gestion)	Nombre de stations	Période
Hauts-de-Seine (SDA)	9 points de transfert 5 DO équivalents	2012-2018
Seine-Saint-Denis (DEA)	3 points de transfert 3 DO	2000-2018
Val de Marne (SDEA)	3 points de transfert 4 DO	2002-2007

Annexe B

Calage : approche régionalisée, à l'échelle du Grand Paris

Caler un modèle à l'échelle d'une agglomération, telle que celle du Grand Paris (domaine de $35\text{km} \times 35\text{km}$), nous empêche d'appliquer la méthode de calage utilisée jusqu'alors, qui conduit à la détermination d'une combinaison de paramètres homogènes sur tout le domaine d'étude. En effet, le territoire étudié est suffisamment vaste pour contenir des bassins versants aux fonctionnements assurément variés. Afin de déterminer la combinaison des paramètres à caler pour tous les bassins versants de la zone d'étude, jaugés et non jaugés, É. BERNARD, Chancibault et al. (2021) et É. BERNARD, MUNCK et al. (2021) se sont appuyées sur les méthodes de régionalisation utilisées pour les bassins ruraux (ROUHIER et al., 2018). L'hypothèse de départ est que les valeurs des paramètres à caler d'un modèle hydrologique dépendent des caractéristiques physiographiques des bassins versants. Ainsi chaque bassin versant avec les mêmes caractéristiques nécessiterait les mêmes valeurs de paramètres pour un modèle. La méthode consiste donc à regrouper les bassins versants par classe, avec au moins un bassin versant jaugé dans chaque classe. Une fois le calage effectué des bassins versants jaugés, on applique la même combinaison de paramètres à caler pour les bassins versants de la même classe (figure B.1).

Ainsi, les critères de classification sélectionnés sont :

- la pente moyenne du bassin,
- le type de réseau (unitaire ou d'eau pluviale),
- le taux d'imperméabilisation.

La classification des 39 bassins versants sélectionnés conduit à 5 classes :

- pentu avec faible imperméabilisation et réseau d'eau pluviale,
- pentu avec faible imperméabilisation et réseau unitaire,
- pentu avec imperméabilisation moyenne et réseau unitaire,
- peu pentu avec imperméabilisation moyenne et réseau unitaire,
- peu pentu avec forte imperméabilisation et réseau unitaire

Chaque classe a au moins un bassin versant jaugé et les classes comprennent entre 3 et 14 bassins versants non jaugés. Cette méthode mériterait d'être approfondie. Il serait intéressant de tester d'autres critères que les 3 retenus, comme par exemple le type de sol (ou la texture du sol) qui

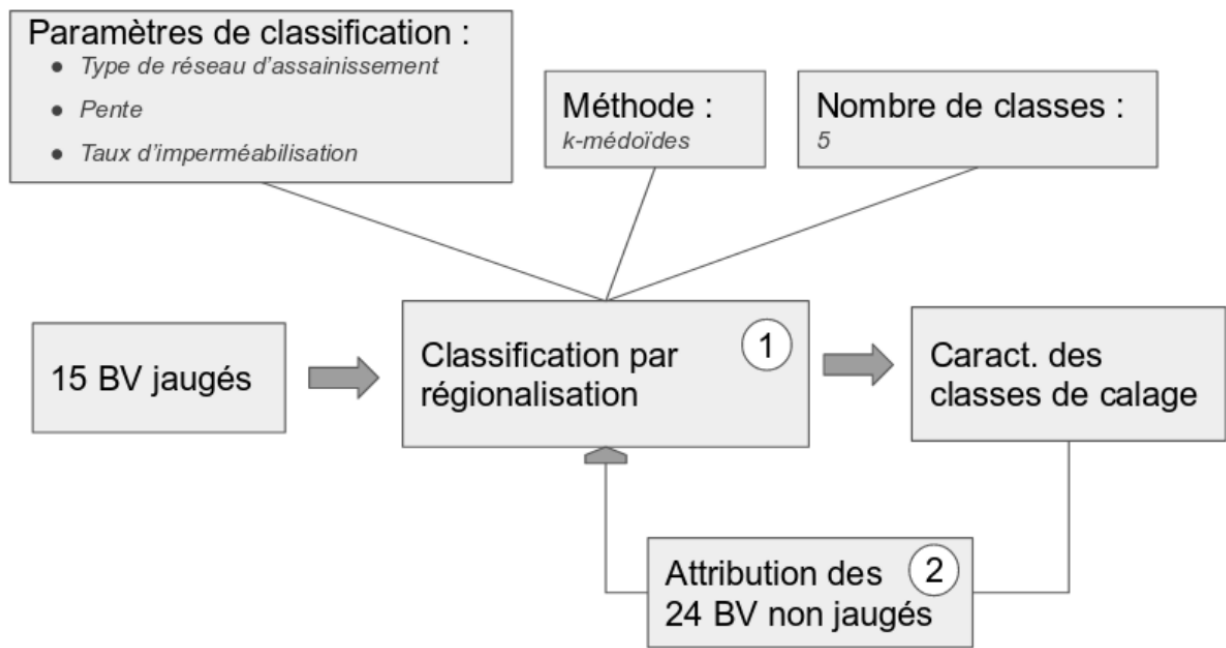


FIGURE B.1
Schéma des étapes de la méthode de classification des bassins versants par régionalisation (E. BERNARD, 2021).

