Des crues éclair aux îlots de chaleur – interactions entre aléas météorologiques et systèmes anthropiques

Pierre-Antoine Versini

▶ **To cite this version:**

Pierre-Antoine Versini. Des crues éclair aux îlots de chaleur – interactions entre aléas météorologiques et systèmes anthropiques. Hydrologie. Université Paris Est - Marne-la-Vallée, 2019. tel-03869802

HAL Id: tel-03869802
https://enpc.hal.science/tel-03869802

Submitted on 3 Jan 2023

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.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

Mémoire présenté pour l'obtention de
l'Habilitation à Diriger la Recherche

Des crues éclair aux îlots de chaleur – interactions entre aléas météorologiques et systèmes anthropiques

Pierre-Antoine VERSINI

Soutenue le Jeudi 21 Février 2019

Membres du Jury :

Mr Pierre Ribstein - Rapporteur
Mme Ana Maria Tarquis - Rapportrice
Mr Georges Najjar - Rapporteur
Mme Anne Ruas - Examinatrice
Mme Julie Roussel - Examinatrice
Mr Thierry Huygues-Beaufond - Examinateur
Mme Françoise Preteux - Examinatrice
Mme Ioulia Tchiguirinskaïa - Directrice d'HDR

HYDROLOGY METEOROLOGY and COMPLEXITY

École des Ponts ParisTech

Remerciements

Puisque la recherche est une activité collective, coopérative et ouverte, je tiens à remercier toutes les personnes suivantes, croisées au cours de ces dernières années dans les différents laboratoires fréquentés ou lors de projets et conférences. Elles ont toutes - à des degrés divers - participé à l'avancée de ces travaux au gré d'échanges qui finissent toujours par devenir constructifs : Hervé Andrieu, Cédric Andrieux, Romeo Ballinas, Marc Berenguer, Emmanuel Berthier, Philippe Bompard, Olivier Bonin, Céline Bonhomme, Marco Borga, Brice Boudevillain, Julien Bouyer, Jean-François Caron, Alejandra Castellanos Diaz, Lucas Charbonnier, Catherine Charleux, Ghassan Chebbo, Rémi Claverie, Carles Corral, Julien Cravero, Yu Jun Cui, Emilio Custodio, Pierre Delage, Emmanuel Delaure, Philippe Dubois, Isabel Escaler, Adélaïde Feraille, Bernard Flahaut, David Forcadell, Eric Gaume, Agathe Giangola-Murzyn, Joaquim Garcia, Auguste Gires, Bernard de Gouvello, Marie-Christine Gromaire, Florence Habets, Khalil Hannah, Hi Hong, Abdellah Ichiba, Claude Joannis, Natalia Kotelnikova, Pierre-Emmanuel Kirstetter, Christophe Lehouq, Fabien Leurent, Xavi Llort, Suzy Mc Ennis, Cedo Maksimovic, Anne-Sophie Marcou, Mireia Marti, Laura Moreno, Marie-Laure Mosini, Jean-Philippe Naulin, Julien Paupardin Olivier Payrastre, François Petavy, Guido Petrucci, Laurent Pouget, Manuel Pruvots-Bouvatier, Felipe Quintero, David Ramier, Rafael Rico, Fabrice Rodriguez, Jean-Marc Rouault, Christian Roux, Javier Salas, Emna Sellami-Kaaniche, Daniel Schertzer, Daniel Sempere-Torres, Elektra Skouri-Plakali, Filip Stanic, Bruno Tassin, Ioulia Tchiguirinskaia, Ezio Todini, Andres Torres, David Velasco, Marc Velasco, Rosa Vicari, Aurianne Vienney.

Au delà des personnes, il me faut aussi remercier les différents fonds territoriaux, nationaux, européens, publics ou privés, qui ont permis de financer ces travaux de recherche : les projets FloodSite, Imprints, WaterChange, Blue Green Dream, Terraces, Trafipollu, TVGEP, Mentor, Agora, les chaires Hydrologie pour une ville résiliente et Ecoconception, l'Agence Catalane de l'Eau, la DEA 93, et l'Onema.

La recherche étant de moins en moins financée par l'état et de plus en plus évaluée sur ses déclinaisons opérationnelles et industrielles, je remercie par avance tous les prochains partenariats qui nous permettront de poursuivre ces travaux dans les années à venir…

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION 4

II. LE RISQUE HYDROLOGIQUE DIFFUS : COMPRENDRE ET LOCALISER POUR MIEUX ANTICIPER 7

II.1. **Contexte et enjeux du risque inondation 7**

II.2. **Présentation des sites d'étude 9**
II.2.1. Le département du Gard 9
II.2.2. Le bassin du Guadalhorce 10
II.2.3. La Catalogne 11

II.3. **De la meilleure compréhension du territoire 12**
II.3.1. Interroger le territoire et ses habitants 12
II.3.2. Estimation de la vulnérabilité 13

II.4. **Modélisation pluie-débit des bassins non jaugés 16**
II.4.2. Contexte spécifique des bassins non jaugés 16
II.4.3. Le modèle CINECAR sur le département du Gard 17
II.4.4. Un autre avatar du SCS sur le bassin du Guadalhorce 19

II.5. **L'interprétation en termes de niveaux de risque 20**
II.5.1. Risque de submersion des routes dans le Gard 20
II.5.2. Alertes sur le bassin du Guadalhorce 23

II.6. **Valorisation des données apportées par la télédétection 25**
II.6.1. QPE et QPF sur le département du Gard 25
II.6.2. QPE sur le bassin du Guadalhorce 28
II.6.3. L'information satellite dans les Pyrénées 29

II.7. **Quantification de l'incertitude 31**
II.7.1. Objectifs 31
II.7.2. Méthodologie 31
II.7.3. Présentation des résultats 32

II.8. **Conclusions 33**

III. LES CONSEQUENCES DU CHANGEMENT GLOBAL : APPREHENDER LA COMPLEXITE POUR EN MESURER LES IMPACTS 35

III.1. Problématique 35

III.2. Terrain d'étude : le bassin du Llobregat 36

III.3. Scénarisation du changement climatique 37
III.3.1. Connaître le passé 37
III.3.2. Prévoir le futur 42

III.4. Conséquences hydrologiques (directes et indirectes) 44
III.4.1. Choix d'un modèle adapté 44
III.4.2. Impacts sur la ressource en eau 46
III.4.3. Impacts sur les inondations 50
III.4.4. Impacts sur les feux de forêt 53

III.5. Conclusions 56

IV. INTRODUCTION A LA RENATURATION DU MILIEU URBAIN : LES TOITURES VEGETALISEES COMME OUTILS DE GESTION DES EAUX PLUVIALES 57

IV.1. Contexte et enjeux du milieu urbain : entre continuité et spécificité 57
IV.1.1. Des crues éclair au ruissellement urbain 57
IV.1.2. Les infrastructures bleues et vertes 57
IV.1.3. Problématisation de la renaturation du milieu urbain 58
IV.1.4. Cadre scientifique des travaux réalisés 60

IV.2. Diffusion de la technique : le potentiel de végétalisation 61
IV.2.1. Le potentiel général 62
IV.2.2. Vers un Potentiel actualisable : prise en compte des dynamiques urbaines 65
IV.2.3. Le Potentiel prospectif : la perspective du Grand Paris 66

IV.3. Instrumentation de toitures végétalisées : 67
IV.3.1. La nécessité du suivi expérimental 67
IV.3.2. Les toitures expérimentales du Cerema 67
IV.3.3. La Vague Verte de Champs-sur-Marne 69

IV.4. Modélisation multi-échelle : 72
IV.4.1. Mise en œuvre d'un modèle conceptuel 72
IV.4.2. Facteurs d'influence 73
IV.4.3. Intégration à l'échelle urbaine 74
IV.4.4. Conséquences pour la gestion des eaux pluviales 76

V. PRESENTATION DU PROJET DE RECHERCHE TRAITANT DE L'EVALUATION DES SERVICES ECO-SYSTEMIQUES D'UNE RENATURATION DU MILIEU URBAIN 87

V.1. Intégration du projet au sein du laboratoire HM&Co 87

V.2. L'ENPC, un environnement de travail au cœur des problématiques urbaines 88

V.3. Dynamique actuelle : projets en cours 89
V.3.1. Projet ANR JCJC EVNATURB : 89
V.3.2. Des sites pilotes à taille réelle au service d'EVNATURB 90
La Vague Verte 90
Le démonstrateur Gaudi 92

V.4. Suivi expérimental d'IBV 93
V.4.1. Etude des matériaux constitutifs 93
V.4.2. Constitution d'un réseau de mesures 94
V.4.3. Caractérisation des variabilités spatio-temporelles 94
V.4.4. Prise en compte de la biodiversité 94

V.5. Simulation du comportement des IBV 95
V.5.1. Représentation à l'échelle du matériau 95
V.5.2. Représentation à l'échelle urbaine 95
V.5.3. Et à travers les échelles ? 96

V.6. Scénarisation du changement global 97
V.6.1. Vers des scénarios climatiques urbains 97
V.6.2. Objectifs et contraintes environnementales liés à l'implantation des IBV 97
V.6.3. Vers des scénarios urbanistiques de végétalisation 98

V.7. Étude multi-échelle des performances et impacts des IBV 99
V.7.1. La conception de l'ouvrage : quel matériau pour quels objectifs ? Les performances peuvent-elles perdurer dans le temps ? 100
V.7.2. La question du raccordement au réseau : les IBV sont-elles suffisantes pour respecter les réglementations ? Comment et dans quelle proportion ? 100

V.7.3. La gestion du risque inondation : les IBV sont-elles viables pour combattre les inondations ? Permettent-elles d'en faciliter la gestion ? 101
V.7.4. La question du rafraîchissement urbain : Quels impacts des IBV ? Comment et dans quelle proportion ? 102
V.7.5. La quantification des performances : les IBV peuvent-elles faciliter l'obtention d'une certification environnementale ? 102
V.7.6. Le projet d'aménagement : vers une plateforme d'évaluation opérationnelle 103
V.7.7. Les impacts sur le milieu récepteur : quel rôle des zones urbaines sur le milieu récepteur ? Les IBV peuvent-elles influencer cette relation ? 103

V.8. Perspectives complémentaires 104

VI. REFERENCES 107

VII. CURRICULUM VITAE 113

VIII. PUBLICATIONS ET PARTICIPATIONS A DES CONFERENCES 115

IX. ENCADREMENTS ET ANIMATIONS 119

X. VALORISATION A TRAVERS L'ENSEIGNEMENT 121

I. Introduction

Mes activités de recherche, débutées il y a plus de 14 ans, ont pour cœur la modélisation hydrologique. Au fil des années, mes sujets de recherche ont évolué tout en restant focalisés sur l'interaction entre les aléas climatiques et les systèmes anthropiques. Ces travaux se sont tous interrogés sur les risques induits par les variations météorologiques (les précipitations et leurs absences, la température) et leurs conséquences hydrologiques, ainsi que sur les moyens à mettre en œuvre pour en prévenir ou atténuer les impacts.

Ces travaux ont débuté à l'IFSTTAR en 2003 (alors encore appelé LCPC) lors d'un stage de fin d'étude (DEA) effectué sous la direction d'Hervé Andrieu et qui s'intéressait à la modélisation hydrologique de bassins versants soumis à des crues éclairs. Ce fut l'occasion d'une première confrontation avec un modèle -outil redoutable de par ses potentialités et formidable dès lors qu'on l'utilise à bon escient- et les premiers questionnements concernant la pertinence de représentation des processus et des variables dans celui-ci. Ce fut aussi le commencement d'un intérêt scientifique pour l'étude de ces phénomènes tellement particuliers que sont les crues soudaines. Violentes et difficilement prévisibles, elles fascinaient le jeune étudiant que j'étais et qui avait encore en mémoire les images terribles du drame de Vaison-la-Romaine survenu en 1992. Tous ces ingrédients ont attisé ma curiosité et m'ont permis de découvrir ce qu'était une communauté scientifique totalement dévouée à la recherche de réponses aux questionnements qui jalonnent la compréhension et la représentation de tels phénomènes.

Ma thèse (2004-2007) a pris le relais de ce trop court stage qui m'avait laissé un peu sur ma faim et dont le rapport se terminait d'ailleurs ainsi : « la modélisation hydrologique des bassins non jaugés n'en est qu'à ses balbutiements… ». Bien conscient des perspectives immenses qui s'offraient alors à moi, j'ai saisi l'opportunité d'intégrer le projet européen FLOODsite (FP6) pour poursuivre ces travaux. Sous la co-direction d'Hervé Andrieu et d'Eric Gaume, cette thèse avait pour objectif d'avancer dans la prévision du risque hydrologique diffus, et plus particulièrement sur la possibilité d'anticiper le risque de submersion des routes lors d'un événement pluvieux intense de type méditerranéen. Cela a donné lieu au développement d'une modélisation distribuée du débit, proposant les bases d'un système d'alertes inondation appliqué au réseau routier. Débutée peu de temps après les inondations tragiques du Gard ayant eu lieu en 2002 (23 morts), ma thèse s'est attachée à valoriser toute l'information disponible (météorologique, hydrologique, géographique) pour améliorer la représentation et la prévision de ces événements. Très liée aux milieux opérationnels, elle m'a permis d'associer recherches académiques et appliquées, en s'interrogeant à chaque fois sur la manière de traduire, décliner et valoriser les connaissances scientifiques en applications utiles et utilisables. Cette expérience m'a aussi donné l'occasion de me familiariser avec l'exigence, la densité et la diversité culturelle induites par un projet européen.

Afin de me trouver au plus près des enjeux liés au contexte méditerranéen, je suis naturellement parti à Barcelone en post-doctorat au Centre de Recherche Appliquée en Hydro-météorologie à l'Université Polytechnique de Catalogne (CRAHI-UPC) sous la direction de Daniel Sempere-Torres. Cette expérience initialement prévue sur un an s'est en réalité étendue sur plus de 4 années (2008-2012) pendant lesquelles j'ai monté, conduit et réalisé de nombreux projets de recherche et développement. Ce fut notamment le cas des projets européens IMPRINTS (FP7) et WATERCHANGE (LIFE+) qui m'ont permis de m'ouvrir aux enjeux hydrologiques du changement climatique (méthode de downscaling et modification des extrêmes). Suivant de près la mise en œuvre de la Directive Européenne Inondation (2007), IMPRINTS se positionnait clairement comme un passeur de savoir entre universitaires et opérationnels, afin de produire de nouvelles connaissances sur la prévision

des crues éclair qui soient directement utilisables en gestion de risque. WATERCHANGE, quant à lui, résultait d'une situation de sécheresse intense ayant touché la Catalogne en 2007-2008 et pendant laquelle les réserves d'eau atteignirent le seuil d'alerte de 15% de leur capacité. Il s'agissait de mettre en œuvre des outils capables d'évaluer les impacts à moyen terme du changement climatique (et leurs incertitudes) sur les ressources en eau d'un territoire alimentant une agglomération comme celle de Barcelone.

De retour en France en 2012, j'ai choisi d'adapter mes objets de recherche à mon environnement comme c'était le cas en Catalogne. Ainsi, le milieu urbain, où la densification des villes s'accompagne de nombreux enjeux liés à la gestion de l'eau, est devenu le centre de mes investigations. La dynamique des phénomènes observés (ruissellement important, intensification liée au changement climatique) se rapprochait fortement de mes travaux antérieurs. Ces recherches en hydrologie urbaine ont donc débuté au Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains de l'ENPC (LEESU) avec une participation au projet C2D2 TVGEP coordonné par Bernard de Gouvello. Fort de l'intérêt montré par des toitures végétalisées instrumentées concernant la gestion des eaux pluviales à l'échelle du bâtiment, l'objectif était ici d'étudier l'éventualité de conséquences similaires à l'échelle du bassin versant par une approche de modélisation. Dans la continuité, j'ai intégré le projet européen Blue Green Dream coordonné par Cedo Makcimovic qui s'intéressait plus généralement aux aspects multifonctionnels des infrastructures bleues-vertes. En tirant bénéfices de mes expériences passées, j'ai pu développer de nouveaux outils capables de représenter les impacts des toitures végétalisées à des échelles dépassant celle de la structure. Ces différents travaux m'ont permis de collaborer avec les différents axes de recherche du LEESU sous les directions de Daniel Schertzer, Ghassan Chebbo et José-Frédéric de Roubaix (hydrologie quantitative, hydrologie qualitative, acteurs et processus décisionnels), et d'acquérir une vision globale et pluridisciplinaire de l'hydrologie urbaine. Enfin j'ai intégré le Laboratoire Hydrologie, Météorologie et Complexité (HM&Co, ENPC) dirigé par Ioulia Tchiguirinskaia, devenu indépendant de par son développement croissant au cours de ces dernières années. J'y poursuis actuellement mes travaux de recherche en hydrologie urbaine en développant une activité autour de l'évaluation des performances éco-systémiques des infrastructures bleues et vertes. Le cadre du laboratoire HM&Co me permet de mettre l'accent sur la caractérisation des variabilités spatio-temporelles des processus mis en jeu, et de développer des méthodes d'observation et de modélisation innovantes, capables de rendre compte de cette très forte variabilité.

Toutes ces activités de recherche sont présentées dans ce document autour de trois thématiques :

- **Prévision des inondations dans un contexte de crue éclair** : améliorer l'anticipation des crues soudaines par l'instrumentation (observations et prévisions pluviométriques radar) et la modélisation pluie-débit dans un contexte de gestion de crise ;
- **Impacts hydrologiques du changement climatique** : étudier dans quelle mesure le changement climatique pourrait intensifier les risques environnementaux (quantité de la ressource en eau, fréquence des inondations) ;
- **Valorisation des infrastructures bleues et vertes en milieu urbain** : analyser et modéliser les effets des structures de type toitures végétalisées sur la gestion des eaux pluviales et le rafraîchissement urbain.

La présentation de ces travaux débouche sur celle du projet de recherche que j'ai commencé à mener au sein du laboratoire HM&Co et que je compte poursuivre ces prochaines années. Celui-ci s'intéresse à l'étude du comportement et de l'influence des toitures végétalisées, et plus généralement des infrastructures bleues et vertes, comme outils de mitigation au changement climatique en ville. Il s'intègre dans une démarche de renaturation du tissu urbain

et promeut une ville durable et résiliente. Il se nourrit de toutes mes expériences passées pour développer une approche multi-échelle, multi-physique et pluridisciplinaire qui permette de faire le lien entre les méthodes et résultats produits par la recherche actuelle en instrumentation et en modélisation urbaine, les problèmes pratiques émanant des sciences de l'environnement et les besoins opérationnels de la planification urbaine.

II. Le risque hydrologique diffus : comprendre et localiser pour mieux anticiper

II.1. Contexte et enjeux du risque inondation

Nîmes (1988), Vaison-la-Romaine (1992), Tarragone (1994), Biescas (1996), les Corbières (1999), Alger (2001), Gard (2002), Var (2010), Calabre (2010), et plus récemment la Côte d'azur (2015), le pourtour méditerranéen est régulièrement soumis à des crues très violentes appelées crues « éclair ». A l'origine de ces phénomènes, on retrouve souvent des précipitations localement très intenses, fruits de trois facteurs (Delrieu et al., 2005) : la proximité de la méditerranée qui agit comme une source d'énergie et d'humidité particulièrement active en fin d'été, des courants d'air allant de la mer vers l'intérieur du pays, et une barrière montagneuse constituée des Alpes, du Massif Central et des Pyrénées où l'orographie favorise et/ou aggrave les processus de convection. Ces précipitations peuvent au final durer plusieurs jours, ou seulement quelques heures comme c'est le cas pour les systèmes convectifs de méso-échelle. La grande réactivité des bassins versants concernés est aussi à souligner. Ils sont généralement peu étendus (quelques centaines d'ha à quelques centaines de km^2), vallonnés, et constitués de sols peu perméables. De ces circonstances résulte que les crues éclair sont caractérisées par une montée rapide des eaux qui rend difficile leur prévision.

La violence de ces phénomènes pluvieux et de leur réponse hydrologique peut avoir des conséquences dramatiques, tant d'un point de vue humain que matériel. Les 8 et 9 septembre 2002, la région cévenole, et plus particulièrement le département du Gard, a subi un événement de période de retour considéré comme centennale. Pour rappel, lors de cet événement exceptionnel, il est tombé 687 mm de pluie en 24 heures à Anduze. Le coût des dommages s'éleva à 1,2 milliards d'euros pour les 6 départements touchés (Gard, Hérault, Vaucluse, Ardèche, Bouches-du-Rhône, Drôme). Ce lourd bilan fut d'autant plus tragique qu'il faut y ajouter les 23 victimes décédées pendant ces deux jours de déluge (dont 5 dans leur voiture). D'une manière générale, il est avéré que de nombreuses victimes des inondations sont des automobilistes au volant de leur véhicule (Jonkman and Kelman, 2005). Ce constat est encore plus vrai lorsqu'il s'agit de crues éclair (Bourque et al., 2007; Staes et al., 1994). Sur la base d'un inventaire réalisé sur la région cévenole, ce sont près de 40% des victimes qui ont perdu la vie dans leur véhicule lors de ces cinquante dernières années (Antoine et al., 2001). Bien qu'il soit conseillé de ne pas se déplacer lors d'un événement pluvieux, de nombreuses personnes, souvent des autochtones familiers du phénomène, continuent à prendre des risques pour aller au travail, chercher leurs enfants, leur famille, des amis ou tout simplement pour rentrer chez soi (Ruin et al., 2007). Notons que le réseau routier est aussi particulièrement sensible car il représente le moyen le plus utilisé par les services de secours pour se déplacer en cas de crise.

Les crues éclair et leurs conséquences sur le réseau routier se rapportent à ce que l'on nomme le risque hydrologique diffus. En effet, de par ses caractéristiques intrinsèques (fortes précipitations localisées), une crue éclair peut affecter variablement un très grand nombre de lieux, de manière simultanée ou non. La prévision de la réponse hydrologique et l'anticipation de ses conséquences sur un territoire nécessitent la prise en compte de cette forte variabilité dans l'espace et dans le temps. Pour des raisons matérielles évidentes, une surveillance exhaustive du territoire n'est pas possible. Afin de dépasser les limites imposées par ce manque d'information, il est apparu nécessaire de trouver des alternatives. Sur la base de ce constat, mes travaux de recherche sur les crues éclair avaient pour objectif de parvenir à prévoir le plus précisément possible dans l'espace et dans le temps l'occurrence du risque hydrologique. Ils se sont questionnés sur l'utilisation et la valorisation de toute l'information disponible, qu'elle soit quantitative ou qualitative, pour parvenir à ce but. Ces travaux peuvent être synthétisés autour des grandes questions suivantes : (i) **comment tirer profit de**

l'expérience d'un territoire et de ses habitants, (ii) **comment progresser dans la modélisation de bassins non jaugés** à l'aide d'une paramétrisation *a* priori et/ou parcimonieuse, (iii) **comment valoriser en termes de risque les résultats de cette modélisation**, (iv) **comment utiliser à bon escient l'information apportée par la télédétection**, (v) **comment quantifier les différences sources d'incertitude** liées à cette estimation de débit.

Toutes ces questions ont pu être abordées à l'aide de plusieurs projets de recherche :

FLOODsite (FP6, 2004-2009) qui avait pour but de traiter de la gestion du risque inondation. Il rassemblait ingénieurs, chercheurs et praticiens pour aborder le sujet d'un point de vue pluridisciplinaire (physique, écologique, opérationnel et socio-économique). Toujours dans l'idée d'être le plus exhaustif possible, différents types d'inondations étaient traités : crues de rivières, d'estuaires et ruptures de digues. Le projet était structuré autour de grandes thématiques (analyse du risque, apport technologique, communication…) déclinées en tâches de travail. J'étais impliqué dans la tâche 17 intitulée « Gestion des secours lors d'une crise hydrologique » dont l'objectif était de développer des méthodes et outils permettant de structurer des plans de secours et d'évacuation. Nous nous sommes intéressés au possible développement d'un prototype d'annonce de coupures de route dans un contexte de crue éclair. Ces travaux ont ensuite été poursuivis par Jean-Philippe Naulin lors de sa thèse (2009-2012) réalisée dans le cadre du projet ANR Prediflood. J'ai participé à l'encadrement de ses travaux dirigés par Eric Gaume et Olivier Payrastre (IFSTTAR).

IMPRINTS (FP7, 2009-2012) dont l'objectif était de contribuer à la réduction des coûts humains et matériels engendrés par les crues éclair et les coulées de boue. Il était coordonné par le Centre de Recherche Appliquées en Hydro-Météorologie (CRAHI-UPC, Barcelone) où j'étais en post-doctorat. Ce projet proposait de rechercher et de développer des méthodes et outils destinés aux acteurs de la gestion de crise. L'impact des changements futurs (climatiques et socio-économiques) fut aussi étudié afin d'établir des mesures d'atténuation et/ou d'adaptation. Plus précisément, le consortium se proposait de développer trois types de méthodologie de complexités différentes pour fournir des prévisions et des alertes : (i) un système d'alerte précoce basé sur des calculs simplifiés, (ii) un système intégré de prévision probabiliste, et (iii) un système de prévision basé sur des règles adaptées à l'utilisation opérationnelle par les praticiens. J'ai contribué au développement d'un système d'alertes hydrologiques sur le bassin versant du Guadalhorce (Andalousie) et à l'étude des incertitudes en prévision de débit à travers le suivi de thèse de Felipe Quintero dont Daniel Sempere-Torres était le directeur de thèse.

AGORA (2009-2011, ACCIO), financé par le gouvernement Catalan, avait pour objectif d'étudier l'apport de la télédétection (image satellite) dans la prévision des débits dans un contexte montagneux. Il reposait sur des campagnes de mesures *in situ* dans les Pyrénées pour qualifier l'épaisseur du manteau neigeux et l'état hydrique des sols. Ces données devaient ensuite être utilisées pour développer et valider des algorithmes de traitement des images satellite susceptibles d'estimer l'évolution du manteau neigeux. Enfin, la dernière étape du projet, celle qui m'a réellement concerné en tant que responsable du projet pour le CRAHI, consistait à tenter de valoriser ces données en modélisation hydrologique.

Les détails de ces travaux sont à retrouver dans les articles suivants :

Versini, P.A., Berenguer, M., Corral, C. and Sempere-Torres, D., 2014. An operational flood warning system for poorly gauged basins. Demonstration in the Guadalhorce basin (Spain). *Natural Hazards*, 71(3): 1355-1378.

Versini, P.-A. 2012. Evaluation of radar estimates and forecasts to prevent flash flood in real time by using a road inundation warning system, *Journal of Hydrology*, 416-417, 157-170

Versini, P.-A., 2012. Les systèmes d'alerte précoce pour les inondations soudaines (crues éclair). *Techniques de l'Ingénieur*. TI630-P4225

Versini, P.-A., Berenguer, M., Velasco, D, Sempere-Torres, D., and Santiago A. 2011. An operational flood warning system in Andalusia (Spain) : Presentation and first results, *HESSD*, http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/10425/2011/hessd-8-10425-2011.html

Versini, P.-A., Gaume, E., and Andrieu, H. 2010. Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information – test in a flash flood prone area (the Gard region, France). *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 10 : 793-803

Versini, P.-A., Andrieu, H., and Gaume, E. 2010. Application of a distributed hydrological model to the design of a road submersion warning system for flash flood prone areas. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 10 : 805-817

Versini, P.A., Gaume, E. and Andrieu, H., 2009. Simulations hydrométéorologiques distribuées et prévision des coupures de routes dans le Gard. *La Houille Blanche*, 6: 72-75.

II.2. Présentation des sites d'étude

En premier lieu, je me dois de présenter les territoires sur lesquels ces travaux furent menés. Cette partie va donc exposer brièvement pour chacun ses caractéristiques, ses enjeux et la disponibilité des données existantes.

II.2.1. Le département du Gard

Comme évoqué plus haut, le département du Gard est particulièrement vulnérable aux crues éclair et représente un lieu propice pour étudier ces phénomènes. Mes travaux sur ce territoire se sont focalisés sur sa partie Nord-Ouest, sur une zone de 3000 km^2 environs (Figure 1). Celle-ci correspond au sud du massif montagneux des Cévennes où l'on retrouve de nombreux cours d'eau (la Cèze, les Gardon, le Vidourle et leurs affluents). Cette zone est particulièrement sensible aux inondations, et plus particulièrement son réseau routier. C'est d'ailleurs sur cette partie du département qu'un inventaire des routes inondables a été réalisé (voir section suivante). D'un point de vue hydrologique, l'Observatoire Hydrologique Méditerranéen Cévennes Vivarais (OHMCV) mutualise de nombreuses données sur la région. Sur la zone concernée, les observations débitmétriques de 12 bassins versants et les précipitations mesurées par 35 pluviomètres (cela représente une densité d'un pluviomètre pour 85 km^2) ont pu être collectées. Notons que ce territoire est aussi couvert par deux radars météorologiques (bande C).

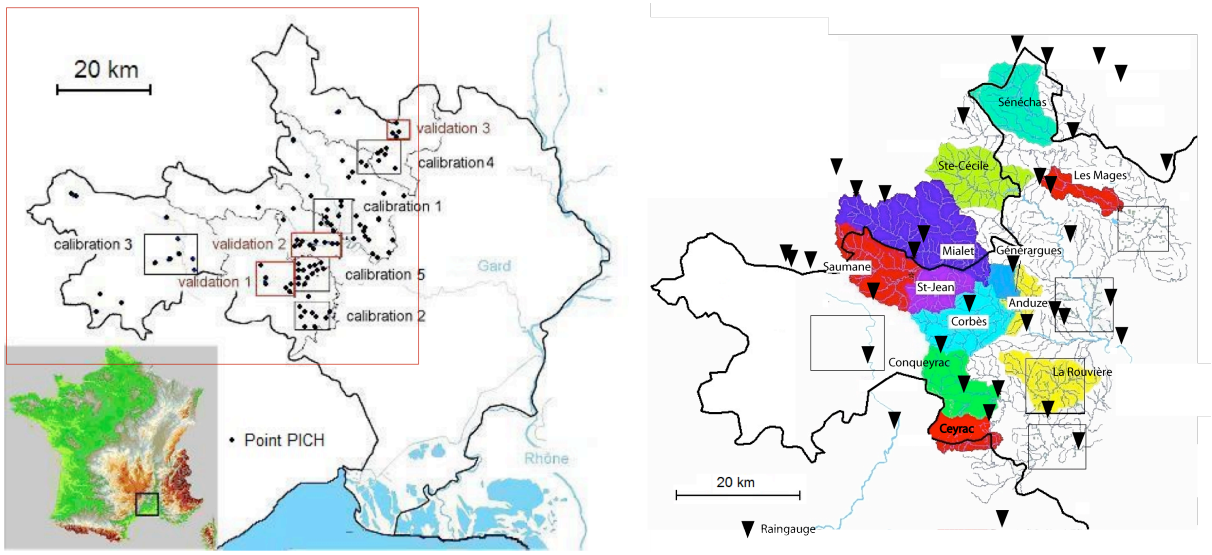

Figure 1. *Département du Gard et représentation des points PICH dans les zones de calibration et de validation de la méthode de caractérisation de la vulnérabilité (à gauche), bassins versants jaugés et des pluviomètres utilisés sur la zone d'étude (à droite).*

II.2.2. Le bassin du Guadalhorce

Le bassin du Guadalhorce se trouve en Andalousie (Espagne) et s'étend sur 3200 km^2. Il est composé de trois affluents principaux (Guadalteba, Guadalhorce, Conde Guadalhorce) et est entouré par des montagnes à l'ouest (1900m) et des plateaux au Nord (550m). Le climat dominant est de type méditerranéen avec des précipitations annuelles généralement comprises entre 500 et 600 mm, concentrée à 90% pendant la période allant d'octobre à avril. Historiquement, le Guadalhorce représente un risque d'inondation important pour la ville de Malaga (voir Figure 2). Ce bassin versant est couvert d'un réseau assez pauvre de mesures. On y trouve 25 pluviomètres horaires (densité d'un pour 180 km^2), ce qui est insuffisant pour espérer disposer de données interpolées précises à hautes résolutions. Un radar météorologique couvre aussi une grande partie du bassin, mais celui-ci était hors service pendant la grande partie de nos travaux. Au centre du bassin, on retrouve trois barrages et en amont de ceux-ci des stations liminimétriques pour lesquelles les données ont pu être collectées sur une courte période allant de 2008 à 2009. La surface instrumentée représente donc seulement un tiers de la surface totale. Enfin des données statistiques hydrométéorologiques étaient disponibles (précipitations maximales, courbe IDF…).

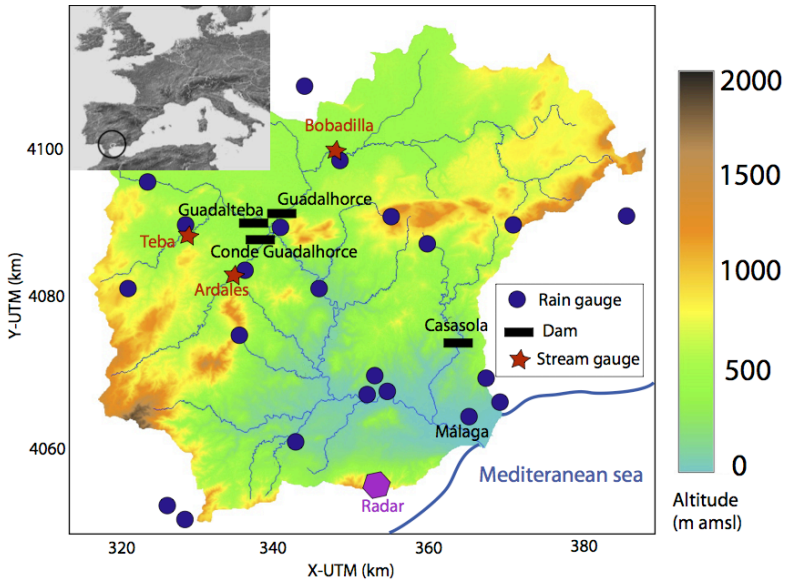

Figure 2. *Bassin du Guadalhorce et localisation des pluviomètres et des stations de débit*

II.2.3. La Catalogne

Barcelonais pendant plus de 4 années, j'ai eu l'occasion de travailler sur plusieurs bassins versants de Catalogne. Deux sont présentés ici, le troisième (Llobregat) le sera dans le chapitre suivant. D'une manière générale, la Catalogne est relativement bien couverte avec la présence de 5 radars météorologiques à bande C (4 appartiennent au Service Météorologique de Catalogne (SMC), l'autre à l'Agence Espagnole (AEMET)). De plus, depuis 1940, des données horaires et journalières sont collectées à partir d'un réseau de pluviomètres qui s'est densifié avec le temps : de 58 en 1940 (densité d'un pour 552 km^2) à 215 en 2010 (densité d'un pour 148 km^2).

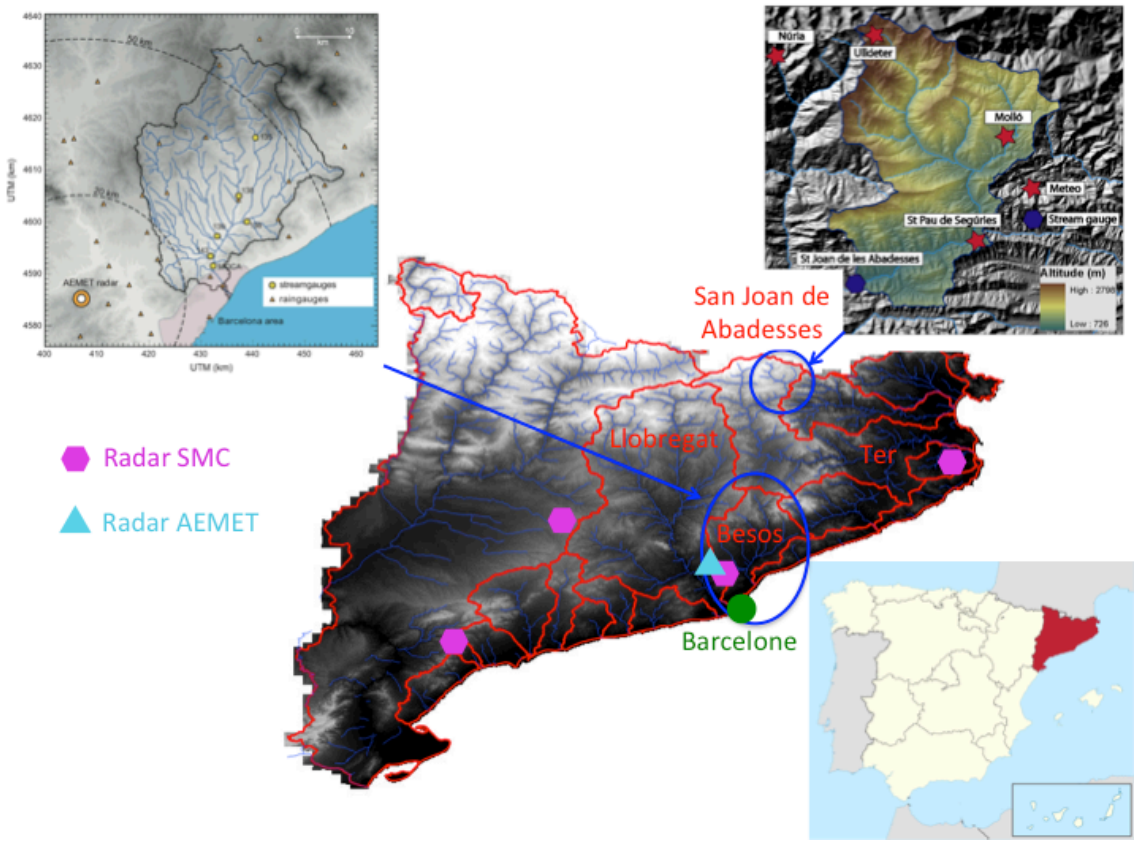

Figure 3. *La Catalogne et les principaux bassins versants étudiés*

Le bassin du Besós (1020 km^2) est localisé dans l'aire métropolitaine de Barcelone. Il est densément peuplé (2 millions d'habitants) et fortement influencé par les activités humaines, surtout industrielles. De fait, son occupation des sols s'est fortement modifiée au cours des 25 dernières années avec une augmentation des forêts en zone montagneuse et une urbanisation grandissante des plaines réalisée au détriment des surfaces agricoles. Le réseau hydrographique est contrôlé à l'aide de 6 stations liminimétriques (voir Figure 3). Un réseau dense de pluviomètres ainsi qu'un radar météo permettent d'y estimer les précipitations.

Le bassin versant de Sant Joan de Abadesses (300 km^2) se trouve dans les Pyrénées au nord-est de la Catalogne. Situé très en amont du Ter, il est caractérisé par une topographie élevée (de 770 m à 2480 m). De fait, le comportement de ce petit bassin est fortement influencé par les précipitations nivales et la fonte des neiges entre octobre et avril. On y retrouve 3 stations météorologiques (comprenant mesures de pluie, de température, de pression et de radiation solaire) et une station de débit à son exutoire (voir Figure 3).

II.3. De la meilleure compréhension du territoire

Avant d'entrer à proprement parler dans les questions scientifiques liées à la modélisation pluie-débit, il est intéressant de faire un aparté sur la quête de l'information qualitative qu'il est possible d'obtenir en se déplaçant sur les territoires étudiés.

II.3.1. Interroger le territoire et ses habitants

a) Les retours d'expérience

Les retours d'expérience sont particulièrement adaptés à l'analyse *a posteriori* des crues éclair. Le caractère local de ces événements, souvent couplé à une absence d'informations quantitatives, rend en effet très difficile la compréhension de leur genèse et de leur déroulement. Les retours d'expérience ont pour objectif de reproduire la chronologie de l'événement en cherchant à mieux comprendre les dynamiques de la transformation pluie-débit, ainsi que ses processus dominants et leurs conséquences. Un protocole permettant de collecter l'ensemble des données pertinentes à la bonne réalisation de ces travaux a été formalisé (Gaume and Borga, 2008). Cette collecte comprend : (i) l'ensemble des données hydro-météorologiques disponibles, (ii) la détermination des zones les plus affectées, (iii) des entretiens avec des témoins locaux, (iv) une enquête de terrain.