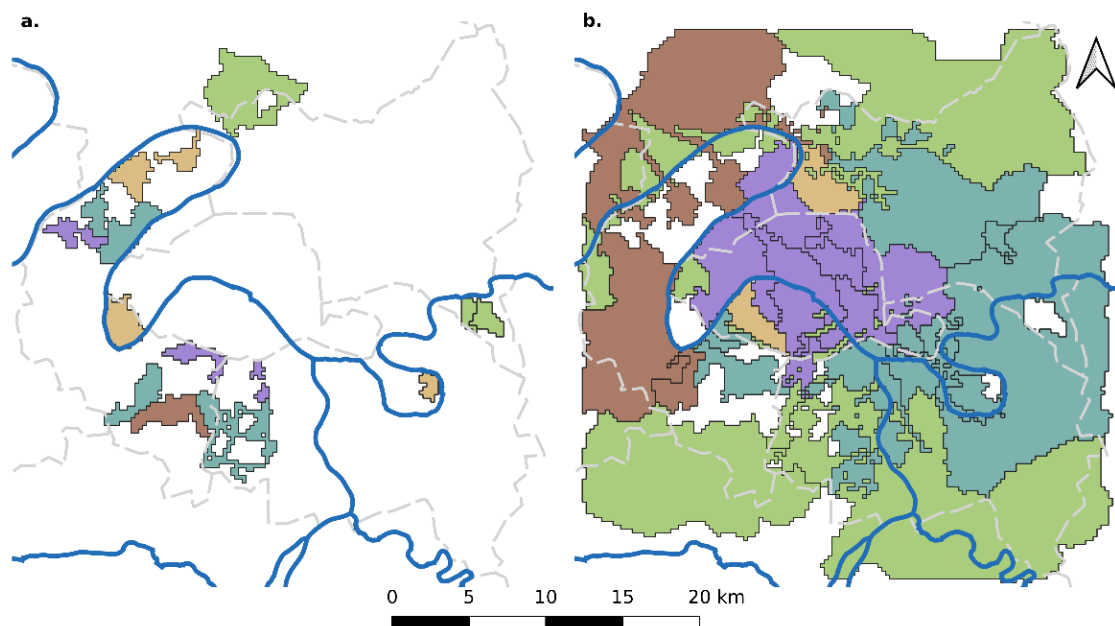


FIGURE B.2
Localisation et identification des classes des bassins versants jaugés (a) et non jaugés (b). Les couleurs indiquent la classe à laquelle chaque bassin versant appartient : pentu avec faible imperméabilisation et réseau d'eau pluviale (vert), pentu avec faible imperméabilisation et réseau unitaire (marron), pentu avec imperméabilisation moyenne et réseau unitaire (bleu), peu pentu avec imperméabilisation moyenne et réseau unitaire (beige) et peu pentu avec forte imperméabilisation et réseau unitaire (violet)) (D'après E. BERNARD, 2021).

joue un rôle important dans la réponse d'un bassin versant, d'autant plus si le bassin est peu imperméabilisé, ou encore la pente qui peut être calculée de différentes façons.

La présence, dans certains bassins versants, de DO et DO équivalents ou de maillages (qui modifient le réseau aval recevant les effluents, créant une difffluence sur le réseau, lorsqu'ils sont mis en oeuvre) ne facilitent pas la phase de calage. En plus des paramètres à caler, les débits seuil de déversement ou de mise en fonction de chaque maillage doivent être déterminés. Le transfert jusqu'à l'exutoire étant désormais une procédure externe de la modélisation, la détermination des débits seuils des ouvrages ne nécessite pas plus de simulations avec SURFEX.

Cette détermination est faite en deux étapes :

- les débits de chaque bassin versant sont d'abord calculés sur les périodes identifiées, en faisant l'hypothèse qu'aucun ouvrage n'est en fonction. Les bassins versant sans ouvrage peuvent ainsi être calés, en identifiant la combinaison conduisant aux débits simulés les plus proches des débits mesurés.
- Le routage est ensuite appliqué avec différentes valeurs de débits seuils appliquées à tous les bassins versants. Les valeurs de débits seuils améliorant le plus les scores sont retenues pour chaque bassin versant.

Grâce au calcul des moyennes des scores NSE et PBias, pour chaque classe, la combinaison de paramètres conduisant à la simulation des débits la plus performante en moyenne dans chaque classe est identifiée. L'étude des différents scores obtenus pour chaque valeur de paramètre et chaque bassin versant met en évidence que les performances du modèle peuvent être très variées pour les différents bassins versants d'une même classe. Ce résultat questionne donc la classification établie. Par ailleurs il apparaît aussi que sur les 4 paramètres à caler identifiés, deux ne sont probablement pas à caler finalement : le coefficient caractérisant les défauts d'étanchéité du réseau *IP_{sew}* et le taux de limitation du drainage profond, identifié par STAVROPULOS-LAFFAILLE, Chancibault, ANDRIEU et al. (2021) comme impactant le bilan énergétique, via le flux de chaleur latente (partie II.1.3). Par conséquent, la combinaison de paramètres à caler, déterminée par classe, à partir de la moyenne des scores obtenus est très probablement critiquable.

Annexe C

Publications

Articles

- ACHOUR, M., N. CHAHINIAN, **K. Chancibault**, H. ANDRIEU et R. MOUSSA (2023). « Morphometric properties, scaling laws and hydrologic response of the Greater Paris combined sewer system. » In : *Hydrological Processes*.
- ANQUETIN, S., E. YATES, V. DUCROCQ, S. SAMOUEILLAN, **K. Chancibault**, S. DAVOLIO et al. (2005). « The 8 and 9 September 2002 flash flood event in France : a model intercomparison ». In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, p. 741-754.
- BOUILLOUD, L., **K. Chancibault**, B. VINCENDON, V. DUCROCQ, F. HABETS, M. SAULNIER et al. (2010). « Coupling the ISBA land surface model and the TOPMODEL hydrological model for Mediterranean Flash-Flood forecasting : description, calibration and validation ». In : *Journal of Hydrometeorology* 11, p. 315-333. DOI : 10.1175/2009JHM1163.1.
- BOUZOUIDJA, R., P. CANNAVO, P. BODÉNAN, Á. GULYÁS, M. KISS, A. KOVÁCS et al. (2021). « How to evaluate nature-based solutions performance for microclimate, water and soil management issues - Available tools and methods from Nature4Cities European project results ». In : *Ecological Indicators* 125, p. 16. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107556>.
- Chancibault, K.**, V. DUCROCQ et J. LAFORE (oct. 2003). « A numerical study of a nontornadic supercell over France ». English. In : *Monthly Weather Review* 131.10, p. 2290-2311. DOI : 10.1175/1520-0493(2003)131<2290:ANSOAN>2.0.CO;2.
- Chancibault, K.**, S. ANQUETIN, V. DUCROCQ et G.-M. SAULNIER (2006). « Hydrological evaluation of high-resolution precipitation forecasts of the Gard flash-flood event (8-9 September 2002) ». In : *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 132, p. 1091-1117. DOI : 10.1256/qj.04.164.
- CHAVEZ, S., N. MOLINES, **K. Chancibault** et B. de GOUVELLO (2024). « Planning for climate change with the best of intentions... Analyzing discourses of plans and planners to highlight adaptation approaches. » In : *ARTICULO*. accepted.
- DUCROCQ, V., C. LEBEAUPIN, T. THOUVENIN, H. GIORDANI, **K. Chancibault**, S. ANQUETIN et al. (2004). « The 8-9 September 2002 extreme flash-flood : Meteorological description and mesoscale simulations ». French. In : *Houille Blanche - Revue Internationale de l'eau* 6, p. 86-92. DOI : 10.1051/lhb:200406012.
- FURUSHO, C., H. ANDRIEU et **K. Chancibault** (2014). « Analysis of the hydrological behaviour of an urbanizing basin ». In : *Hydrological Processes* 28, p. 1809-1819. DOI : 10.1002/hyp.9706.
- FURUSHO, C., **K. Chancibault** et H. ANDRIEU (2013). « Adapting the coupled hydrological model ISBA-TOPMODEL to the long-term hydrological cycles of suburban rivers : evaluation and sensitivity analysis ». In : *Journal of Hydrology* 485, p. 139-147. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2012.06.059.
- KHALIFA, A., R. BOUZOUIDJA, M. MARCHETTI, M. BUÈS, L. BOUILLOUD, E. MARTIN et al. (2018). « Individual contributions of anthropogenic physical processes associated to urban traffic in improving the road surface temperature forecast using TEB model. » In : *Urban Climate* 24, p. 778-795. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.09.003>.
- KHALIFA, A., M. MARCHETTI, L. BOUILLOUD, E. MARTIN, M. BUÈS et **K. Chancibault** (2016). « Accounting for anthropic energy flux of traffic in winter urban road surface

- temperature simulations with the TEB model. » In : *Geoscientific Model Development* 2, p. 547-565.
- RODRIGUEZ, F., E. BOCHER et K. Chancibault (2013). « Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties ». In : *Journal of Hydrology* 485, p. 54-67. DOI : 10.1016/j.jhydro1.2012.11.023.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, H. ANDRIEU, A. LEMONSU et V. MASSON (2017b). « Validation hydrologique d'un modèle hydro-microclimatique urbain (TEB-Hydro) : analyse de sensibilité sur le bassin versant de Rezé (Nantes, France) ». In : *La Houille Blanche* 3, p. 14-21. DOI : 10.1051/lhb/2017017.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, J.-M. BRUN, A. LEMONSU, V. MASSON, A. BOONE et al. (2018). « Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance Model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment ». In : *Geoscientific Model Development Discussions* 2018, p. 1-28. DOI : 10.5194/gmd-2018-39.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, H. ANDRIEU, A. LEMONSU, I. CALMET, P. KERAVEC et al. (2021). « Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model : Towards an assessment tool for nature based solution performances. » In : *Urban Climate* 39, p. 100925. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100925>.
- TUNQUI NEIRA, J. M., M.-C. GROMAIRE, K. Chancibault et G. CHEBBO (2023). « Toward a comprehensive functional typology of stormwater control measures for hydrological and water quality modeling purposes ». In : *Blue-Green Systems* 5.1, 16 pages. DOI : 10.2166/bgs.2023.026.
- VINCENDON, B., V. DUCROCQ, S. DIERER, V. KOTRONI, M. L. LAY, M. MILELLI et al. (2009). « Flash flood forecasting within the PREVIEW project : value of high-resolution hydrometeorological coupled forecast ». In : *Meteorology and Atmospheric Physics* 103, p. 115-125. DOI : 10.1007/s00703-008-0315-6.
- VINCENDON, B., V. DUCROCQ, G.-M. SAULNIER, L. BOUILLOU, K. Chancibault, F. HABETS et al. (2010). « Benefit of coupling the ISBA land surface model with a TOP-MODEL hydrological model version dedicated to Mediterranean flash-floods ». In : *Journal of Hydrology* 394, p. 256-266. DOI : 10.1016/j.jhydro1.2010.04.012.
- YATES, E., S. ANQUETIN, V. DUCROCQ, J.-D. CREUTIN, D. RICARD et K. Chancibault (mars 2006). « Point and areal validation of forecast precipitation fields ». English. In : *Meteorological Applications* 13.1, p. 1-20. DOI : 10.1017/S1350482705001921.