J'ai participé à la préparation et la réalisation d'un tel retour d'expérience suite aux événements pluvieux intenses des 6-9 septembre 2005 qui ont touché le sud du département du Gard avec plus de 500 mm de pluie mesurés localement. A cette occasion, de nombreuses routes furent coupées et l'autoroute A9 fut même évacuée puisqu'inondée. En collaboration avec le LTHE de Grenoble nous nous sommes rendus sur place 3 mois après ces événements. Des entretiens ont été réalisés auprès des services techniques pour comprendre et reproduire la chronologie des circonstances qui avaient conduit à fermer l'autoroute. D'autre part, des relevés topographiques furent réalisés pour reconstituer la section de rivière située en amont de la buse à l'origine de la submersion de l'autoroute. La présence de laisses de crue a permis d'estimer la hauteur maximale atteinte par le cours d'eau lors de cet événement. Ces données ont rendu possible l'estimation d'un débit maximum qui a pu être comparé au débit critique de l'ouvrage de franchissement. Ces valeurs (grossièrement) estimées ont montré que la buse n'était pas en capacité de laisser passer le débit alors qu'elle était censée être dimensionnée pour une crue centennale. Les services techniques nous ont confirmé que c'était la seconde fois (depuis 1988) que l'autoroute était inondée à cet endroit.

b) Les enquêtes

En plus des enquêtes réalisées dans le cadre de ce retour d'expérience, nous avons aussi mené un certain nombre d'entretiens semi-directifs auprès d'acteurs de la gestion de crise dans le département du Gard (mairies, services techniques territoriaux, SDIS…). Un questionnaire avait spécifiquement été élaboré pour mieux comprendre les enjeux de la gestion du risque inondation -et plus particulièrement ceux liés au réseau routier- et faire remonter les besoins opérationnels. Les thèmes suivants y étaient abordés : gestion de crise, problématique du réseau routier, procédure d'évacuation, et communication avec l'usager. Je retranscris ici les principales conclusions de ces entretiens :

- La problématique des inondations du réseau routier est perçue comme relevant d'enjeux importants, tant d'un point de vue humain (mortalité importante d'automobilistes, souvent des locaux), que fonctionnel avec des problèmes d'accessibilité pour rejoindre les lieux critiques (hôpitaux, maison de retraite) et la nécessité de définir des itinéraires sûrs. Des nuances sont toutefois apportées sur : (i) la durée de la submersion qui peut être très courte et occasionner finalement peu de gênes, et (ii) l'importance du tronçon inondé au sein du réseau qui n'est pas nécessairement vital (comme certains axes communaux par exemple).
- La connaissance des routes les plus vulnérables aux inondations existe, mais elle est diffuse, inégale sur le territoire et pas assez partagée entre les différents services. Il

apparaît nécessaire qu'un travail de synthèse et de formalisation soit effectué en collaboration avec les différents acteurs impliqués sur ces thématiques. Cela permettrait d'identifier *a priori* les secteurs les plus sensibles, en termes de fragilité intrinsèque ou d'enjeux spécifiques liés à leurs dessertes. Toutes les personnes interrogées sont toutefois conscientes qu'une exhaustivité est impossible à obtenir tant les causes de submersion peuvent s'avérer conjoncturelles (i.e. fossé mal entretenu).

- En période de crise, l'information reste là aussi trop fragmentée sur le territoire et le besoin de coordination et de diffusion se fait sentir encore davantage. Tous les acteurs reconnaissent la difficulté d'anticiper dans le temps et dans l'espace ces coupures qui peuvent se produire rapidement et être de courte durée. Idéalement, le temps d'anticipation devrait être de 30-45 minutes pour pouvoir mettre en œuvre des opérations ciblées. En corollaire, il apparaît aussi nécessaire d'être capable de pouvoir désigner des itinéraires alternatifs sécurisés.
- La communication vis à vis de l'usager est ressortie comme un point critique tant sur la forme du support choisi que sur son contenu. Il semble primordial de distiller une information parcimonieuse et ne pas fournir trop d'éléments qui pourraient être mis en défaut et créer de la suspicion dans le futur (constat d'une route signalée inondée à tort). Il convient donc de se limiter à une carte indiquant les routes coupées et de réserver des outils plus performants aux services opérationnels.

II.3.2. Estimation de la vulnérabilité

a) Objectifs

Le risque est souvent défini comme le produit d'une vulnérabilité et d'un aléa. Dans la recherche de la localisation précise du risque hydrologique, la caractérisation de la vulnérabilité peut donc apparaître comme une information pertinente. Elle permet de focaliser l'attention aux endroits où l'aléa hydrologique peut avoir le plus de conséquences. Ce travail représenta la première étape de ma thèse. Appliqué au réseau routier, je me suis intéressé à caractériser la vulnérabilité « structurelle » d'une route, à savoir comprendre pourquoi un tronçon routier serait plus susceptible qu'un autre d'être inondé en regard de ses caractéristiques et de son interaction avec le réseau hydrographique. L'objectif de ce travail consistait à développer une méthode de caractérisation de la vulnérabilité capable d'identifier les points les plus sensibles du réseau routier sur le Nord du département du Gard.

b) Méthodologie

Pour ce faire nous nous sommes servis de toute l'information géographique disponible sur la région (topographie, occupation des sols, géologie…), ainsi que d'un inventaire historique de coupures de route. Nommé PICH (pour Plan d'Intervention aux Crises Hydrologiques), ce document fut constitué par les services techniques territoriaux à la suite des événements tragiques de 2002. Focalisé sur le Nord du département, le PICH avait pour objectif de recenser le plus exhaustivement possible les secteurs routiers submersibles en indiquant pour chacun : le mode de submersion, la localisation et éventuellement une estimation de la fréquence de coupure, en se basant sur les constats effectués durant les 40 dernières années. L'analyse de ces données nous a permis de distinguer trois types de submersion :

- Les intersections entre les réseaux hydrographique et routier qui représentent 78% des submersions inventoriées et sur lesquelles l'étude s'est portée. On retrouve un ouvrage de franchissement (pont ou buse) à leur endroit.
- Les points de côtoiement où les réseaux routier et hydrographique se longent (9% de l'inventaire). A cet endroit, la route se situe dans le lit du cours d'eau.
- Les points bas (13% de l'inventaire) représentent un point du réseau routier où se produit une accumulation naturelle des eaux pluviales.

Par croisement des données vectorielles de routes et de rivières, toutes les intersections entre les deux réseaux ont pu être déterminées sur la zone d'étude (celles répertoriées dans le PICH, comme celles, majoritaires, qui ne l'étaient pas). Différents indicateurs géomorphologiques caractérisant ces intersections (altitude, pente, forme, indice topographique) et leur bassin versant amont (taille, occupation des sols, pente moyenne…) ont été déterminés à l'aide d'outils SIG. En complément, un indicateur caractérisant l'ouvrage de franchissement a aussi été calculé. Il correspondait au rapport entre le débit décennal théorique (Q_{10}) estimé à l'aide de la méthode Crupedix (CEMAGREF, 1980) et le débit critique de l'ouvrage (Q_c) déterminé à l'aide de la formule de Manning-Strickler.

Pour chaque indicateur normalisé, les distributions statistiques des valeurs obtenues pour les échantillons PICH et Non PICH ont été comparées. Leur possible caractère discriminant a été évalué statistiquement à l'aide d'un test non-paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney pour vérifier l'indépendance des 2 échantillons. Seuls les indicateurs réussissant ce test ont été conservés, puis combinés pour proposer une méthode de caractérisation robuste. Des seuils ont ensuite été définis pour créer 4 classes de vulnérabilité (forte, moyenne, faible et très faible). Une telle hiérarchisation permettait d'évaluer la pertinence de la méthode en comparant les proportions respectives d'intersections PICH et Non-PICH sélectionnées dans chaque classe.

c) Présentation des résultats

Les tests ont mis en lumière quatre indicateurs discriminants : l'altitude et la pente locale de l'intersection, la surface du bassin versant amont et le rapport de débits. Les distributions de ces indicateurs sont apparues relativement distinctes pour les intersections PICH et Non-PICH (voir Figure 4). Il a pu être conclu que les intersections submergées avaient tendance à se trouver dans les parties les plus basses d'un territoire donné, généralement en aval des plus grands bassins versants. L'indicateur de pente a confirmé la localisation de ces inondations sur des terrains plats (ce qui est assez corrélé avec l'altitude). Dans de telles zones, la topographie ralentit l'écoulement et peut favoriser l'accumulation de l'eau. Enfin, le rapport de débits a montré que les ouvrages inondés étaient souvent sous-dimensionnés ($Q_{10} > Q_c$), sans que cela soit forcément systématique. Cela peut être dû à l'imprécision des méthodes employées pour déterminer ces deux débits – qui restent néanmoins les meilleures solutions compte tenu de l'information disponible. Une autre explication nous a été fournie par un rapport technique (GEOPLUS, 2004) sur les ouvrages submergés dans la région. Il y était montré que la submersion n'est pas nécessairement localisée au dessus de l'ouvrage, mais plutôt avant ou après celui-ci là où la route rejoint le lit de la rivière avant de la franchir. Une inondation peut donc se produire même si l'ouvrage est correctement dimensionné.

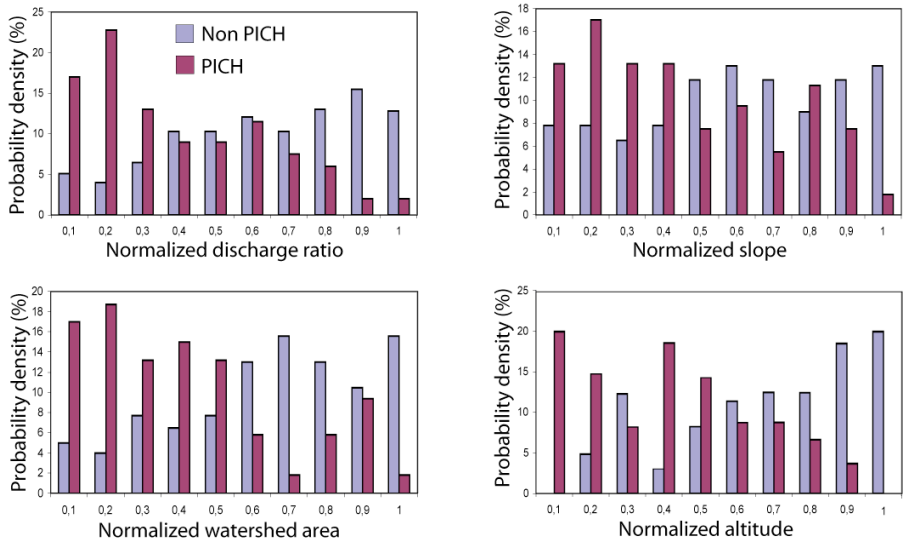

Figure 4. *Comparaison des distributions PICH et Non PICH pour les 4 indicateurs discriminants : rapport de débits, pente et altitude de l'intersection, taille du bassin versant.*

Les 4 indicateurs ont ensuite été combinés pour tirer profit de l'apport de chacun (la corrélation entre eux étant suffisamment faible pour justifier une telle combinaison). Ces résultats (voir Tableau 1) ont montré une amélioration significative par rapport à ceux obtenus lorsque chaque indicateur est pris individuellement, et une très bonne discrimination entre les intersections inondables et celles qui *a priori* ne le sont pas. Ainsi, il a été permis de déterminer : (i) une classe de vulnérabilité 1 contenant uniquement des intersections PICH, (ii) une classe 2 dans laquelle elles sont majoritaires (54%), (iii) une classe 3 plus large de vulnérabilité faible, (iv) une classe 4 contenant uniquement des intersections Non-PICH et regroupant un quart de l'effectif total.

Classe de vulnérabilité	Connecteur	Seuil				
			PICH	Non-PICH	Total sélectionné	PICH/ total classe
1	ET	0,3	20%	0%	8%	100%
2	ET	0,57	30%	17%	22%	54%
3	OR	0,57	50%	58%	54%	35%
4			0%	25%	16%	0%

Tableau 1 : Effectifs des classes de vulnérabilité déterminées à l'aide de la combinaison d'indicateurs discriminants

Dans l'optique d'utiliser l'intégralité des informations existantes, les fréquences de coupures signalées dans le PICH ont été reportées pour les intersections submersibles contenues dans les différentes classes de vulnérabilité. On trouve des fréquences allant de 10 submersions par an à une submersion centennale (?!). Il est ici nécessaire de rappeler le caractère non exhaustif et relativement subjectif de ces informations qui peuvaient nous permettre d'argumenter la démarche, mais en aucun cas d'en tirer des conclusions définitives. Cette information de période de retour empirique a été reportée pour l'ensemble des points PICH appartenant aux classes de vulnérabilité 1, 2 et 3 définies précédemment. Les points Non-PICH ont été affectés d'une période de retour supérieure à la période d'observation (40 ans). Il est apparu très clairement (Figure 5) que les intersections appartenant à la classe de forte vulnérabilité sont celles qui sont caractérisées par les périodes de retour les plus faibles (inférieures à 10 ans). La classe 2 contenant 54% d'intersections PICH est dotée d'une période de retour maximale de 15 ans. Quand à la dernière classe, elle contient les périodes les plus importantes, dont celle estimée à 100 ans. Ces très bons résultats nous ont permis de valider définitivement la méthode proposée.

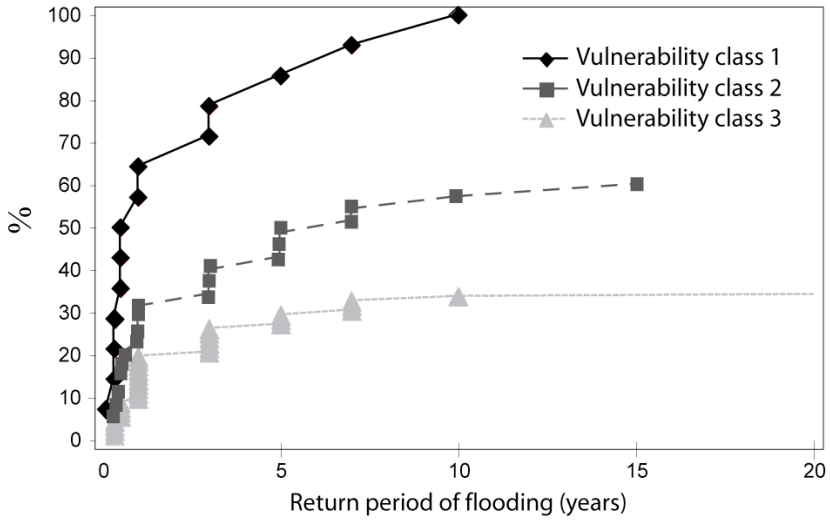

Figure 5. *Distribution des périodes de retour empiriques des intersections PICH finalement sélectionnées dans les 3 classes de vulnérabilité*

d) Transférabilité et limites de la méthode

Bien que cette méthode caractérisait correctement la susceptibilité des routes aux inondations dans les zones étudiées (relativement homogènes), la question de sa transposabilité sur d'autres parties du territoire peut s'est posée. En effet, celle-ci ne semblait pas directement extrapolable sans prendre un certain nombre de précautions dès lors que l'on s'intéressait à des zones localisées beaucoup plus en amont ou en aval. Lors de sa thèse, Jean-Philippe Naulin s'est attelé à essayer d'étendre cette méthode à l'ensemble du département du Gard, soit une zone d'étude de 5000 km^2 comprenant environ 2000 intersections. Pour cela, il a adapté la méthode de caractérisation de la vulnérabilité en distinguant 3 zones relativement homogènes (montagnes, plateaux et plaines) pour lesquels les indicateurs discriminants ont été déterminés. L'absence d'information historique sur ces nouvelles zones (le PICH étant circonscrit au Nord du département) n'a pas pu permettre de valider directement cette nouvelle approche. Seule l'application du prototype d'annonce de coupure sur l'ensemble du territoire a pu permettre d'apporter des éléments de réponse quant à sa pertinence (cf. Section II.4.3).

II.4. Modélisation pluie-débit des bassins non jaugés

La surveillance du risque hydrologique diffus nécessite d'être capable d'estimer le débit en aval d'un très grand nombre de bassins versants dont quasiment aucun n'est instrumenté. Cela engendre la mise en œuvre d'une modélisation pluie-débit qui s'effectue dans le cadre de la prévision des bassins non jaugés (appelé aussi PUB pour Predictions in Ungauged Basins en anglais). Ce sujet a beaucoup occupé la communauté scientifique ces 15 dernières années (Hrachowitz et al., 2013), car il met sur le devant de la scène un certain nombre de questionnements : comment tenir compte des fortes variabilités spatiales et temporelles des précipitations et des processus hydrologiques ? Comment calibrer des modèles hydrologiques en l'absence de mesure ? Comment valider le schéma proposé ? Différents travaux ont été conduits sur ces thématiques.

II.4.2. Contexte spécifique des bassins non jaugés

Tout d'abord, il est important de rappeler que les variabilités spatiales et temporelles des précipitations à l'origine des crues éclair représentent le facteur principal contrôlant la réponse hydrologique (Chancibault et al., 2006; Le Lay and Saulnier, 2007). En effet, à l'hétérogénéité naturelle des précipitations, il faut ajouter dans ce cas, l'influence de la topographie sur la genèse des pluies (pluie orographique). Il apparaît donc nécessaire d'utiliser une pluie spatialisée qui a démontré une amélioration significative des résultats des modèles (Saulnier and Le Lay, 2009). Pour tirer profit de cette entrée spatialisée des précipitations, le choix a été fait de mettre en œuvre des modélisations pluie-débit distribuées. Un tel schéma permet en effet de répondre à l'objectif d'une estimation diffuse des débits en un nombre conséquent de points tout en gardant une cohérence dans la propagation des débits entre les points amont et aval. Le choix des résolutions spatiale et temporelle s'est fait en regard des enjeux et de la dynamique des processus concernés. Ces phénomènes de crue rapide dominés par le ruissellement de surface sur de petits bassins versants (70% sont inférieurs à 10 km^2) caractérisés par des temps de concentration courts nous a conduit à travailler à un pas de temps relativement faible, d'un quart d'heure maximum et à une résolution spatiale de 1 km^2. Enfin une approche évènementielle a été privilégiée pour se focaliser sur les processus conduisant ces écoulements rapides (hortonien, saturation).

La question de la paramétrisation des modèles est aussi essentielle dans le contexte des bassins non jaugés. Des techniques de régionalisation (Blöschl and Sivapalan, 1995) sont ainsi souvent mises en œuvre pour transférer des paramètres calés sur les bassins jaugés à l'ensemble des bassins environnants qui ne le sont pas (Beven, 2012). Ce transfert repose sur les caractéristiques géographiques (topographie, occupation des sols, pédologie, géologie) des bassins concernés. Ces données peuvent permettre la constitution d'« hydrotype », c'est à dire

d'une entité géographique représentative d'un comportement hydrologique type. La paramétrisation des modèles doit aussi être parcimonieuse dans le sens où le nombre de paramètres à calibrer doit rester modeste pour éviter les problèmes d'équifinalité. On se restreint donc à utiliser entre 3 et 5 paramètres comme il est généralement recommandé afin d'éviter les conséquences d'une sur-paramétrisation (Perrin et al., 2001). Enfin il est nécessaire que le modèle soit robuste, c'est à dire qu'une faible modification des données d'entrée ou des paramètres n'engendre pas une réponse radicalement différente de celui-ci.

Ces questions de représentation de l'espace et de calage de paramètres sont illustrées à travers les exemples suivants.

II.4.3. Le modèle CINECAR sur le département du Gard

a) Présentation du modèle

Le modèle distribué choisi pour être mis en œuvre sur le département du Gard fut CINECAR (Gaume et al., 2004). Spécialement développé pour reproduire les crues éclair, il fut testé à plusieurs reprises sur le territoire des Cévennes (Delrieu et al., 2005). Son principe repose sur une discrétisation de l'espace en sous-bassins. Ainsi, pour chaque bief du réseau hydrographique de la zone étudiée, on définit deux sous-bassins rectangulaire (un rive gauche, un rive droite) sur lesquels une pluie brute uniforme est affectée (voir Figure 6).

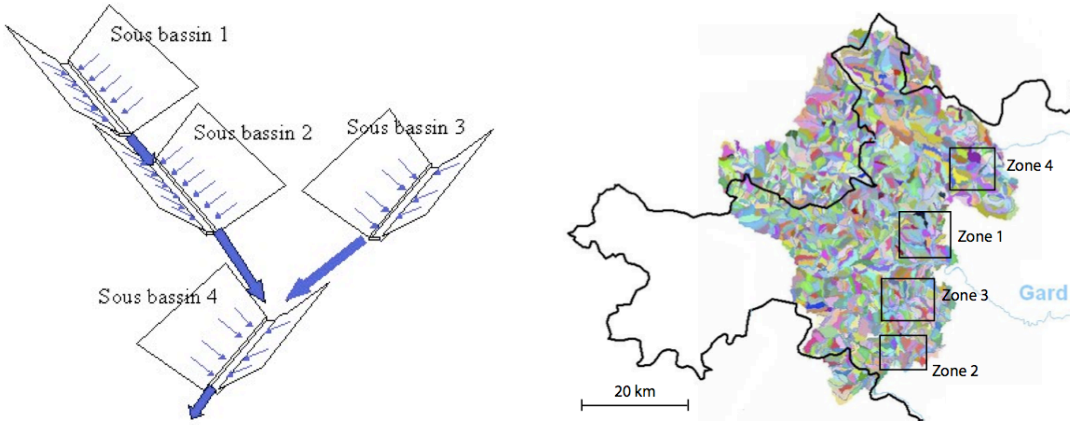

Figure 6. *Schéma de principe de CINECAR et sa traduction sur le Nord du département du Gard à travers la désagrégation de l'espace en sous-bassins*.

Sur chaque sous-bassin, un modèle de production de type Soil Conservation Service (SCS) permet de déterminer la pluie efficace à l'aide d'un coefficient de ruissellement instantané. Ce modèle simple et robuste ne repose que sur un paramètre, le Curve Number (*CN*). Le transfert de la pluie efficace ruisselée sur les sous-bassins comme à l'intérieur des biefs hydrographiques est simulé à l'aide d'une solution approchée des équations de Saint-Venant 1D (onde cinématique). Cette fonction de transfert est quant à elle régie par deux paramètres : le coefficient de rugosité de Manning-Strickler et la largeur de la section rectangulaire simplifiée (sous-bassin ou bief).

b) Mise en œuvre du modèle et calibration

Afin de mettre en œuvre le modèle, la zone d'étude a été discrétisée en une succession de sous-bassins reliés au réseau hydrographique (voir Figure 6). La grande majorité des informations nécessaires a pu être déduite des données géographiques (essentiellement la topographie et le réseau). Par ailleurs, des tests de sensibilité ont montré que le modèle était particulièrement sensible aux valeurs de *CN* et de largeurs des biefs hydrographiques, variables dans le temps et dans l'espace.

Afin d'avancer vers une estimation des paramètres susceptible de prendre en considération ces variabilités spatiales et temporelles, un protocole adapté de calibration des paramètres a

été mis en place. Dans une perspective de régionalisation des CN, les sous-bassins ont été regroupés en différentes classes sur la base de l'occupation de leur sol et de leur géologie. Pour chacune de ces classes, deux valeurs de *CN* - définissant une hypothèse basse et une hypothèse haute de la réponse hydrologique - ont été déterminées. Une telle formulation permettait de tenir compte autant que faire se peut de l'incertitude entourant tant les données de pluie que le schéma de modélisation (et ses paramètres). Concernant la variabilité temporelle des *CN*, nous avons cherché à trouver un lien entre les valeurs calées et divers indices représentatifs de l'antériorité pluviométrique (débit de base initial, nombre de jours secs, pluie antérieure…). D'autre part, les largeurs de biefs - qui peuvent être plus ou moins importantes en début comme en cours d'événement - ont été reliées à leur indice de Strahler (soit leur position dans le réseau défini à une certaine résolution spatiale).Trois jeux de largeurs ont été testées afin de tenir compte de l'état initial des rivières.

Ainsi, sur les 12 bassins jaugés existants sur la zone d'étude, 8 ont été utilisés pour calibrer le modèle, les 4 autres pour le valider. Les simulations ont été effectuées sur une dizaine d'événements pluvieux survenus entre 2000 et 2005 et pour lesquels la pluviométrie totale était supérieure à 100 mm. Des champs de précipitation hautes résolutions ont été déterminés à l'aide d'une méthode d'interpolation spatiale (krigeage) appliquée aux données provenant du réseau de pluviomètres. Pour chaque événement, 3 jeux de largeur de biefs et 7 valeurs de *CN* (entre 30 et 90) furent testés. Le jeu de paramètres fournissant les meilleurs résultats (au sens du critère de Nash) pour l'ensemble des bassins versants de calibration fut conservé.

c) Présentation des résultats

Les tentatives menées pour régionaliser les *CN* se sont révélées peu fructueuses. Les distributions hétérogènes des sols entre les bassins jaugés et non jaugés ainsi que l'absence de cohérence entre les valeurs obtenues nous ont conduit à abandonner cette approche. Au final, un couple de *CN* a été déterminé de manière uniforme sur l'ensemble du territoire pour chaque événement pluvieux. La qualité des simulations obtenues tant lors de la calibration que de la validation variait fortement d'un bassin versant à l'autre et d'un événement pluvieux à l'autre. En général, les meilleurs résultats furent obtenus pour les épisodes les plus forts (Figure 7). Ils étaient plus erratiques pour les événements de plus faible intensité. Ceci est dû à la non-linéarité de la relation pluie-débit, ainsi qu'à la forte sensibilité de la réponse hydrologique aux conditions initiales d'humidité des sols.

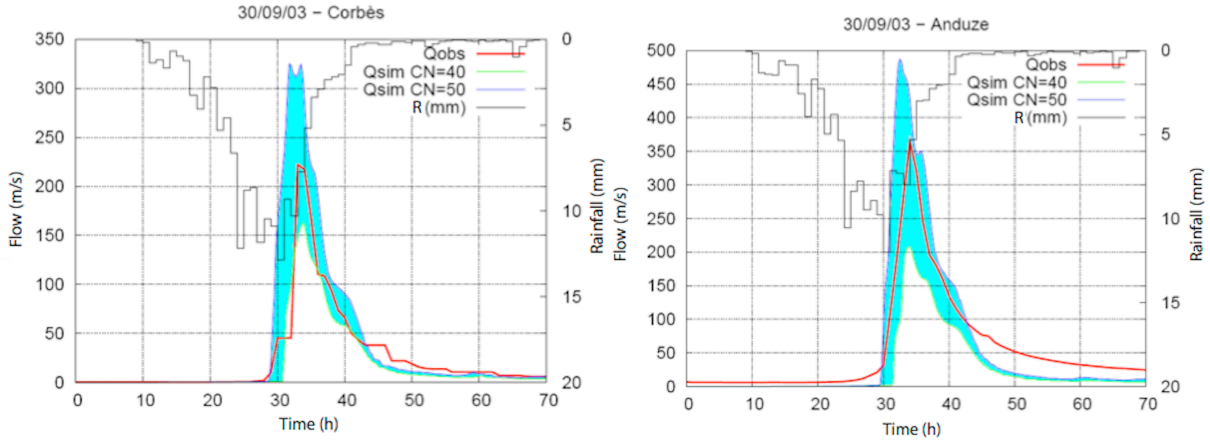

Figure 7. *Comparaison entre simulations et observations pour l'événement du 3 septembre 2003 à Corbès (calibration) et Anduze (Validation).*

Parmi les différents indicateurs testés pour relier les valeurs des paramètres aux conditions d'antériorité pluviométrique, la position de l'orage dans la saison, ainsi que le cumul de précipitation lors des 15 derniers jours nous ont permis de proposer, au début d'un événement pluvieux, un jeu de paramètres à utiliser pour l'estimation des débits. Ces résultats sont

synthétisés dans le tableau suivant. On s'aperçoit que la saisonnalité de l'événement est très marquée. Au fur et à mesure de l'automne, le sol devient plus humide et les rivières plus importantes, ce qui conduit à utiliser des valeurs de *CN* et de largeurs plus élevées. Le cumul de précipitation lors des 15 jours précédant l'événement est aussi un indicateur significatif. Plus ce total est important et plus le comportement du sol se rapproche d'un sol imperméable (*CN* élevé).

	Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
$P_{15jours}$	CN	L	CN	L	CN	L	CN	L
0-100 mm	40/50	1	40/50	2	50/60	3	50/60	3
100-200 mm	40/50	2	50/60	3	50/60	3	50/60	3
200-300 mm	50/60	2	50/60	3	60/70	3	60/70	3
300-400 mm	60/70	3	60/70	3	70/80	3	70/80	3
> 400 mm	70/80	3	70/80	3	80/90	3	80/90	3

Tableau 2. *Jeux de paramètres (CN et largeurs) déterminés en fonction de l'état hydrique et de la position dans la saison*

d) Extension à l'ensemble du département du Gard

Lors de sa thèse, Jean-Philippe Naulin a tenté d'étendre la mise en œuvre du modèle pluie-débit sur l'ensemble du département du Gard qui représente un territoire hydrologiquement hétérogène (réseau comprenant des petits bassins encaissés et de larges plaines inondables, milieu parfois karstique…) et doté d'un certain nombre d'ouvrages hydrauliques. Afin de traiter ce sujet, les pistes suivantes d'amélioration ont été proposées :

- Modification de la fonction le transfert (onde diffusive) pour les biefs hydrographiques situés en plaine (pente < 1%) afin de mieux simuler l'atténuation de l'onde de crue.
- Définition de paramètres CN distribuée en lien avec les informations d'occupation des sols, de géologie et d'antériorité pluviométrique (cf. méthode USDA (1986)).

En étudiant les débits simulés aux exutoires des bassins jaugés, il est apparu que la prise en compte de *CN* distribués améliorait légèrement la qualité des simulations, surtout pour les épisodes pluvieux les plus intenses. La modification de la fonction de transfert a quant à elle clairement amélioré la représentation des débits à l'aval du département.

II.4.4. Un autre avatar du SCS sur le bassin du Guadalhorce

a) Présentation du modèle

Comme précédemment, le manque de données historiques -encore accentué ici-, nous a conduit à utiliser un modèle simple, robuste et dépendant de peu de paramètres. La discrétisation de l'espace s'est faite à l'aide d'une grille constituée de mailles de 1 km^2, plus adaptée à l'utilisation de données radar. Toutes ces mailles étaient connectées entre elles en suivant le réseau de drainage déterminé à l'aide de la topographie. Traitées comme une unité hydrologique, un modèle global de type SCS a été appliqué sur chacune d'elle, dès lors que les précipitations dépassaient l'abstraction initiale (I_a). Les processus hydrologiques à considérer ne se limitant pas au ruissellement de surface, le modèle conceptuel proposé par Weeks et Boughton (1987) a été choisi pour représenter la contribution du débit de base $Q_s(t)$. Il suppose un ratio constant entre la composante rapide du débit et la variation du débit de base (α). Le transfert de pixel en pixel était assuré à l'aide d'un hydrogramme unitaire reposant sur la résolution de l'onde diffusante à l'aide des paramètres de Muskingum (Szymkiewicz, 2002). Cette formulation dépendait de 3 paramètres qui devaient être ajustés pour les deux types de surface rencontrés (rivière et versant) : X lié à la dispersion, K le temps de stockage pour un pixel, et N le nombre d'éléments de chemin parcourus.

b) Mise en œuvre du modèle

Devant le grand nombre de paramètres à caler (*CN* distribués, α, I_a, X, K, N pour les 2 types de surface), différentes procédures ont été mises en œuvre pour simplifier cette approche :

- Les *CN* ont été déterminés pour chaque pixel en utilisant l'information géomorphologique (pente, géologie et occupation des sols) suivant les préconisation du ministère des travaux publics (MOPU, 1990). Des travaux précédents (Corral et al., 2000) ayant employé cette méthode avaient montré une surestimation assez importante des débits, et la nécessité de les modifier à l'aide d'un paramètre correctif (*FCN*).
- Contrairement au cas du Gard, le paramètre I_a d'abstraction initiale n'a pas été déterminé à l'aide des *CN*, considérées ici comme indépendantes du temps. I_a a été mis à jour en temps réel en l'estimant à l'aide du total de pluie tombé entre le début de l'événement pluvieux et l'émergence du débit observé.
- Concernant les paramètres de transfert des mailles versants, *Nv* a été fixé à 1 et *Xv* à 0, représentant ainsi une atténuation maximale du pic de débit. Pour les mailles rivières, *Nr* a été déterminé comme le nombre de mailles menant jusqu'à l'exutoire, *Xr* restant un paramètre à calibrer. Les temps de stockage *Kv* et *Kr* ont été définis comme le rapport entre la longueur du chemin à parcourir et la vitesse (les vitesses *vr* et *vv*, supposées constantes sur le bassin, restant donc à estimer).

Au final, le modèle nécessitait l'ajustement de 5 paramètres : *FCN*, *α*, *Xr*, *vr* et *vv*.

c) Méthode de calibration et résultats

Ces paramètres ont été calés à l'aide de la seule station de mesure disposant de données utilisables (Bobadilla) sur 8 épisodes pluvieux dont les cumuls de pluie variaient entre 20 et 100 mm. Les résultats obtenus par le modèle ont montré une capacité à reproduire le débit observé variable d'un épisode pluvieux à un autre. Comme précédemment sur le département du Gard, les performances du modèle furent généralement meilleures pour les événements de pluie les plus forts (cf. Figure 8). Il faut noter que le facteur de correction du *CN* était très important (0,5), ce qui traduisait une forte surestimation des débits en utilisant les paramètres déterminés *a priori*. Rappelons aussi que l'information de pluie utilisée ici représentait une forte source d'incertitude. Au delà de la méthode d'interpolation spatiale choisie, aucun pluviomètre ne se trouvait à l'intérieur du bassin jaugé. Toutefois, malgré ces nombreuses sources d'incertitude (et faute de mieux !), les paramètres calés sur le bassin versant de Bobadilla ont été transférés à l'ensemble du bassin du Guadalhorce.

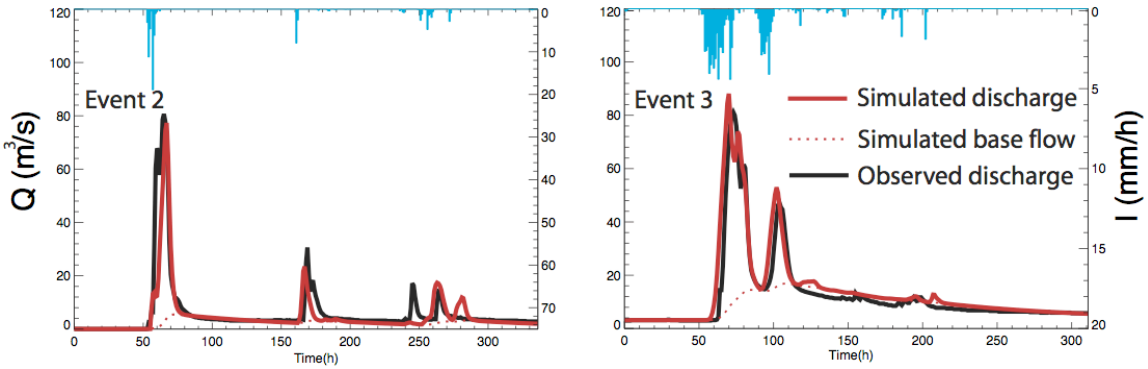

Figure 8. *Comparaison entre débits simulés et observés sur le bassin de Bobadilla*

II.5. L'interprétation en termes de niveaux de risque

II.5.1. Risque de submersion des routes dans le Gard

a) Enjeux et méthodologie

Comme évoqué précédemment le risque inondation correspond au produit de l'aléa hydrologique et de la vulnérabilité du site étudié. Concernant la problématique des coupures de routes dans le département du Gard, il s'agissait donc de mettre à profit les travaux réalisés sur la caractérisation de la vulnérabilité et l'estimation spatialisée des débits pour étudier la

possible mise en place d'un prototype d'annonce de coupures de route capable de localiser précisément dans l'espace et dans le temps les tronçons routiers susceptibles d'être inondés lors d'un événement pluvieux important. Pour se faire, une méthode combinant vulnérabilité et aléa a été proposée. Il s'agissait de comparer les débits simulés à différents débits références correspondants aux périodes de retour théoriques 2, 10 et 50 ans. Ces périodes de retour ont été rapportées à celles estimées pour les occurrences de submersion liées aux 4 classes de vulnérabilité. Ainsi, 3 niveaux de risque ont pu être établis : élevé (rouge), moyen (orange) et faible (jaune).

Classe de vulnérabilité	Proportion de routes inondées			
	$Q_{2ans}/2<Q_{sim}<Q_{2ans}$	$Q_{5ans}<Q_{sim}<Q_{10ans}$	$Q_{10ans}<Q_{sim}<Q_{50ans}$	$Q_{sim}>Q_{50ans}$
1	65%	10%	0%	0%
2	33%	55%	59%	100%
3	20%	33%	34%	100%
4	0%	0%	0%	20%

Tableau 3. *Définition des 3 niveaux de risque reposant sur la proportion de routes inondées dans chaque classe de vulnérabilité en fonction de la période de retour du débit simulé.*

Cette méthode a été validée sur 5 événements pluvieux pour lesquels la localisation des coupures effectives de route avait été reportée par les services techniques. La qualité de détection a été évaluée à l'aide de plusieurs indicateurs :

- Probabilité de détection (*POD*) calculée comme le ratio entre le nombre d'inondations correctement détectées et le nombre total de sections inondées
- Taux de fausses alertes (*FAR*) calculé comme le ratio entre le nombre de sections non inondées mises en alerte et le nombre total d'intersections
- Timing (*TIM*) calculé comme le ratio entre les inondations détectées avant qu'elles ne soient signalées et le nombre total de détections correctes

b) Résultats

Les résultats obtenus pour les 2 premiers événements (Tableau 4) ont démontré la viabilité de la modélisation pluie-débit, ainsi que l'utilité de la caractérisation de la vulnérabilité. Ainsi lorsque cette dernière était utilisée, les 13 routes inondées furent identifiées (*POD*=100%) quelque soit l'hypothèse hydrologique considérée, et qualifiées par un risque moyen ou élevé. De plus, ces détections furent indiquées avant que les routes ne soient effectivement coupées par les services techniques (*TIM*=100%). Enfin, la très grande majorité des routes non inondées n'a pas été considérée comme risquée -ou caractérisée par un risque faible-, laissant ainsi la possibilité de définir des itinéraires saufs même dans les zones les plus touchées (*FAR* autour de 10%). Lorsque la vulnérabilité n'était pas prise en compte, le taux de détection *POT* n'atteignait plus les 100%, et les routes submersibles furent qualifiées d'un niveau de risque faible. Néanmoins ce taux de détection assez élevé (autour de 80%) traduisait l'importance de la distribution spatiale des précipitations car les débits simulés au niveau de la plupart des routes inondées excédaient le débit décennal.

Date	Nb of Inundated sections	Rain (mm)	POD		FAR		TIM	
			LHH	HHH	LHH	HHH	LHH	HHH
21 Nov 2003	6	150	100% (0%)	100% (83%)	4% (0%)	15% (8%)	–	–
29 Nov 2003	7	180	100% (43%)	100% (71%)	25% (6%)	30% (13%)	85% (81%)	100% (100%)
17 Dec 2003	0	60	–	–	–	–	–	–
3 Nov 2004	0	100	–	–	–	–	–	–
6 Sep 2005	56	300	58% (26%)	93% (74%)	19% (10%)	27% (29%)	75% (63%)	80% (77%)

Tableau 4. *Indicateurs déterminés sur les 5 événements. Les résultats entre parenthèses correspondent à ceux obtenus sans caractériser la vulnérabilité des intersections. LHH et HHH représentent les hypothèses hydrologiques basse et haute.*

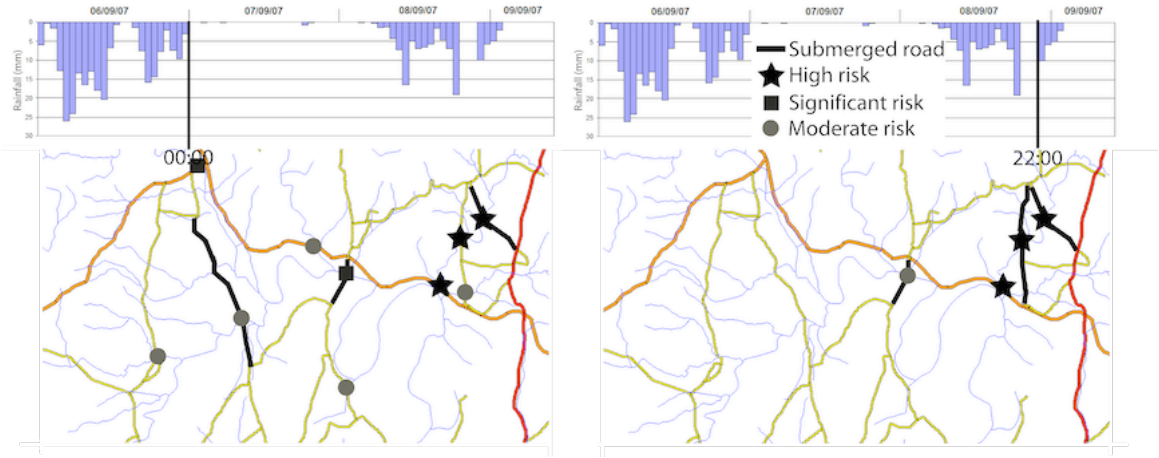

Figure 9. *Comparaison entre alertes et routes effectivement inondées à deux pas de temps différents les 6 et 9 septembre 2007*

Aucune route inondée n'a été répertoriée sur les zones étudiées lors des 2 événements suivants. En accord, le système d'alerte n'a indiqué aucun risque d'inondation car les débits simulés n'excédaient nulle part le seuil de $Q_{2ans}/2$. Ce résultat est aussi satisfaisant car il prouvait que le modèle n'avait pas tendance à surestimer le débit et donc le risque d'inondation.