Colloques internationaux avec actes

- ALLARD, A., K. Chancibault et H. ANDRIEU (2013). « Construction du réseau de drainage de l'ensemble d'une agglomération urbaine : cas de Nantes Est. » In : *Novatech*, p. 10.
- (2014b). « Vector representation of a complete urban drainage network for hydrological modelling at the whole city scale ». In : *13th International Conference on Urban Drainage*. Kuching, Sarawak, Malaysia.
- BARTOLI, O., N. CHAHINIAN, A. ALLARD, J.-S. BAILLY, K. Chancibault, F. RODRIGUEZ et al. (2015). « Manhole cover detection using a geometrical filter on very high resolution aerial and satellite images ». English. In : *2015 Joint Urban Remote Sensing*

- Event (JURSE)*. Ecole Polytechnique Fed Lausanne ; Univ Lausanne Inst Geog Durabilite ; Univ Zurich. IEEE.
- BERNARD, E., K. Chancibault, C. de MUNCK et A. MOSSET (2021). « A new hydro-climate model for urban water management including nature based solutions : a preliminary application on Paris metropolitan area. » In : *2nd International Conference "Water, Megacities and Global Change"*, p. 12.
- BERNARD, E., C. de MUNCK, K. Chancibault, A. MOSSET et A. LEMONSU (2021). « Hydro-climatic response of Paris Metropolitan area through TEB-Hydro model simulation : multi-catchment calibration and model evaluation ». In : *15th International Conference on Urban Drainage*.
- BETOU, F., A. RUAS, K. Chancibault, E. GAUME, P. LAUNEAU et M. GIRAUD (2023). « Modélisation hydro-climatique de la métropole nantaise : préparation des données d'occupation du sol. » In : *Novatech - 11th international conference on water*. 4 p.
- BRAUD, I., K. Chancibault, S. DEBIONNE, G. L. KOUYI, B. SARRAZIN, C. JACQUEMINET et al. (2010). « The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) : experimental set up, modelling strategy and first results ». In : *Novatech - 7th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management*. Lyon, France.
- Chancibault, K., V. DUCROCQ et J.-P. LAFORE (2002). « A numerical study of a nontor-nadic supercell over France ». English. In : *21st Conference on Severe Local Storms*. Amer Meteorol Soc. Amer Meteorol Soc, p. 271-274.
- Chancibault, K., F. HABETS, G. SAULNIER, V. DUCROCQ et S. ANQUETIN (2006). « A hydro-meteorological high-resolution coupled system for flash-flood forecasting ». In : *2nd International Symposium on Quantitative Precipitation Forecasting and Hydrology*. Boulder, CO, USA.
- Chancibault, K., A. LEMONSU, J.-M. BRUN, C. D. MUNCK, A. ALLARD, N. LONG et al. (2014b). « Hydrological Evaluation of Urban Greening Scenarios : Application to the City of Nantes, France ». In : *13th International conference on Urban Drainage*. Kuching, Sarawak, Malaysia.
- Chancibault, K., A. MOSSET, Z. LOTFI, C. BEAUVAIS, S. SHOBAIR, S. OURRAI, N. VERNIN et al. (2021). « Reconstruction of the complete sanitation network at Greater Paris scale. » In : *Proceedings of the 15th Internationale Conference on Urban Drainage*. 3p.
- Chancibault, K., A. MOSSET, Z. LOTFI, S. SHOBAIR, C. LEHOUCQ, S. AZIMI et al. (2020). « Reconstruction and simplification of the Greater Paris sewerage network ». In : *Proceedings of the 2nd International conference "Water, Megacities and Global Change"*. Sous la dir. d'UNESCO.
- FURUSHO, C., K. Chancibault et H. ANDRIEU (2010a). « Analysis of the hydrological functioning of an urbanizing river. » In : *World Wide Workshop for Young Environmental Scientists*.
- (2010c). « Runoff generation on a urbanizing river basin ». In : *Novatech - 7th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management*. Lyon, France.
- KOUADIO, J., K. Chancibault et F. RODRIGUEZ (2020). « Les solutions fondées sur la nature : une stratégie d'adaptation aux changements globaux adaptée à l'Afrique subsaharienne? » In : *XIIèmes Journées Géographiques de Côte d'Ivoire*, p. 13.