Enfin, le dernier événement représentait un cas extrême avec la succession de deux épisodes météorologiques importants. Le premier était caractérisé par un cumul de précipitation de 300 mm et le second de 200 mm. Cet événement a occasionné de nombreuses coupures de route : 56 des 293 intersections répertoriées sur les zones d'étude furent inondées. Une très grande proportion de ces routes inondées fut détectée (POD=93%) par le système d'alerte dans le cas d'une hypothèse hydrologique haute (Figure 9). Dans ce cas, les fausses alertes restent limitées (FAR=27%), ce qui démontrait une bonne représentation de la structure spatiale des champs de pluie. Dans un tel cas, où un nombre important de routes est touché, le système d'alerte est limité par la précision de la méthode de caractérisation de la vulnérabilité.

c) Extensions et conclusions

L'extension du prototype à l'ensemble du département a été testée sur 10 événements pour lesquels les routes inondées étaient répertoriées (Naulin et al., 2013). Une fois de plus, il en a résulté que les taux de détection variaient fortement d'un événement à un autre et semblaient corrélés au nombre total d'inondations reportées : plus il y a de routes submergées, plus elles sont détectées. Dans ces cas, le rôle de la caractérisation de la vulnérabilité reste marginal, et l'estimation d'un aléa fort conduit à l'émergence d'un risque. Pour des événements moins intenses, et donc des débits plus faibles, la définition des niveaux de risque repose davantage sur la caractérisation de la vulnérabilité, qui s'avère être le point faible du prototype quand il est appliqué à l'échelle du département. Pour éviter cet écueil, l'estimation de la vulnérabilité *a priori* a été remplacée par la connaissance a posteriori des routes réellement inondées : le niveau de vulnérabilité fut défini par le nombre d'inondation subies pendant les 10 événements étudiés. Les taux de détection furent ainsi bien meilleurs, ce qui démontrait la pertinence de mettre en œuvre une méthode d'assimilation des données pour nourrir le système de toute nouvelle connaissance.

Les améliorations entrevues au niveau des bassins jaugés avec la modification de la fonction de transfert et la prise en compte de *CN* distribués n'ont pas été confirmées en termes de détection. Pour être valorisée opérationnellement, une grande précision dans l'estimation des débits n'est pas nécessaire ; l'ordre de grandeur suffit. C'est bien la prise en compte des distributions spatiales et temporelles des précipitations qui permet de bien anticiper la localisation du risque hydrologique et ses conséquences sur le réseau routier. En tirant bénéfice de cette spatialisation de la pluie, le modèle est capable de fournir des estimations de

débit fiables, malgré un ajustement « grossier » de ses paramètres. Par contre, ces résultats ont aussi démontré que le recensement des routes inondées est difficilement assimilable à une mesure indirecte des débits, utile pour évaluer la pertinence des modèles.

II.5.2. Alertes sur le bassin du Guadalhorce

a) Enjeux et méthodologie

Sur ce bassin versant, le système d'alerte distribué devait reposer sur la représentation maillée du territoire opérée par le modèle hydrologique. Il avait pour objectif de générer des alertes à chaque pas de temps sur l'intégralité du bassin et de tirer le maximum de bénéfices des rares données disponibles. Dans cette optique trois types différents d'alerte ont été définies : deux reposaient sur la seule donnée de précipitation (rapidement calculées), la troisième était directement liée aux sorties du modèle hydrologique. Dans chaque cas, les alertes correspondaient au dépassement d'une valeur référence caractérisée par une période de retour.

En Espagne, les courbes Intensité-Durée-Fréquence des précipitations reposent sur une formule empirique proposée par le Ministère des Travaux Publics (MOPU, 1999). Les précipitations de référence ont ainsi été calculées pour différentes périodes de retour (T = 2, 5, 10, 25, 50, 100 ans) et durées (D = 1, 2, 3, 4, 6, 12 heures). Les alertes basées sur la pluie ponctuelle furent déterminées cellule par cellule en comparant la pluie horaire mesurée aux différentes valeurs références sur cette même durée. Le niveau d'alerte assignée correspondait au maximum de période de retour dépassée. Agrégées à l'échelle d'un bassin versant (en suivant le schéma de drainage), ces données de pluie ont été pondérées à l'aide d'un coefficient correctif pour tenir compte de l'effet d'échelle. La durée choisie correspondait au temps de concentration du bassin versant concerné, estimé à l'aide de sa surface (MOPU, 1990). Enfin, les alertes basées sur les sorties du modèle hydrologique furent déterminées en comparant le débit simulé avec les quantiles théoriques proposés par la Ministère de Travaux Publics et reposant sur la méthode rationnelle (MOPU, 1990).

b) Présentation des résultats et conclusions

Suite à son implémentation, ce système d'alerte a pu être testé sur deux événements pluvieux significatifs survenus en janvier et février 2010 et ayant engendré de nombreuses inondations sur le territoire concerné.

L'événement du 6-7 janvier 2010 correspondait à un épisode pluvieux caractérisé par une précipitation totale de 70 mm localisée au sud du bassin. La pluie fut réellement concentrée sur un créneau de 2h pendant lesquelles il est tombé plus de 40 mm autour de Malaga. Ce système convectif méso-échelle à l'origine de crues éclair « urbaines » fut responsable de débordements dans la banlieue de Malaga. Pour cet événement, le système produisit des alertes là où les inondations se déroulèrent (Figure 10). Les alertes reposant sur la pluie ponctuelle, localisées aux endroits où les intensités furent les plus fortes (soit 35 mm/h), furent caractérisées par une période de retour de 5 ans. Ce risque d'inondation fut confirmé par les deux autres types d'alerte en en précisant davantage la localisation. Les biefs hydrographiques signalés furent bien ceux concernés par les inondations. Seule la période de retour affectée à ce risque différait (2 ans pour les pluies agrégées, 5 ans pour le débit simulé). Cette différence était essentiellement due à l'absence d'abstraction initiale qui engendre un débit plus important.

Cet exemple a démontré que les alertes basées sur la pluie ponctuelle étaient bien adaptées pour localiser le risque engendré par de fortes intensités. Cela est particulièrement le cas en milieu urbain où la distribution spatiale des précipitations est fortement corrélée au risque de débordement. Sans plus d'information sur les réseaux d'écoulement (superficiel et souterrain) qui nécessiterait de travailler à une plus grande résolution, ce type d'alerte apparaît suffisant pour déterminer approximativement les zones à risque.

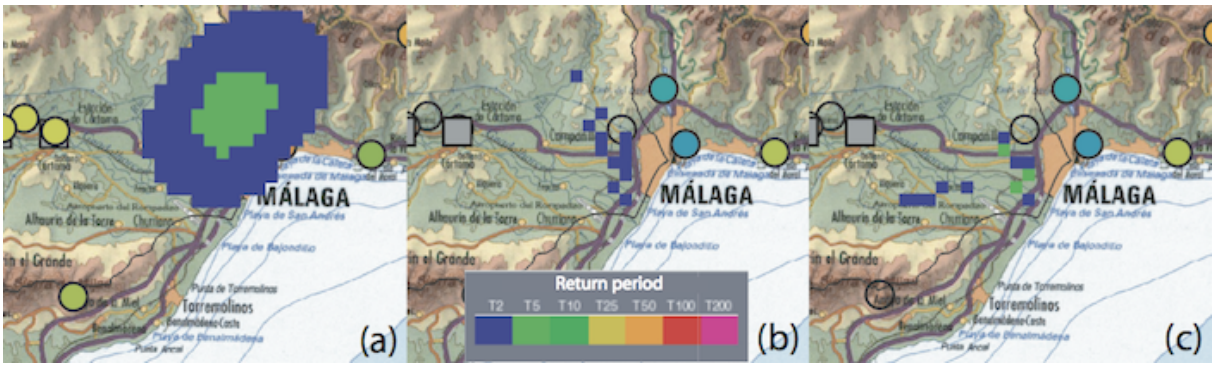

Figure 10. *Alertes délivrées par : (a) la précipitation ponctuelle, (b) la précipitation agrégée et (c) le modèle hydrologique.*

L'événement pluvieux du 15-16 février 2010 différait significativement du précédent avec des intensités beaucoup plus faibles (maximum de 20 mm/h), mais une durée plus longue (24 heures). Le Sud-ouest du bassin fut particulièrement touché, avec des cumuls de pluie atteignant plus de 200 mm à Alhaurin de la Torre et plus de 100 mm à Malaga. La saturation progressive des sols a entrainé de nombreux débordements de rivière et une quarantaine d'interventions des services de secours. Les intensités horaires de précipitation n'ayant pas dépassé le seuil correspondant à une période de retour de 2 ans (25 mm/h), aucune alerte ne fut déterminée sur la base des précipitations ponctuelles. Par contre, de nombreuses alertes furent signalées à l'aide des pluies agrégées. La sévérité du niveau de risque crût progressivement durant l'événement, passant d'une période de retour de 2 ans à 5 ans (Figure 11). La majorité des zones touchées par les inondations fue identifiée, à l'exception de celles situées dans la banlieue de Malaga. Ces omissions furent comblées par les alertes calculées à l'aide du modèle hydrologique, plus nombreuses et plus intenses. Toutes les inondations recensées furent ainsi détectées, dont certaines à l'aide d'un niveau de risque élevé (période de retour de 25 ans).

Ces travaux ont montré que dès lors que l'on s'intéresse à des événements pluvieux complexes, il semble nécessaire d'agréger les données de précipitation à l'échelle du bassin versant, plus adaptée à représenter les processus hydrologiques responsables des inondations. Bien que plus couteuse en temps, l'utilisation d'un modèle hydrologique distribué s'est montrée déterminante pour localiser et caractériser le niveau de risque. Celui-ci permet de tenir compte de la non linéarité de la transformation pluie-débit (et de sa variabilité spatiale), ainsi que des conditions initiales de saturation des sols qui peuvent représenter un facteur important dans la réponse du bassin. Enfin, force est de constater que malgré une procédure de calibration pour le moins rustique, le modèle hydrologique fut capable de simuler le débit de manière satisfaisante en de nombreux points du bassin.

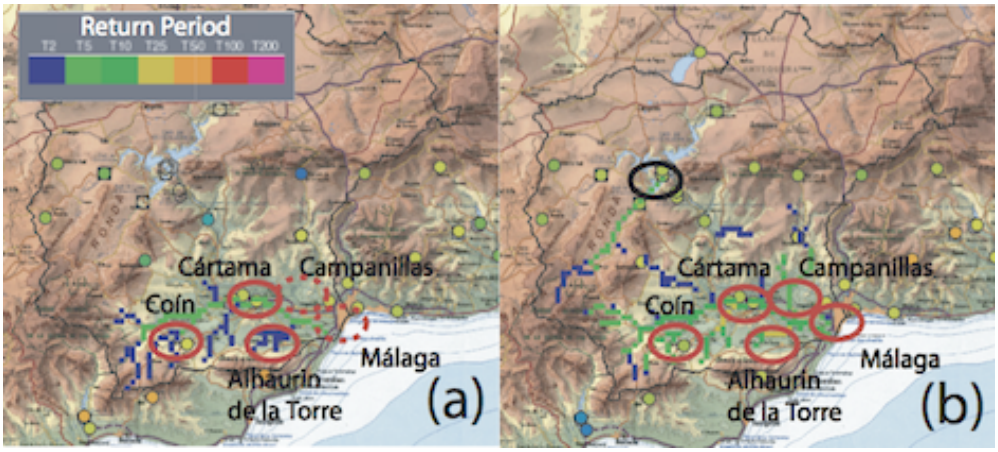

Figure 11. *Alertes délivrées par : (a) la précipitation agrégée et (b) le modèle hydrologique. Les ellipses rouges correspondent aux zones réellement inondées.*

II.6. Valorisation des données apportées par la télédétection

Comme on l'a vu à travers les travaux précédents, la prise en compte des variabilités spatiales et temporelles des précipitations est un point clef dans la simulation de débit, et ce d'autant plus si la structure du modèle permet de valoriser cette information. La précision des estimations quantitatives de précipitation (QPE pour Quantitative Precipitation Estimates) est donc cruciale en prévision opérationnelle de crue. Les radars météorologiques apparaissent actuellement comme les seuls outils capables de fournir une information pertinente à de hautes résolution spatiale (1 km^2 pour les radar bande C) et temporelles (5 minutes). Les QPE à base radar sont donc acceptées depuis un certain nombre d'années comme des données fiables pouvant améliorer considérablement la qualité des simulations hydrologiques (Borga et al., 2006; Cole and Moore, 2008; Delrieu et al., 2009). Notons que les images satellitaires peuvent parfois être utilisées en hydrologie prédictive, mais à des résolutions temporaires plus basses, sur des horizons plus longs (plusieurs jours), et souvent couplées à d'autres informations (Hardy et al., 2016).

Les radars météorologiques permettent aussi de produire des prévisions à courts termes (QPF pour Quantitative Precipitation Forecast). Par corrélation croisée entre deux champs d'estimations successives, il est possible d'extraire la vitesse et la direction de déplacement des précipitations et d'en déduire les champs futurs sous condition que « rien ne change ». Différentes techniques ont aussi été développées pour mieux prendre en compte les cellules orageuses pour lesquelles cette hypothèse de stationnarité n'est pas respectée. Malgré tout, la qualité de ces prévisions reste souvent limitée à des horizons temporels ne dépassant pas 2 heures, et intimement liée à la nature de l'événement pluvieux. Dans cette gamme de valeurs, des travaux ont montré l'intérêt d'utiliser ce type de données pour des applications en hydrologie prédictive (Berenguer et al., 2005; Boudevillain et al., 2006; Vivoni et al., 2006).

Les travaux présentés ici s'intéressent donc à l'utilisation de ces estimations et prévisions de pluie à base radar. Ils se sont interrogés sur la manière de valoriser cette information caractérisée par de hautes résolutions spatiale et temporelle en gestion de risque. Par ailleurs nous présenterons aussi une étude menée en milieu montagneux où l'information satellitaire a été utilisée pour mieux représenter la couverture neigeuse et ses conséquences sur les débits.

II.6.1. QPE et QPF sur le département du Gard

a) Enjeux et méthodologie

Le prototype d'annonce de coupures de route présenté précédemment a été testé pour valoriser l'utilisation de QPE et de QPF. A cet effet, les données radar produites par Météo-France (MF) et par la compagnie REAH® pour les services opérationnels de prévision des crues (SPC) ont été utilisées et comparées pour l'événement pluvieux des 29-30 septembre 2007 qui a touché les bassins versants du Vistre et du Vidourle (voir Figure 13). Lors de ces deux jours, un orage a balayé ce territoire d'ouest en est, en générant localement de fortes intensités. Entre 80 et 120 mm furent mesurés sur les deux bassins, avec des pics à plus de 200 mm localement. Cet épisode a entrainé la fermeture de 19 sections de route pour cause d'inondation, dont plus de la moitié était localisée en aval de petits bassins versants inférieurs à 10 km^2. Pour étudier la pertinence des informations spatialisées de précipitation, la méthodologie suivant a été mise en œuvre : (i) comparaison des champs de précipitions (QPE et QPF) avec celui issu du krigeage, (ii) valorisation de ces données en modélisation hydrologique sur les bassins jaugés, (iii) utilisation du prototype d'annonce de coupure pour détecter et prévoir les routes inondées.

b) Présentation des résultats

La comparaison entre les cumuls de précipitations estimées (MF, SPC et krigeage des données pluviométriques) et prévues (MF, SPC), a montré de fortes disparités entre ces différents produits, tant sur les maximums atteints que sur la localisation des pluies intenses (Figure 12). D'une manière générale, les champs MF avaient tendance à sous-estimer les

précipitations. De plus, ses prévisions à échéance 30 et 60 minutes tendaient à déporter rapidement le système convectif vers l'est, alors que celui-ci était plutôt stationnaire (cas typique de système auto-régénérateur dont la vitesse des cellules orageuses diffère de celle du système). Inversement, les champs SPC avaient tendance à estimer des valeurs élevées de précipitation (supérieures à 250 mm) sur une large partie du territoire. Une césure a aussi été constatée du fait de la superposition de deux zones de calibration distinctes des données radar.

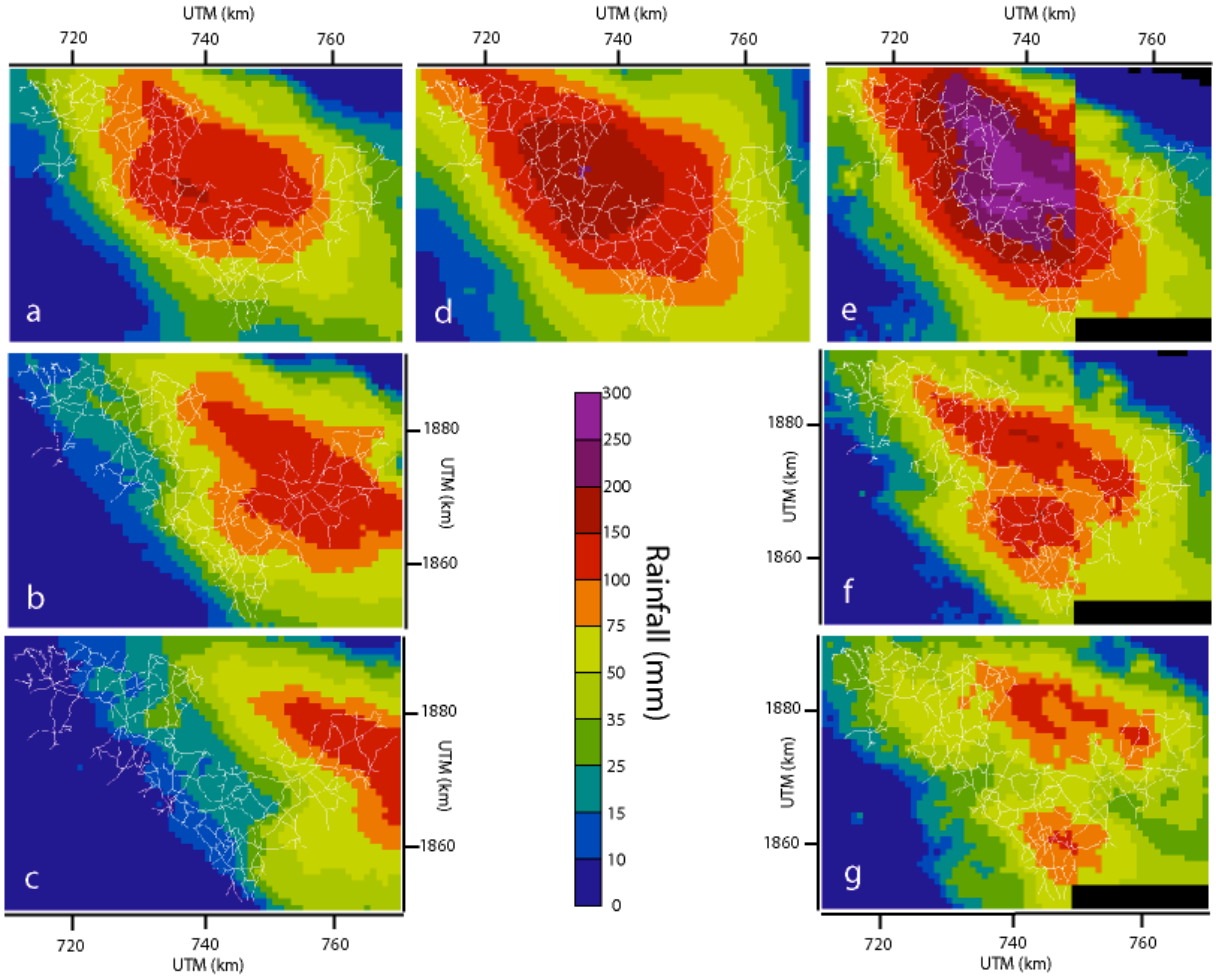

Figure 12. *Cumuls de précipitation sur la zone d'étude : (a) QPE MF, (b) QPF 30min MF, (c) QPF 60min MF, (d) krigeage, (e) QPE SPC, (f) QPF 30min SPC, (g) QPF 60min SPC*

La détermination de *CN* spécifiquement ajustés sur les bassins jaugés a fortement amélioré la qualité des prévisions de débit par rapport à l'utilisation des *CN* estimés *a priori* (cf. Tableau 2), et ce particulièrement pour les bassins aval où le modèle n'avait pas été calibré. Ce *CN* ajusté était soit inférieur, soit supérieur, au jeu de paramètre *a priori* suivant le type de données de précipitations utilisées. Il avait donc tendance à compenser les incertitudes entourant les QPE (MF et SPC). Enfin, les données krigées, bien qu'elles semblaient représenter correctement l'événement à l'échelle du bassin versant, ont produit les moins bonnes simulations. Elles présentaient un décalage temporel (due à la résolution des pluviomètres utilisés) qui a grandement affecté les critères de Nash. Tout cela a confirmé la grande sensibilité du modèle aux entrées spatialisées de pluie.

Des résultats similaires ont été obtenus avec l'application du prototype d'annonce de coupures de route. Malgré l'utilisation du *CN* ajusté, l'utilisation des données krigées a engendré un taux de détection très faible (*POD* inférieur à 40%) et de nombreuses fausses alertes (*FAR* > 90%). Sur la base de cette information pluviométrique, le modèle s'est révélé incapable d'estimer correctement (dans le temps et dans l'espace) les débits pour les intersections situées en aval des plus petits basins versants. Cela a confirmé la difficulté de représenter avec

précision les variabilités spatiales et temporelles des précipitations sur la seule base de pluviomètres. Les QPE SPC ont quant à eux fourni les meilleurs taux de détection (*POD* > 80%). Malgré de nombreuses fausses alarmes (*FAR* = 87%), le prototype fut aussi capable de retrouver la grande majorité des intersections non inondées, ce qui rendait possible la définition d'itinéraires sans danger. Ainsi la Figure 13 montre que toutes les coupures prévues par le modèle furent généralement qualifiées par un risque élevé ou moyen. Il faut aussi noter que toutes les inondations non détectées se trouvaient sur le bassin du Vistre. Malgré une simulation de débit satisfaisante obtenue à l'exutoire de celui-ci (Nash = 0,70), le modèle hydrologique n'est pas parvenu à reproduire correctement la réponse des petits bassins versants dans cette zone où l'on retrouvait de très fortes précipitations. La détection réalisée à l'aide des QPE MF fut moins satisfaisante (*POD* = 48%).

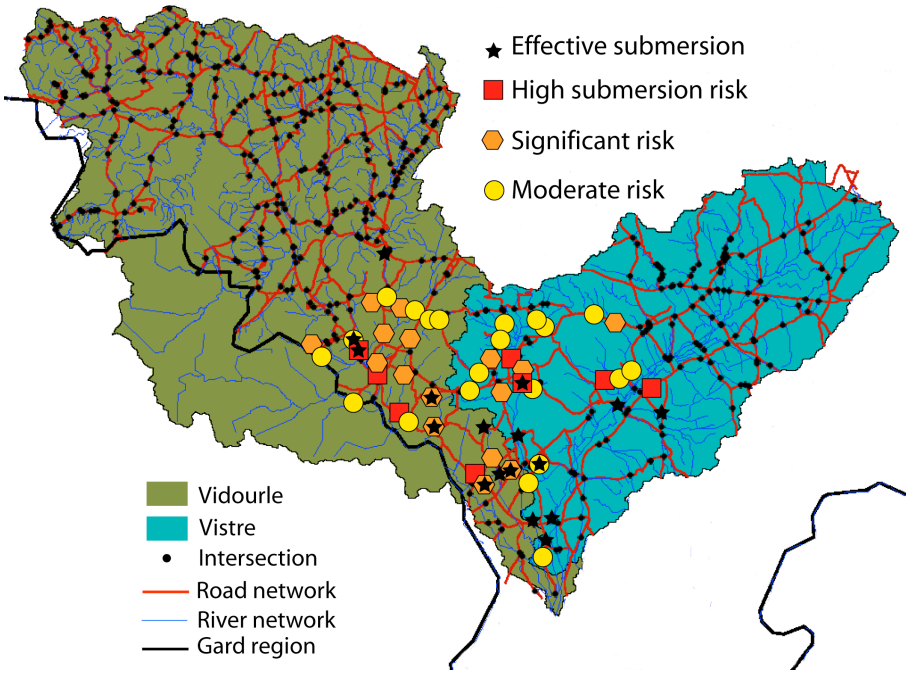

Figure 13. *Bassins versants du Vidourle et du Vistre où les sections inondées pendant l'épisode des 29-30 septembre 2007, ainsi que les alertes fournies par le prototype pendant l'ensemble de l'événement à l'aide des QPE SPC et d'un CN ajusté sont indiquées.*

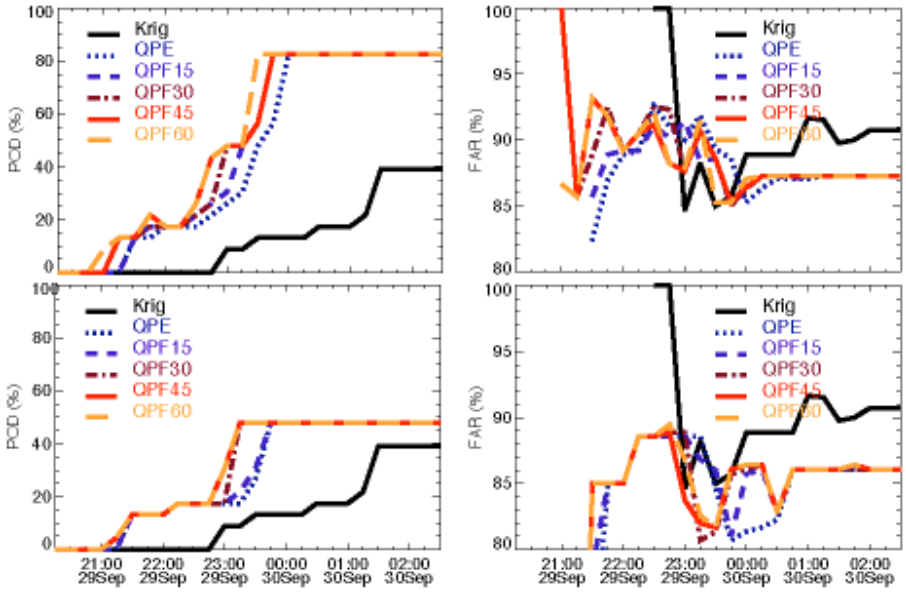

Figure 14. *Variations dans le temps des taux de détection (POD) et de fausses alarmes (FAR) calculés avec l'utilisation des données SPC (haut) et MF (bas)*

La qualité des résultats obtenus à l'aide des QPF était clairement corrélée à celle obtenue avec les QPE. Ainsi, le gain le meilleur en termes d'anticipation provenait de l'utilisation des QPF SPC (avec un *CN* ajusté). La Figure 14 montre l'évolution des taux de détection au cours de l'événement pluvieux à l'aide de l'information disponible (QPE et QPF à 15, 30, 45 et 60 minutes). L'utilisation des QPF a montré un intérêt certain puisqu'elle permettait d'anticiper de 15 à 45 minutes la détection des routes inondées, surtout au paroxysme de l'événement (entre 22h et minuit). Ce laps de temps peut sembler très important au regard des temps de réponse des petits bassins concernés (environs 30 minutes). Enfin, ces résultats ont souligné la dégradation des prévisions de pluie avec l'augmentation du temps d'anticipation.

c) Conclusions

Les résultats satisfaisants obtenus suite à l'application du prototype d'annonce de coupures de route sur les bassins versants du Vistre et du Vidourle ont légitimé et encouragé l'utilisation de mesures pluviométriques à base radar (QPE et QPF). Ces données semblent d'autant plus pertinentes dans le cas d'un événement convectif comme celui des 29-30 septembre 2007, caractérisé par de très fortes variabilités spatiales et temporelles des précipitations. Elles permettent de représenter correctement la structure de champ pluvieux sur les petits bassins versants inférieurs à 10 km^2. Sous réserve que ces données ne soient pas trop biaisées, elles permettent d'améliorer significativement les simulations hydrologiques. Suivant la précision des QPE, les QPF qui en sont déduites peuvent apporter elles aussi une plus value en termes de prévision. La possibilité de pouvoir anticiper de 30 à 45 minutes une inondation est clairement valorisable opérationnellement. Dans ce cas de figure, les services de secours peuvent pré-positionner leurs équipes et optimiser leur déploiement par exemple.

II.6.2. QPE sur le bassin du Guadalhorce

Le système d'alerte développé sur le bassin du Guadalhorce n'a pu être testé que sur un événement pluvieux pendant lequel le radar météorologique était opérationnel. Survenu le 21 avril 2011, cet épisode était caractérisé par de longues et faibles précipitations : 10 mm en moyenne pendant 10h, et ponctuellement 25 mm au sud du bassin (Figure 15). Les intensités horaires les plus fortes n'ont pas dépassé 20 mm/h. En conséquence, aucune alerte n'a été déterminée par le système, et ce quel que soit le type d'alerte choisi (à base de pluie ou de débit). Néanmoins, l'utilisation des données radar a bien montré la capacité de cet instrument à reproduire la structure du champ pluvieux. Ainsi la majorité des zones où l'intensité de 20 mm/h fut atteinte n'est pas visible sur le champ interpolé à l'aide du krigeage. La faible densité du réseau pluviométrique a laissé de nombreuses portions du territoire sans information. Enfin, notons que cette absence d'alerte coïncidait avec une absence d'inondation sur le territoire étudié. Cela démontrait –pour ce cas particulier- que le modèle ne surestimait pas les conséquences hydrologiques d'un faible événement pluvieux.

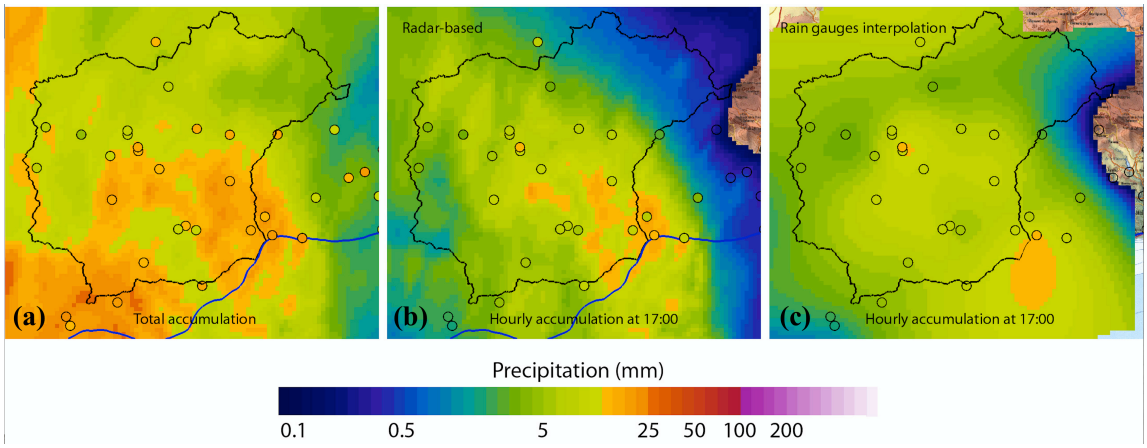

Figure 15. *Cartes d'alertes obtenues pour l'événement du 21 avril 2011 : (a) précipitation totale calculée à l'aide des estimation radar, (b) champs de précipitation à base radar à 17h, (c) champs de précipitation issu du krigeage à 17h*

II.6.3. L'information satellite dans les Pyrénées

a) Enjeux et méthodologie

L'objectif de ces travaux était d'étudier dans quelle mesure l'information de couverture neigeuse fournie par les images satellite pouvait améliorer le suivi de l'évolution de l'épaisseur du manteau neigeux, de sa fonte et de ses conséquences sur le débit d'un cours d'eau. Le territoire concerné était le bassin pyrénéen de Sant Joan de Abadesses (présenté Figure 3). Cette étude a reposé en grande partie sur le travail réalisé par Rafael Rico dans le cadre d'un stage long de Master à l'UPC que j'ai encadré. Celui-ci a développé et testé un modèle d'accumulation et de fusion du manteau neigeux en s'interrogeant sur la manière de représenter au mieux les processus mis en jeu tout en ne disposant que d'une information ténue et ponctuelle. Les données de couverture neigeuse utilisées provenaient du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra, administré par la NASA, et qui balaye l'intégralité du globe avec une fréquence comprise entre un et deux jours. Le produit utilisé ici reposait sur le traitement d'un signal caractérisé par une longueur d'onde proche de l'infrarouge (1,6 μm) qui permettait de déterminer un taux de remplissage de surface enneigée sur des cellules de 500 m de coté.

Afin de simuler le comportement du bassin versant, un modèle hydrologique a été implémenté. Il reposait sur la même structure distribuée que celui mis en œuvre sur le Guadalhorce (mailles agencées suivant le réseau de drainage, transfert réalisé à l'aide de Muskingum). Néanmoins la fonction de production était ici plus évoluée car elle devait prendre en compte un fonctionnement hydrologique plus complexe avec notamment les contributions des zones non-saturée et saturée. Le modèle HBV (Bergström, 1976) augmenté d'un module pour reproduire l'évolution du manteau neigeux a été utilisé à cet effet. Celui-ci permettait de déterminer la neige accumulée pour chaque pas de temps en prenant en compte la précipitation sous forme neigeuse (considérée telle quelle dès que la température est inférieure à T_{lim}) et la neige fondue représentée comme une fonction linéaire mettant en jeu une température de fusion T_{melt}, la température extérieure et la radiation nette.

Sans renter dans le détail des calculs de ce bilan, rappelons qu'il nécessitait la connaissance - entre autres- des distributions spatiales des altitudes, pentes, orientations (déterminées grâce au modèle numérique de terrain), ainsi que celles des variables météorologiques (pluie, température, pression et radiation). Ces derniers champs n'étant pas disponibles, les données ponctuelles provenant des stations furent interpolées spatialement à l'aide d'un gradient thermique (0.0065 ºC/m) pour la température et la pression, et d'une méthode de splines (également utilisée pour les précipitations). La nébulosité fut déterminée en comparant des données de radiation mesurées au niveau des stations météorologiques à des valeurs théoriques par temps clair, pour être ensuite interpolée à l'échelle du bassin. Seuls les paramètres T_{lim}, a (paramètre de degré-jour) et T_{melt} - ainsi que ceux du modèle hydrologique- devaient être ajustés ; les autres (masse optique de l'air, émissivités…) étant fixés *a priori*.

Un filtre de Kalman a ensuite été implémenté pour assimiler les données satellitaires de couverture neigeuse (convertie en épaisseur par multiplication du pourcentage de cellule couverte par l'épaisseur de neige maximale mesurée). L'hypothèse a été faite que la matrice de covariance caractérisant le bruit du processus simulé était un bruit blanc gaussien caractérisé par un écart type similaire à celui des données observées (Evensen, 2003).

b) Présentation des résultats

Les paramètres du module d'accumulation-fusion ont été ajustés en comparant les champs de couverture simulés et observés pour des épisodes neigeux de plusieurs dizaines de mm lors de l'hiver 2007-2008. Ils ont montré une faible variabilité au cours de cette période, si bien qu'il fut possible de rapporter leurs valeurs aux caractéristiques météorologiques de l'événement. Le paramètre de degré-jour obtenu variait autour de 4 mm/°C.jour avec des valeurs plus faibles au printemps pour compenser le poids plus important de l'effet radiatif. La température de fusion T_{melt} (autour de 0,5°C) a montré une forte corrélation avec la

température moyenne de l'événement. Ainsi plus la température du manteau neigeux était basse, plus la température de fusion devait être importante pour amorcer la fonte de la neige (cette valeur est supérieure à 0 car le processus de fonte tient compte de l'énergie échangée lors du changement d'état). Enfin, les valeurs de T_{lim} calibrées valaient en moyenne 1°C, mais aucune relation n'a été trouvée entre ses variations et les caractéristiques de l'événement. En parallèle, le module hydrologique a été calé en comparant les débits simulés à ceux observés sur une période non influencée par la fonte des neiges (entre mai et septembre 2009). Il a montré sa capacité à simuler correctement le débit à l'exutoire du bassin (Nash > 0,5).

Les simulations ont ensuite été effectuées sur la période hivernale 2008-2009. Les données satellitaires de manteau neigeux ont été assimilées dès lors qu'elles étaient disponibles (ce qui n'était pas le cas lors du premier épisode de pluie survenu fin décembre). Quelques résultats représentatifs sont représentés sur la Figure 16. Il en ressort que l'absence de données en début d'hiver a rendu difficile la représentation de la couverture neigeuse. Celle-ci était ainsi assez largement sous-estimée. Pour les événements suivants, les performances du modèle d'accumulation-fusion furent significativement améliorées avec des couvertures observées et des cumuls de neige simulés très proches.

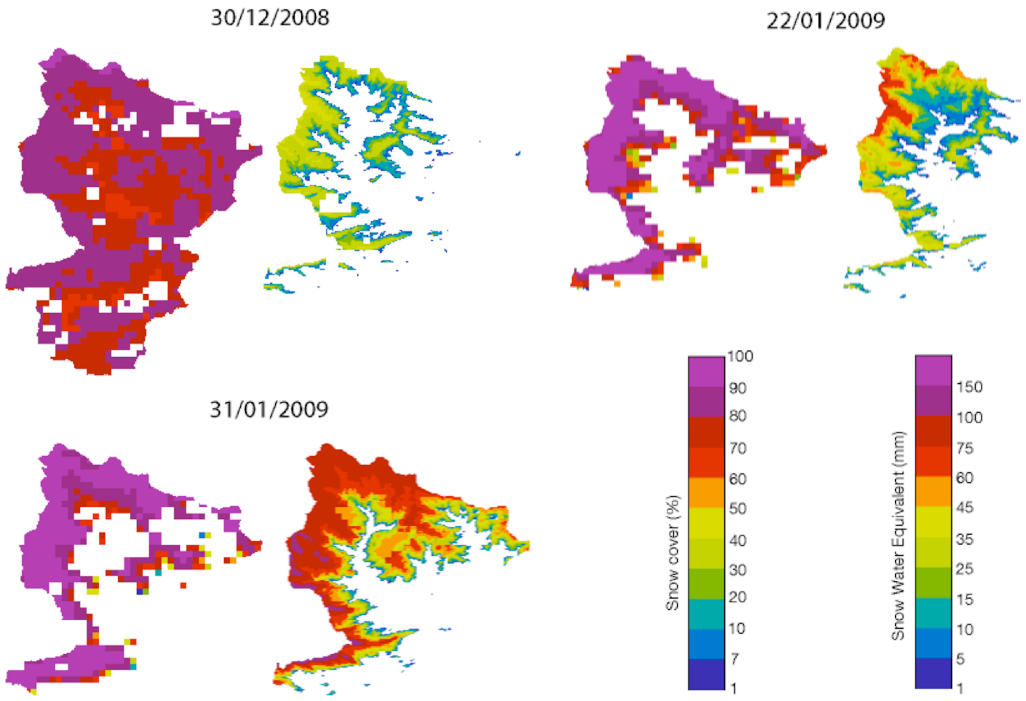

Figure 16. *Comparaison entre couverture neigeuse observée par satellite (gauche) et neige accumulée en équivalent eau simulée par le modèle (droite)*

Les simulations de débit effectuées à l'aide du modèle ont généralement montré une amélioration de ses performances du fait de l'utilisation des données satellitaires. Les résultats obtenus pour les mêmes événements que précédemment sont représentés sur la Figure 17. Le premier événement correspondait à une précipitation très faible (<1mm) dont le débit résultant était intégralement généré par la fonte des neiges. L'assimilation des images de couverture neigeuse en début d'événement a permis de prendre en compte ce phénomène de fonte. La différence entre la magnitude des débits observés et simulés était fortement liée à l'absence d'information quantitative sur l'épaisseur du manteau neigeux, et donc sa possible sous-estimation. Le décalage temporel résultait plus certainement de la résolution temporelle à laquelle l'information satellitaire était disponible. Le second événement fut le plus représentatif du gain apporté par l'assimilation de données avec une amélioration significative du critère de Nash et de la forme du débit simulé. Dans ce cas, le débit était composé pour moitié de neige fondue et pour moitié d'une conséquence directe des précipitations. Enfin, le

bénéfice apporté par les images de couverture fut très faible sur le troisième épisode, résultant en très grande majorité de pluies importantes (55 mm). Le rôle de la fonte des neiges y était donc marginal et celui de l'assimilation de données très peu visible.

Ces résultats encourageants ont montré la possible valorisation de l'information satellitaire pour des enjeux dépassant clairement le cadre de ses résolutions spatiales et temporelles. Réalisés sur seulement quelques épisodes pluvieux, ces travaux auraient nécessité d'être consolidés à l'aide de données supplémentaires obtenues sur une chronique plus longue. De plus l'utilisation de produits plus élaborés tels que les données de Snow Water Equivalent aurait encore pu améliorer l'apport des données satellite en modélisation hydrologique. Cela n'a pu être réalisé ici à cause de la trop grande présence de foret et l'incapacité du satellite à estimer ces quantités d'équivalent en eau à travers un tel couvert végétal.