- MESTAYER, P., I. BAGGA, I. CALMET, G. FONTANILLES, D. GAUDIN, J. LEE et al. (2011). « The FluxSAP 2010 hydroclimatological experimental campaign over an heterogeneous urban area ». In : *11th European Meteorological Society Annual Meeting-10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*.
- MESTAYER, P., K. Chancibault, L. LEBouc, L. LETELLIER, M. MMOSINI, F. RODRIGUEZ et al. (2011). « FluxSAP 2010 experimental campaign over an heterogeneous urban zone, Part 1 : heat and vapour flux assessment ». In : *14th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*.
- MUSY, M., L. MALYS, B. MORILLE, A. SZUCS, C. INARD, R. BOZONNET E. et al. (2014). « Impact of vegetation on urban climate, thermal comfort and building energy consumption—Overview of VegDUD project results. » In : *IC2UHI proceedings*, p. 719-730.
- PINSON, L., A. RUAS, V. MASSON et K. Chancibault (2015a). « Reconstruction de l'objet canicule : modélisation et représentation graphique. » In : *11ème Conférence Internationale Spatial Analysis and Geomatics*. P. 13.
- (2016). « Acteurs et mesures préventives à différentes échelles territoriales pour la création d'indices de dangerosité sur le risque caniculaire. » In : *CIST2016 proceedings. En quête de territoire(s) ? Looking for territoire(s) ?*, p. 385-392.
- REDON, E., A. LEMONSU, M. MUSY, V. MASSON, C. D. MUNCK et K. Chancibault (2014). « Modelling of urban vegetation as a thermal regulator and management of associated water resources for neighbourhood to city-scale applications ». In : *3rd International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island*. Venice, Italy.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, H. ANDRIEU, A. LEMONSU et V. MASSON (2017a). « Hydrological validation of an urban hydro-microclimate model (TEB-Hydro) : Case studies on urban catchments in Nantes (France) ». In : *14th International Conference on Urban Drainage*. Prague, Czech Republic.
- VINCENDON, B., K. Chancibault, V. DUCROCQ, L. BOUILLOUD, G. SAULNIER, M. LELAY et al. (2007). « Flash flood fore-casting within the preview project : high resolution hydrometeorological simulations. » In : *ICAM2007*.

Colloques nationaux avec actes

- ALLARD, A., K. Chancibault et H. ANDRIEU (2014a). « Représentation du réseau de drainage urbain complet pour une modélisation hydrologique à l'échelle de l'agglomération ». In : *Journée Doctorale en Hydrologie Urbaine*. Lyon, France.
- BERNARD, E., C. de MUNCK, K. Chancibault et A. MOSSET (2020). « Définition d'un cadre de modélisation hydro-climatique à l'échelle de Paris et sa petite couronne. » In : *9èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine*.
- BETOU, F., K. Chancibault, A. RUAS et E. GAUME (2022). « Modélisation hydro-climatique de la métropole nantaise : préparation des données d'occupation du sol. » In : *10èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine*. 5 p.
- Chancibault, K., A. LEMONSU, J.-M. BRUN, C. D. MUNCK, A. ALLARD, N. LONG et al. (2014a). « Toward an urban water and energy budget model as an evaluation tool of urban planning : greening scenarios evaluation over the City of Nantes, in France. » In : *Symposium Toward integrated modelling of urban systems*. Lyon, France.

- CHAVEZ, S., N. MOLINES, A. GUEGAN, H. MASCLLET, K. Chancibault et B. DE GOUVELLO (2021). « Quelle prise en compte des enjeux d'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme (PLUi) ? Une démarche hybride d'analyse de contenu appliquée au PADD. » In : *57ème Colloque ASRDLF - Territoire(s) et numérique*.
- LERY, S., S. BOUARAFA, K. Chancibault et L. PINEAU (2017). « Températures de cours d'eau urbains : mesures, interprétations et singularités ». In : *SHF – Hydrométrie*. Lyon, France.
- PINSON, L., A. RUAS, V. MASSON et K. Chancibault (2015b). « Une meilleure connaissance et estimation du risque caniculaire en zone urbaine dense. » In : *AIC 2015 - Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, p. 6.
- STAVROPULOS-LAFFAILLE, X., K. Chancibault, H. ANDRIEU, A. LEMONSU et V. MASSON (2016). « Validation hydrologique d'un modèle hydro-microclimatique urbain (TEB-Hydro) : Analyse de sensibilité sur le bassin versant de Rezé (Nantes, France) ». In : *7èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine*.

Colloques sans acte

- BOUFFIER J. nd Poirier, A., S. RUCQUOI, A. MOSSET et K. Chancibault (2013). « Détermination de l'occupation du sol à partir des données géographiques disponibles ». In : *Colloque national "Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ?"*
- BRAUD, I., F. BRANGER, K. Chancibault, C. JACQUEMINET, P. BREIL, B. CHOCAT, S. DEBIONNE, C. DODANE, A. HONEGGER, T. JOLIVEAU, S. KERMADI, E. LEBLOIS, G. L. KOUYI et al. (2011b). « The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) ». In : *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
- Chancibault, K. (2021). « Les solutions fondées sur la nature pour l'adaptation au changement climatique. » In : *Atelier du club Ville et aménagement sur l'adaptation au changement climatique*. à distance.
- Chancibault, K., H. ANDRIEU, C. FURUSHO, A. GIONGOLA-MURZYN, C. LEROUX, L. LETELLIER et al. (2013). « Studying a periurban catchment, urban/rural transition zone : The Chézine river in Nantes ». In : *Ecocity World Summit*. Nantes, France.
- Chancibault, K., J. BOUFFIER, A. MOSSET, A. POIRIER et S. RUCQUOI (2013). « Détermination de l'occupation du sol à partir des données géographiques disponibles ». In : *Quelles innovations pour la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain ?* Nantes, France.
- Chancibault, K., E. BOZONNET, I. CALMET, A. LEMONSU, M. MUSY et F. RODRIGUEZ (2014). « Scénarios de végétalisation de la ville de Nantes (France) pour l'adaptation au changement climatique : évaluation énergétique, microclimatique et hydrologique ». In : *Adaptation au changement climatique : quelles contributions l'urbanisme peut-il apporter ?* Sion, Switzerland.
- (2015a). « Scénarios de végétalisation de la ville de Nantes : évaluation énergétique, microclimatique et hydrologique ». In : *Les bienfaits de la végétation dans nos villes et nos villages*. Caen, France.

- Chancibault, K., E. BOZONNET, I. CALMET, A. LEMONSU, M. MUSY et F. RODRIGUEZ (2015b). « Scénarios de végétalisation de la ville de Nantes : évaluation énergétique, microclimatique et hydrologique ». In : *COP21 - Comment adapter les territoires urbains aux futures canicules : pistes et stratégie d'adaptation du territoire Parisien*.
- Chancibault, K., E. BOZONNET, I. CALMET, A. LEMONSU, M. MUSY, F. RODRIGUEZ et al. (2017). « Régulation thermique et gestion des eaux pluviales par les arbres en ville : projet VegDUD et autres projets ». In : *32ème Arborencontre : Les plantations permettant de gérer les eaux pluviales et réguler la température en ville*. Montévrain, France.
- Chancibault, K., A. LEMONSU, J.-M. BRUN, C. D. MUNCK, A. ALLARD, V. MASSON et al. (2015). « Improving the water budget in the urban surface scheme TEB for a better evaluation of green infrastructures for adaptation purposes ». In : *9th International Conference on Urban Climate*. Toulouse, France.
- Chancibault, K., Z. LOTFI et H. ANDRIEU (2021). « Introduction aux projections du changement climatique et leurs incertitudes : focus sur les précipitations et la température. » In : *e-Journées Techniques Route 2021*.
- Chancibault, K., F. RODRIGUEZ, H. ANDRIEU, E. BOCHER, J. BOUYER, F. BRANGER, I. BRAUD, P. BREIL, Y. BRUNET et al. (2013). « Rôle de l'occupation du sol vis-à-vis de la modélisation des flux énergétiques et hydriques en milieu urbain et périurbain (projet Rosenhy) ». In : *Colloque de restitution de la 3e prospective nationale de recherche 2013/2017 en Surfaces et Interfaces Continentales*. Paris, France.
- Chancibault, K., F. RODRIGUEZ, M. MOSINI, C. FURUSHO, E. BOCHER, M. PALACCIO et al. (2009). « An experimental peri-urban basin in North-western France ». In : *EGU General Assembly conference Abstracts*.
- DUCROCQ, V., K. Chancibault, F. HABETS et S. ANQUETIN (2003). « Mesoscale modelling of a flooding storm. Application to the extreme flood of Gard ». In : *5th EGS Plinius Conference*. Ajaccio, France.
- FURUSHO, C., K. Chancibault et H. ANDRIEU (2010b). « Hydrological modelling of peri-urban river basins ». In : *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
- MALLET, A. et K. Chancibault (2015a). « Comment aménager la ville avec le climat ? » In : *POPSU Europe - Ilots de chaleur urbains, stratégies des villes face aux changements climatiques*. Vienna, Austria.
- MARCHETTI, M., A. KHALIFA, M. BUËS, L. BOUILLOUD, E. MARTIN et K. Chancibault (2015). « Urban pavement surface temperature. Comparison of numerical and statistical approach ». In : *EGU General Assembly Conference abstracts*.
- RODRIGUEZ, F., P. LAUNEAU, N. LONG, A. BOJU, P. KERAVEC, P. MESTAYER et al. (2017). « La télédétection au sein de l'ONEVU ». In : *Atelier Télédétection pour l'Etude des Milieux Urbains*. Toulouse, France.

Chapitres de livres

- Chancibault, K. et S. HERPIN (2024). « E-Book Project "Healthy corridors as drivers of social housing neighbourhoods for the co-creation of social, environmental and marketable NBS". Chapter "Environment" ». In : sous la dir. de G. MUNIZ, J. LAMEIRAS

- et B. BECHET. European Union's Horizon 2020. Chap. Evaluation of thermal comfort by physical indicators.
- LE ROY-LISNEUF, J., S. HERPIN, K. Chancibault et G. FLEURY-BAHI (2024). « E-Book Project "Healthy corridors as drivers of social housing neighbourhoods for the co-creation of social, environmental and marketable NBS". Chapter "Environment" ». In : sous la dir. de G. MUNIZ, M. CARDINALI et P. BODÉNAN. in progress. European Union's Horizon 2020. Chap. Increasing thermal comfort through NBS : how psychological and meteorological factors impact outdoor thermal comfort ?
- MALLET, A. et K. Chancibault (2015b). « Villes et changement climatique : ilots de chaleur urbains ». In : sous la dir. de J.-J. TERRIN. Parenthèses. Chap. Nantes, comment construire la ville avec le climat ?, p. 120-137.