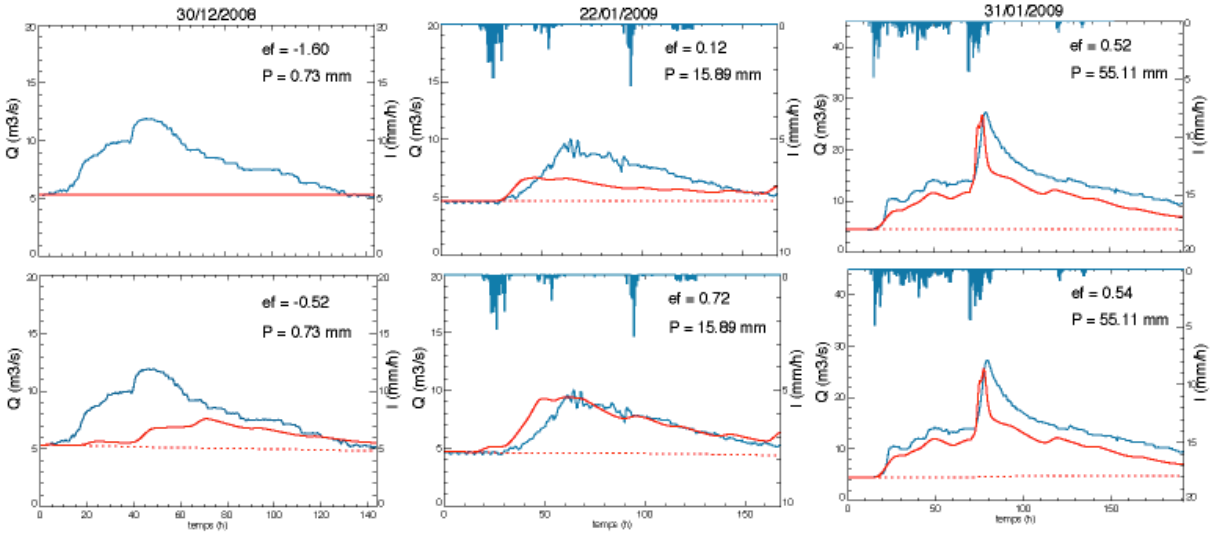

Figure 17. *Comparaison entre débits observés et simulés sans assimilation des données satellitaires (haut) et avec (bas)*

II.7. Quantification de l'incertitude

II.7.1. Objectifs

Comme nous l'avons vu au fil de la présentation de tous ces travaux de modélisation, l'incertitude qui entoure la prévision de débit peut être significative, et ce d'autant plus qu'elle peut provenir de différentes sources d'erreur : estimation des précipitations, structure et hypothèses simplificatrices du modèle utilisé, estimation des paramètres, mesures de débit utilisées pour la calibration de celui-ci. Ces erreurs se propagent tout au long de la chaine de modélisation pour en affecter les résultats. La quantification -et éventuellement la réduction- de cette incertitude ne peut se faire qu'à condition de bien identifier et estimer ces différentes sources d'erreur. Dans le cadre du projet IMPRINTS, j'ai ainsi participé à l'encadrement de la thèse de Felipe Quintero (2008-2011) qui s'intéressaient à l'estimation et la représentation de l'incertitude dans la chaîne de prévision de débit en se focalisant d'une part sur l'incertitude liée à l'estimation des précipitations, et d'autre part sur celle liée au choix des paramètres d'un modèle hydrologique.

II.7.2. Méthodologie

L'incertitude entourant l'estimation des champs de précipitations a été appréhendée à l'aide d'une perturbation des mesures radar (Llort et al., 2008). Pour se faire, un champs référence a été calculé à partir d'une combinaison (krigeage avec dérivée externe) entre l'estimation radar corrigée (R_{obs}) et les données pluviométriques au sol (Velasco-Forero et al., 2009). En comparant ce champ référence avec le champ corrigé, un champ d'erreur a pu être déterminé

en considérant que les erreurs affectant les estimations radar étaient multiplicatives. La distribution de ces erreurs fut ensuite caractérisée par sa moyenne (μ), son écart type (σ) et la pente de son spectre (transformation de Fourrier) liée à son autocorrélation spatiale. Ces 3 paramètres ont ensuite été utilisés pour réaliser des simulations stochastiques de champs de perturbation $\delta_i(t)$ en modifiant le champ observé :

$$R_i(t) = R_{obs}(t) \times 10^{\frac{\delta_i(t)}{10}}$$

Répétée plusieurs fois, cette méthode a été adoptée ici afin de constituer des ensembles de 50 champs pluvieux possibles ($R_i(t)$) permettant d'appréhender l'incertitude entourant l'estimation des précipitations pour chaque événement.

Le modèle hydrologique Dichitop (Corral et al., 2000) a ensuite été utilisé pour simuler la réponse du basin versant du Besos (cf. Figure 3). Il repose sur une structure distribuée similaire à celle présentée précédemment sur le bassin du Guadalhorce. Une distinction est toutefois faite pour différencier, sur chaque maille, une zone urbaine et une zone rurale à l'aide de l'occupation des sols. La fonction de production SCS est appliquée sur les zones urbaines, tandis que TopModel (Beven and Kirkby, 1979) l'est sur la partie rurale. TopModel repose sur la détermination d'un indice topographique (λ_i) qui contrôle la capacité de saturation du sol via le déficit de la zone non saturée. La plupart des informations nécessaires à la bonne mise en œuvre du modèle fut soit déduite de l'information géographique, soit estimée *a priori* (comme le déficit initiale). Au final, 5 paramètres restaient à calibrer : M et T_0 (paramètres liés à TopModel), FCN (lié au SCS), Vv et Vr (paramètres de transfert), montrant tous une certaine variabilité dans le temps. C'est sur ces derniers que l'étude d'incertitude entourant leurs valeurs s'est portée.

A cette fin, un jeu de 26 événements pluvieux a été utilisé et divisé en deux sous-échantillons pour la calibration et la validation du modèle. Les événements ont aussi été répartis en plusieurs classes correspondant à certaines de leurs caractéristiques hydro-météorologiques : (i) conditions initiales de saturation (2 classes définies), (ii) position dans l'année (1 classe pour chacune des 4 saisons), (iii) coefficient de ruissellement (3 classes définies dans la gamme des valeurs calculées). La méthode GLUE (Beven and Binley, 1992) a été appliquée pour sélectionner un ensemble de paramètres acceptables pour tous les événements appartenant à une même classe. Ainsi, pour chaque classe, un ensemble de 5000 jeux de paramètres a été testé par un calcul de vraisemblance (estimée à l'aide du critère de Nash). Seuls les meilleurs jeux de paramètres ont été conservés (Nash > 0,5) pour constituer au final 9 jeux de paramètres représentatifs de leur possible variabilité. Il a été considéré que cet ensemble de 9 jeux permettait de tenir compte de l'incertitude engendrée par la paramétrisation du modèle hydrologique Dichitop.

Les contributions respectives de l'incertitude engendrée par les précipitations puis par la paramétrisation du modèle ont été étudiées séparément, puis conjointement. Leur influence sur le débit simulé a été analysée via un coefficient de dispersion calculé à l'aide des quantiles de débit à 10% et 90% :

$$D(\%) = \frac{Q_{10\%} - Q_{90\%}}{Q_{ref}} \times 100$$

II.7.3. Présentation des résultats

La calibration du modèle s'est soldée par des résultats satisfaisants avec la détermination de 9 jeux de paramètres possibles. Les valeurs sélectionnées apparaissaient la plupart du temps cohérentes avec les classes auxquelles appartenaient les épisodes pluvieux. Ainsi, la vitesse de rivière Vr était plus faible en hiver qu'en été, période plus propice au comportement torrentiel. Des performances similaires ont été obtenues pour les événements appartenant à l'échantillon de validation.

Les résultats de ces travaux ont montré que l'incertitude affectant les précipitations pouvait être très importante et varier sensiblement d'un événement à un autre. Ses conséquences hydrologiques se manifestaient surtout sur les pics de débit, moins lors des périodes de récession. Des coefficients de dispersion *D* élevés en ont résulté, variant entre 50% et 173% (pour une moyenne de 135%) suivant l'épisode pluvieux. La prise en compte de l'incertitude entourant la définition des paramètres du modèle a, pour sa part, engendré une dispersion moindre : entre 23% et 87% (moyenne de 55%), ce qui était cohérent avec des résultats obtenus lors de travaux similaires (Zappa et al., 2011). La combinaison de ces deux sources d'incertitude a finalement montré une dispersion très importante : de 88% à 400% (pour une moyenne de 234%). Celle-ci s'avérait être plus grande que la somme des dispersions engendrée par chacune d'elles (Figure 18) du fait des relations non linéaires entre la pluie et le débit qui sont reproduites par le modèle Dichitop.

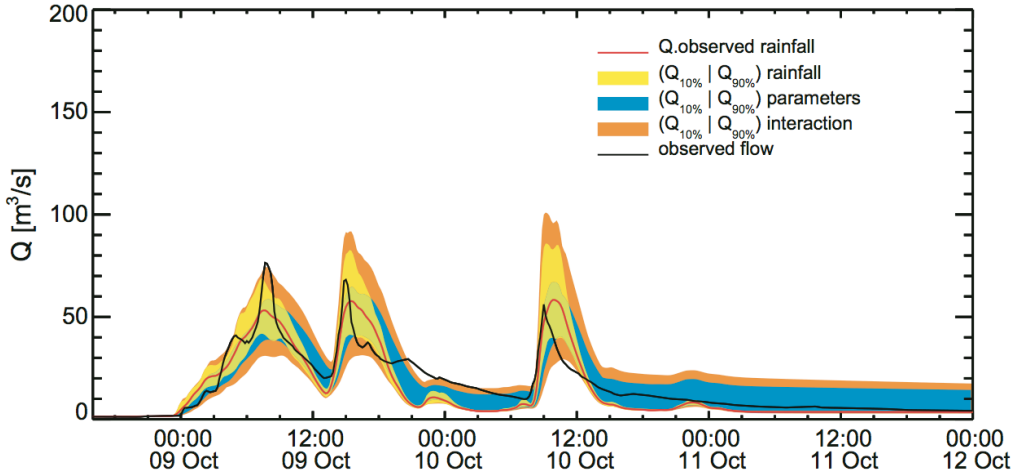

Figure 18. *Contribution individuelle et combinée des incertitudes entourant les champs de pluie et les paramètres du modèle (Quintero et al., 2012).*

II.8. Conclusions

Ces différents travaux sur le risque hydrologique diffus ont illustré la nécessité de mieux appréhender la complexité des phénomènes étudiés - due tant à leur hétérogénéité spatial qu'à leur variabilité temporelle - pour mieux comprendre et anticiper leurs conséquences. Ils ont d'abord démontré qu'une bonne connaissance du territoire, ainsi que la mise en œuvre de méthodes s'inspirant d'autres disciplines (géographie, sciences humaines), permettaient d'apporter des informations pertinentes susceptibles d'orienter, d'améliorer et de valider les approches de modélisation. Comme dans tout système anthropique, la gestion de risque sur un territoire donné requiert de bien comprendre la construction, la gestion et l'évolution de celui-ci. Il nous a donc semblé intéressant de transposer ce type d'approche pluridisciplinaire à d'autres thématiques (voir I.IV.2).

Concernant la physique des aléas, une meilleure connaissance de la distribution des précipitations dans l'espace et dans le temps s'est avérée primordiale. Bien qu'encore perfectibles, les radars météorologiques se sont montrés quasiment indispensables pour estimer, comme pour prévoir à court terme, les précipitations à de hautes résolutions spatio-temporelles. L'utilisation de radars bande X à double polarisation, qui permettent d'augmenter encore ces résolutions, représente à n'en pas douter des perspectives de recherche intéressantes pour les années à venir.

Les modèles hydrologiques utilisés dans ces travaux ont montré des aptitudes plus ou moins bonnes pour représenter la non-linéarité de la relation pluie-débit sur une large gamme d'événements pluvieux. Il en ressort que pour estimer correctement les débits dans l'espace et dans le temps, les modèles se devaient d'être distribués, parcimonieux et robustes. La difficile calibration des modèles conceptuels dès lors qu'ils sont mis en œuvre sur des territoires

hétérogènes (re)pose la question de l'utilisation de modèles à base physique, nécessitant souvent une paramétrisation plus importante. La bonne solution se trouve sûrement dans un compromis entre ces deux approches, ainsi que dans l'étude des processus à travers les échelles et de la possible rupture/continuité des champs géophysiques qui leur sont associés. L'assimilation de données qualitatives (comme celles relatives aux coupures de routes) ou quantitatives (comme la télédétection) représentent aussi un bon moyen d'améliorer les sorties de modèles. Cela nécessite le développement de modèles « intelligents » capables d'apprendre et la constitution de base de données *ad hoc*.

Enfin, malgré tous les efforts qui pourront être mis en œuvre pour améliorer la compréhension, l'estimation et la représentation des processus physiques à l'origine d'une crue, le résultat sera toujours incertain. Il apparaît donc utile de travailler sur des méthodes de quantification de cette incertitude via des approches ensemblistes - et pour faire le lien avec ce qui vient d'être dit - à l'aide de modèles reposant sur de la physique stochastique.

III. Les conséquences du changement global : appréhender la complexité pour en mesurer les impacts

III.1. Problématique

D'après les derniers rapport du GIEC (IPCC, 2014) le changement climatique est en route et ses conséquences hydrologiques risquent d'être importantes. L'augmentation globale de la température et les modifications concernant les caractéristiques des précipitations dans l'espace et dans le temps devraient augmenter les situations extrêmes avec localement des précipitations plus intenses et/ou des diminutions des débits d'étiage. Le pourtour méditerranéen apparaît comme une zone particulièrement vulnérable à ce changement (Cabello et al., 2011; Giorgi and Lionello, 2008) avec une augmentation des températures allant de 2 à 6,5° et une réduction des précipitations de -5% à -30% à la fin du XXIème siècle en fonction du scénario d'émission et de la saison.

De nombreuses études ont déjà illustré les modifications de régime hydrologique que pouvait entrainer le changement climatique à l'échelle de grands bassins versants comme la Seine (Dorchies et al., 2016) ou le Rhin (Lenderink et al., 2007), comme sur de plus petits cours d'eau (Velázquez et al., 2013). Ces études montrent généralement un épuisement marqué des ressources en eau, avec une diminution des volumes moyens annuels atteignant 30% à la fin du siècle. Le changement climatique aura aussi des conséquence sur les extrêmes hydrologiques avec l'augmentation du risque d'inondation (Dankers and Feyen, 2009) et des étiages. Néanmoins, il apparaît encore peu évident de définir comment va se matérialiser localement ces modifications à des échelles compatibles avec des études d'impacts. C'est typiquement le cas pour ce qui concerne les crues éclair ou les zones géographiques à la topographie marquée.

Il apparaît donc nécessaire de développer des méthodes allant dans ce sens. Elles doivent viser à une meilleure appréhension du futur sur la base d'une bonne connaissance du présent et du passé proche. Sur la base de ce constat, ce chapitre s'intéresse aux conséquences du changement climatique (température, précipitations) dans un contexte méditerranéen et à une échelle compatible avec une étude d'impacts. Il s'intéresse particulièrement à l'influence du changement climatique sur les ressources en eaux, les feux de foret et les crues. Pour se faire, les questions suivantes ont été abordées : (i) **comment déterminer des scénarios climatiques hautes résolutions** adaptés aux études d'impact, (ii) **comment mettre en œuvre un modèle hydrologique non stationnaire**, (iii) **quels seront les impacts de ce changement climatique sur les ressources en eau et les inondations**, et avec quelle incertitude.

Les travaux présentés dans ce qui suit ont essentiellement été menés au sein du CRAHI à travers plusieurs projets de recherche. En premier lieu, on trouve le projet **WATERCHANGE** (LIFE+) dont j'étais le responsable, et qui avait pour finalité d'étudier l'influence du changement global (regroupant les changements liés au climat, à la demande en eau et à l'occupation du sol) sur les ressources hydriques d'un bassin versant fortement anthropisé (Llobregat). Réalisé en collaboration avec le centre technologique CETaqua et différents acteurs de la gestion de l'eau catalane, son objectif était de développer un outil de planification des ressources en eau utilisant différents scénarios de changement global et capable d'évaluer la pertinence de mesures structurelles ou institutionnelles d'adaptation.

La thématique du changement climatique a aussi été abordée dans le projet **IMPRINTS** déjà présenté, et plus indirectement à travers le projet **ARCON**. Ce dernier, réalisé pour le compte de l'Agence Catalane de l'Eau (ACA), avait pour objectif de parvenir à reconstruire des cartes de pluie journalières caractérisées par une texture spatiale similaire à celle des champs radar disponibles actuellement.

Les détails de ces travaux sont à retrouver dans les articles suivants :

Versini, P.-A, Pouget, L., Mc Ennis, S., Custodio, E., Escaler, I., 2016. Climate change impact on water resources availability – Case study of the Llobregat River basin (Spain). *Hydrological Sciences Journal*, 61(14): 2496-2508.

Versini, P.A., Velasco, M., Cabello, A. and Sempere-Torres, D., 2013. Hydrological impact of forest fires and climate change in a Mediterranean basin. *Natural Hazards*, 66(2): 609-628.

Velasco, M., Versini, P.A., Cabello, A. and Barrera-Escoda, T., 2013. Assessment of flash floods taking into account climate change scenarios in the Llobregat River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 3145-3156.

Versini, P.-A. , Berrenguer, M., Sempere-Torres, D., 2012. Reconstruction of historical precipitation based on radar fields: application on Catalonia region (Spain), Conférence EGU, 22-27 avril 2012, Vienne (Autriche)

Pouget, L., Escaler, I., Guiu, R., Mc Ennis, S. and Versini, P.A., 2012. Global Change adaptation in water resources management: The Water Change project. *Science of The Total Environment*, 440: 186-193.

III.2. Terrain d'étude : le bassin du Llobregat

La plupart de ces travaux a été conduite sur le bassin versant du Llobregat en Catalogne (Figure 3). Long de 175 km et étendu sur 5000 km^2, le Llobregat prend source dans les pré-Pyrénées à 2000 m d'altitude pour se jeter dans la Méditerranée à l'ouest de Barcelone. L'occupation des sols diffère grandement du Nord au Sud avec des forets de pins dans la partie montagneuse, une partie centrale essentiellement tournée vers des activités agricoles intensives et une côte très urbanisée avec une forte demande en eau.

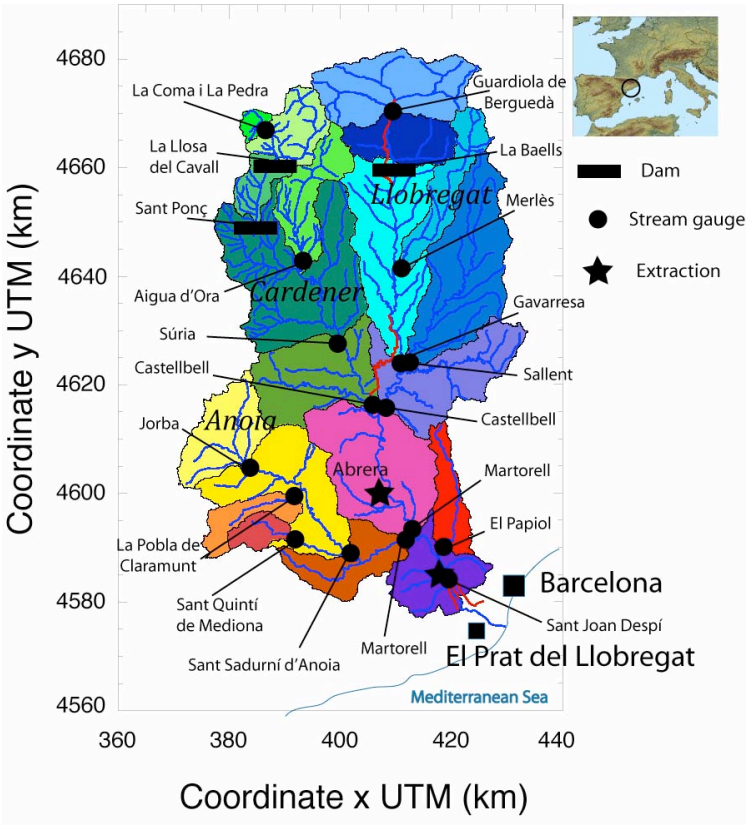

Figure 19. *Le bassin versant du Llobregat et ses stations débitmétriques.*

Le débit est régulé en amont à l'aide de trois barrages (Figure 19) dont la capacité totale est de 219 hm^3. Le régime hydrologique est caractérisé par deux périodes de hautes eaux (au printemps et en automne), particulièrement propices aux inondations. Inversement, le débit atteint un premier minimum en janvier du fait de la rétention neigeuse et un second en août. Les usages de l'eau sont néanmoins nombreux : 350 hm^3 pour les demandes urbaines (production d'eau potable) et industrielles, 32 hm^3 pour la demande agricole. Enfin le bassin versant du Llobregat est couvert par un réseau de mesure hydro-météorologique plutôt dense avec plus de 90 pluviomètres et 17 stations limnimétriques (en plus des 3 barrages). A l'exception de sa partie nord, ces stations sont réparties de manière homogène sur le territoire. De plus, comme l'ensemble de la Catalogne, le bassin est couvert par un radar météorologique à bande C.

III.3. Scénarisation du changement climatique

III.3.1. Connaître le passé

a) Enjeux et problématique

Avant de s'intéresser à l'étude du changement climatique et de ses conséquences hydrologiques, il semble indispensable de bien connaître et de bien caractériser le climat passé, au moins sur la période contemporaine sur laquelle des comparaisons peuvent être effectuées. De telles données sont indispensables pour étudier les tendances et les valeurs extrêmes, valider les modèles climatiques, et par la suite détecter la manifestation du changement climatique. Censés pouvoir reproduire au mieux les hétérogénéités locales, les modèles régionaux sont particulièrement demandeurs de données hautes résolutions, et ce d'autant plus s'ils sont appliqués sur des régions montagneuses et/ou soumises à des crues éclair, où des pluies intenses et localisées peuvent se produire.

Concernant les précipitations, de longues chroniques de données issues d'un réseau de pluviomètre sont souvent disponibles. Caractérisés par une densité variable dans le temps, ces réseaux peinent à reproduire les hétérogénéités locales évoquées précédemment. D'un autre côté, comme nous l'avons déjà mentionné, des outils comme les radars météorologiques peuvent considérablement améliorer la qualité des estimations de précipitation en tenant davantage compte de leur variabilité spatiale. Hélas, ces données sont généralement disponibles sur des périodes beaucoup plus courtes (inférieures à 10 ans) qui ne permettent pas la réalisation d'une étude statistique. Pour résoudre ce dilemme – la durée ou la résolution spatiale - nous nous sommes interrogés sur la possibilité de parvenir à reconstruire des cartes de pluie journalières, caractérisées par une texture spatiale similaire à celle des champs radar en combinant ces deux sources d'information (pluviomètres et radar). Ce travail a été réalisé sur le territoire de la Catalogne en collaboration avec l'Agence Catalane de l'Eau qui souhaitait disposer de nouvelles cartes de référence en tirant le maximum de bénéfices des données radar disponibles actuellement.

b) Méthodologie

La méthodologie mise en œuvre reposait sur la valorisation d'une base de données constituée de champs de précipitations journalières provenant de la mosaïque radar SMC (voir carte de la Catalogne Figure 3). Disponibles sur la période 2008-2011, ces champs ont été utilisés pour définir des patrons représentatifs caractérisant leur variabilité spatiale à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales (ACP). Ces patrons ont ensuite été combinés linéairement afin de reconstruire les champs historiques (1940-2007) à l'aide des données provenant des pluviomètres. Une dernière correction a été effectuée en interpolant les données des pluviomètres à l'aide d'une méthode de krigeage pour laquelle le champ reconstitué était utilisé comme dérivée externe (Velasco-Forero et al., 2009). Cette technique permettait

d'attribuer les valeurs exactes de pluie mesurées au niveau des pluviomètres, tout en conservant la texture radar. Différents tests ont été menés pour évaluer la pertinence de la reconstitution historique :

- Validation croisée : Pour chaque champ reconstitué, un pluviomètre est mis de côté et la valeur estimée à son endroit est comparée à la valeur observée. Cette opération est répétée pour chaque pluviomètre. Différents indices sont ensuite déterminés pour comparer les valeurs observées et reconstituées : coefficient de corrélation, erreur moyenne quadratique (RMSE) et biais.
- Utilisation d'une référence externe : les champs reconstitués sont comparés aux champs de précipitation estimés à l'aide du radar de l'AEMET (non exploité jusque là) pour 17 événements pluvieux disponibles. Les mêmes indices sont utilisés pour évaluer la qualité de la reconstitution.

c) Présentation des résultats

L'ACP a été conduite sur 1086 cartes journalières (transformées et centrées) de précipitation issues des données radar sur la période 2008-2011. Les 4 premières composantes sont représentées Figure 20. Le premier champ (représentant 60,8% de la variance expliquée) est un patron relativement uniforme illustrant l'hétérogénéité à petite échelle. La deuxième composante (7,8% de la variance expliquée) correspond au gradient sud-ouest nord-est qui suit approximativement la chaine des Pyrénées. La troisième composante (6,6% de la variance expliquée) coïncide quant à elle au gradient nord-ouest sud-est symbolisant l'influence de la mer Méditerranée. Enfin la quatrième composante (2,6% de la variance expliquée) représente les variations de la partie centrale du territoire. Réalisée sur des sous-périodes, l'ACP a démontré la stabilité de ces 4 premières composantes. Au final, les 25 premières composantes ont été sélectionnées. Elles permettaient de reproduire 90% de la variance expliquée.

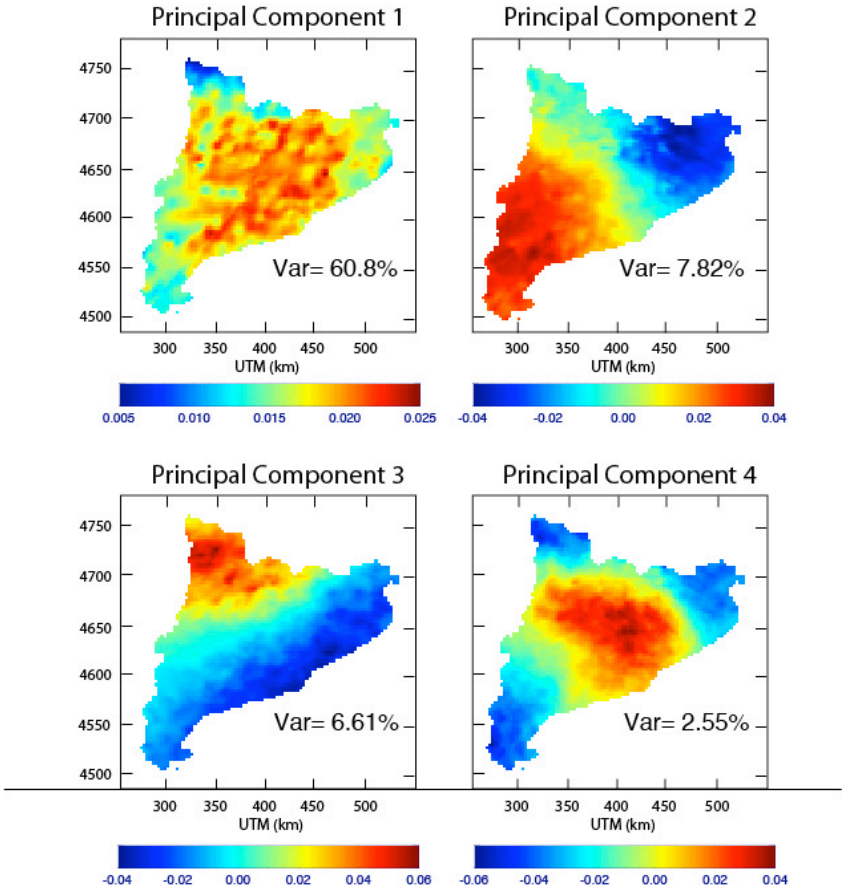

Figure 20. *Présentation des 4 premières composantes principales issues de l'ACP des champs de précipitation radar sur la période 2008-2011.*

Ces 25 composantes principales ont été utilisées pour reconstituer les champs pluvieux sur la période historique 1940-2007. Les tests de validation croisée ont montré que les valeurs de pluie issues des champs reconstitués étaient très proches des valeurs observées (corrélations supérieures à 0,5). La qualité des reconstitutions semblait liée à la distribution spatiale des précipitations. Ainsi, pour les épisodes de type stratiforme, la méthode de reconstitution était affectée par les faibles variations de précipitation et peinait à reproduire exactement ces intensités (épisode du 24 mars 1943 de la Figure 21). Inversement, la méthode s'est montrée particulièrement pertinente dans la reproduction de champs caractérisés par des précipitations hétérogènes et localement très intenses (événement du 7 novembre 1982 de la Figure 21). Dans ce cas, les coefficients de corrélation étaient élevés tandis que l'erreur quadratique était légèrement affectée par les valeurs élevées de précipitation. Ces exemples ont permis d'illustrer la capacité de la méthode à bien reconstituer la distribution spatiale de la pluie sur une large gamme de valeurs (jusqu'à plus de 200 mm). La correction réalisée à l'aide du krigeage par dérivée externe a donné lieu à une amélioration significative des résultats obtenus par une simple combinaison des composantes principales. En effet, cette dernière permettait de représenter correctement la distribution spatiale des précipitations mais échouait à en reproduire correctement les valeurs locales.

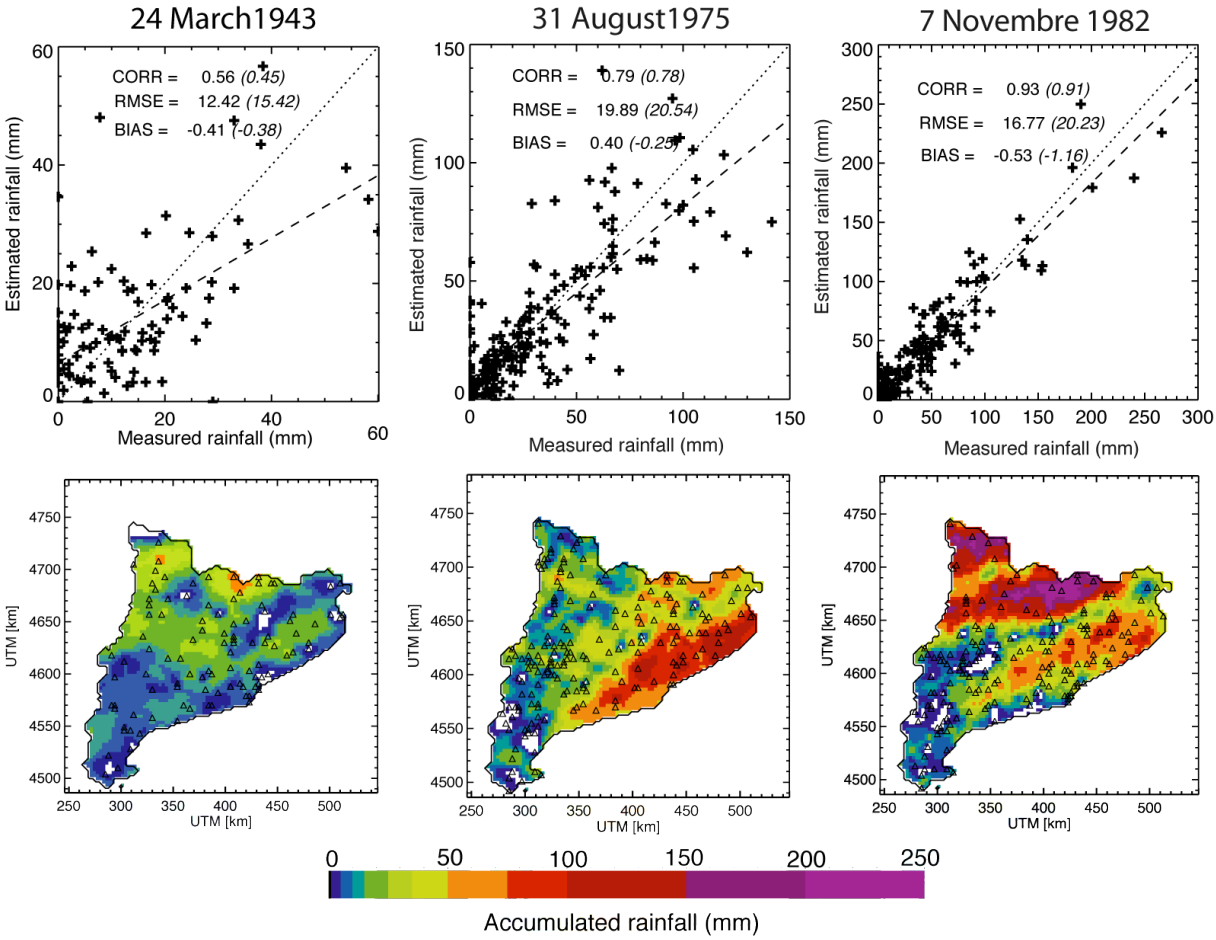

Figure 21. *Comparaison entre les valeurs de pluie observée et reconstituée au niveau des pluviomètres (les scores entre parenthèses sont ceux obtenus sans correction du champ reconstitué) et champs de précipitation pour 3 événements représentatifs.*

Les résultats obtenus en comparant les champs reconstitués à ceux (de référence) produits à partir du radar de l'AEMET furent très satisfaisants, et ce bien que le jeu de 17 événements pluvieux contenaient des situations très variées en termes d'intensité et de distribution spatiale. Un coefficient de corrélation moyen de 0,91 fut obtenu, ainsi qu'une RMSE moyenne de 4 mm. Les champs de 3 événements représentatifs de cette diversité sont

représentés Figure 22. L'événement du 15 juillet 2001 était caractérisé par une forte variabilité spatiale avec notamment des pluies intenses à l'est du territoire. Les zones sans pluie comme celles où l'accumulation dépassait les 50 mm ont bien été reproduites. On remarque néanmoins une différence sur la pointe nord de la Catalogne avec une précipitation reconstituée plus importante. Comme cette zone est relativement éloignée du radar AEMET, il semble difficile d'évaluer la pertinence de la méthode à cet endroit. L'événement du 14 novembre 2001 est celui pour lequel les résultats les moins satisfaisants furent obtenus. Néanmoins, avec des intensités faibles et une grande partie du territoire non affectée par la pluie, la RMSE est restée faible et le coefficient de corrélation supérieur à 0,8. Une fois de plus les différences les plus significatives se retrouvèrent au bord du territoire, là où le radar est le moins performant. Enfin l'événement du 9 octobre 2002 était caractérisé par des intensités très fortes pouvant dépasser localement 150 mm. Ces valeurs élevées influèrent sur le calcul du RMSE, mais le coefficient de corrélation de 0,94 a toutefois confirmé que la méthode de reconstruction parvenait à très bien représenter la variabilité spatiale de ces fortes valeurs.

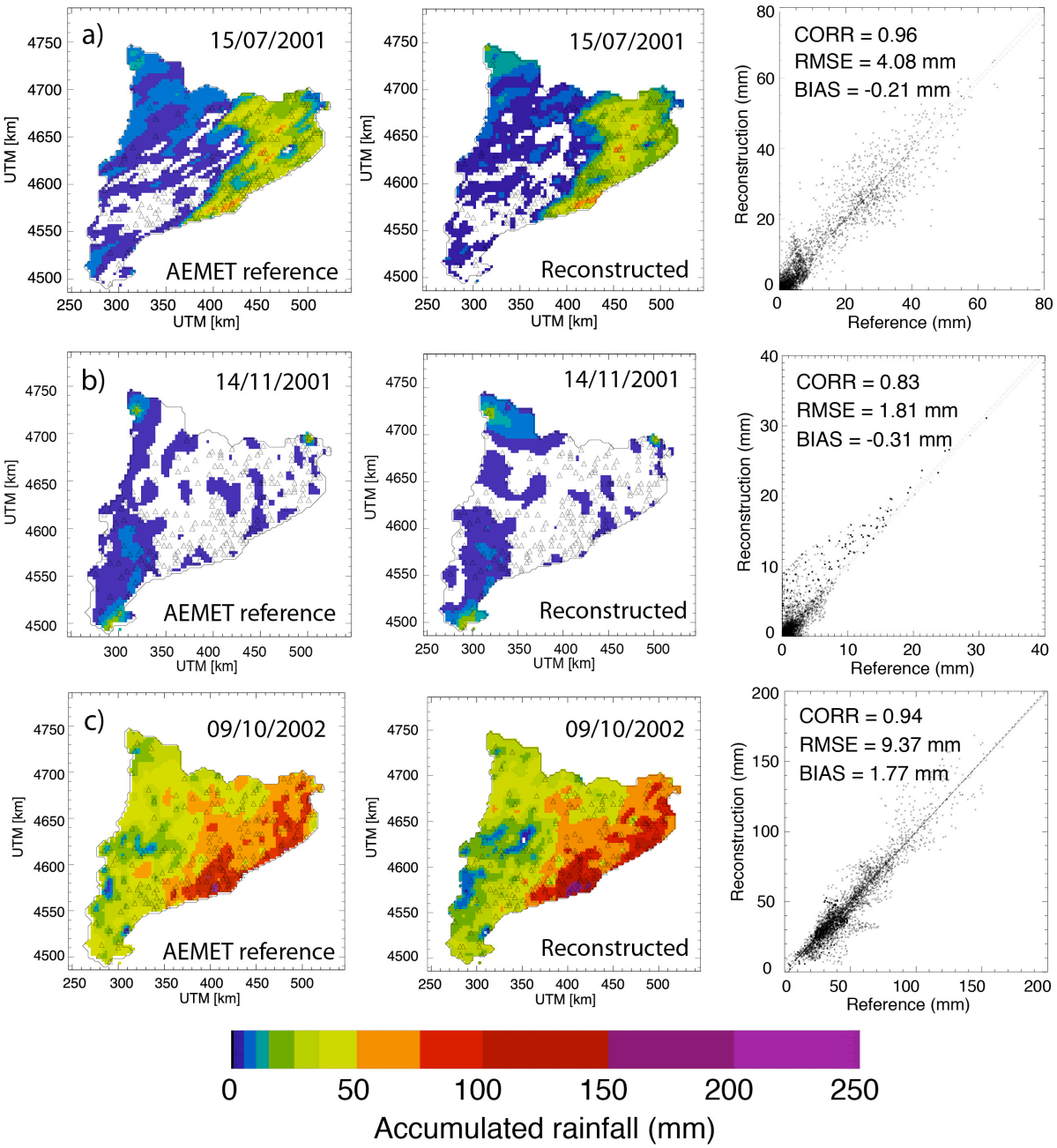

Figure 22. *Comparaison entre les champs de pluie de référence (AEMET) et les champs reconstitués pour 3 événements pluvieux représentatifs.*

d) Conclusions et perspectives

Les résultats satisfaisants obtenus grâce à cette méthode de reconstruction ont démontré que l'information radar pouvait être valorisée sur des périodes plus larges que celle sur lesquelles elles étaient produites. La méthode s'est montrée sensible au nombre de pluviomètres utilisables pour effectuer la combinaison. Au delà d'une densité de 1 pluviomètre pour 180 km^2, l'apport de nouvelles données restait néanmoins limité. D'autre part, rappelons que les 25 patrons de précipitations ont été déterminés à l'aide de seulement 3 années de données. Il semble évident que l'enrichissement de cette base de données devrait permettre de déterminer d'autres patrons peut-être plus représentatifs de la potentielle variabilité de ces champs de précipitations. D'autre part, aucune amélioration significative de la qualité des champs reconstruits n'a été constatée en augmentant le nombre de composantes ; mais cela pourrait évoluer dans le cas d'une base de données plus riche. Enfin, ces patrons pourraient aussi être rapprochés des caractéristiques climatiques de l'événement pluvieux (saisonnalité, patron de circulation atmosphérique par exemple). Des essais ont été conduits dans ce sens en distinguant par exemple les situations stratiformes des situations convectives. Faute d'un échantillon suffisamment important, ces essais d'amélioration n'ont pas donné satisfaction.

Cette série homogène de champs pluvieux fut utilisée en l'état pour étudier les tendances climatiques historiques et redéfinir les cartes d'extrêmes. Dans un premier temps, une distribution de type Gumbel a été ajustée pour chaque maille du territoire. Des cartes de pluies extrêmes ont ainsi pu être déterminées pour différentes durées et périodes de retour en se basant sur la formule empirique proposée par le Ministère des Travaux publics (MOPU, 1999) afin d'estimer les courbes Intensité-Durée-Fréquence des précipitations (voir II.5.2). Ces données ont aussi permis de calculer des cartes d'indice de précipitation standardisé (McKee et al., 1995). Calculés mensuellement sur une durée allant de 3 à 12 mois, ces indices permettent de définir la sévérité de la sècheresse à travers différentes classes. Les valeurs négatives indiquent une sècheresse par rapport à la période de référence choisie, les valeurs positives une situation humide. De telles cartes ont pu être produites à l'échelle des grands bassins versants de Catalogne (Figure 23). Elles représentent de bonnes références pour étudier et quantifier les effets du changement climatique sur ces territoires.