Rapports

- BEAUVAIS, C., K. Chancibault, A. MOSSET et R. C. (2017). *Reconstruction du réseau hydrographique du département des Hauts-de-Seine en vue d'une modélisation hydrologique*. rapport technique. Livrable du Programme PIREN-Seine, phase VII.
- BECHET, B., J.-L. BERTRAND, K. Chancibault, L. DEVISME, G. FLEURY-BAHI, F. HABETS et al. (2023). *1er rapport du Groupe Interdisciplinaire de l'Evolution du Climat (GIEC) dans les Pays de la Loire*. Rapp. tech. Comité 21 Grand Ouest, sous la Direction de V. Raison-Victor et Antoine Charlot.
- BECHET, B., J.-L. BERTRAND, K. Chancibault, G. FLEURY-BAHI, V. RAISSON-VICTOR, M. ROBIN et al. (2023). *Des propositions pour passer à l'action... 2ème rapport du Groupe Interdisciplinaire de l'Evolution du Climat (GIEC) dans les Pays de la Loire*. Rapp. tech. Comité 21 Grand Ouest, sous la Direction de V. Raison-Victor et Antoine Charlot.
- BECHET, B., Y. LE BISSENNONNAIS, A. RUAS, A. AGUILERA, M. ANDRÉ, H. ANDRIEU et al. (2017). *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action*. Rapp. tech. INRAE.
- BRAUD, I., F. BRANGER, K. Chancibault, C. JACQUEMINET, P. BREIL, B. CHOCAT, S. DEBIONNE, C. DODANE, A. HONEGGER, T. JOLIVEAU, S. KERMADI, E. LEBLOIS, G. L. KOUYI et al. (2011a). *AVuPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) : rapport scientifique final du projet ANR-07-VULN-01*. Rapp. tech.
- BRAUD, I., F. BRANGER, K. Chancibault, C. JACQUEMINET, P. BREIL, B. CHOCAT, S. DEBIONNE, C. DODANE, A. HONEGGER, T. JOLIVEAU, S. KERMADI, E. LEBLOIS, G. LIPEME-KOUYI et al. (2011). *Assessing the Vulnerability of PeriUrban Rivers. Rapport scientifique final du projet AVuPUR (ANR-07-VULN-01)*. Rapp. tech. IRSTEA.
- Chancibault, K., F. RODRIGUEZ, H. ANDRIEU, E. BOCHER, J. BOUYER, F. BRANGER, I. BRAUD, P. BREIL, J.-M. BRUN et al. (2014). *Projet Rosenhy, résultats et perspectives, rapport scientifique détaillé du programme EC2CO*. Rapp. tech.
- Chancibault, K., A. MOSSET, Z. LOTFI, C. BEAUVAIS, S. SHOBAIR, S. OURRAI, J.-C. LINCA et al. (2019). *Hydrologie urbaine : Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne*. Rapport de synthèse PIREN-Seine, phase VII (2015-2019). Vol. 3. ARCEAU Ile de France, 51 p. DOI : 10.26047/PIREN.rapp.synth.2019.vol3.

- DE MUNCK, C., J.-M. BRUN, L. A. et K. Chancibault (2013). *Un modèle climatique urbain pour l'évaluation de politiques de végétalisation à grande échelle. Livrable du projet VegDUD*. Rapp. tech.
- LOTFI, Z., K. Chancibault, C. JOANNIS, H. ANDRIEU, G. CHEBBO, S. AZIMI et al. (2016a). *Fonctionnement du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII*. Rapp. tech.
- (2016b). *Reconstruction du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII*. Rapp. tech.
- SHOBAIR, S., A. MOSSET, K. Chancibault, J.-C. LINCA, A. RABIER et G. CHEBBO (2018). *Réseaux d'assainissement du Val de Marne en lien avec le réseau inter-départemental : fonctionnement, reconstruction et analyse*. Rapp. tech.
- SOULA, J., M. ANDRÉ, L. LECLERCQ, K. Chancibault, D. SCHERTZER et G. PIGEON (2013). *Projet Ville numérique : rapport final*. Rapp. tech. Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.

CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE : VERS UNE ÉVALUATION PLUS INTÉGRÉE DU DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE

Résumé

Depuis l'obtention de mon doctorat en physique de l'atmosphère, mes travaux de recherche se sont tournés vers l'hydrologie. L'étude de la prévisibilité des crues-éclair à partir de prévisions de pluies à meso-échelles m'a permis d'acquérir les connaissances sur les processus physiques associés et sur les modèles dédiés (famille des TOPMODELS), en mode événementiel. J'ai alors enrichi avec les écoulements latéraux de l'eau, un modèle de transferts d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère, développé à Météo-France (ISBA). L'objectif de ce modèle était d'améliorer la prévision des crues-éclair, grâce à une meilleure prise en compte de l'humidité des sols avant événement.