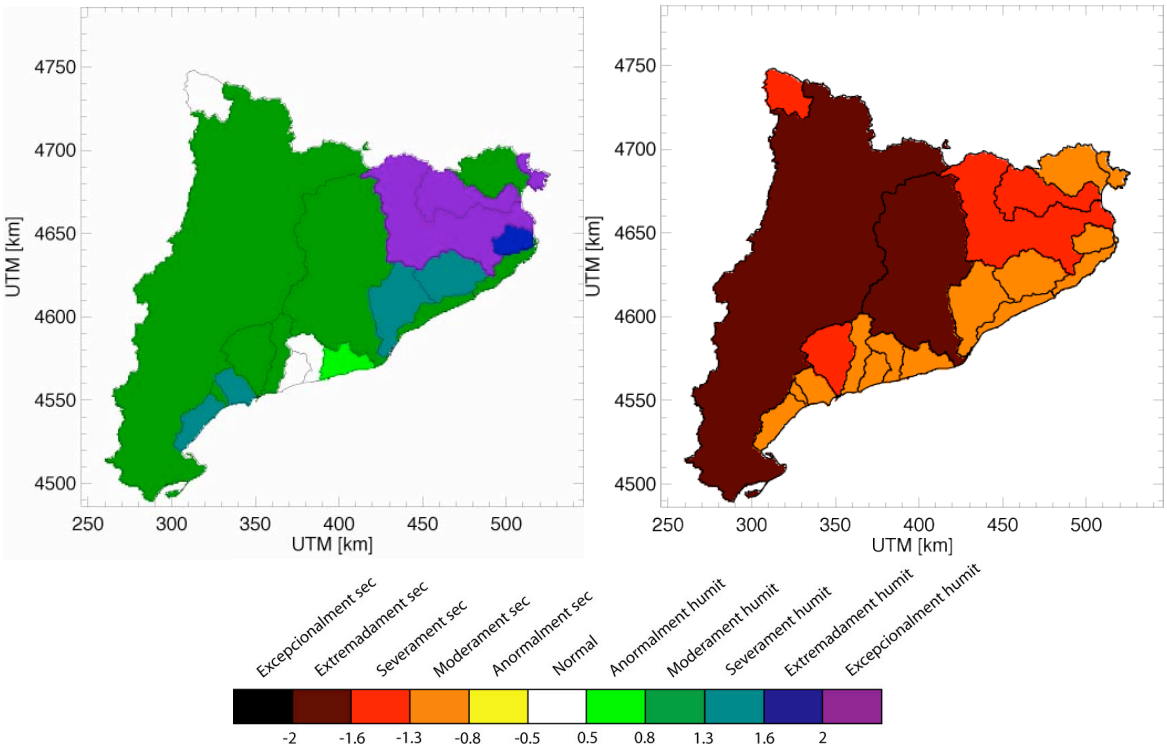

Figure 23. *Carte d'indices de précipitation standardisés pour les mois de février 1959 (événement humide, D = 3 mois) et mai 1986 (événement sec, D = 12 mois)*

III.3.2. Prévoir le futur

a) Enjeux et problématique

La manifestation du changement climatique au cours du 21ème siècle est estimée sur la base de projections d'émissions de gaz à effet de serre, elles-mêmes déterminés à partir de possibles évolutions socio-économiques du monde (économie, technologie, mode de vie, politiques publiques). Ces projections sont utilisées en entrée des modèles climatiques qui simulent la réponse du système Terre à ces changements de forçages radiatifs. En hydrologie, les champs résultant de température et de précipitation sont les plus souvent analysés. Néanmoins, les résolutions spatiale (plusieurs dizaines voire centaines de kilomètre) et temporelle (journalière) de ces sorties de modèle rendent leur utilisation difficile dans une étude d'impacts. Afin de palier cette disparité, des méthodes de descente d'échelle (downscaling) sont mises en œuvre. Elle sont généralement classées en deux catégories : downscaling statistique et downscaling dynamique (Gutmann et al., 2012). Les méthodes de downscaling statistiques proposent le plus souvent des lois de corrélation entre variables à petite et grande échelle. Au delà de l'absence de la prise en compte des processus physiques, ces lois obtenues grâce à des données du passé reposent sur une hypothèse de stationnarité qui s'accommode mal avec une étude relative au changement (climatique). Les méthodes de downscaling dynamiques reposent quant à elles sur l'utilisation de modèles climatiques régionaux (RCM) qui, malgré une meilleure représentation des phénomènes physiques, n'en restent pas moins dépendants des résultats des modèles de circulation générale (GCM) et limitées à des résolutions spatiales et temporelles encore parfois inadaptées à l'étude d'impacts.

La précision de ces sorties de modèle est souvent discutée puisque de nombreuses sources d'incertitude émaillent cette production de scénarios climatiques : choix des scénarios d'émission, du modèle de circulation générale et de la méthode de downscaling. Ces incertitudes peuvent avoir un poids très fort dès lors que l'on souhaite utiliser ces données pour des applications en hydrologie (Kay et al., 2009; Prudhomme and Davies, 2009). Pour en tenir compte, de nombreuses études ont démontré qu'il était vivement conseillé d'adopter un cadre de travail ensembliste en utilisant plusieurs scénarios d'émission et plusieurs modèles de circulation générale (Prudhomme et al., 2010).

Dans le cas du bassin versant du Llobregat, deux sources différentes de scénarios climatiques étaient disponibles. Les premiers provenaient de Service Météorologique Catalan (SMC). Ils correspondaient à des champs de précipitation et de température déterminés pour les scénarios d'émissions A2 (impact anthropique fort) et B1 (impact modéré) sur la période 1970-2100. Ces champs sont caractérisés par une résolution de 15 km via une méthode de downscaling dynamique réalisée à l'aide d'un couplage entre le modèle régional MM5 et les sorties du modèle de circulation générale ECHAM5-MPI/OM (Barrera-Escoda, 2011). Les seconds scénarios émanaient de l'Agence Espagnol de Météorologie (AEMET, 2008). Une méthode de downscaling statistique de type analogues avait été appliquée aux sorties du modèle de circulation général CGCM2 pour les scénarios d'émissions A2 et B2. Au final, les scénarios climatiques étaient déterminés au niveau de 130 stations météorologiques espagnoles (dont 16 répartis inégalement sur le bassin du Llobregat avec une forte densité au Nord).

Malgré l'effort consenti pour descendre les échelles, la résolution des champs de précipitations et de températures déterminés par ces modèles était encore inadaptée à une étude d'impact hydrologique. De plus, de larges disparités apparaissaient lorsque l'on comparait les variations saisonnières des champs observés et simulés sur le bassin du Llobregat pendant la période historique (1970-1990) (voir Figure 24). Ce fut particulièrement le cas pour les précipitations avec une grande difficulté des modèles à reproduire tant leur amplitude que leur saisonnalité. Les données SMC avaient tendance à largement surestimer ces fluctuations, tandis que celles de l'AEMET peinaient à reproduire la période estivale de

sécheresse. Il est donc apparu nécessaire : (i) de corriger ces données pour qu'elles soient compatibles avec les mesures observées sur le Llobregat, et (ii) d'augmenter encore leur résolution spatiale en bénéficiant des champs de précipitations historiques à base radar présentées précédemment. Calibrée sur la période historique, la méthodologie développée devait ensuite être appliquée aux scénarios futurs. Au final, l'objectif était de disposer d'un ensemble de scénarios climatiques (précipitation et température) calculés à partir de plusieurs scénarios d'émission et de tenir compte de l'incertitude entourant tant les hypothèses socio-économiques sur lesquelles ils reposent, que de celles émanant des modèles de circulation générale et des méthodes de downscaling. Ce travail a en parti été réalisé dans le cadre de la thèse de Roméo Ballinas financé par l'Etat Mexicain.

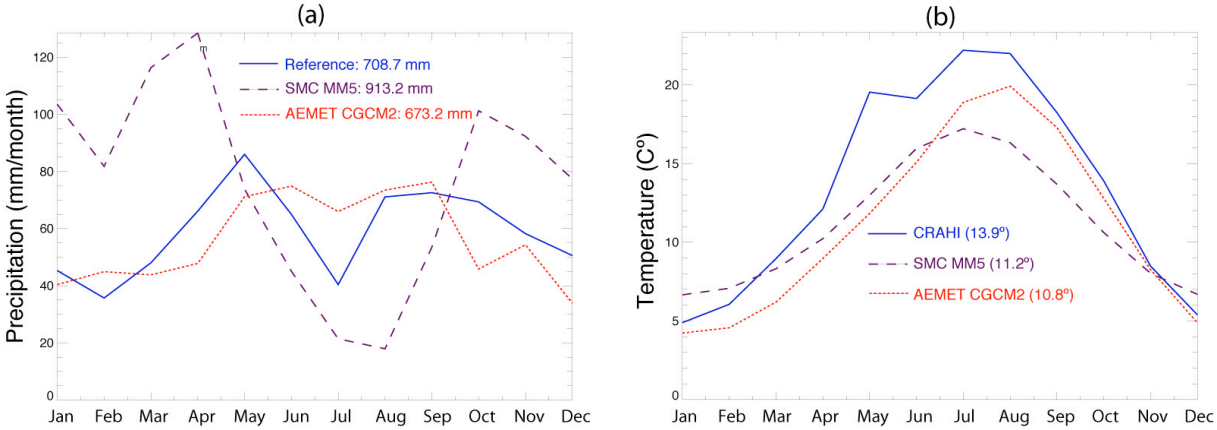

Figure 24. *Comparaison entre scénarios climatiques produits par SMC et AEMET et mesures de référence sur la période historique (1970-1990) : (a) précipitation et (b) température*

b) Méthodologie

Afin d'ajuster au mieux les sorties des modèles aux observations, une méthode de correction de biais a été mise en œuvre. De par leur simplicité et leur flexibilité, de telles techniques sont souvent utilisées pour corriger les sorties de modèles climatiques (Deque, 2007; Maraun et al., 2010). Elles peuvent être classées en 2 catégories : (i) comparions entre simulations passées et présentes et application du delta aux observations passées, (ii) détermination de facteurs d'échelle à partir d'une comparaison entre simulations et observations passées, qui sont ensuite appliqués aux simulations futures. Ces méthodes de correction de biais reposent néanmoins sur un certain nombre d'hypothèses : stationnarité de la correction effectuée, remise en question du MCG s'il nécessite de fortes corrections, nature statistique du biais éloignée de la forte non-linéarité des processus mis en jeu. Afin de tenir compte au mieux de ces faiblesses et de la nouvelle source d'incertitude que peuvent engendrer ces méthodes, la correction de biais a été effectuée mensuellement (Muerth et al., 2013) dans le cadre d'une approche ensembliste. Cette approche permettait par la même occasion de corriger la saisonnalité. Les facteurs correctifs mensuels ont été déterminés en comparant observations et simulations passées. Pour obtenir *in fine* des cartes à haute résolution, la distance entre ce champ corrigé et l'éventail de champs historique était calculée. Les 10 champs de précipitation et de température pour lesquels cette distance était la plus faible étaient sélectionnés et modifiés pour conserver une valeur moyenne égale sur l'ensemble du bassin. Ainsi pour chaque période future étudiée, un ensemble constitué de 2 (modèles) x 2 (scénarios d'émissions) x 10 = 40 membres ont été déterminés pour les champs de température et de précipitation. Un tel ensemble nous permettait de tenir compte des incertitudes introduites tant par les scénarios d'émission que par les MCG et les méthodes de downscaling.

c) Présentation des résultats

Les résultats obtenus après correction des sorties de modèle SMC et AEMET ont été représentés pour 3 périodes distinctes : 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (voir Figure 25).

Les scénarios émanant des prévisions SMC apparaissaient comme étant les plus pessimistes, et parmi eux celui reposant sur l'hypothèse d'émission A2 semblait être le pire. Ils prévoyaient une diminution générale des précipitations (pouvant atteindre 10% en moyenne sur l'année), particulièrement sévère en été et en automne (40% dans le pire des cas). Les scénarios provenant de l'AEMET montraient plutôt une légère augmentation moyenne des précipitations avec toutefois des disparités saisonnières : diminution en automne compensée par une augmentation au printemps. Les simulations de températures futures étaient quant à elles univoques. Elles montraient toutes une augmentation générale tout au long de l'année, et ce quel que soit le scénario ou la période envisagé. Cet accroissement variait entre 2 et 8°C, cette dernière valeur étant atteinte pour le scénario le plus pessimiste (B1 à la fin du 21ème siècle).

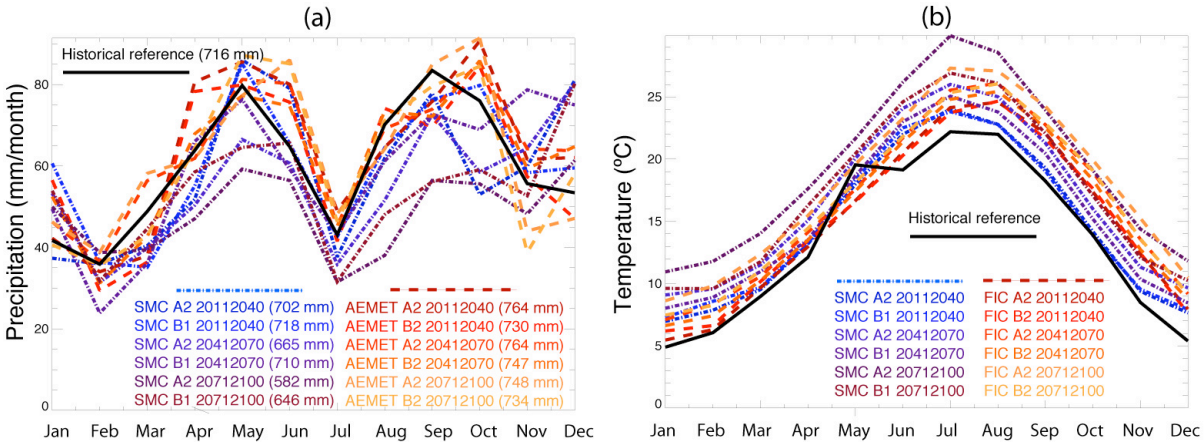

Figure 25. *Cycles saisonniers des précipitations (gauche) et des températures (droite) déterminés pour les différents scénarios climatiques considérés.*

III.4. Conséquences hydrologiques (directes et indirectes)

III.4.1. Choix d'un modèle adapté

a) Présentation du modèle

L'étude des conséquences hydrologiques du changement climatique nécessite la mise en place d'un modèle capable d'estimer les variations journalières de débit pour un grand nombre de sous-bassins (cf. carte du Llobregat Figure 19). Pour se faire, le modèle semi-distribué HBV (Bergström, 1976) a été utilisé pour estimer le débit en amont des points stratégiques du bassin versant (barrages, stations d'extraction, canaux). Ce modèle est couramment utilisé pour étudier les modifications hydrologiques engendrées par le changement climatique (Leander and Buishand, 2007; Steele-Dunne et al., 2008). A l'échelle du sous-bassin versant, il représente différents processus : ruissellement de surface, débit de sub-surface, débit de base et évapotranspiration (formule de Thornthwaite). Comme la taille des sous-bassins est faible (333 km^2 pour l'Alt Llobregat et 732 km^2 pour l'Anoia) en regard du pas de temps journalier, aucune fonction de transfert n'a été utilisée. Au final, pour chaque sous-bassin, 6 paramètres sont à ajuster (*β, FC, K1, K2, UZL* et *Perc*). Une paramétrisation non-stationnaire du modèle a été entreprise pour tenir compte des modifications naturelles et structurelles du bassin au fil du temps.

b) Méthodologie de calibration

La calibration des modèles hydrologiques représente une étape clef dans une étude d'impacts liés au changement climatique. L'hypothèse forte sous-jacente d'une telle approche consiste à présupposer de la stabilité des processus hydrologiques dominants malgré des conditions climatiques qui changent (Vaze et al., 2010). Ainsi les procédures classiques consistant à séparer les données d'observation en un jeu dédié à la calibration et un autre à la validation du

modèle rencontrent deux difficultés majeures : (i) problème d'équifinalité des jeux de paramètres calibrés, (ii) problème de non-stationnarité (détermination de paramètres pertinents pour la situation présente mais pas future). Enfin, bien que l'incertitude engendrée par les modèles hydrologiques est généralement considérée plus faible que celles liées aux scénarios climatiques, elle peut être significative (Velázquez et al., 2013).

Pour tenir compte de la possible non-stationnarité des paramètres, la période historique a été scindée en deux ensembles climatologiquement distincts comme suggéré par Klemeš (Klemeš, 1986) pour effectuer une calibration/validation croisée. La première période (1980-2000) correspondait à une période plutôt humide (« normale ») avec une précipitation annuelle moyenne de 690 mm et l'occurrence de seulement 4 années « sèches » (< 600 mm). La seconde période (2001-2010) correspondait à une période sèche déjà influencée par le changement climatique (précipitation annuelle moyenne de 560 mm et 6 occurrences d'années sèches). Idéalement, les paramètres à ajuster devraient être rapportés à l'occupation des sols afin qu'ils tiennent compte de sa possible évolution. Il a néanmoins été démontré que le bassin du Llobregat serait peu touché par de telles modifications dans le futur (Cabello et al., 2011). L'urbanisation localisée sur la côte devrait se poursuivre sans que cela ait des conséquences directes sur le fonctionnement hydrologique des bassins amonts.

D'autre part, il a été tenu compte de la possible existence de multiples jeux de paramètres fournissant des simulations de débit acceptables au regard du critère d'optimisation choisi (problème d'équifinalité). A cette fin, la méthode GLUE (Beven and Binley, 1992) a été mise en œuvre. Elle a permis de conserver les 10 meilleurs jeux de paramètres après un balayage de l'espace défini par leurs valeurs possibles. Notons que les possibles erreurs liées à la structure du modèle et aux données utilisées pour le calibrer n'ont pas été considérées.

c) Présentation des résultats

Les résultats de simulation obtenus tant sur les périodes de calibration que de validation furent très satisfaisants en termes d'erreur sur les volumes (autour de 5%, voir Tableau 5). Cela signifie que le modèle était capable de bien reproduire la quantité d'eau parvenant aux différents exutoires. Les valeurs obtenues sur le critère de Nash furent plus modestes. Malgré des dynamiques observées et simulées similaires, le modèle avait tendance à sous-estimer les pics de débit, ce qui affectait fortement la détermination du critère. Notons que certains des pics non reproduits au niveau de la station de La Coma i la Pedra (Figure 26) ne correspondaient pas à une pluviométrie importante, ce qui pouvait poser questions sur la qualité des données utilisées. Enfin, il est intéressant de noter que le modèle reproduisait remarquablement bien la longue période de sécheresse de 2007-2008. La calibration-validation croisée sur les deux périodes a montré des résultats similaires, ce qui tendait à démontrer une indépendance du modèle vis à vis des changements climatiques.

Sous-bassin	Nash	Erreur V (%)
La Llosa del Cavall	0.50/0.45	5.0/6.0
Sant Ponç	0.58/0.52	6.0/4.0
Guardiola de Berguedà	0.63/0.58	5.5/5.2
Sallent	0.60/0.62	7.1/6.4

Tableau 5. Résultats de la calibration/validation croisée pour les sous-bassins amont.

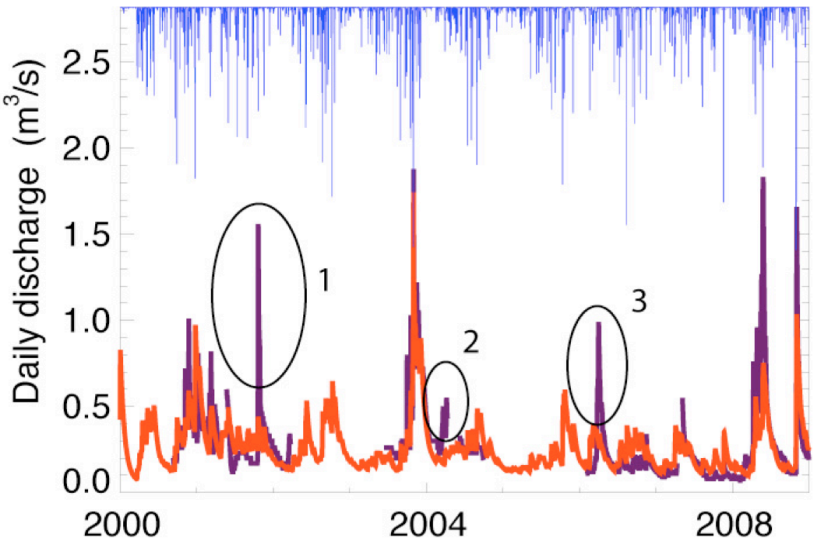

Figure 26. *Comparaison entre débits observés (violet) et simulés (rouge) pour le sous-bassin de La Coma i La Pedra.*

Une fois le modèle calibré, il a pu être utilisé pour étudier l'impact hydrologique du changement climatique dans différents domaines que nous allons détailler maintenant.

III.4.2. Impacts sur la ressource en eau

a) Enjeux et méthodologie

Pour un bassin versant comme celui du Llobregat, la disponibilité de l'eau relève d'enjeux très importants. Afin d'évaluer les possibles impacts du changement climatique sur cette ressource, nous nous sommes particulièrement intéressés aux débits parvenant aux 3 barrages situés en amont du bassin. Appelés « bassins contributeurs », ce sont les seuls à être pris en compte par l'ACA dans son modèle de gestion des ressources. Alimentés par les massifs montagneux, ces volumes d'eau représentent clairement la très grande majorité de la quantité utilisée pour des usages domestiques, agricoles et industriels.

Les données de précipitations, de températures et de débits ont été analysées pour ces bassins contributeurs. Deux indicateurs permettant d'évaluer la capacité du bassin à satisfaire la demande en eau ont aussi été calculés :

- L'indice de fiabilité annuelle : il correspond à la capacité du bassin à fonctionner et à assurer ses fonctions dans un contexte routinier comme lors de circonstances inattendues. Il est calculé comme le rapport entre le nombre d'années pour lesquelles il n'y a pas de mise en défaut et le nombre total d'années de la période étudiée. La mise en défaut correspond ici à un volume total annuel inférieur à 250 hm^3 caractérisant un état de sécheresse sur ce territoire.

$$\text{Fiabilité} = 1 - \frac{\text{Nombre d'années en défaut}}{\text{Nombre total d'années}}$$

- L'indice de résilience : il correspond à la capacité du système à se remettre d'une mise en défaut et à récupérer un fonctionnement normal. Il est calculé comme le rapport entre le nombre d'années pour lesquelles le système est en défaut suivies par une année où il ne l'est pas et le nombre total de mises en défaut sur la période étudiée.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Nombre d'années en défaut suivies par une année sans défaut}}{\text{Nombre total de mises en défaut}}$$

b) Présentation des résultats

Bien que les précipitations totales semblaient être moins affectées par le changement climatique sur les bassins amont que sur le reste du territoire, les résultats (synthétisés dans le

Tableau 6) ont montré des tendances similaires à celles constatées plus haut. Ainsi, les scénarios SMC présentaient peu de modifications concernant la pluie, mais une augmentation des températures qui se traduisait par une diminution relativement significative de la disponibilité en eau. Les scénarios d'émissions A2 se montraient toujours les plus pessimistes avec une diminution de 40% dans le pire des cas à la fin du 21ème siècle. Les scénarios AEMET dépeignaient des augmentations légères des précipitations et plus prononcées des températures (et donc de l'évapotranspiration). Cela conduisait à une diminution modérée de la disponibilité en eau, atteignant 13% dans le pire des cas (scénario B2).

Concernant les indices de fiabilité et de résilience, les scénarios SMC et AEMET ont aussi produit des résultats bien distincts. Pour ceux de l'AEMET, la fiabilité restait stable en comparaison de la valeur référence calculée sur la période historique (65%), voire était parfois meilleure pour le scénario d'émission B2. Cela traduisait une diminution des périodes de sécheresse dans les années à venir. Quant à l'indicateur de résilience, il diminuait légèrement et illustrait une certaine difficulté pour le bassin à recouvrer ses capacités : après être mis en défaut, il y a environ 50% de chance pour que ce soit aussi le cas l'année d'après. Ces mêmes indicateurs calculés à partir des scénarios SMC furent beaucoup plus pessimistes. La fiabilité comme la résilience diminuaient fortement surtout à partir de 2040, et ce quel que soit le scénario d'émission considéré. Ils atteignaient respectivement 26% et 22% dans le pire des cas. Cela signifie que le bassin serait les trois quarts du temps mis en défaut et que cette perturbation se poursuivrait l'année d'après dans près de 80% des cas.

Pour aller plus loin sur la conséquence d'une succession de situations de sécheresse, le volume d'eau disponible a été calculé sur des fenêtres glissantes de 3 ans (Figure 27). L'évolution de cette variable a été déterminée pour chaque scénario climatique et pour chaque période de temps, puis comparée à la valeur critique de 700 hm^3 en dessous de laquelle le système est en déficit. Sur la période historique, ce seuil a été franchi allégrement lors de la période de sécheresse 2007-2008 déjà évoquée. Les résultats obtenus à l'aide des scénarios SMC furent relativement proches de ceux de référence sur la période 2011-2040, mais ces déficits s'intensifiaient clairement au fil du temps. On retrouvait alors de 10 à 20 situations de déficit annuel sur une période de 30 ans, ce qui confirmait une augmentation en intensité et en fréquence des événements de sécheresse au cours du 21ème siècle. De tels résultats ne se retrouvaient pas à l'aide des scénarios climatiques de l'AEMET qui montraient une occurrence de déficit très faible, entre 0 et 2 sur les différentes périodes de 30 ans.

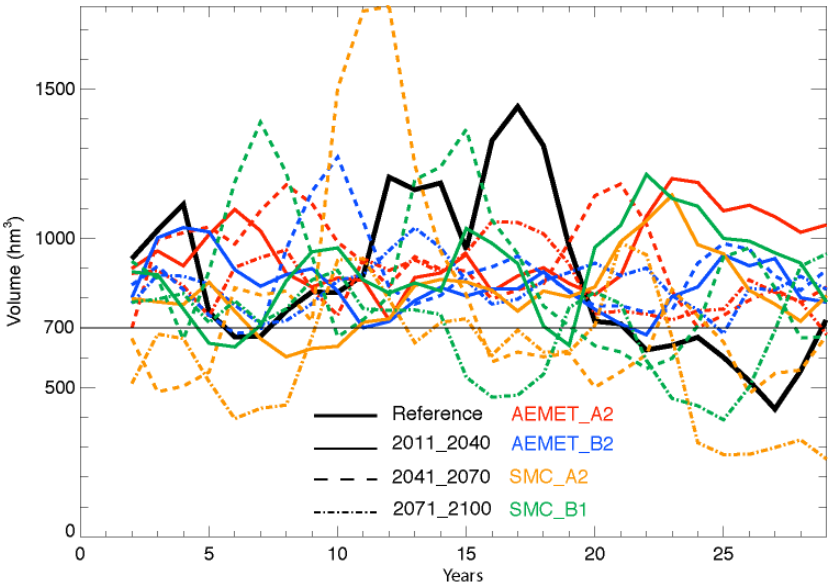

Figure 27. *Accumulation sur 3 ans de l'eau disponible pour l'ensemble des scénarios climatiques et les différentes périodes de temps (valeur critique à 700 hm^3).*

	1980-2000	2011-40				2041-70				2071-2100			
	Ref.	SMC		AEMET		SMC		AEMET		SMC		AEMET	
		A2	B1	A2	B2	A2	B1	A2	B2	A2	B1	A2	B2
P	770 mm/an	-1%	+3%	+9%	+2%	-5%	+2%	+8%	+5%	-19%	-9%	+6%	+5%
T	11.8 ºC	+8%	+9%	+9%	+10%	+25%	+16%	+20%	+16%	+47%	+31%	+33%	+21%
WA_mean	317 hm^3/an	-14%	-7%	+1%	-13%	-17%	-7%	-4%	-8%	-40%	-27%	-11%	-12%
WA_min	151 hm^3/an	+22%	+12%	+47%	0%	-18%	+10%	+38%	+41%	-62%	-35%	+28%	+31%
WA_max	653 hm^3/an	-29%	-23%	-33%	-43%	**+42%**	-9%	-23%	-25%	-32%	-42%	-33%	-43%
Fiabilité	65%	66%	63%	80%	66%	30%	56%	76%	70%	26%	33%	60%	73%
Résilience	57%	50%	45%	50%	50%	14%	30%	57%	44%	22%	30%	75%	50%

Tableau 6. *Précipitation moyenne, température moyenne, disponibilité en eau (minimum, maximum et moyenne), indices de fiabilité et de résilience calculés pour chaque période et pour les différents scénarios climatique*

c) Prise en compte de l'incertitude

Comme on vient de le voir dans la section précédente, la prise en compte de l'incertitude entourant les scénarios climatiques -via l'utilisation de différents scénarios d'émission et de GCM – entraîne une forte variabilité de la réponse hydrologique. Nous avons alors cherché à prendre aussi en considération l'incertitude touchant tant la méthode de downscaling que la paramétrisation du modèle hydrologique. Une approche ensembliste a donc été élaborée pour tenir compte de cette cascade en combinant les champs de précipitation et de température et les jeux de paramètres sélectionnés à l'aide de la méthode GLUE. L'impact de la prise en compte de ces différentes sources d'incertitude a ensuite été évalué en calculant la dispersion de la disponibilité en eau annuelle :

$$\mathrm{Disp} = \frac{\max(WA) - \min(WA)}{\mathrm{mean}(WA)} \times 100$$

Où min(*WA*), max(*WA*) and mean(*WA*) sont les valeurs de disponibilité en eau annuelle minimum, maximum et moyenne.

Lorsque l'on regarde la dispersion respectivement apportée par la méthode de downscaling d'une part et par la paramétrisation d'autre part, on s'aperçoit que la dispersion totale correspondait à la somme de ces deux contributions (Tableau 7). Cette dispersion pouvait atteindre près de 40% pour les scénarios SMC et 30% pour ceux de l'AEMET. Ces résultats ont confirmé que les projections hydrologiques varient significativement d'un scénario climatique à un autre et d'une période à une autre. Le spectre très large de ces résultats, qui oscillait entre un maintient de la situation actuelle et une disponibilité en eau divisée par deux avec un doublement des périodes de sécheresse, a rendu difficile sa traduction en termes de prise de décisions opérationnelles.

	SMC						AEMET					
Dispo annuelle moyenne en eau	2011-40		2041-70		2071-00		2011-40		2041-70		2071-00	
Scenario	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Mean (hm^3/an)	190	209	208	213	169	177	234	206	236	220	236	215
Max (hm^3/an)	228	252	256	254	200	212	268	237	274	253	274	249
Min (hm^3/an)	160	177	177	180	147	149	203	177	206	187	208	191
Dispersion (%)	36	35	38	34	31	35	28	30	29	30	28	27

Tableau 7. *Valeurs de Dispersion (minimum, maximum et moyenne) calculée pour chaque période et pour les différents scénarios climatiques*

Malgré les limitations mentionnées ci-dessus, cette étude a mis en avant un certain nombre d'éléments intéressants pour la gestion des ressources en eau. La prise de conscience des répercussions possibles des changements globaux devait pouvoir aider les décisionnaires à définir des mesures de résilience ayant pour objectif d'éviter ou de minimiser ses conséquences sociales, économiques et environnementales. Si ces projections n'étaient pas suffisamment précises pour justifier l'investissement dans des infrastructures importantes, elles pouvaient au moins contribuer à anticiper et à mettre en œuvre des mesures ponctuelles (campagnes de sensibilisation, réduction des utilisations non vitales, amélioration de l'interconnexion des réseaux d'eau, exploitation ponctuelle des usines de dessalement, ...) ou permanentes plus modestes (modernisation de l'irrigation, construction de stations d'épuration, règles de construction durable, ...).

d) Evaluation des solutions

Le projet WATERCHANGE dans le cadre duquel ces travaux ont été réalisés est allé plus loin dans l'étude du changement global sur les ressources en eau du Llobregat. En parallèle de ces scénarios d'apport, des scénarios de demandes en eau ont été élaborés sur la base de projections démographiques. Ces données, comme les différentes sorties du modèle HBV, ont

été introduite dans le Water Change Modelling System (WCMS) développé au cours du projet en combinant les modèles de gestion SIMGES et de qualité GESCAL. En collaboration avec des économistes de CETaqua et les différents gestionnaires intervenant sur le bassin, trois scénarios ont finalement été conservés pour étudier la situation sur les 30 prochaines années : aucun déficit, déficit ponctuel et déficit récurrent. D'autre part, différentes mesures réalisables tant pour réduire la demande que pour augmenter l'offre, ont été évaluées et classées à l'aide d'une analyse coût – bénéfice (voir Figure 28).

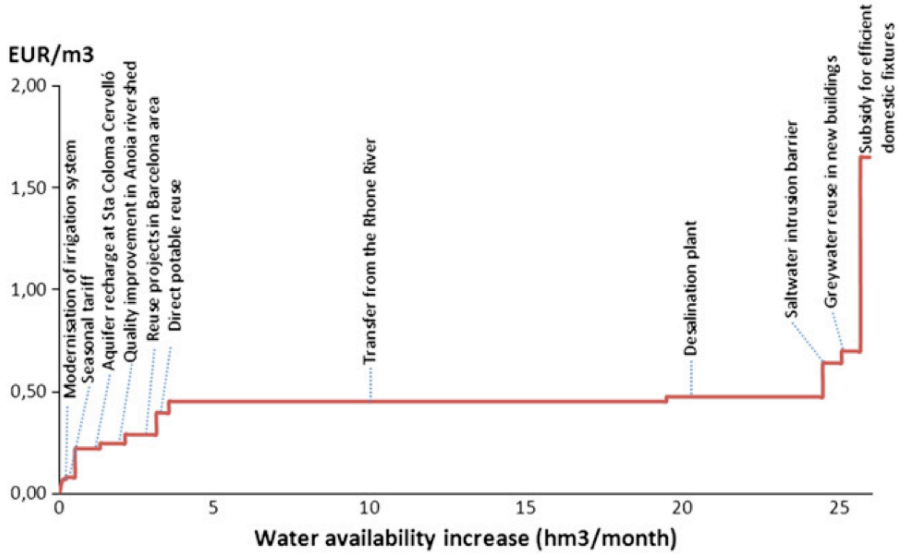

Figure 28. *Coût des apports en eau de différentes mesures proposées sur le bassin du Llobregat (d'après Pouget et al., 2012)*

Les performances de trois stratégies de mesures (basse, moyenne et haute) ont été évaluées à l'aide du WCMS en termes de réduction de déficit et de coûts évités en cas de sécheresse (voir Tableau 8). Il en est ressorti que tous les scénarios de déficit avaient de forts impacts économiques. Pour le pire d'entre eux, le coût moyen engendré par une sécheresse représentait 4% du PIB de la Catalogne, tandis qu'un investissement annuel de 0,1% du PIB sur cette même période permettait de proposer des mesures correctives pertinentes. Les stratégies les plus performantes en termes de coûts-bénéfices étaient celles jouant sur la demande (utilisation raisonnée, politique de taxes) plutôt que sur l'augmentation de l'offre. Enfin, la grande variabilité des scénarios possibles rendait difficile la sélection de mesures appropriées. Cette responsabilité revenait aux décisionnaires qui deveaint choisir entre minimiser les conséquences d'une sécheresse dans le pire des cas ou minimiser les coûts d'investissement en laissant à la société la charge du coût résiduel d'un déficit.

	No adaptation		Low adaptation strategy		Medium adaptation strategy		High adaptation strategy	
	Water reliability[a]	Ratio of drought costs avoided	Water reliability[a]	Ratio of drought costs avoided	Water reliability[a]	Ratio of drought costs avoided	Water reliability[a]	Ratio of drought costs avoided
Punctual deficit scenario	99%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Moderately recurrent deficit scenario	92%	0%	96%	77%	97%	91%	99%	83%
No deficit scenario	100%	–%	100%	–%	100%	–%	100%	–%

[a] Water reliability index is the ratio between the water effectively supplied and the water demanded during the 28 years simulated.

Tableau 8. *Conséquences des mesures pour 3 scénarios de mesures d'adaptation (d'après Pouget et al., 2012)*

III.4.3. Impacts sur les inondations

a) Contexte et objectifs

Comme évoqué précédemment, des travaux ont déjà été menés sur l'impact du changement climatique sur les inondations et ont généralement montré une augmentation des phénomènes intenses en Europe (Dankers and Feyen, 2009). Il n'existe néanmoins pas de consensus autour

d'une augmentation incontestable des inondations que ce soit en termes d'intensité comme de fréquence. De plus, peu d'études ont été menées sur des bassins de tailles modestes (autour de 100 km^2), et plus particulièrement dans un contexte de crues éclair. Les travaux qui ont été menés à ce sujet sur le bassin du Llobregat étaient donc pionniers. Ils se sont efforcés de défricher ce sujet et d'apporter quelques éléments de réponses concernant la possible augmentation en intensité et en fréquence des crues soudaines au cours du XXI ème siècle.

b) Méthodologie

Deux sous-bassins du Llobregat ont particulièrement été étudiés à ce sujet (Figure 19). Il s'agit d'abord de l'Alt-Llobregat situé en amont du bassin dans le massif pyrénéen. Etendu sur 333 km^2, il connaît des précipitations relativement abondantes qui peuvent être très intenses (l'estimation de la pluie centennale journalière varie entre 160 et 200 mm). Le second bassin de l'Anoia, plus étendu (732 km^2), appartient au plateau sud-ouest davantage urbanisé. Là, les précipitations sont moins fortes et la pluie centennale journalière varie entre 90 et 150 mm. Le changement climatique a été représenté à l'aide des scénarios présentés précédemment et issus des données SMC (scénarios d'émission A2 et B1). Sur les 4 périodes (1971-2010, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100), le modèle HBV a été appliqué pour estimer le débit en aval des bassins de l'Alt Llobregat et de l'Anoia. Notons que la calibration des paramètres du modèle a été spécialement adaptée pour représenter en priorité les valeurs significatives de débit.

Sur les différentes périodes étudiées, la distribution statistique des débits a été déterminée. A cette fin, une méthode de dépassement de seuil (autrement appelée POT pour « peak over threshold ») a été mise en œuvre. Contrairement à la méthode des maximas annuels, le POT repose sur la sélection de potentiellement plusieurs pics par an et permet un échantillonnage plus exhaustif de la période étudiée. Les valeurs sélectionnées ont servi à ajuster une distribution statistique de type Pareto Généralisé (Lang et al., 1999) qui dépend de deux paramètres : le seuil à partir duquel les débits sont sélectionnés et la durée minimale séparant deux pics successifs. Une telle procédure a permis de disposer d'un échantillon constitué d'au moins deux pics par année et de s'assurer de son indépendance (confirmé par un test d'autocorrélation).

c) Présentation des résultats

Afin de s'assurer de la cohérence statistique des séries simulées par le modèle HBV, les valeurs maximales de débits observées et simulées sur la période historique ont été comparées. Les résultats présentés Figure 29 montrent une bonne correspondance entre ces séries qui a légitimé l'utilisation du modèle pour reproduire les débits extrêmes sur les périodes futures.

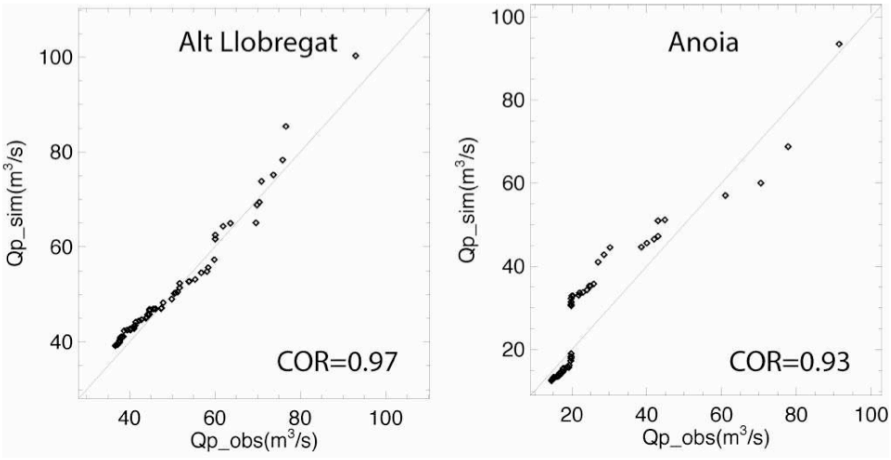

Figure 29. *Comparaison entre pics de débit observés et simulés sur la période historique (1971-2010) pour les bassins de l'Alt Llobregat et de l'Anoia.*

Avec la détermination d'un seuil de 13 $m^3.s^{-1}$ et d'une durée inter-événement de 7 jours, les différentes distributions de débit ont pu être ajustées sur le bassin de l'Alt Llobregat. Il en est ressorti que l'occurrence de ses événements extrêmes devait augmenter au cours du 21ème siècle, surtout au cours de sa première moitié (cf. Tableau 9). La tendance concernant leur intensité était moins claire (voir Figure 30) puisque, suivant la période étudiée et le scénario d'émission, les valeurs de débit les plus rares pouvaient augmenter ou diminuer en comparaison à la période de référence. On a aussi noté une différence entre les deux scénarios d'émission, puisque les résultats obtenus à partir du scénario A2 (qui relève d'objectifs plus économiques qu'environnementaux) semblaient engendrer des événements plus importants.

		Scénario A2			Scénario B1		
	1971-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2010
Alt Llobregat	79	117	98	80	103	101	88
Anoia	61	54	51	60	53	61	53

Tableau 9. *Comparaison du nombre de dépassements de seuil sur les différentes périodes d'étude pour les deux bassins*

Les distributions ajustées sur le bassin versant de l'Anoia reposaient sur des paramètres plus faibles du fait de la taille plus modeste du bassin (un seuil de 9 $m^3.s^{-1}$ et une durée inter-événement de 5 jours). Les résultats ont montré des tendances bien différentes à celles obtenues sur la partie amont au cours du 21ème siècle. Du fait de la raréfaction des précipitations sur cette partie du territoire, le nombre d'événements intenses diminuaient en fréquence quelle que soit la période envisagée ou le scénario d'émission. A contrario, ces événements moins nombreux devaient être plus intenses à l'avenir. Les distributions de Pareto ajustées ont ainsi montré des valeurs de débit plus importantes sur la gamme de période de retour allant de 10 à 50 ans (Figure 31). Il semblait néanmoins peu évident de distinguer des tendances liées à l'utilisation d'un scénario d'émission particulier.

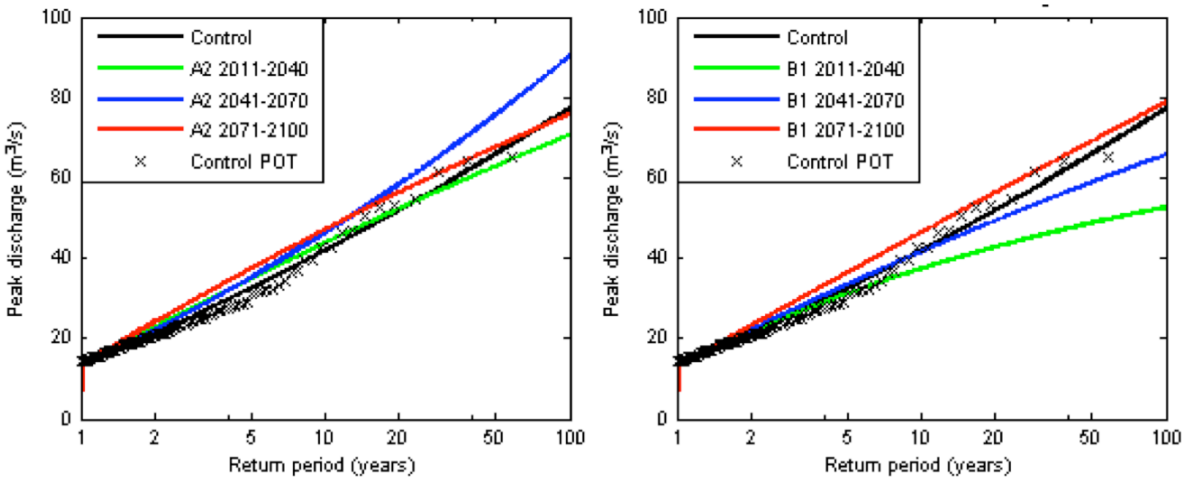

Figure 30. *Comparaison des distributions statistiques obtenues pour les différentes périodes étudiées sur le bassin de l'Alt Llobregat : scénario d'émission A2 (gauche) et B1 (droite).*

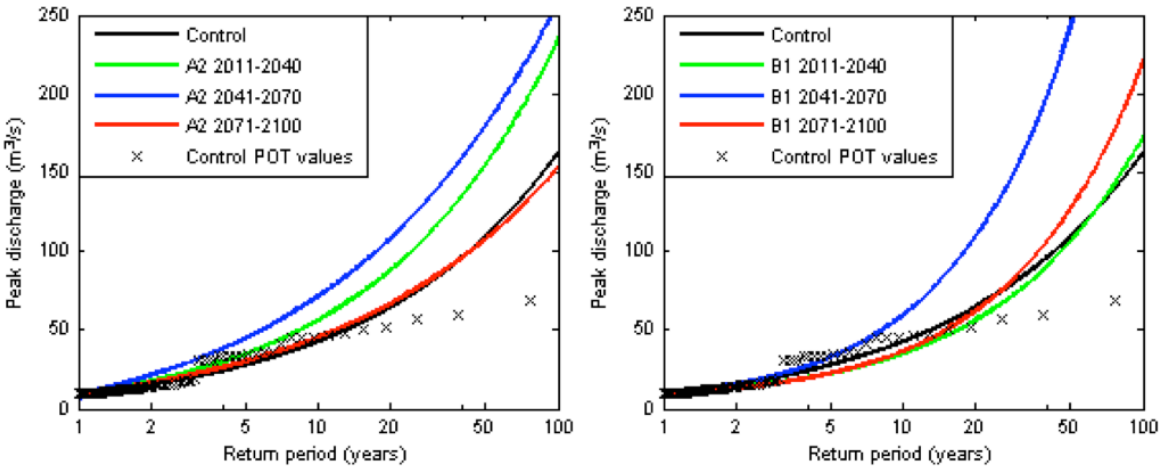

Figure 31. *Comparaison des distributions statistiques obtenues pour les différentes périodes étudiées sur le bassin de l'Anoia : scénario d'émission A2 (gauche) et B1 (droite).*

III.4.4. Impacts sur les feux de forêt

a) Contexte et objectifs

De par les modifications qu'il peut engendrer tant sur les températures que sur les précipitations, le changement climatique peut aussi avoir des conséquences hydrologiques indirectes *via* le risque d'incendie. En effet, l'augmentation des périodes de sécheresse entraîne une vulnérabilité des territoires vis à vis du risque de feu de foret dont l'augmentation en fréquence est à attendre (Lenihan et al., 2003; Moreno et al., 2009). Réciproquement, de nombreux travaux ont montré qu'un incendie pouvait avoir de forts impacts hydrologiques en fonction du type et de la quantité de végétation brûlée, ainsi que du temps écoulé depuis celui-ci (DeBano, 2000; Letey, 2001). Ainsi, une augmentation des coefficients de ruissellement a souvent été constatée au cours de l'année suivant l'incendie. Celle-ci provient d'une part de la réduction de la quantité d'eau interceptée par la végétation, et d'autre part par l'imperméabilisation des sols dont la capacité d'infiltration est réduite. Néanmoins faute de données appropriées, la quantification précise des ces conséquences s'avère difficile, et leur modélisation encore davantage. Il est donc apparu nécessaire de développer des méthodologies susceptibles de mieux prévoir l'évolution du risque incendie et de ses impacts hydrologiques dans un contexte de changement climatique. Cela s'est traduit ici par : (i) l'élaboration de carte de risque d'incendie reposant uniquement sur des données (météorologiques) qui pourront être estimées dans le futur, (ii) le développement de modèles susceptibles d'évaluer l'influence d'un incendie sur la réponse hydrologique d'un bassin versant et plus particulièrement sur la genèse d'une crue.

b) Méthodologie

Afin de répondre à ce double impératif, une méthodologie en deux étapes a été mise en œuvre sur le bassin versant du Llobregat en tirant profit de travaux déjà réalisés tant sur la définition de scénarios climatiques que sur la modélisation hydrologique. Tout d'abord, une méthode à base climatique (et utilisant les projections haute résolution de précipitations et de températures) a été développée pour estimer et cartographier le risque d'incendie dans le futur. Celle-ci reposait sur le calcul du Canadian Drough Code (CDC), un indicateur de sécheresse à grande échelle, souvent utilisé à cet effet (Van Wagner, 1987). Il estime la teneur en eau d'un sol organique compacte en faisant le bilan journalier des échanges en tenant compte de la précipitation et de l'évapotranspiration.

L'évolution temporelle du CDC est représentée sur la Figure 32. Les trois incendies majeurs qui se sont produits sur le bassin du Llobregat y ont aussi été reportés. Ils correspondent tous à des valeurs de CDC élevés. La valeur seuil de 350 a ainsi été déterminée. Pour chaque

année, le nombre de jours consécutifs pendant lesquels cette valeur de 350 (ND350) était dépassée a été calculé et sa distribution statistique de type Gumbel représentée (Figure 32). 5 niveaux de risque ont ensuite été déterminés en fonction de la période de retour considérée : très faible (T < 10 ans), faible (10 ans < T < 20 ans), moyen (20 ans < T < 30 ans), important (30 ans < T < 50 ans), très important (T > 50 ans).

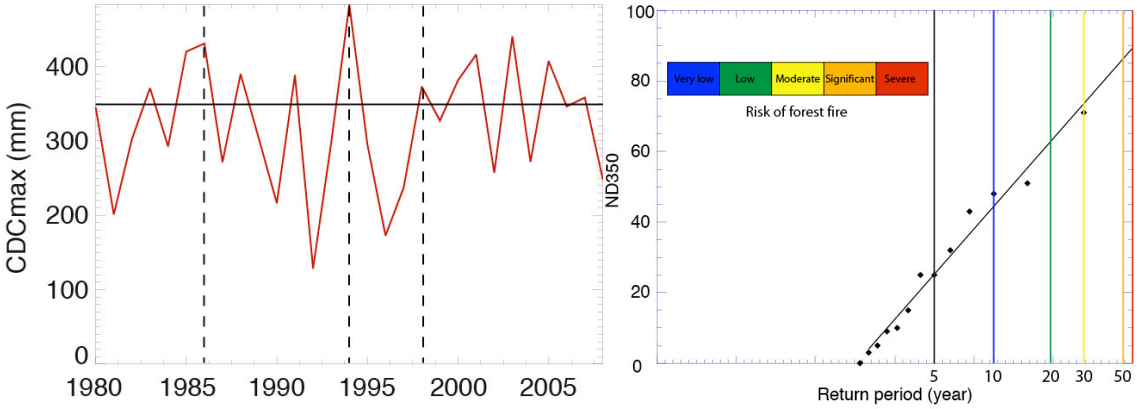

Figure 32. Gauche : *Evolution de l'indice CDC sur la période 1980-2010 (les lignes verticales pointillées correspondent aux 3 incendies importants). Droite : distribution de Gumbel du nombre de jours annuels pour lesquels un CDC de 350 est dépassé et niveaux de risque.*

Pour évaluer quel peut être l'impact d'un incendie sur le comportement hydrologique d'un bassin versant, nous nous sommes appuyés sur des travaux effectuées sur le petit bassin du Rimbaud (département du Var, 146 ha), ravagé à 86% par un incendie (Lavabre et al., 1993). En comparant les mesures de débit effectuées avant et après l'incendie, les modifications suivantes de sa réponse hydrologique avaient été constatées :

- Diminution de 60% du temps de réponse du bassin
- Augmentation de 60% du coefficient de ruissellement
- Augmentation de 100% du pic de débit
- Modification de la distribution statistique : un événement anciennement caractérisé par une période de retour de 10 ans était désormais annuel

Cette évaluation quantitative a ensuite été traduite en termes de modélisation. Tout d'abord, un modèle distribué à pas de temps horaire et de type SCS a été ajusté sur le sous-bassin de l'Anoia (voir Figure 19). Etant donnés que (i) la taille du bassin du Rimbaud était du même ordre de grandeur qu'une maille (1 km^2), et que (ii) son occupation des sols était similaire à celle du bassin de l'Anoia avec essentiellement du maquis et des forêts de pins, l'hypothèse a été faite que les modifications hydrologiques d'un incendie seraient aussi les mêmes. Ainsi, les paramètres d'une cellule touchée par un incendie ont été modifiés pour diminuer sa capacité d'infiltration, augmenter son débit de pointe et son temps de réponse dans des proportions similaires à celles constatées sur le Rimbaud.

c) Présentation des résultats

Le risque d'incendie a été représenté pour tous les sous-bassins du Llobregat en utilisant les scénarios climatiques SMC corrigés reposant sur les scénarios d'émissions A2 et B1 et pour les trois horizons temporels 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (voir Figure 33). Nous avons constaté que, durant la première période, les zones à risque étaient les mêmes que celles déjà mises en avant sur la période historique. On retrouvait le bassin de l'Anoia qualifié d'un niveau de risque faible et le Nord du Llobregat d'un risque très faible. A cette échelle, les modifications en termes de précipitation et de température étaient peu élevées, et la légère augmentation de la pluie au printemps compensait la hausse des températures. Sur la seconde période, la légère diminution des précipitations et l'accroissement des températures a entraîné

une augmentation de la période de sécheresse en été. Cela fut particulièrement prononcé pour le scénario d'émission A2 avec l'émergence de risques d'incendie moyens et importants. Ces tendances furent encore aggravées sur la dernière période pendant laquelle le bassin de l'Anoia était caractérisé par un risque très élevé d'incendie quelque soit le scénario d'émission. Cela était essentiellement dû aux prévisions pessimistes du SMC qui pronostiquaient une augmentation des températures comprise entre 4 et 8°C.

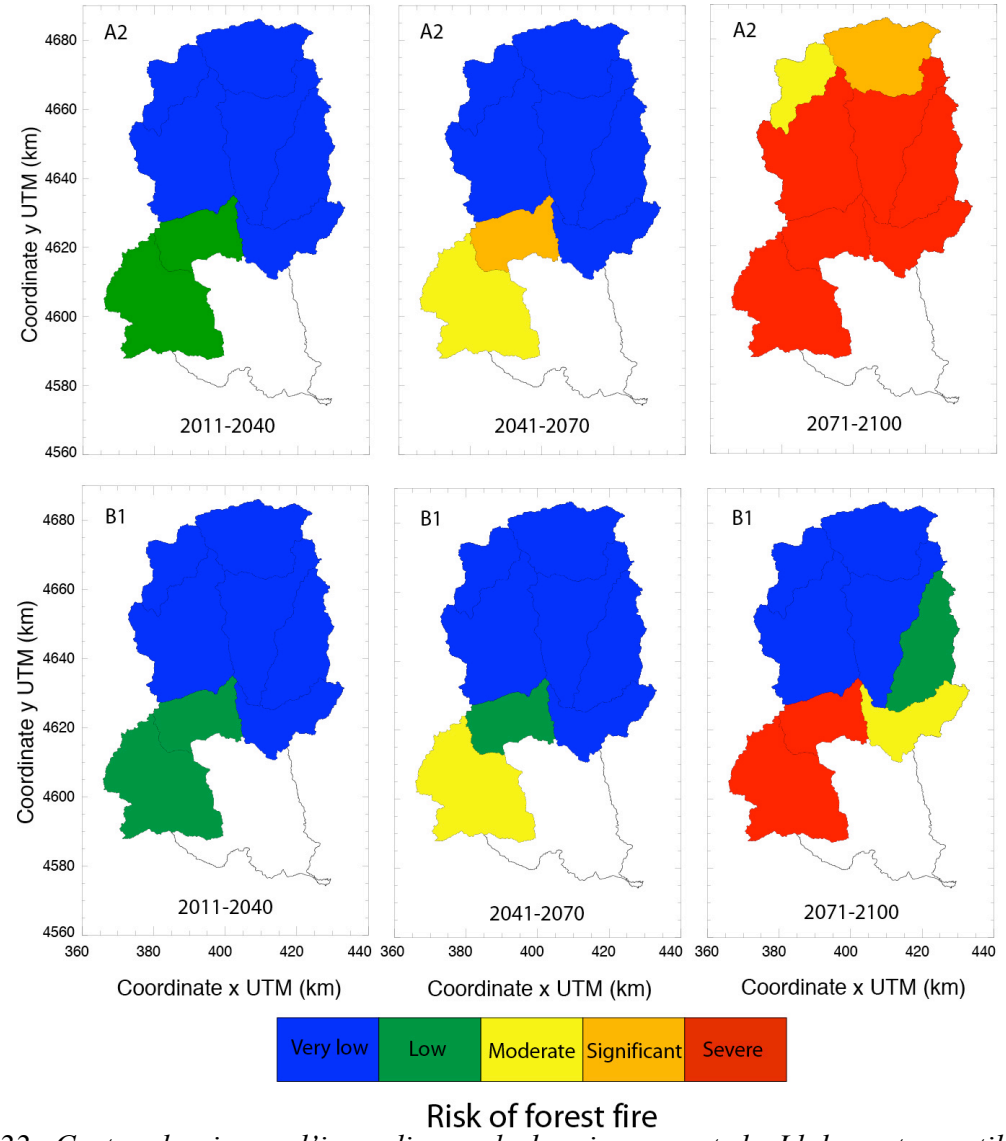

Figure 33. *Cartes du risque d'incendie sur le bassin versant du Llobregat en utilisant les scénarios climatiques du SMC (A2 en haut et B1 en bas) pour les 3 horizons temporels 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100.*

D'autre part, l'application du modèle hydrologique sur plusieurs événements pluvieux de la période historique a permis de mesurer l'impact d'un incendie sur le bassin de l'Anoia. Celui-ci s'est principalement manifesté par des augmentations du débit de pointe de l'ordre de 40% et du coefficient de ruissellement de 30%. Le transfert était peu modifié (le temps de réponse est réduit de 20 minutes) en regard de l'influence encore grande du transport dans les cours d'eau. Au final, nous avons constaté une modification des périodes de retour des événements extrêmes. Ainsi pour l'événement le plus significatif (initialement caractérisé par une période de retour de 5 ans), le débit modifié par un incendie se trouvait désormais caractérisé par une période de retour comprise entre 10 et 20 ans. Cela signifiait que les conséquences d'un feu de forêt pouvaient être très importantes à l'échelle du bassin versant, dès lors qu'une part significative de son territoire était affectée.

Le risque accru d'incendie au cours du 21ème siècle et la possible intensification des débits extrêmes engendrés par le changement climatique ont entraîné une modification supplémentaire des distributions statistiques (Figure 34). En reportant la potentielle augmentation de 40% du débit de pointe sur les distributions Gumbel ajustées pour différents scénarios d'émission (présentés en Section III.4.3), on a constaté un déplacement des quantiles de débit loin d'être anodin. Comme déjà évoqué, l'augmentation des débits extrêmes en termes d'intensité et de fréquence dépendait fortement du scénario d'émission utilisé et de la période étudiée. Ainsi un débit initialement qualifié par une période de retour de 20 ans pouvait, dans le pire des cas (scénario A2, période 2041-2070 après avoir subi un incendie), devenir un événement commun (période de retour inférieure à 10 ans). Inversement, un débit de période de retour 20 ans en 2011-2040 pour ce même scénario A2 correspondait à un événement initialement considéré comme centennal sur la période historique.

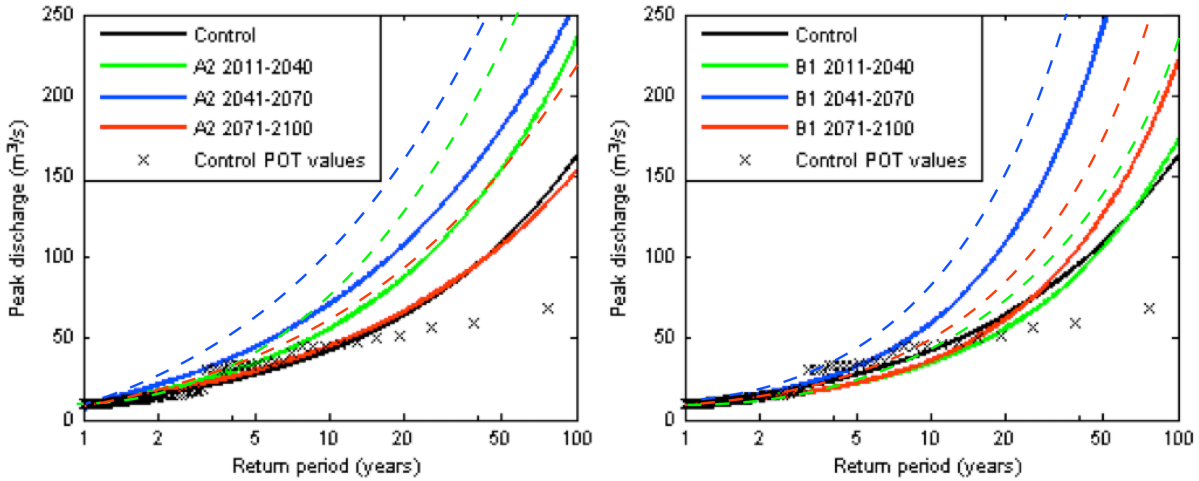

Figure 34. *Modification des distributions statistiques de type Gumbel (courbes pointillées) obtenues pour les différentes périodes étudiées en tenant compte des incendies.*

III.5. Conclusions

Ces différents résultats ont confirmé les grandes variabilités spatiale et temporelle des impacts hydrologiques du changement climatique. A l'échelle d'un même bassin versant comme celui du Llobregat, l'augmentation en fréquence et/ou en intensité des pics de débit (comme des précipitations) peuvent être plus ou moins forte en fonction de la zone étudiée et des processus conduisant sa réponse hydrologique. La généralisation de résultats ponctuels à l'ensemble d'un territoire est impossible en l'état et nécessite clairement l'utilisation d'outils multi-échelles capables d'appréhender cette variabilité.

Il semble aussi essentiel de rappeler ici que les résultats présentés peuvent être entachés d'une forte incertitude. Comme déjà évoqué, les sources peuvent être nombreuses : scénarios d'émission, modèle de circulation générale, méthode de downscaling, modèle hydrologique, choix et paramétrisation de la loi statistique, durée des périodes considérées (30 ans alors que l'on étudie des occurrences centennales),… Une approche globale et stochastique doit permettre de mieux quantifier cette incertitude et de rendre aux résultats une part d'honnêteté qui peut leur faire souvent défaut.

Au final, il ressort que la fiabilité de ces études d'impacts nécessite de connaître aussi précisément que possible les interactions entre sol et atmosphère à travers les échelles. Cela se traduit par la nécessité de développer des outils et méthodes (plus) adaptés, et concerne en premier lieu les méthodes de downscaling et la représentation des processus via l'utilisation de modèles idoines.

IV. Introduction à la renaturation du milieu urbain : les toitures végétalisées comme outils de gestion des eaux pluviales

IV.1. Contexte et enjeux du milieu urbain : entre continuité et spécificité

Ce troisième volet dédié à l'hydrologie urbaine prolonge les deux précédents et pose les jalons du projet de recherche présenté par la suite. Il s'intéresse à des territoires où les interactions entre les aléas climatiques et les systèmes anthropiques sont particulièrement importantes, et amenées à l'être encore davantage sous l'action combinée de la densification urbaine et du changement climatique. En effet, les centres urbains accueillent aujourd'hui plus de 50% de la population mondiale, soit 3,8 milliards d'individus, et ce nombre devrait atteindre les 5 milliards d'ici 2030 (sources Banque Mondiale). En France, plus de 80% de la population vit en milieu urbain, avec plus de 10 millions d'habitants pour la seule agglomération parisienne (sources INSEE). Ces concentrations accrues de population dans les zones urbanisées ont de fortes conséquences environnementales. Cela concerne le domaine de l'énergie avec 2/3 de la production consommée en ville, la qualité de l'air avec environ 50% des émissions de gaz à effet de serre, la biodiversité, et bien sûr le cycle de l'eau. L'urbanisation toujours croissante via des opérations d'aménagement et de réhabilitation est par définition consommatrice d'espaces naturels, et entraîne de facto une réduction de l'infiltration et de l'évapotranspiration due à l'augmentation des surfaces imperméables (toits, parkings, routes). Il en résulte une grande vulnérabilité hydrologique (quantitative et qualitative) de ces territoires, avec l'émergence de nombreux risques : inondations, réseaux d'assainissement saturés et vecteurs de nombreux polluants pouvant se déverser dans les cours d'eau, difficile recharge et contamination des nappes.

IV.1.1. Des crues éclair au ruissellement urbain

Le milieu urbain est un environnement complexe de par l'agencement de surfaces hétérogènes (perméables et imperméables), et la superposition d'un double chemin d'écoulement (superficiel et souterrain). D'un point de vue hydrologique et opérationnel, les problématiques liées au risque d'inondation urbaine peuvent être rapprochées de celles relatives aux crues éclair. Tout d'abord, on retrouve des dynamiques similaires avec des petits bassins versants (la plupart du temps non jaugés) caractérisés par des temps de réponse très courts (de quelques minutes à quelques heures). Les surfaces imperméables génèrent d'importants ruissellements qui peuvent s'accumuler rapidement dans les points bas et/ou saturer localement le réseau d'eaux pluviales. Tout cela engendre un risque d'inondation, diffus dans l'espace et dans le temps, et difficilement prévisible. La compréhension, le suivi et l'anticipation de ces phénomènes nécessitent donc de travailler à de hautes résolutions tant spatiales que temporelles, et de mettre en œuvre des outils proches de ceux présentés lors de la première partie. En termes d'impact, le réseau routier apparaît comme particulièrement vulnérable avec de nombreuses conséquences socio-économiques. Enfin, l'aléa climatique pourrait s'intensifier sous l'effet du changement climatique et encore augmenter la pression sur ces territoires. Malgré une grande incertitude entourant les projections de précipitations moyennes annuelles, il semble que les événements pluvieux courts et intenses, souvent responsables de débordements et/ou de déversements, risquent d'augmenter à l'avenir (Hoang et al., 2012).

IV.1.2. Les infrastructures bleues et vertes

Devant l'impératif d'une adaptation du milieu urbain à ces contraintes climatiques et démographiques, un changement de paradigme dans la réalisation des projets d'aménagement semble nécessaire. Il doit permettre de maximiser les services éco-systémiques des zones urbaines et d'en augmenter la résilience face au changement climatique. Concernant la gestion

de l'eau en ville, une première étape dans cette direction a été franchie au début des années 80 avec l'apparition du terme « technique alternative » (en anglais Sustainable Urban Drainage System ou Best Management Practices, cf. Fletcher et al. (2015)). Cette nouvelle approche privilégiait la conception diffuse de petits ouvrages multi-objectifs à la conception historique, centralisée et mono-tâche (bassin de rétention pour les inondations par exemple) (Fratini et al., 2012; Marsalek and Chocat, 2002). En faisant intervenir les processus de rétention, d'infiltration, et d'évapotranspiration, ces techniques de gestion à la source cherchent à reproduire autant que faire se peut le cycle naturel de l'eau, et à contrecarrer les effets négatifs de l'expansion urbaine en optimisant la gestion de l'espace et en réduisant les coûts d'investissement.

Ce mouvement connaît actuellement une nouvelle étape avec la prise en compte d'enjeux qui dépassent la simple gestion de l'eau. Celle-ci est portée par les concepts de « ville durable » ou de « ville résiliente » qui ont pour objectifs de rétablir un métabolisme urbain plus économe en ressources, plus respectueux de l'environnement, mais qui resterait toujours actif et attractif. De par la complexité du « système ville », ce mouvement privilégie une approche intégrée de l'aménagement urbain et préconise la « renaturation de la ville ». A ce titre, le terme « d'infrastructures bleues et vertes » (appelées IBV par la suite) ou de « solutions bleues-vertes » est aujourd'hui mis en avant. Il permet d'amorcer une synergie entre les espaces bleus (bassins, lacs urbains) et les espaces verts (toitures végétalisées, noues, bassins d'infiltration…), tous deux porteurs de cette réintroduction de la nature en ville. Cette nouvelle terminologie permet aussi de s'intéresser au caractère multifonctionnel de ces structures qui vont au delà de la gestion de l'eau : atténuer les îlots de chaleur urbains, préserver la biodiversité, améliorer l'isolation thermique des bâtiments, voire être un vecteur d'agréments esthétiques (Ashley et al., 2013).

C'est autour de ces objets - les IBV- et de leur caractère multifonctionnel que j'ai construit le projet de recherche mené aujourd'hui au sein du Laboratoire Hydrologie, Météorologie et Complexité et qui est détaillé dans le chapitre suivant. Les questions scientifiques sur lesquelles il est construit et autour desquelles j'ai organisé mes dernières investigations, ainsi que celles à venir, sont préalablement présentées ici. On retrouvera aussi dans ce chapitre la présentation des principaux travaux effectués sur cette thématique des IBV ces 6 dernières années à l'Ecole des Ponts ParisTech, et qui s'intéressent principalement à l'utilisation des toitures végétalisée en gestion des eaux pluviales.

IV.1.3. Problématisation de la renaturation du milieu urbain

Malgré de nombreuses initiatives allant dans le sens du verdissement du milieu urbain (végétalisation de 100 ha de toits et de façades prévue sur Paris par exemple), force est de constater que la démarche se heurte encore à certaines réticences. Au cœur de celles-ci, on retrouve la nécessité de mieux quantifier les performances que peuvent prodiguer les IBV dans les différents domaines évoqués plus haut (gestion de l'eau, confort thermique, qualité de l'air,…). Rappelons qu'en mars 2016, le Sénat arguant d'un « manque d'étude » avait rejeté en première lecture un amendement stipulant que tout nouveau bâtiment situé en zone commerciale devait avoir une 5ème façade sur laquelle l'installation de dispositifs végétalisées ou de production d'énergie renouvelable serait obligatoire.

Derrière cette difficulté à quantifier les performances de ces IBV -leurs services éco-systémiques-, un certain nombre de verrous scientifiques bloquent encore la démocratisation de ces techniques, et ce malgré des avancées notables réalisées sur ces questions ces dernières années. Je les présente ici car c'est autours de ces verrous que ce projet de recherche a été bâti.

Tout d'abord, le développement systématique des IBV souffre d'un **manque de connaissance concernant** les processus physiques conduisant le **fonctionnement thermo-hydro-mécanique** des matériaux qui les constituent**.** A ce titre, l'infiltration et l'évapotranspiration méritent une attention particulière, puisque directement liées aux questions de gestion des eaux pluviales (via la capacité de rétention d'un sol) et de rafraichissement urbain (via le flux de chaleur latente). Elles représentent des processus complexes caractérisés par de fortes hétérogénéité spatiale et variabilité temporelle.

En termes de modélisation, le **couplage entre fonctionnements thermique et hydrique** doit aussi être amélioré, et ce particulièrement à l'échelle urbaine où le comportement de la végétation doit être représenté en tenant davantage compte de l'état hydrique des sols et des substrats, ainsi que du microclimat local. Jusqu'à maintenant, peu d'études ont été réalisées sur l'impact des infrastructures bleues et vertes à une échelle dépassant celle du bâtiment. Ainsi, les **interactions à plus grande échelle,** entre un milieu urbain –quel que soit sa configuration- et son milieu récepteur **sont très peu étudiées et encore mal connus**. Il apparaît donc nécessaire de coupler cette gestion décentralisée à la parcelle à une gestion plus globale, embrassant par exemple le bassin versant d'un point de vue hydrologique, ou la ville ou le quartier d'un point de vue aménagement.

En conséquences, les **performances thermiques et hydrologiques réelles des IBV** sont mal établies alors qu'elles devraient être clairement évaluées lors de la conception d'un ouvrage ou d'un projet. Variables dans l'espace et dans le temps, ces performances gagneraient à être davantage liées à des **indicateurs quantitatifs**. Plus généralement, les services éco-systémiques prodigués par les IBV doivent être évaluées **directement en lien avec la biodiversité**, à savoir quelles conséquences peuvent entrainer un complexe sol/végétation particulier.

Ce travail d'évaluation doit être mené dans des conditions de temps présent, mais aussi en tenant compte du changement global, et plus particulièrement des conséquences du changement climatique et des dynamiques urbaines à l'échelle de la ville. A ce titre, un certain flou demeure aussi concernant la manifestation du changement climatique à l'échelle urbaine. Nonobstant les efforts faits ces dernières années pour convertir les sorties des modèles climatiques (les précipitations en premier lieu) à des échelles plus fines, ces scénarios sont généralement encore déterminés à des résolutions spatio-temporelles (plusieurs km et journalière) peu compatibles avec des études d'impacts hydrologiques, et encore moins pour des enjeux touchant au milieu urbain. Dans ce dernier cas, un échantillonnage spatial au minimum de l'ordre du km et un échantillonnage temporel au plus égal à une heure est préconisé. Quelques travaux ont essayé de résoudre ce problème en proposant des outils statistiques (Arnbjerg-Nielsen et al., 2013; Willems and Vrac, 2011). Mais ces derniers sont généralement restreints à des changements d'échelle temporelle et reposent sur l'hypothèse que la modification touchant la distribution des intensités de pluie est le même quelque soit l'échelle de temps considérée. Il existe donc un **manque d'outils capables de transformer les projections climatiques à ces petites échelles**. Cette absence conduit à un **manque de connaissance certain sur les impacts du changement climatique en ville**.

Enfin, on note une **absence de travaux prospectifs concernant la possible implantation des IBV** dans l'environnement urbain aujourd'hui, comme dans un avenir proche. Il semble légitime d'établir un lien entre les fonctions et services éco-systémiques prodigués par les IBV d'une part, et les contraintes et objectifs environnementaux, ainsi que les dynamiques urbaines d'autre part. Cela concerne tous les facteurs climatiques, géotechniques, réglementaires ou normatifs (comme une certification environnementale) qui pourraient encourager, ou au contraire entraver, l'implantation d'IBV.

Sur la base de ce constat, ce projet de recherche s'intéresse donc aux interactions thermiques et hydrologiques entre un milieu urbain en quête de re-naturalisation et son environnement naturel récepteur, les deux étant fortement vulnérables au regard du changement climatique. Il s'attache **à mieux comprendre le fonctionnement des infrastructures bleues et vertes pour mieux les concevoir**, ainsi que les échanges qu'elles impliquent entre les surfaces imperméables et naturelles. Il s'interroge sur les **conséquences de ces interactions** tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif **dans un contexte de changement global** et pour **différentes échelles spatio-temporelles.** Un cadre multi-échelle est alors envisagé pour faire le lien entre le fonctionnement thermo-hydrique du matériau constituant une IBV et ses conséquences à travers un large panel d'échelles urbaines allant du bâtiment au bassin versant. Une approche systémique et multifonctionnelle est aussi revendiquée pour embrasser plus largement les performances éco-systémiques des IBV dans un environnement urbain complexe. Dans ce cadre, le développement des infrastructures bleues et vertes est choisi comme fil conducteur de cette traversée d'échelle. Au cours de cette traversée, on s'interrogera sur le maintien de leurs performances en tant qu'outil d'adaptation au changement climatique en regard de différents enjeux opérationnels exposés plus loin (I.V.7).

IV.1.4. Cadre scientifique des travaux réalisés

Les travaux présentés dans ce chapitre amorce donc cette réflexion sur les IBV en se focalisant sur des questions d'hydrologie urbaine. Ils s'intéressent à la gestion des eaux pluviales, et plus particulièrement aux débordements et déversements de réseau induits par les précipitations, ainsi qu'à la manière de les atténuer à l'aide d'IBV (principalement les toitures terrasses végétalisées, appelées TTV par la suite). Ils ont permis d'initier la mise en place d'un cadre de modélisation multi-échelle qui permette d'étudier le comportement et l'influence de ces IBV comme outils de mitigation au changement climatique. En couplant instrumentation, modélisation et prospection, ces travaux m'ont permis d'aborder particulièrement les questions scientifiques suivantes : (i) comment améliorer nos connaissances sur le fonctionnement hydrique d'une toiture végétalisée et d'en saisir tant la variabilité temporelle que l'hétérogénéité structurelle, (ii) comment représenter son comportement dans le cadre d'une modélisation hydrologique urbaine, (iii) quels sont les impacts de ces infrastructures en gestion des eaux pluviales à travers les échelles, (iv) quelle diffusion est nécessaire pour une efficacité à une échelle dépassant celle du bâtiment et comment s'opère cette diffusion au sein des dynamiques urbaines.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets suivants :

Le projet européen de la KIC Climate **Blue Green Dream** (http://bgd.org.uk/, https://hmco.enpc.fr/portfolio-archive/blue-green-dream/) qui a reçu le Business Green Technology Award en 2015 et qui cherchait à promouvoir une gestion couplée des infrastructures bleues et vertes en ville, et de mettre cette synergie au service des écosystèmes urbains pour des objectifs nombreux relevant autant de la gestion des inondations que du rafraîchissement urbain, des économies énergétiques, ou de qualité de l'air (Maksimovic et al., 2013). Reposant sur des bases scientifiques, il a développé un large consortium composé d'universitaires, d'opérationnels, et d'aménageurs afin de poser les premiers jalons d'un marché dédié à une nouvelle manière d'aborder les projets d'aménagement et de rénovation urbaine à travers, notamment, la prise en compte systématique des IBV.

Le projet C2D2 **TVGEP** (Conception des Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales Urbaines) dont l'objectif était d'évaluer l'intérêt des toitures terrasses végétalisées pour la gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales, en en identifiant leurs atouts et limites, tant à l'échelle de la parcelle qu'à l'échelle de la ville. Son originalité consistait à embrasser différentes dimensions et a démontré le caractère réaliste d'une approche

intégratrice : analyse des freins et leviers, comportement des structures d'un point de vue tant quantitatif que qualitatif, changement d'échelle. En termes opérationnels, le projet visait à dresser un panorama des pratiques et des acteurs afin de mieux concevoir, dimensionner et entretenir ces techniques pour la gestion des eaux pluviales à l'échelle d'un bâtiment.

Le projet ADEME **TERRACES** (Toitures vEgetales pour RafRaîchir les Ambiances Climatiques urbainES) dont l'objectif était d'étudier l'impact des toitures végétalisées sur les îlots de chaleurs urbains dans le contexte actuel et dans une perspective de changement climatique (Claverie et al., 2015). Il visait l'approfondissement des analyses scientifiques concernant la performance et les impacts des toitures végétalisées sur le climat urbain, l'environnement et la santé. A l'échelle du bâtiment, il s'agissait de progresser dans l'évaluation du rafraîchissement apporté par une toiture végétalisée en se focalisant sur la mesure du bilan énergétique et de l'évapotranspiration. A l'échelle urbaine, il s'agissait d'élaborer une représentation cartographique du potentiel rafraîchissant en évaluant le potentiel de végétalisation des toitures.

Les détails de ces travaux sont à retrouver dans les articles suivants :

Versini, P.A., Gires, A., Fitton, G., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Ni, V., Doumenc, V., 2017. ENPC Blue Green Wave: a Blue Green Dream pilot site to assess multifunctional aspect of green infrastructures. *La Houille Blanche.* Accepté

Versini, P.A., Kotelnikova, N., Poulhes, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D. and Leurent, F., 2018. A distributed modelling approach to assess the use of Blue and Green Infrastructures to fulfil stormwater management requirements. *Landscape and Urban Planning*, 173: 60-63

Versini, P.-A., 2017. Les infrastructures bleues et vertes - outils d'adaptation au changement global en milieu urbain. *Techniques de l'Ingénieur.* P4260

Versini, P.A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2016. Toward an operational tool to simulate green roof hydrological impact at the basin scale: a new version of the distributed rainfall-runoff model Multi-Hydro. *Water Science and Technology*, 74(10), DOI: 10.2166/wst.2016.310

Versini, P.-A, Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B., 2015. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from roof scale to basin scale. *Journal of hydrology*, 524: 562-575.

de Gouvello, B., Versini, P.-A., Paupardin, J., and Pruvots-Bouvatier, M., 2015. Multi-scale approach of the green roofing potential: application to the Paris agglomeration. International Conference on Water, Megacities and Climate Change, 1-4 décembre 2015, Paris (France)

Versini, P.A., Jouve, P., Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B., 2015. Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale - Study in the Hauts-de-Seine county (France). *Urban Water Journal*, 13(4) : 372-381

La poursuite et l'approfondissement de ces travaux, ainsi que leur prolongement à d'autres problématiques seront présentés dans le chapitre suivant détaillant mon projet de recherche pour les années à venir.

IV.2. Diffusion de la technique : le potentiel de végétalisation

Ce premier volet s'intéresse à la notion de potentiel de végétalisation des toitures qui représente, à l'échelle d'un territoire donné (quartier, ville ou agglomération), la surface de toit qui peut être végétalisée en fonction des caractéristiques du bâti existant. Il repose sur la disponibilité et l'exploitation de bases de données essentiellement géographiques. Ces

questions relatives à la diffusion des toitures végétalisées ont été traitées en collaboration avec Bernard de Gouvello (CSTB/LEESU). Elles s'appuient sur de précédents travaux dédiés : (i) au développement de la récupération de l'eau de pluie à grande échelle (Belmeziti et al., 2014), (ii) à l'évaluation des surfaces des matériaux de toiture à l'échelle de la ville (Sellami-Kaaniche et al., 2014). Dans chaque cas, il était question de créer des typologies de bâtiment ayant un comportement analogue au regard de la thématique étudiée (utilisation de l'eau de pluie ou matériau de la toiture par exemple).

IV.2.1. Le potentiel général

a) Fonctionnalité du bâtiment

Dans le cadre du projet TVGEP, une première ébauche du potentiel de végétalisation a été entreprise. Elle devait à l'échelle de la parcelle, unité géographique de quelques hectares représentant l'élément de base de la modélisation hydrologique (cf. Section IV.4), déterminer une surface maximale de végétalisation des toitures. Pour cela, les données relatives au Mode d'Occupation du Sol (MOS) d'Ile-de-France (IAU-IDF, http://www.iau-idf.fr/) et la BD TOPO® Bâti de l'IGN ont été combinées. Sur les 81 postes proposés dans la nomenclature du MOS, une sélection a été réalisée pour conserver uniquement ceux dont les bâtiments seraient susceptibles d'être végétalisés. Il s'agissait de déterminer *a priori* les espaces où l'on pouvait retrouver des toits terrasses, en privilégiant les grands ensembles et en évitant entre autres les zones d'habitats individuels. Au final, ce sont 25 postes qui ont été sélectionnés, en majorité ceux relatifs à l'habitat collectif, aux activités économiques, commerciales et administratives, à l'enseignement et aux équipements. A l'intérieur de ces catégories, seules les surfaces correspondant aux empreintes bâties ont été conservées. Elles représentent les surfaces *a priori* végétalisables de la parcelle. Il s'agit d'une approximation haute puisqu'elle suppose que l'ensemble des surfaces de toit conservées est effectivement plat, sans microstructure, techniquement végétalisable et actuellement non végétalisé. Le potentiel de végétalisation peut alors être défini comme le pourcentage de surface de parcelle *a priori* végétalisable (ratio entre les surfaces végétalisables et la surface totale de la parcelle).