À mon arrivée au Laboratoire Eau et Environnement, j'ai ensuite commencé à me former à l'hydrologie urbaine, afin de développer un modèle hydrologique dédié aux bassins versants périurbains, sur la base du même modèle. Ces bassins périurbains croisent les caractéristiques des bassins urbains et naturels. Cette fois, le modèle visait le mode continu. Dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe VILLE du GAME, mes travaux ont depuis contribué à enrichir un modèle d'énergie des surfaces urbaines pour en faire un modèle hydro-climatique urbain (TEB), où les bilans énergétique et hydrique sont couplés avec un même niveau de complexité. Ce modèle fonctionne en mode continu sur des périodes pluriannuelles. Il a ainsi été appliqué et évalué à l'échelle de petits bassins urbains nantais, instrumentés (Rezé et Pin Sec). Sur le bassin du Pin Sec, la présence de données débitmétriques et de flux a permis de caractériser l'impact du nouveau bilan en eau sur le bilan énergétique. Le modèle a ensuite été appliqué sur de plus grands territoires : le Grand Paris et la métropole nantaise. Pour cela, des développements supplémentaires ont été nécessaires. Un outil de reconstruction du réseau d'assainissement (THOR) fonctionnel mais simplifié, a ainsi vu le jour. Diverses méthodes pour la construction du jeu de données d'occupation du sol à fournir en entrée du modèle ont été testées voire construites. Enfin ces dernières années, mes travaux de recherche se tournent plus vers la prospective. Les données de projections climatiques à notre disposition, sur le territoire nantais, ont été analysées. Des approches de désagrégation temporelle ont été enrichies, pour permettre d'étudier l'impact hydro-climatique du climat futur. De nouveaux développements dans TEB sont en cours, pour représenter les ouvrages de gestion à la source, afin de pouvoir évaluer de futurs scénarios d'aménagement (coll. LEESU/ENPC). En parallèle, dans le cadre d'une collaboration avec l'UTC et le Cerema, une analyse des documents réglementaires, du point de vue de la gestion des eaux pluviales, est menée. Cette analyse contribue au développement d'une méthodologie de construction de scénarios futurs d'aménagement réalistes, en lien avec les enjeux hydrologiques et microclimatiques locaux.

Ainsi, ces divers travaux me conduisent naturellement vers l'adaptation hydro-climatique des villes au changement global (urbanisation et changement climatique). Ce projet de recherche comprend des aspects de compréhension des phénomènes : comment l'urbanisation, d'une part et le changement climatique d'autre part, impactent la gestion des eaux pluviales. Le risque hydrologique en lien avec les crues urbaines sera initié. Ce

projet comprend aussi des aspects de développements d'outils et méthodes : comment construire les scénarios d'aménagement futurs sur la base des solutions d'adaptation à notre disposition ? Enfin, travailler sur de nouveaux territoires pour partager plus nos connaissances et pour les enrichir fait partie des objectifs de ce projet, avec ma participation à la construction d'un consortium en Côte d'Ivoire.

Abstract

Since obtaining my PhD in atmospheric physics, my research has focused on hydrology. Studying the predictability of flash floods based on mesoscale rainfall forecasts enabled me to acquire knowledge of the associated physical processes and dedicated models (TOP-MODELS family), in event mode. I then added lateral water flows to a model of water and energy transfers between soil, vegetation and atmosphere, developed at Météo-France (ISBA). The aim of this model was to improve forecasting of flash floods, by taking better account of pre-event soil moisture.

When I joined the Water and Environment Laboratory, I began training in urban hydrology, in order to develop a hydrological model dedicated to peri-urban catchment areas, based on the same model. These peri-urban basins combine the characteristics of urban and natural basins. This time, the model was aimed at the continuous mode. In collaboration with VILLE team (GAME), my work has since contributed to enriching an urban surface energy model into an urban hydro-climatic model (TEB), where energy and water balances are coupled with the same level of complexity. This model operates in continuous mode over multi-year periods. It was applied and evaluated on small, instrumented urban basins in Nantes (Rezé and Pin Sec). In the Pin Sec basin, the presence of flowmeter and flow data enabled us to characterize the impact of the new water balance on the energy balance. The model was then applied to larger territories : Greater Paris and the Nantes metropolitan area. For this, additional developments were required. A functional but simplified sewer network reconstruction tool (THOR) was developed. Various methods for constructing the land-use dataset to be provided as input to the model were tested and even constructed. Finally, in recent years, my research work has focused more on forecasting. The climate projection data available to us for the Nantes area have been analyzed. Temporal disaggregation approaches have been developed to study the hydro-climatic impact of future climate. New developments in TEB are underway, to represent management structures at source, in order to assess future development scenarios (coll. LEESU/ENPC). At the same time, as part of a collaboration with UTC and Cerema, an analysis of regulatory documents, from the point of view of stormwater management, is being carried out. This analysis contributes to the development of a methodology for building realistic future development scenarios, in line with local hydrological and micro-climatic issues.

These various projects naturally lead me towards the hydro-climatic adaptation of cities to global change (urbanization and climate change). This research project includes aspects of understanding phenomena : how urbanization, on the one hand, and climate change, on the other, impact stormwater management. The hydrological risk associated with urban flooding will also be addressed. The project also includes the development of tools and methods : how can we build future development scenarios on the basis of the adaptation solutions available to us ? Finally, working on new territories to share and enrich our knowledge is one of the objectives of this project, with my participation in the construction of a consortium in Côte d'Ivoire.