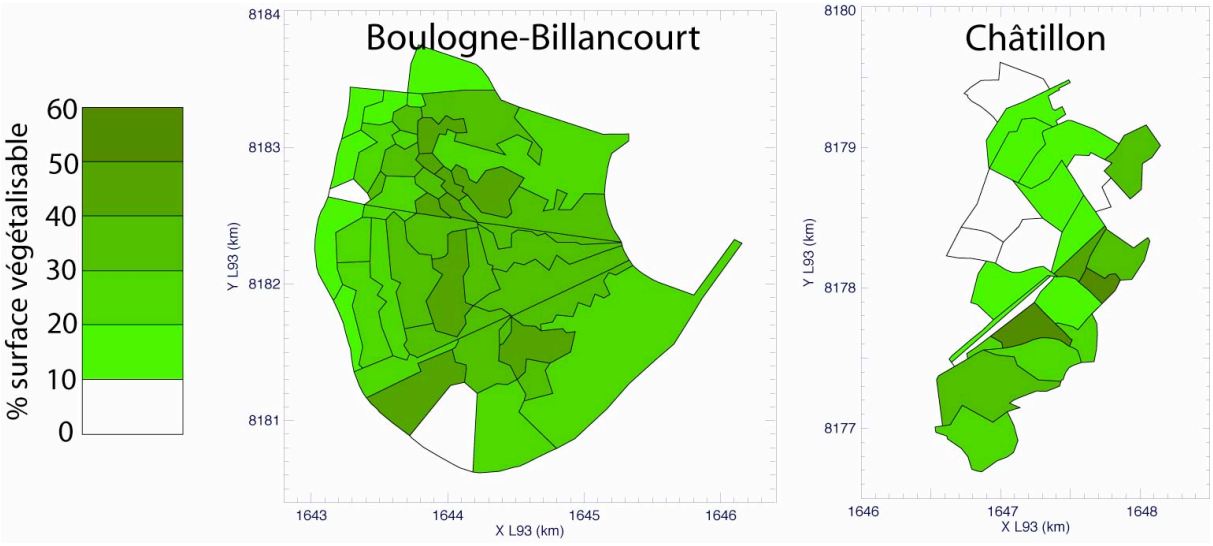

Figure 35. *Potentiel de végétalisation calculé comme le ratio entre les surfaces végétalisables et la surface totale de la parcelle pour les bassins de Boulogne-Billancourt et de Châtillon.*

Cette méthode a été appliquée sur deux bassins versants des Hauts-de-Seine : Boulogne-Billancourt et Châtillon (cf. Figure 35). Il est apparu que la distribution spatiale de ce potentiel de végétalisation était plutôt variable d'un territoire à un autre au regard de leur histoire urbanistique. En effet, le bassin de Boulogne-Billancourt est caractérisé par un potentiel de végétalisation plutôt homogène avec entre 30 et 40 % de surfaces végétalisables dans le centre, contre 10 à 30% en périphérie, dû à une densité des bâtiments plus faible sur

les bords de Seine et la présence d'un certain nombre d'espaces verts. Dans le centre-ville, la concentration d'habitats collectifs - pour lesquels on suppose que la couverture est végétalisable - est plus importante. Le potentiel de végétalisation apparait plus hétérogène sur le bassin de Châtillon. Il peut y atteindre plus de 50% de la surface des parcelles dans les zones de haute densité d'habitats collectifs, et reste inférieur à 10% pour les zones résidentielles.

La proportion de toitures potentiellement végétalisables ainsi calculée reste approximative dès lors que l'on suppose que tous les bâtiments appartenant aux modes d'occupation des sols sélectionnés sont dotés de toits plats et peuvent effectivement être couverts par une TTV. Cette méthode a donc nécessité d'être améliorée pour mieux tenir compte : (i) de l'hétérogénéité des types de toitures au sein d'un même mode d'occupation des sols, (ii) de la période de construction du bâtiment influençant la présence d'une toiture terrasse, (iii) des toitures végétalisées existantes, et (iv) des contraintes réglementaires et des dynamiques urbaines.

b) Intégration de l'information historique

Des investigations complémentaires ont donc été menées dans le cadre du projet TERRACES (toujours en collaboration avec Bernard de Gouvello) à travers le suivi du Post-Doc d'Emna Sellami-Kaaniche. Sur la base de ses travaux de thèse (Sellami-Kaaniche et al., 2014), cette dernière a avancé dans la définition d'un Potentiel physique général (*Pg*) en la faisant reposer sur deux critères : la typologie du bâtiment (critère topologique) et sa période de construction (critère historique). La notion d'entité a ainsi été définie comme le croisement d'une classe de bâtiment avec une période historique. Pour se faire, 13 classes de bâtiments similaires en termes de planéité des toitures ont été définies (habitat individuel, habitat collectif, surfaces commerciales, bureaux…). Sur la base d'une étude urbanistique menée sur la région parisienne, quatre périodes historiques influençant la nature des toitures et l'utilisation des matériaux de couverture ont été définies :

- Période 1 (avant 1900) : toitures majoritairement composées de matériaux métalliques qui ont concurrencé les matériaux traditionnels (tuile en terre cuite et ardoise) ;
- Période 2 (1900-1950) : période avant la seconde guerre mondiale caractérisée principalement par des toitures en tuile ;
- Période 3 (1951-1980) : période après-guerre incluant les trente glorieuses pendant laquelle les toitures sont majoritairement des terrasses ;
- Période 4 (1981-2014) : période moderne pendant laquelle les toitures sont majoritairement inclinées.

Sur la base de ces 52 entités (13 classes x 4 périodes), une méthode statistique croisée à une interprétation visuelle des matériaux de toiture a été implémentée. Cette méthode repose sur un échantillonnage aléatoire de bâtiments appliqué à chaque entité. Pour les bâtiments sélectionnés, un repérage visuel a été opéré à partir des images aériennes (BD-ORTHO®) et a permis de déterminer des valeurs de ratios de toitures plates pour chaque entité (R_{TT}). Cet échantillonnage a été essentiellement mené sur la ville de Créteil (considérée par les historiens comme représentative de l'urbanisation de l'agglomération parisienne). Le potentiel général est ensuite calculé à l'échelle de la commune ou du quartier en prenant les surfaces de toit appartenant à chaque entité représentée et en les pondérant à l'aide des ratios R_{TT} déterminés précédemment :

$$Pg(ha) = \sum_{i=entité} \left(S_{Ti} \times \frac{R_{TTi}}{100} \right)$$

Avec S_{Ti} la surface des toitures d'une entité *i* (m²) et R_{TTi} le ratio des toitures terrasses pour l'entité *i* (%).

Cette méthode a été appliquée à trois échelles différentes : la commune (Créteil), le département (Seine-Saint-Denis) et l'agglomération parisienne (regroupant 431 communes).

A l'échelle de la ville, le *Pg* de Créteil s'élève à 95,3 ha. Cela représente un peu plus de 8% de la surface totale de la ville (11,4 km²) et plus de 53% de la surface cumulée de l'emprise au sol des bâtiments (178 ha). En étudiant plus précisément la distribution spatiale de ce potentiel, on note des écarts significatifs qui s'expliquent en partie par l'importance des logements collectifs dans certains secteurs périphériques au regard d'autres zones où prédomine l'habitat individuel, très faiblement végétalisable. Ces résultats ont pu être comparés à une base de données fournies par l'IAU et identifiant les toits plats sur la base d'un traitement automatique d'orthophotos. Cette validation a démontré des résultats extrêmement proches à l'échelle de la commune (96,3 ha végétalisable), et des écarts de l'ordre de 10% à l'échelle des quartiers, ce qui n'est pas étonnant dans la mesure où les ratios R_{TT} ont été calculés à l'échelle de la ville.

A l'échelle de l'agglomération parisienne (Figure 36), on retrouve une répartition très inégale des valeurs du *Pg*. Moins de 20% des municipalités de la région métropolitaine ont un *Pg* de plus de 25 ha et seulement 10% d'entre eux dépassent 50 ha. En s'écartant de la capitale, on peut remarquer que le *Pg* a généralement tendance à diminuer. Ceci peut s'expliquer par la "dé-densification" progressive des espaces urbains. Cependant, il existe plusieurs exceptions notables à cette tendance avec localement des valeurs de *Pg* supérieures : le département de la Seine-Saint-Denis ainsi que les 5 « villes nouvelles » créées dans les années 1960 et désormais incluses dans le périmètre de l'agglomération parisienne (Marne-la-Vallée, Cergy-Pontoise, Saint-Quentin-en-Yvelines, Evry et Sénart). Ces zones sont caractérisées à la fois par une re-densification locale et par une plus grande proportion de bâtiments avec des toits plats, correspondant à leur époque de construction.

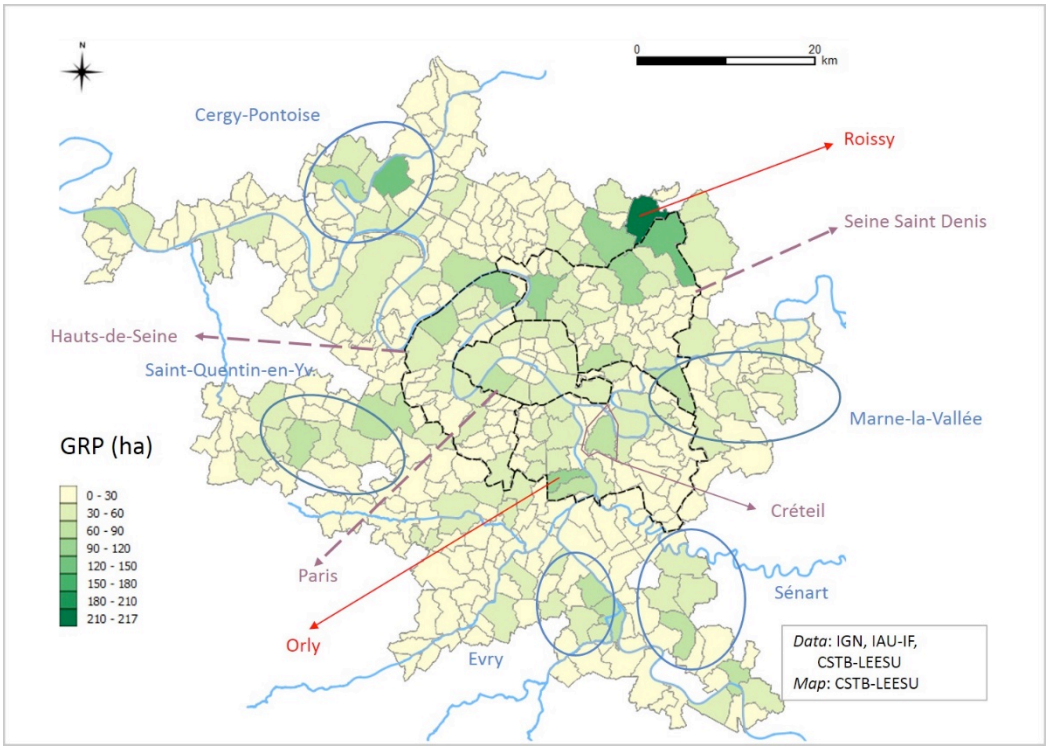

Figure 36. *Potentiel de végétalisation déterminé à l'échelle de l'agglomération parisienne*

IV.2.2. Vers un Potentiel actualisable : prise en compte des dynamiques urbaines

Le calcul du potentiel physique général était basé sur le critère unique de la planéité des toitures car les technologies actuelles permettent d'apporter une solution de végétalisation à tout type de toiture plane (végétalisation extensive a minima). Toutefois, si la planéité constitue une condition considérée comme nécessaire dans ces travaux, elle n'est pas suffisante pour garantir que la végétalisation des surfaces concernées soit effectivement entreprise. Pour cette raison la notion de « potentiel actualisable de végétalisation » a été introduite. Cet indicateur permet d'estimer la part des toitures terrasses actuellement non végétalisées effectivement végétalisables à l'échelle d'une commune, en tenant compte des contraintes réglementaires, d'urbanisme et du positionnement des « acteurs leviers ». En effet, au niveau d'une commune, les toitures terrasses non végétalisées ne peuvent pas être toutes végétalisées à cause de contraintes réglementaires (notamment le périmètre « protégé » autour des monuments historiques). De même, la volonté des acteurs tels que les maires est nécessaire pour promouvoir la mise en œuvre de la végétalisation. Il s'agissait donc d'intégrer des éléments de politique publique et d'histoire urbaine pour approcher de manière plus réaliste le potentiel de végétalisation. En particulier, cette vision diachronique devait permettre d'intégrer les projets d'aménagements susceptibles de contribuer de manière plus notable à la végétalisation, mais également d'appréhender les dynamiques de renouvellement urbain sur les espaces déjà bâtis.

Ce travail réalisé par deux stagiaires (Aurianne Vienney et Anne-Sophie Marcou co-encadrées avec Bernard de Gouvello) a consisté à : (i) collecter puis à analyser des informations de diverses origines (base de données, documents d'aménagement, stratégie de renouvellement urbain), (ii) mener des entretiens semi-directifs auprès des acteurs intervenant entre la conception et l'exploitation d'une toiture végétalisée (architectes-urbanistes, aménageurs, offices publics de l'habitat, étancheurs, écologues, services techniques départementaux). La finalité de ces entretiens a été d'identifier les principaux facteurs favorisant l'adoption d'une toiture végétalisée, mais également de repérer les obstacles à cette mise en œuvre.

Il est ressorti de cette enquête que l'intérêt pour les toitures végétalisées va croissant et se diffuse progressivement dans les pratiques des aménageurs et des architectes. Cette démocratisation passe par le développement de relais tels que l'ADIVET (Association des toitures végétales) ou la mise en œuvre de politiques publiques affichant des objectifs ambitieux en matière de végétalisation des toitures, à l'instar de la ville de Paris. Enfin, les labels environnementaux associés à l'échelle du bâtiment, par leur reconnaissance au moins partielle des apports des toitures végétalisées, constituent un autre levier de développement. Néanmoins, il apparait qu'après une évolution importante au début des années 2000, le marché des toitures végétalisées semble maintenant stagner, d'une part en raison des contraintes de surcoût économique engendré sur les projets, et d'autre part à cause du manque de connaissance sur les qualités réelles de ces réalisations, ce qui renvoie directement aux bénéfices attendus. Les entretiens ont mis en évidence que ces verrous pouvaient être levés en partie grâce à : (i) la mise en place d'outils économiques incitatifs, (ii) une meilleure évaluation et justification des performances environnementales (principalement en gestion des eaux pluviales, atténuation des îlots de chaleur urbains, et apport en termes de biodiversité), (iii) la prise en compte des aménités environnementales (bien être, santé, vivre ensemble…) fortement liés à l'accessibilité des toitures. S'il demeure aujourd'hui prématuré de traduire ces éléments en des propositions permettant une quantification même sommaire du potentiel actualisable de végétalisation des toitures sur un territoire donné, l'identification et la hiérarchisation de ces différents éléments constitue une étape fondamentale allant dans ce sens.

IV.2.3. Le Potentiel prospectif : la perspective du Grand Paris

Dans le cadre du renouvellement urbain et de la reconstruction de la ville sur elle même, une approche prospective a aussi été développée. Elle a conduit à introduire un nouveau concept, le Potentiel prospectif (P_{Pro}) qui estime le potentiel physique général associé à un scénario d'évolution prospective du tissu urbain. Dans le cadre du projet TERRACES, ce scénario a été considéré comme étant lié aux conséquences du développement de l'infrastructure ferroviaire prévu dans le cadre du Grand Paris et des aménagements qui vont en découler (présenté plus en détails dans le chapitre suivant V.8). Le potentiel prospectif a été établi en analysant le tissu urbain entourant des gares nouvellement construites et en concertation avec les services techniques départementaux en charge de l'aménagement urbain. Ainsi, dans les zones concernées par l'implantation d'une nouvelle gare, le potentiel général de végétalisation a été recalculé. Ce nouveau calcul a été effectué en considérant que la densification dans le périmètre de nouvelles gares se traduirait par une augmentation du ratio d'emprise au sol, et qu'à toute nouvelle emprise au sol correspondrait un bâtiment comprenant une terrasse. Cette méthode a été appliquée à l'échelle du département de Seine-Saint-Denis où ce potentiel prospectif a été comparé au potentiel général (cf. Figure 37).

Le *Pg* actuel du département de Seine-Saint-Denis s'élève à 13,13 km², soit plus de 5,5% de la surface totale du département (236 km²). Selon le scénario prospectif décrit, ce potentiel est susceptible de progresser pour atteindre 21,5 km², soit près de 10% du territoire. Ce résultat a montré que le projet du Grand Paris, qui va conduire à une densification notable du cadre bâti dans le département, constitue une formidable opportunité pour accroître très sensiblement la présence de la végétation en ville par le biais des toitures végétalisées.

La situation actuelle témoigne d'une importante variation du potentiel d'une commune à l'autre, où la combinaison d'une concentration de logements collectifs et de bâtiments de type industriel offre localement de grandes surfaces végétalisables (la partie nord-ouest du département). L'étude prospective a mis en évidence que la construction de nouvelles gares est de nature à renforcer sensiblement le potentiel des nombreuses communes impactées par le rallongement des lignes de transport ferré du Grand Paris allant du nord-ouest vers respectivement le nord-est et le sud-est. Certaines communes situées dans les « trous » du maillage renforcé du réseau ferré de transport et à la lisière du département voient leur situation inchangée, ce qui conduit à un accroissement des écarts. Il convient néanmoins de souligner que ces communes disposent pour la plupart d'espaces verts relativement importants au regard de leur surface totale. Ainsi, les écarts constatés en termes de potentiel ne signifient pas pour autant un renforcement des inégalités en termes de surface végétalisée.

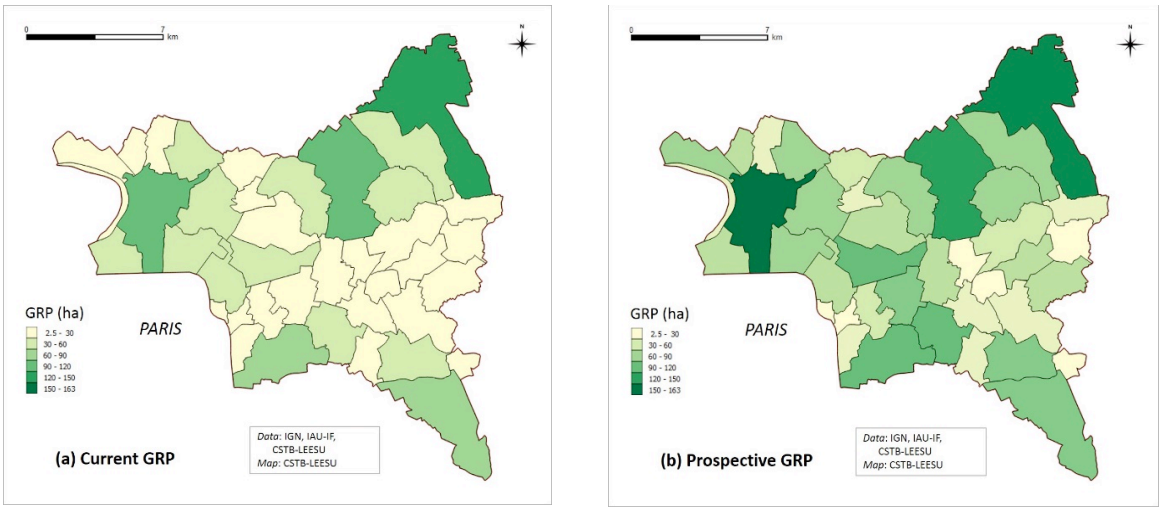

Figure 37. *Comparaison entre le potentiel général (a) et prospectif (b) calculé pour les communes du département de Seine-Saint-Denis*

IV.3. Instrumentation de toitures végétalisées :

IV.3.1. La nécessité du suivi expérimental

Les différents échanges que nous avons pu avoir avec les acteurs de l'aménagement urbain nous ont montré que la démocratisation des toitures végétalisées est loin d'être atteinte. Elle est entre autres freinée par le manque de retour d'expérience concernant les ouvrages existants, et plus particulièrement l'évaluation de leurs performances réelles, ainsi que leur perduration dans le temps. Jusqu'à maintenant les expérimentations ont été peu nombreuses, conduites sur des périodes courtes et en considérant la structure de manière homogène (Fassman-Beck et al., 2013a; Fioretti et al., 2010). Une meilleure connaissance du fonctionnement hydrique, mais aussi thermique, des toitures végétalisées passe donc par une étude approfondie des processus physiques mis en jeu, en particulier l'infiltration, la rétention et l'évapotranspiration qui sont encore mal connues (Poë et al., 2015; Stovin et al., 2015). A cette fin, il apparaît nécessaire de multiplier expérimentations et suivis de sites pilotes (bancs d'essais ou infrastructures réelles) sur de longues durées (5 à 10 ans). Cela passe par la mise en œuvre de capteurs (ou réseau de capteurs) capables d'appréhender ces processus physiques et leurs variabilités spatio-temporelles.

Les projets de recherche déjà évoqués ainsi que les collaborations qui en ont découlées (Imperial College, IFSTTAR, Cerema, GMCEA, CSTB entre autres) m'ont permis d'être confronté à des structures végétalisées différentes tant par leur configuration que par le climat auquel elles étaient soumises. Je vais présenter ici les deux principaux sites sur lesquels l'ai travaillé : les toitures de Trappes et la Vague Verte de Champs-sur-Marne qui représentait l'un des 4 principaux sites expérimentaux du projet Blue Green Dream.

IV.3.2. Les toitures expérimentales du Cerema

Dans le cadre du projet TVGEP, le Cerema Île-de-France a mis en place un banc expérimental grandeur nature sur le toit d'un bâtiment existant. Celui-ci est constitué de 6 compartiments de 35 m^2 végétalisés et de 2 compartiments « classiques » recouverts respectivement par une enrobée bitumeuse et du gravier. Les 6 configurations de complexes végétalisés diffèrent par le type de végétation (nu, sédums, ou graminées), l'épaisseur de substrat (3 ou 15 cm), et la couche de drainage (polystyrène expansé ou pouzzolane). Chaque compartiment est équipé d'un débitmètre qui permet de mesurer en continue le volume d'eau évacué par chaque structure. Une station météorologique permet aussi de mesurer la pluviométrie, la température, ainsi que la vitesse du vent. Ce dispositif avait pour objectifs de comparer sur un même site (i.e. mêmes conditions climatiques) différentes structures de végétalisation en faisant varier certaines de leurs caractéristiques, et d'analyser leurs réponses hydrologiques respectives face à un même événement pluvieux. Une étroite collaboration avec le Cerema, et plus particulièrement avec David Ramier, a facilité la mise à disposition et l'analyse des données collectées.

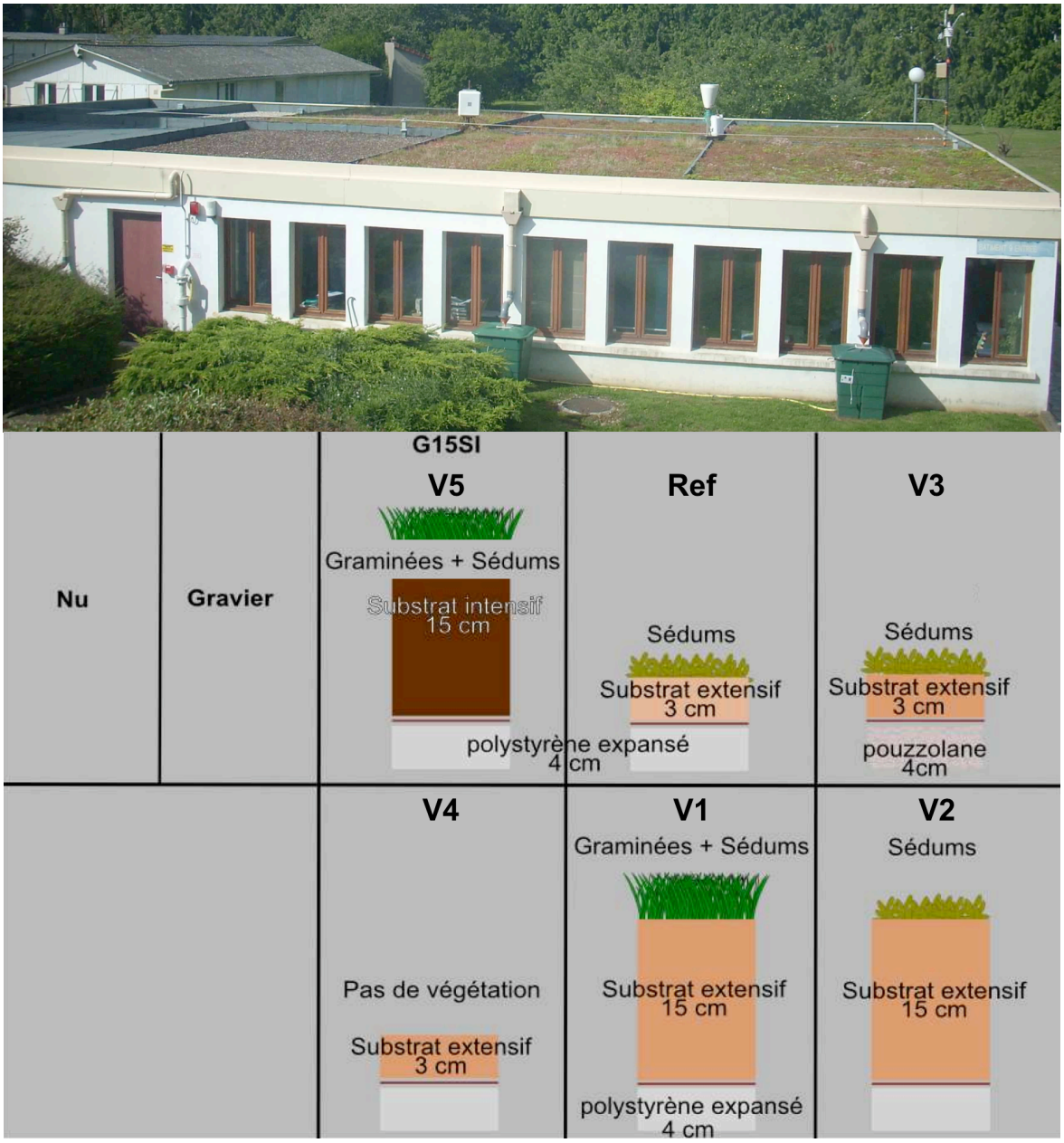

Figure 38. *Les différentes configurations des toitures végétalisées suivies au Cerema installées dans le cadre du projet TVGEP (Source : Livrable 2.2 TVGEP)*

Les données recueillies depuis octobre 2011 ont permis de mettre en lumière certaines propriétés des réponses hydrologiques des toitures végétalisées. On peut brièvement les illustrer ici à travers la succession d'épisodes pluvieux ayant eu lien en mai-juin 2016 et qui constituaient un record pour cette saison :

- les toitures végétalisées montrent toutes une réduction plus ou moins marquée du pic de débit et du volume ruisselé en fonction de la précipitation,
- ce rôle d'écrêteur est surtout visible lors des premiers pics de pluie lors d'un événement long (Figure 39) ou pour un événement isolé (Figure 40)
- les réponses et les coefficients de ruissellement des toitures V1, V2 et V5 montrent le rôle relativement significatif de l'épaisseur de substrat : plus celui-ci est épais et plus la capacité de rétention est importante,
- l'absence de végétation (en comparant V4 avec Ref ou V3) augmente le ruissellement, car d'une part le couvert végétal intercepte une partie des précipitations, et d'autre part le substrat met plus de temps à récupérer sa capacité de rétention du fait d'une évapotranspiration plus faible.

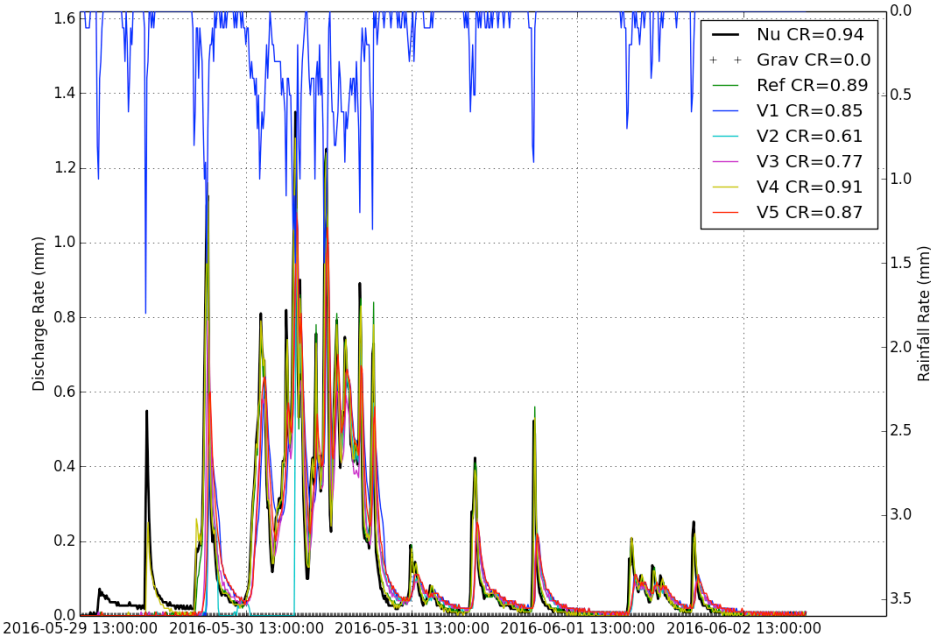

Figure 39. *Réponses des différentes configurations de toitures végétalisées à l'épisode pluvieux des 5-6 juin 2016*

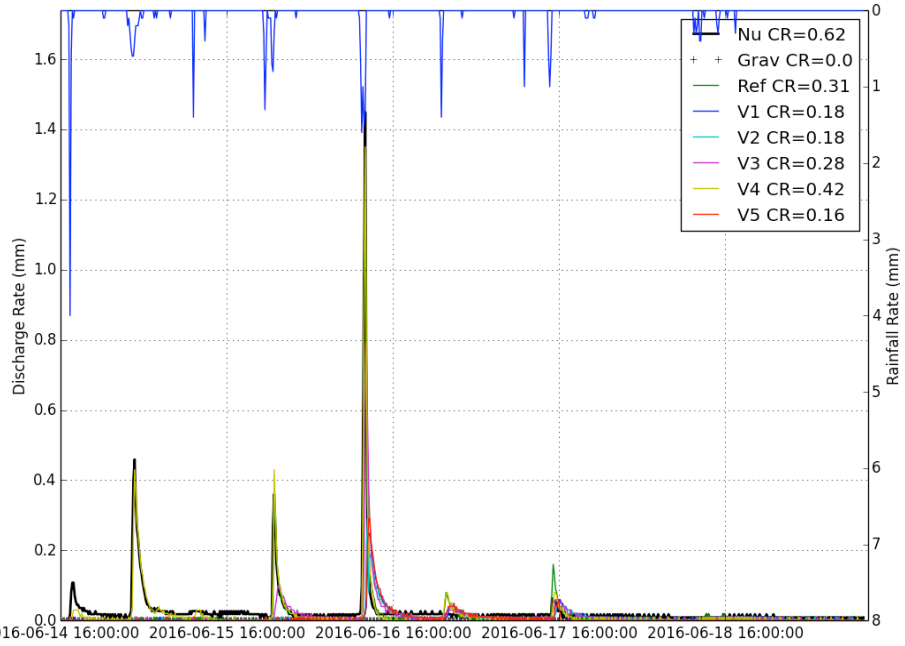

Figure 40. *Réponses des différentes configurations de toitures végétalisées à l'épisode pluvieux des 14-18 juin 2016*

Au final, ces résultats ont démontré que les toitures végétalisées sont relativement peu performantes lors de longs événements pluvieux. Elles stockent les premières pluies et réduisent considérablement les pics de débit résultants. Ensuite, elles se comportent quasiment comme des surfaces imperméables (surtout pour les substrats les moins épais). Elles apparaissent donc davantage efficaces lors d'orages d'été caractérisés par des pluies courtes et intenses.

IV.3.3. La Vague Verte de Champs-sur-Marne

La Vague Verte de Champs-sur-Marne (cf. Figure 41) représente depuis sa construction en 2013 une opportunité unique de pouvoir mettre en œuvre un démonstrateur à taille réelle en

plein cœur de la Cité Descartes. Située sur le nouveau bâtiment Bienvenüe en face de l'école des Ponts ParisTech, cette structure végétalisée s'étend sur un hectare, ce qui en fait la plus grande d'Île-de-France. Initialement choisi comme site phare du projet Blue Green Dream, cet ouvrage a fait l'objet de plusieurs campagne de mesures auxquelles j'ai activement participées et qui concernaient de nombreuses variables météorologiques (pluie, vent, teneur en eau, température, débit). Ces campagnes avaient toutes pour objectifs de caractériser les variabilités spatio-temporelles des processus physiques mis en jeu à travers les échelles. D'un point de vue hydrologique, des mesures ponctuelles de température et de teneur en eau ont été réalisées en différents points du substrat pour en appréhender les variations. Dans un second temps, des capteurs de hauteur d'eau et de vitesse ont aussi été installés dans le réseau de collecte des eaux pluviales afin de mieux comprendre les différentes contributions de la vague au ruissellement, et d'en estimer le bilan hydrique.

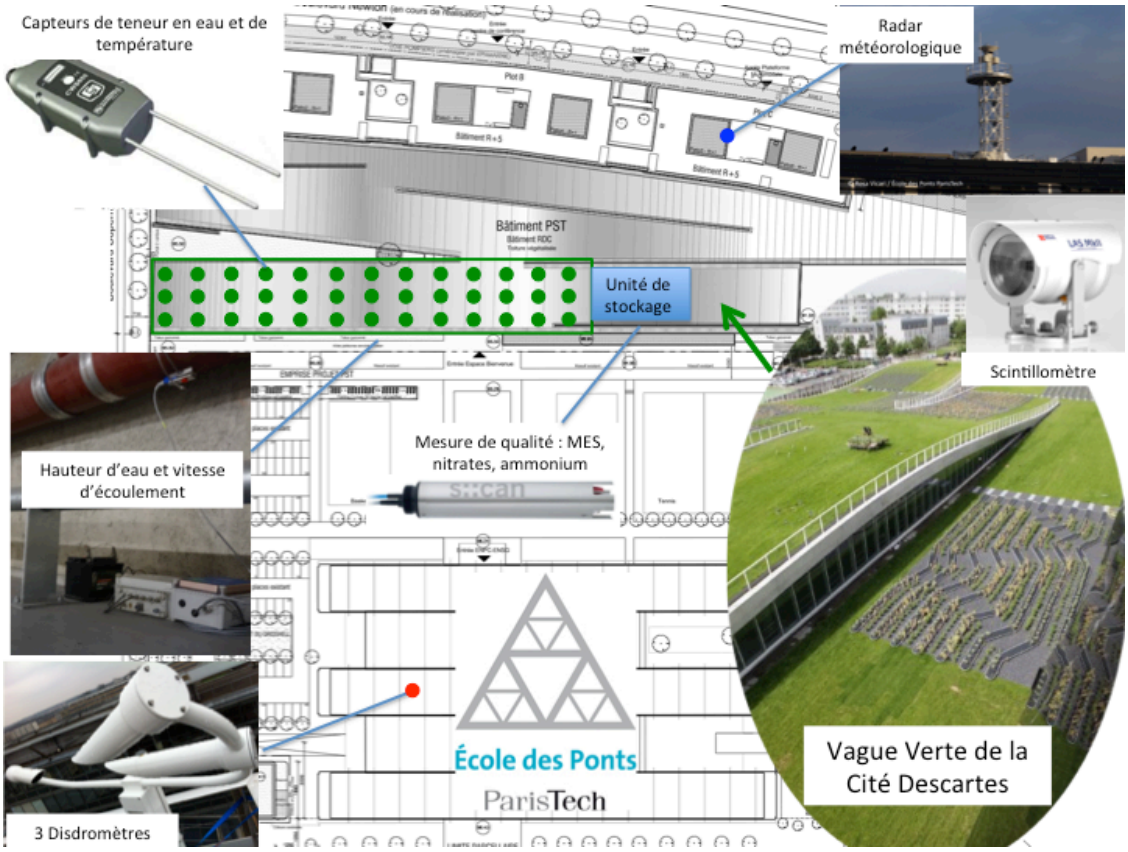

Figure 41. *Instrumentation en cours de déploiement sur la Vague Verte dans le cadre de la plateforme Fresnel (https://hmco.enpc.fr/portfolio-archive/fresnel-platform/)*

Les données collectées ont –entre autres- fait état de très grandes variabilités spatiale et temporelle de la teneur en eau (voir Figure 42). Il a été démontré que cette variabilité n'était pas liée à la topographie particulière de la structure, mais à l'hétérogénéité spatiale du matériau qui la constitue. D'autre part, les données de température au sol ont montré une variabilité temporelle liée au cycle diurne et caractérisée par un comportement scalant.

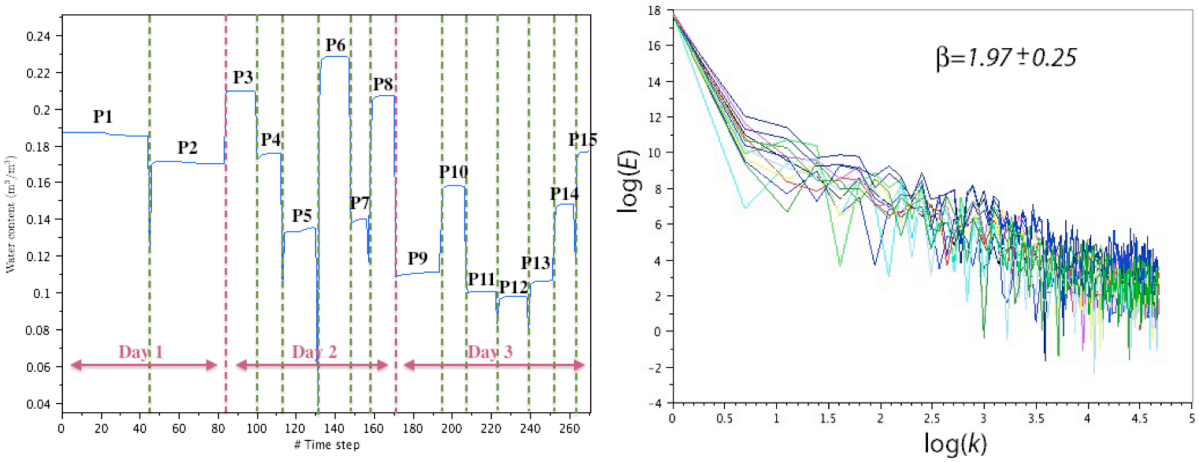

Figure 42. *Variations spatiales et temporelles de la teneur en eau (gauche) et analyse spectrale de la température pour 15 points de mesure effectués au mois d'aout 2014.*

Enfin, les estimations de débit dans le réseau ont pu permettre d'appréhender la réponse d'une partie de la Vague Verte à différents événements pluvieux. A ce propos, la Figure 43 illustre les hydrogrammes observés pour les événements pluvieux des 6 octobre et 19 novembre 2015. Caractérisés par des pluviométries similaires (respectivement 22,8 mm et 24,6 mm), ces événements ont néanmoins montré des réponses fort différentes en termes de débit avec des coefficients de ruissellement de respectivement 0,24 et 0,64. Ces résultats ont confirmé que le type d'événement pluvieux (court et intense contre long et faible) ainsi que les conditions initiales (plutôt sèche pour le premier et plutôt humide pour le second) peuvent significativement influencer les performances des toitures végétalisées.

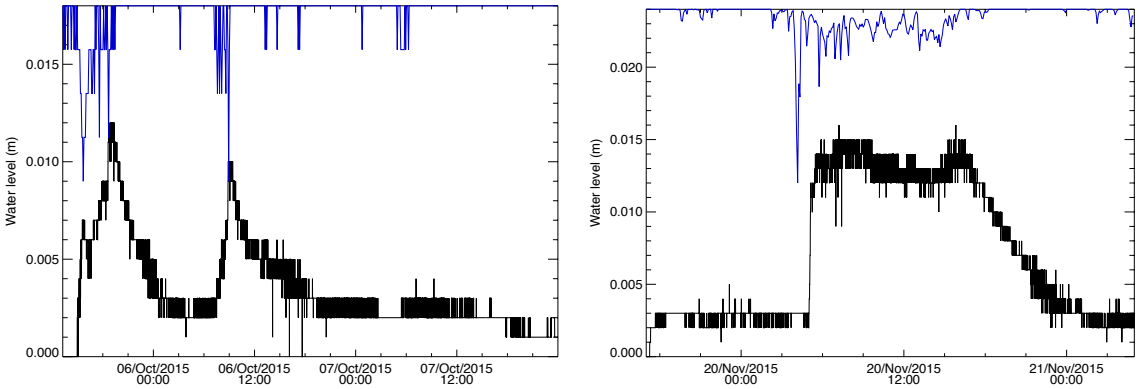

Figure 43. *Réponses hydrologiques observées sur une partie de la Vague Verte à 2 événements pluvieux : 6 octobre 2015 (gauche) et 19 novembre 2015 (droite).*

La Vague Verte doit devenir dans les années à venir un véritable site pilote s'intéressant tant à la compréhension des processus qu'à la manière de les évaluer à l'aide d'instruments et de protocoles de mesures innovants. Ainsi, son instrumentation se poursuit aujourd'hui à travers la thèse de Filip Stanic (« Suivi et modélisation à haute résolution des flux hydriques d'une toiture végétalisée, réseaux de capteurs ubiquitaires ») que je co-encadre. Issu d'un partenariat entre les laboratoires HM&Co et Navier de l'ENPC, cette thèse débutée en octobre 2016 vise à proposer des préconisations de mise en œuvre des toitures végétalisées via le développement d'un outil opérationnel en tirant profit de travaux d'instrumentation et de modélisation. Un réseau de 32 sondes TDR est ainsi en cours de déploiement afin de mesurer la teneur en eau et la température en de nombreux points du substrat (Stanic et al., 2018b, 2018c). Je reviendrai plus en détails sur ces travaux dans le chapitre suivant I.II.1.V.4.2).

IV.4. Modélisation multi-échelle :

Bien qu'un certain nombre de modèles aient déjà été développés pour simuler le comportement hydrologique d'une toiture végétalisée (Hilten et al., 2008; Palla et al., 2009; Stovin et al., 2013 par exemple), très peu ont été utilisés pour étudier leur impact à l'échelle du bassin versant urbain (Carter and Jackson, 2007) et encore moins pour s'intéresser à des enjeux directement liés à la gestion des eaux pluviales. Sur la base de ce constat, il est apparu nécessaire de mettre en œuvre un modèle capable de simuler la réponse hydrologique de différents types de toitures végétalisées et que celui-ci soit intégrable dans un modèle pluie-débit dédié au milieu urbain. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre des projets TVGEP et Blue Green Dream, où un modèle conceptuel a été développé et validé grâce aux données collectées sur les toitures instrumentées du Cerema. Il est appelé « modèle TV » par la suite.

IV.4.1. Mise en œuvre d'un modèle conceptuel

Par opposition à une représentation physique des processus dont la définition des paramètres peut s'avérer difficile, et la résolution numérique encore davantage, une approche conceptuelle a été proposée. Celle-ci décompose le comportement du système en sous-processus globaux qui peuvent être représentés à l'aide d'un réservoir, ou d'une série de réservoirs qui se remplissent les uns les autres, et dont la précipitation est une variable d'entrée et le débit produit par la structure celle de sortie. Le fonctionnement et les relations entre ces réservoirs sont régis par des paramètres souvent empiriques. La Figure 44 illustre la structure du modèle développé pour simuler le comportement hydrologique d'une toiture végétalisée, et composée d'une succession de réservoirs représentant chacun une couche du système (végétation, substrat et drainage).

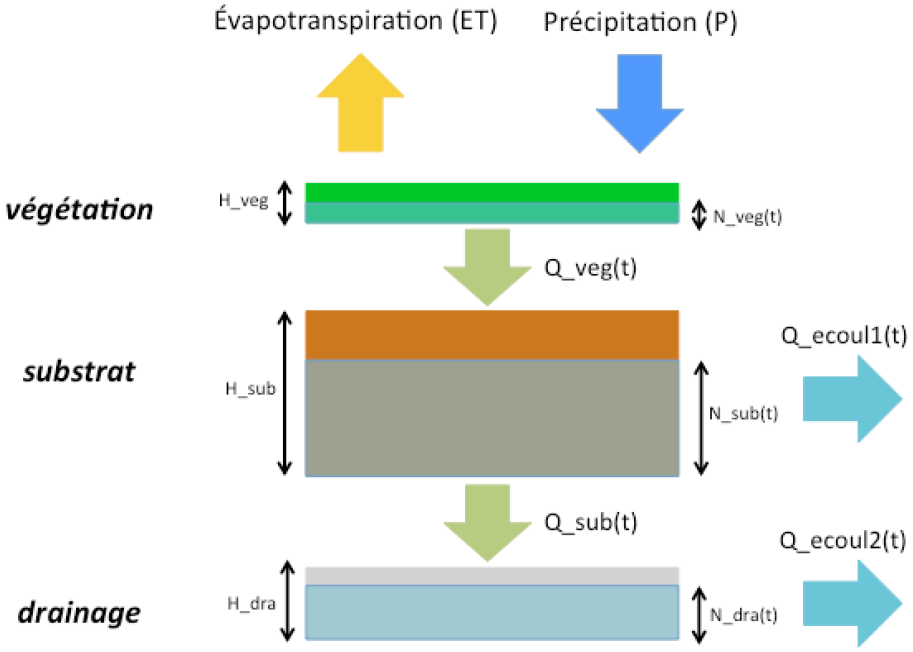

Figure 44. *Structure réservoir d'un modèle simple représentant le fonctionnement hydrologique d'une toiture végétalisée*

Le modèle TV a été ajusté à l'aide des données du Cerema pour les toitures Ref (3 cm de substrat) et V1 (15 cm). La série d'observations disponibles à l'époque (juin 2011-juin 2012) a été divisée en deux sous-périodes pour la calibration et la validation du modèle, comprenant chacune une saison sèche et une saison humide. Au final, les résultats obtenus pour les deux toitures furent très satisfaisants avec des critères de Nash élevés (> 0.7) et une erreur faible sur les volumes (< 10%) pour la période de calibration (voir Tableau 10). Ces bons résultats

ont été confirmés par l'application du modèle sur la sous-période de validation avec l'obtention de critères similaires.

	Nash calib.	Erreur calib.	Nash valid.	Erreur valid.
Ref	0.72	9%	0.64	5%
V1	0.82	5%	0.80	9%

Tableau 10. Résultats de la modélisation des TTV Ref et V1 sur les périodes de calibration et de validation

En isolant les événements les plus significatifs (débits > 0,1 l/s) de la période d'observation, on peut se rendre compte que la dynamique du comportement de la toiture est particulièrement bien représentée (cf. Figure 45). Les montées au pic comme les périodes de récession sont toutes bien reproduites. Notons que les erreurs sur les volumes (sous-estimés par le modèle) peuvent provenir d'une mauvaise évaluation de l'évapotranspiration. Ici les données journalières d'évapotranspiration potentielle fournies par Météo France à Villacoublay (10 km de Trappes) ont été utilisées. Ces valeurs ont été pondérées à l'aide de coefficients saisonniers afin d'estimer l'évapotranspiration réelle.

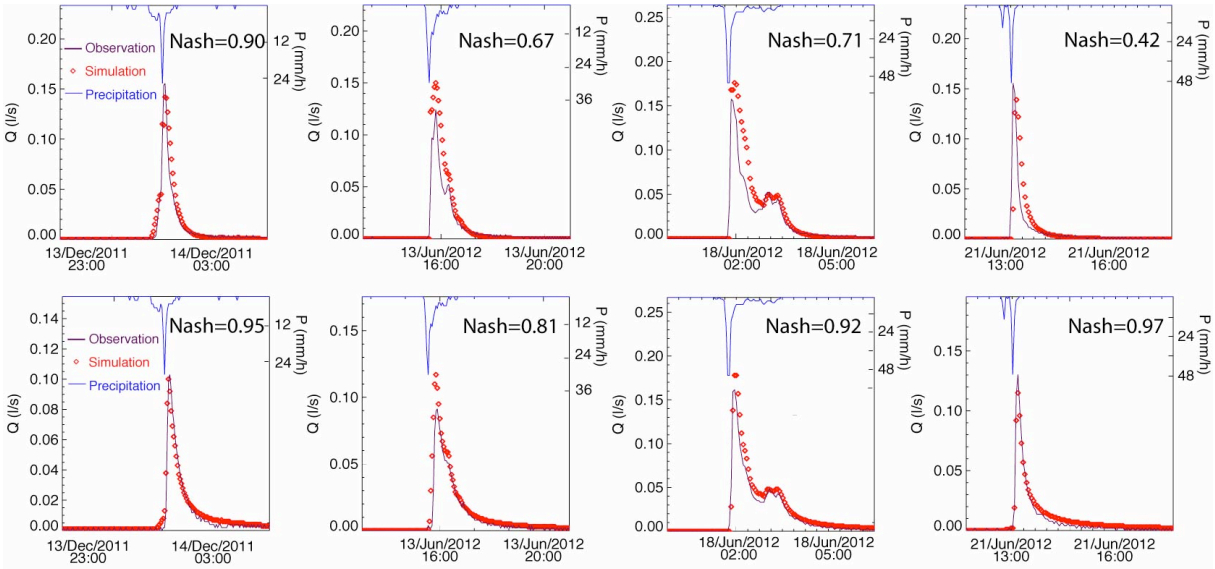

Figure 45. *Comparaison entre débits simulés et observés pour les toitures Ref (haut) et V1 (bas)*

IV.4.2. Facteurs d'influence

Dans un second temps, le modèle TV a servi à comparer les réponses hydrologiques des toitures végétalisées Ref et V1 à celle d'une toiture imperméable, et à s'interroger sur les variables hydrométéorologiques influençant leurs comportements respectifs. Ces travaux devaient aussi permettre de se questionner sur la possibilité d'anticiper ces réponses à partir de la seule connaissance de ces variables. Pour se faire un certain nombre de caractéristiques hydrométéorologiques a été déterminé à l'échelle de l'événement pluvieux : intensités maximales enregistrées pendant 5, 30 et 60 minutes, précipitation totale, durée de l'événement, antécédent pluviométrique (cumul de pluie lors des 15 derniers jours) et état de saturation du substrat en début d'événement (estimé à l'aide du niveau du réservoir concerné dans le modèle TV). Celles-ci ont été calculées pour 54 événements pluvieux significatifs extraits d'une chronique de pluie francilienne s'étalant de 1993 à 2011, et sur laquelle le modèle TV a été exécuté. Ces épisodes couvrent de larges gammes de valeurs avec des intensités variant de 6 à 68 mm/h, des durées de 10 minutes à plus de 8 heures, et des cumuls de précipitation de 7 à 112 mm.

La réponse hydrologique des TTV a été appréhendée en termes de réduction de débit et de volume ruisselé à l'aide des indicateurs d'impact suivants :

$$\Delta Qp = \frac{(Qp_imp - Qp_veg)}{Qp_imp} \times 100$$

$$\Delta V = \frac{(V_imp - V_veg)}{V_imp} \times 100$$

Où *Qp_imp* et *V_imp* sont les débits de pointe et le volume total ruisselé déterminés pour un toit imperméable et *Qp_veg* et *V_veg* ceux déterminés pour un toit végétalisé.

Une régression multiple (de type Stepwise) a ensuite été mise en œuvre pour déterminer parmi ces caractéristiques hydrométéorologiques celles qui expliquent au mieux la variabilité des indicateurs d'impact. Cette procédure a permis de sélectionner les caractéristiques les plus influentes pour prévoir la réponse hydrologique sur la base d'une combinaison linéaire de celles-ci.

	Imax5	Imax30	Imax60	Ptot	Durat.	Pant.	SoilSat	COR
ΔQ_Ref	-0.47	-0.69	-0.67	**-0.71**	-0.44	-0.24	**-0.36**	0.75
ΔV_Ref	-0.38	-0.49	**-0.48**	**-0.54**	-0.45	-0.27	**-0.44**	0.68
ΔQ_V1	-0.50	-0.71	-0.69	**-0.69**	-0.40	-0.38	**-0.68**	0.90
ΔV_V1	-0.50	-0.46	**-0.46**	**-0.50**	-0.34	-0.44	**-0.76**	0.89

Tableau 11. Corrélations entre les caractéristiques hydrométéorologiques et les indicateurs d'impact (celles conservées par la procédure stepwise sont en gras), COR est la corrélation entre les indicateurs déterminés à l'aide de la combinaison linéaire et du modèle TV.

La précipitation est apparue comme un facteur influençant grandement la réponse hydrologique des toitures végétalisées (cf. Tableau 11). Bien que le pas de temps de 5 minutes soit proche du temps de réponse de la toiture, la pluie totale calculée sur l'ensemble de l'événement semble plus déterminant. Comme cela a déjà été évoqué ici, ainsi que dans d'autres travaux (Carson et al., 2013; Fassman-Beck et al., 2013b), plus la précipitation est importante et plus l'impact des toitures végétalisées est faible. Quelle que soit la toiture étudiée, la durée de l'événement et l'antécédent pluviométrique ont quant à eux très peu d'influence. Les conditions initiales de saturation représentées à travers le niveau dans le réservoir substrat ont montré par contre une relative importance, et ce plus particulièrement pour le substrat le plus épais (le substrat le plus mince ayant souvent le temps de retrouver sa capacité de rétention entre deux événements pluvieux). Les deux caractéristiques que sont la précipitation totale et l'état de saturation initiales ont donc été conservées pour prévoir les impacts hydrologiques. L'intensité maximale calculée sur 60 minutes a été elle aussi prise en compte pour la détermination des impacts sur le volume ruisselé. Au delà de cette durée, très proche du temps de concentration de la toiture, la plupart de l'eau précipitée est directement ruisselée. Au final, les coefficients de régression obtenus sont plutôt bons (entre 0,68 et 0,90, cf. Tableau 11), et ont mis en exergue des capacités prédictives intéressantes de la part des caractéristiques hydrométéorologiques conservées.

IV.4.3. Intégration à l'échelle urbaine

Comme évoqué précédemment, la partie 4 du projet TVGEP consistait à étudier dans quelle mesure les bénéfices, constatés en termes de ruissellement à l'échelle de toitures instrumentées (de l'ordre de quelques dizaines de m^2), pouvaient être transposés à l'échelle du bassin versant (de l'ordre de quelques km^2). Pour se faire, le modèle TV a été intégré à un modèle grande échelle pour en étudier l'impact sur un bassin versant. Ce travail a été réalisé à

l'aide de SWMM (Rossman, 2016) qui est un modèle d'hydrologie urbaine développé par l'agence de la protection de l'environnement des Etats-Unis (USEPA). Il permet de simuler, à l'échelle du bassin, les flux d'eaux pluviales circulant en surface et dans les réseaux d'assainissement. Reposant sur une structure semi-distribuée, il fragmente le bassin versant étudié en petites parcelles sur lesquelles est effectué le bilan hydrique. Sur chacun de ces sous-bassins versants, un pourcentage de surface théoriquement recouvert par des toitures végétalisée est déterminé (sur la base du *Pg* présenté en section IV.2.1). Une telle représentation de l'espace ne permet pas de distinguer l'agencement des différents types de surface au sein du sous-bassin, mais a l'avantage d'être économe en temps de calcul et de pouvoir réaliser des simulations en continu sur de longues périodes de temps (plusieurs années).

Pour palier ces inconvénients, le modèle TV a aussi été introduit dans le modèle Multi-Hydro dans le cadre du projet européen Blue Green Dream. Développé à l'Ecole des Ponts ParisTech (https://hmco.enpc.fr/portfolio-archive/multi-hydro/), Multi-Hydro permet de simuler le comportement hydrologique de bassins versants de toutes tailles en réponse à un ou plusieurs événements pluvieux (El Tabach et al., 2009; Giangola-Murzyn, 2014; Gires et al., 2015; Ichiba et al., 2017). C'est un modèle distribué qui prend en considération l'hétérogénéité spatiale de l'occupation des sols sous forme d'une grille pixélisée dont on peut choisir la résolution. Cette configuration permet : (i) de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des précipitations, (ii) de mieux considérer les interactions entre les surfaces perméables et imperméables, (iii) de localiser précisément les infrastructures atypiques comme les toitures végétalisées sur le territoire étudié. Multi-Hydro gère les interactions entre plusieurs modèles à base physique (ne nécessitant pas de calibration) et représentant différents composants du cycle de l'eau en ville (cf. Figure 46). Il comprend un modèle de surface qui s'intéresse aux processus d'infiltration (de type Green-Ampt) et de ruissellement, un modèle de sub-surface représentant la rétention de l'eau dans le sol (reposant sur les équations de Richards) et un modèle de drainage représentant le réseau d'eaux pluviales dans toute sa complexité (transfert modélisé suivant les équations de Saint-Venant). Multi-Hydro a ainsi servi de modèle pour s'interroger sur la mise en œuvre d'une modélisation hydrologique haute résolution et la représentation d'un bassin versant urbain qui en découle via le stage d'Elektra Skouri-Plakali dont j'ai participé à l'encadrement (Skouri-Plakali et al., 2018).

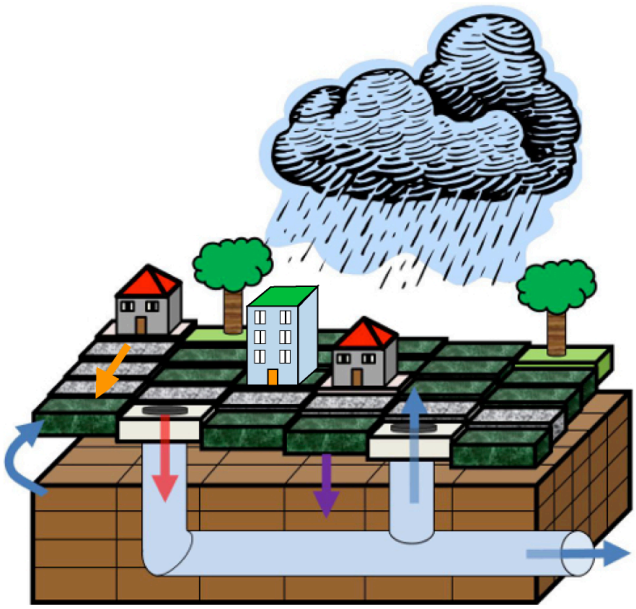

Figure 46. *Schéma de principe de Multi-Hydro avec les différents échanges possibles entre la surface, le sol et le réseau d'eaux pluviales*

IV.4.4. Conséquences pour la gestion des eaux pluviales

Ces deux modèles hydrologiques urbains, dans lesquels le modèle TV a été intégré, ont permis d'étudier les impacts d'une diffusion des toitures végétalisées dans un grand nombre de situations que nous synthétisons ici.

a) Débordement et déversement

En collaboration avec la Direction de l'Eau du Conseil Général des Hauts-de-Seine (92), des cas d'étude réels où l'apport des toitures terrasses végétalisées pouvait avoir des effets bénéfiques afin de résoudre des problèmes opérationnels ont été choisis. Il s'agissait de deux bassins versants confrontés à des problématiques distinctes de saturation de réseau (voir Figure 47) :

- Le Bassin de Boulogne-Billancourt (5,5 km^2) : très densément urbanisé, il est soumis à des problèmes de déversements (rejets en Seine en de nombreux points).
- Le bassin de Châtillon (2,4 km^2) : il est soumis à des problèmes d'inondation (débordement) essentiellement localisés sur le Boulevard de Vanves en amont de l'exutoire. Ces débordements se produisent lorsque le débit à l'exutoire est supérieur à la valeur seuil de 5 m^3/s.

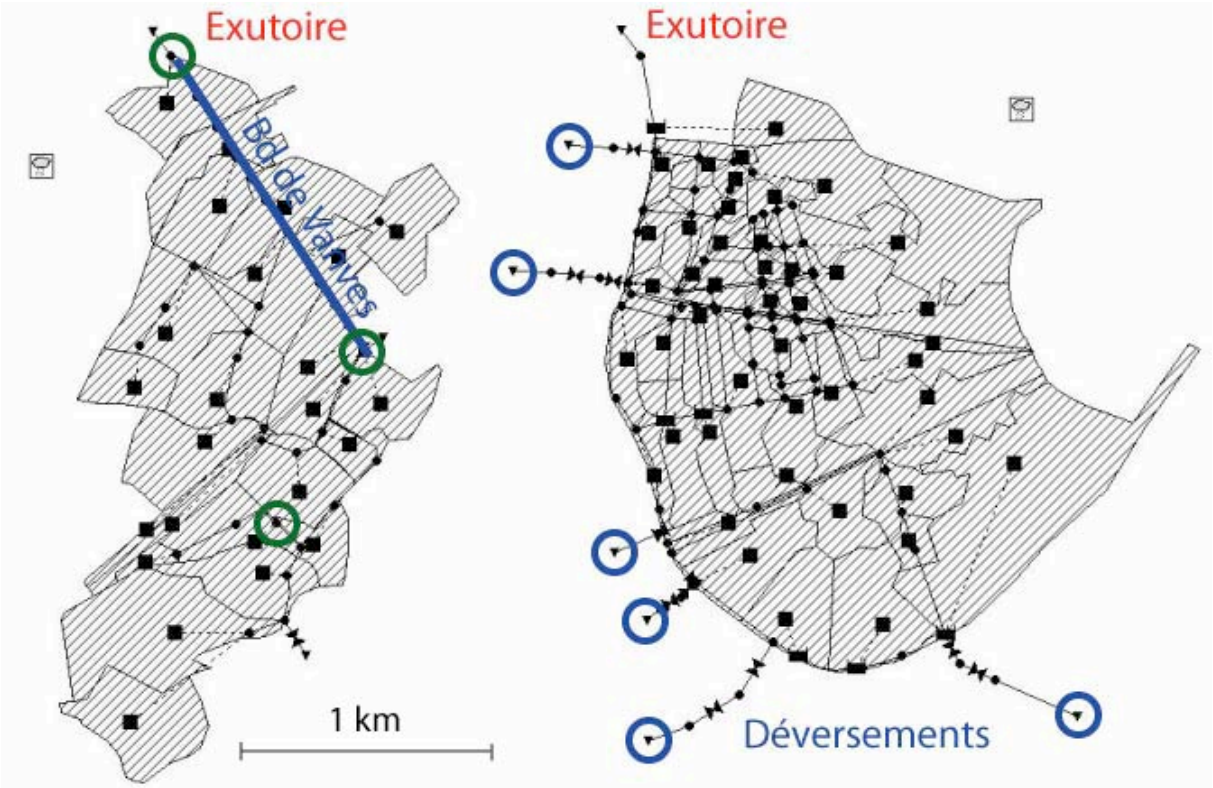

Figure 47. *Représentation des bassins de Chatillon (à gauche) et de Boulogne-Billancourt (à droite) sous SWMM : les risques de débordement et de déversement sont indiqués en bleu, les exutoires pour lesquels les simulations ont été effectuées sont en vert.*

Après avoir validés les schémas de modélisation illustrés sur la Figure 47 à l'aide de mesures de débits en certains points des bassins, l'impact des toitures végétalisées a été appréhendé à l'aide de scénarios de végétalisation reposant sur le potentiel de végétalisation présenté en Section IV.2.1 et illustré Figure 35. Le potentiel général étant une estimation maximisante de la surface de toit disponible pour l'installation de végétation, différents scénarios couvrant 12,5%, 25%, 50% et 100% de ce potentiel ont été déterminés et comparés à la situation de référence (situation actuelle sans végétation). L'emploi des deux types de toitures végétalisées Ref (S3E) et V1 (S15E) a été étudié.

Concernant le risque de débordement à Châtillon :
D'une manière générale, les résultats obtenus pour les deux types de toiture étaient très proches, avec néanmoins une diminution de débit toujours plus importante pour la couche de substrat la plus épaisse. Les débits de pointe simulés semblent être influencés par la mise en œuvre de toitures végétalisées lorsqu'une partie significative du potentiel de végétalisation est couverte. 50% de ce potentiel (qui représente 10% de la superficie totale du bassin) doit être végétalisé afin de réduire le débit de pointe de 15% ; et ce quelle que soit la période de retour de l'événement pluvieux considéré (Figure 48). Lorsque 100% du potentiel est recouvert, la diminution du débit de pointe peut atteindre jusqu'à 35%. D'une manière générale, la réduction du débit de pointe semble proportionnelle au pourcentage de potentiel de végétalisation effectivement recouvert (un doublement de la surface végétalisée entraîne le doublement de la réduction de débit).

Le débit de 5 m^3/s -synonyme de débordement- est caractérisé par une période de retour légèrement supérieure à un an. On s'aperçoit qu'une végétalisation faible, de l'ordre de 12.5 ou 25%, est suffisante pour sensiblement modifier cette période de retour et rendre ce phénomène moins fréquent. On n'atteint néanmoins pas 2 ans malgré la végétalisation à 100% du potentiel à l'aide d'une toiture de type S15E.

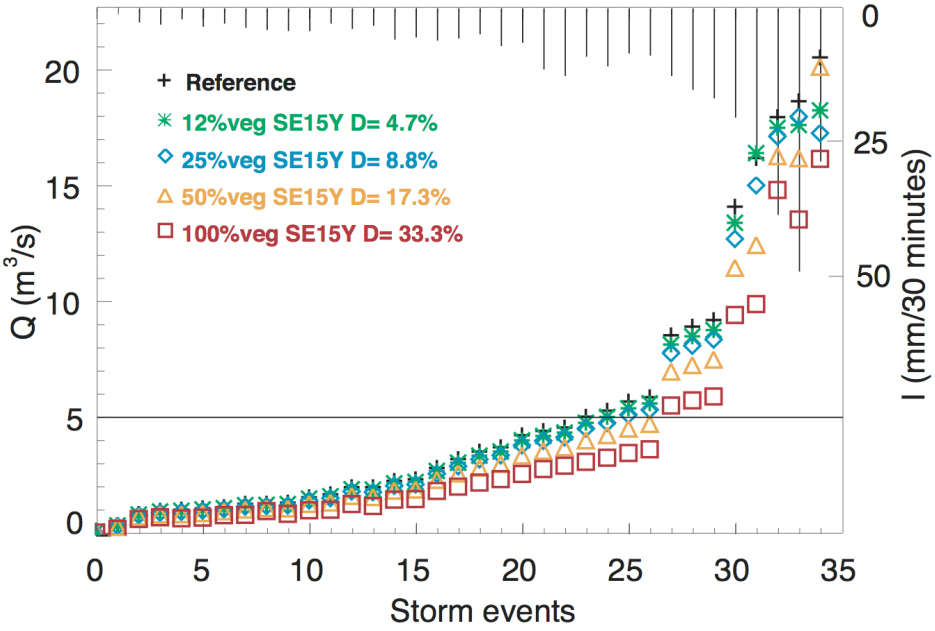

Figure 48. *Impacts des différents scénarios de végétalisation sur le débit de pointe à l'exutoire du bassin de Châtillon et sur le risque de débordement matérialisé par la valeur seuil de 5 m^3/s*

Concernant le risque de déversement à Boulogne-Billancourt :
La distribution statistique des volumes journaliers déversés en Seine autour de Boulogne-Billancourt est illustrée Figure 49. Quel que soit le scénario de végétalisation utilisé, la distribution est modifiée pour les valeurs courantes de déversement comme pour les événements les plus rares. La réduction de volume semble toutefois être liée à la fréquence des phénomènes observés. Plus l'événement est fréquent et plus la végétalisation des toitures réduit la quantité de volumes déversés en Seine. Le risque de débordement est ainsi complètement éliminé pour les événements les plus courants (période de retour inférieure à 2 mois) lorsque 100% du potentiel de végétalisation est effectivement recouvert. Pour les événements moins fréquents (2 mois < T < 1 an), les volumes peuvent être divisés par deux dans les mêmes circonstances. Les scénarios intermédiaires (50% du potentiel est recouvert) offrent une réduction de 30% de ces volumes.

A l'image des résultats obtenus sur le bassin de Châtillon, il apparaît que le pourcentage de toitures végétalisées est plus significatif que le type de toiture utilisée (S3E ou S15E), bien que la structure dotée de la couche de substrat la plus épaisse est censée infiltrer davantage les précipitations.

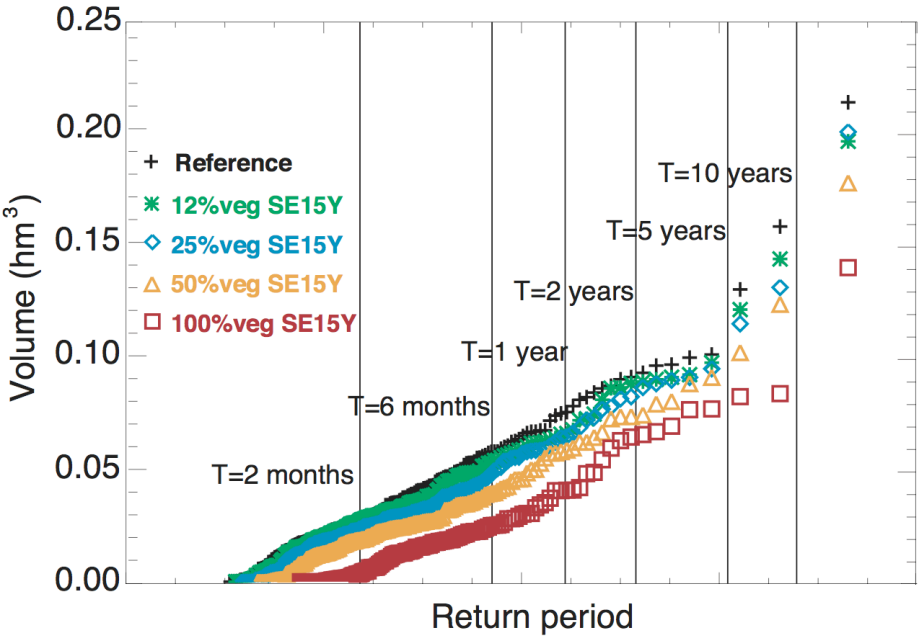

Figure 49. *Impacts des différents scénarios de végétalisation sur le volume déversé en Seine sur le bassin de Châtillon*

b) L'intérêt de l'approche distribuée et le phénomène de concomitance

Comme évoqué précédemment, la modélisation pluie-débit distribué permet de tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du territoire étudié, autant que de celle des précipitations. Appliqué à l'échelle de l'événement pluvieux, le modèle Multi-Hydro a donc permis d'étudier l'influence respective des facteurs suivants sur les performances des toitures végétalisées à l'échelle du bassin versant urbain : (i) conditions initiales de saturation des substrats, (ii) localisation de la végétalisation, (iii) variabilité spatiale des précipitations.

Méthode :

Pour se faire, le modèle a été appliqué sur le bassin versant du Loup (75 ha) situé à cheval sur les communes de Villepinte et Tremblay-en-France (Seine-Saint-Denis). Doté d'un réseau séparatif, le bassin est essentiellement composé de bâtiments industriels à toits plats dont on a supposé possible la totale végétalisation à l'aide d'un substrat de 3 cm de type Ref (voir Figure 50). Le schéma de modélisation du bassin dans sa configuration actuelle avait été préalablement validé lors de travaux antérieurs à l'aide des données collectées au niveau du bassin de rétention départemental qui contrôle son exutoire (Gires et al., 2015). Appliquée sur 16 événements pluvieux, cette configuration initiale a été modifiée de la manière suivante : (i) en végétalisant artificiellement tous les toits plats et en en faisant varier l'état de saturation en début d'événement (10%, 30% et 50%), (ii) en végétalisant seulement un tiers des toits, respectivement situés à l'amont, au centre et à l'aval du bassin. Pour tenir compte de la variabilité spatiale des précipitations, des événements courants ont été désagrégés spatialement à l'aide d'une technique de downscaling reposant sur les multifractales universelles (Schertzer and Lovejoy, 1987; Gires et al., 2013). Il en résulte un ensemble de 50 réalisations caractérisées par une résolution spatiale de 10 m. Ces différentes simulations ont été évaluées à l'aide des indicateurs d'impact liés aux réductions de débit de pointe ou de volume ruisselé définis précédemment (Section IV.4.2).

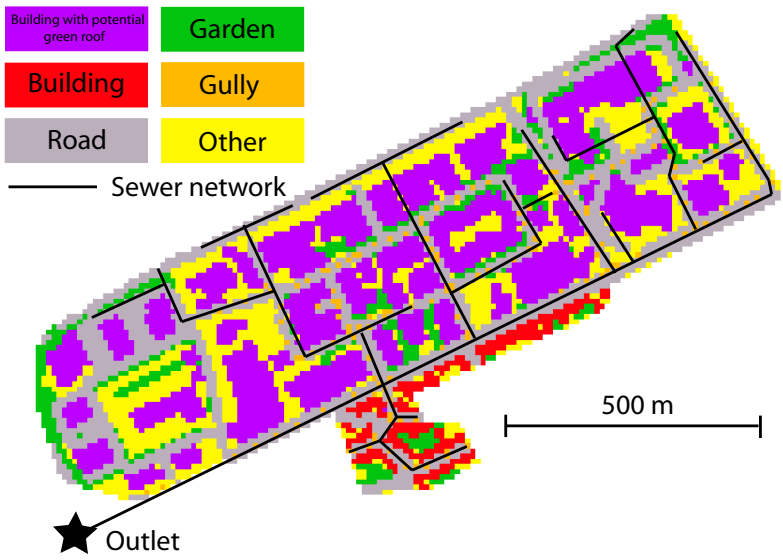

Figure 50. *Représentation de l'hétérogénéité de l'occupation des sols du bassin du Loup telle que perçue par Multi-Hydro.*

Résultats généraux :
Les résultats obtenus ici ont confirmé que les toitures végétalisées ont un impact significatif sur le ruissellement urbain en termes de débit de pointe et de volume ruisselé, et ce en fonction de la précipitation et de l'état initial de la saturation du substrat (voir Tableau 12). Ces réductions peuvent atteindre environ 70% pour les cas les plus favorables (précipitations et saturation initiale faibles). Ces valeurs importantes s'expliquent autant par la présence des toitures végétalisées que par les pertes initiales inhérentes aux zones imperméables.

Pour les événements communs (période de retour inférieure à 1 an), la mise en place de toitures végétalisées permet de stocker au moins 20% du volume ruisselé dans la plupart des cas. En comparaison, la réduction du débit de pointe semble être moins prononcée et davantage liée à la distribution temporelle des précipitations. Elle peut être supérieure à 10% pour un large éventail de situations : intensité ou précipitation totale faible ou modérée. Lorsque l'événement est composé de plusieurs pics de pluie, la structure végétalisée est capable d'en stocker les premiers mm et d'atténuer les pics de débit correspondants. Néanmoins, les pics suivants restent pratiquement inchangés car le substrat est saturé et n'a pas le temps de récupérer sa capacité de rétention. Notons qu'en de très rares cas, les toitures végétalisées peuvent produire un débit de pointe plus élevé que celui relatif à la situation de référence. Nous reviendrons plus spécifiquement sur ces situations de concomitance plus loin.

Influence des conditions initiales :
Les résultats ont confirmé que l'état initial de saturation est un facteur clé influençant la réponse hydrologique des toitures végétalisées : plus le substrat est saturé, plus faible est son impact. Dans des conditions sèches (saturation à 10%), la réduction du volume ruisselé est d'au minimum 15% et atteint plus de 30% pour les événements courants (période de retour inférieure à un an). La réduction du débit de pointe est plus variable, mais peut être supérieure à 80% pour les événements les plus courants (voir Figure 51). Lorsque le substrat est saturé (IS = 50%), les toitures végétalisées peuvent rester efficaces (les deux indicateurs sont respectivement d'environ 30% et 10%). La différence entre les états initiaux de saturation de 10% et 50% représente une capacité de stockage d'environ 6 mm pour ce substrat de 3 cm d'épaisseur. Cela semble suffisant pour réduire de façon significative les conséquences d'un large éventail d'événements pluvieux. Pour cette raison, la mise en œuvre d'une telle toiture végétalisée est plus efficace pour des événements de pluie standard et courts que pour des événements longs pour lesquels le substrat pourrait être saturé rapidement.

			Condition initiale						Scenarios de végétalisation					
			IS=50%		IS=30%		IS=10%		Ouest		Centre		Est	
Date	Précip. (mm)	Période de retour	*ΔV* (%)	*ΔQp* (%)	*ΔV* (%)	*ΔQp* (%)	*ΔV* (%)	*ΔQp* (%)	*ΔV* (%)	*ΔQp* (%)	*ΔV* (%)	*ΔQp* (%)	*ΔV* (%)	*ΔQp* (%)
14/07/2010	40.60	5<<10 ans	11.0	9.3	15.3	8.8	19.9	9.2	13.2	15.5	13.2	7.9	13.2	15.6
12/07/2010	32.60	2<<5 ans	2.5	2.6	8.6	3.7	14.5	6.5	7.9	1.8	7.4	4.8	7.8	4.9
12/06/2010	26.40	2 ans	4.6	4.7	12.3	15.7	20.1	30.1	9.8	11.6	9.4	15.4	9.6	14.2
05/06/2011	21.00	2 ans	2.2	1.1	12.1	5.7	18.9	12.2	3.5	2.7	3.4	2.2	3.4	3.5
03/06/2012	23.20	1 ans	10.2	5.8	18.4	6.2	26.5	13.2	13.3	6.8	13.2	6.6	13.2	7.8
26/08/2011	23.00	1 ans	1.8	-0.9	7.6	3.7	17.1	9.6	3.2	7.6	3.1	5.6	3.1	7.6
21/06/2012	15.60	1 ans	3.2	2.8	15.1	10.6	34.5	29.0	11.9	8.8	11.6	10.5	11.6	7.4
19/05/2012	13.20	6 mois	3.5	-3.9	17.9	-2.6	35.9	6.1	9.6	1.3	9.4	0.2	9.5	-0.2
03/11/2012	15.60	6 mois	6.9	2.9	20.4	3.2	33.9	3.0	11.5	4.9	11.3	4.7	11.5	2.7
22/07/2011	8.80	6 mois	14.1	36.7	33.2	50.3	62.4	85.9	24.8	42.7	24.5	45.0	23.7	36.4
03/07/2010	16.00	3 mois	7.5	1.2	21.3	21.1	30.1	34.5	12.4	7.6	12.3	7.2	12.5	9.2
15/12/2012	10.80	3 mois	2.7	-12.1	20.0	-11.8	42.9	0.3	5.1	0.0	4.9	0.0	4.9	0.0
15/12/2011	14.40	3 mois	4.8	-0.4	19.8	1.7	34.9	1.7	9.0	-1.2	9.0	0.0	9.1	1.3
23/10/2010	6.00	3 mois	26.5	24.2	56.3	69.4	71.7	81.5	32.1	31.4	32.0	34.7	31.7	32.5
05/08/2011	8.80	1 mois	9.1	15.6	28.7	14.8	50.6	64.7	18.3	24.1	18.1	26.7	17.4	29.8
25/03/2010	6.40	1 mois	25.4	12.6	48.1	23.9	70.9	73.0	34.6	17.9	34.2	25.6	33.2	19.4

Tableau 12. *Indicateurs d'impact calculés pour chaque événement pluvieux en modifiant les conditions initiales et la localisation de la végétalisation*

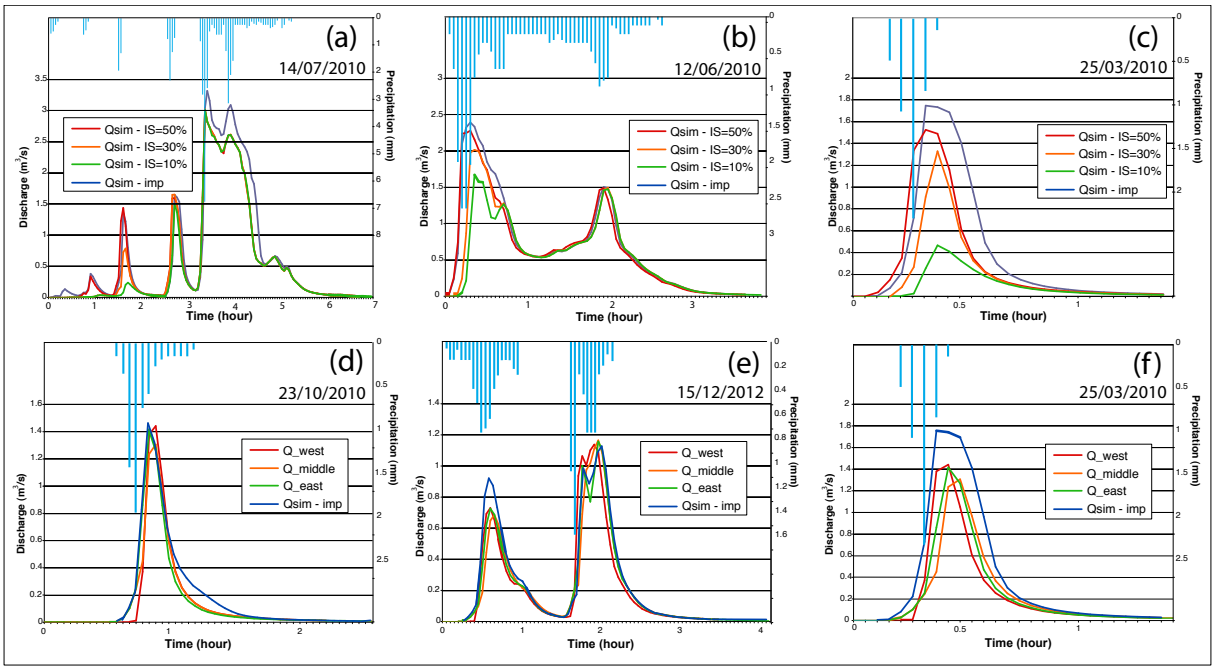

Figure 51. *Comparaison des débits simulés pour la situation de référence et celles obtenus en faisant varier l'état de saturation initiale du substrat des toitures (haut), et la localisation de la végétalisation (bas).*

Influence de la localisation des toitures végétalisées :
La végétation couvrant ici seulement 1/3 des surfaces de toit, les impacts sur le ruissellement ont en conséquence été beaucoup plus modestes. Il est toutefois intéressant de noter que la répartition spatiale des toitures végétalisées n'a que peu d'influence sur la réponse hydrologique du bassin du Loup. Pour les deux événements les plus faibles (25/03/2010 et 23/10/2010), la montée au pic semble être retardée d'un pas de temps entre les différents scénarios de végétalisation amont et aval (voir Figure 51 –d et –f). Dans la configuration d'une végétalisation de la partie aval du bassin, le débit provenant de cette zone est ralenti et se retrouve synchronisé avec les contributions provenant de l'amont. Ces événements représentent un autre exemple intéressant de situation de concomitance. Enfin, la répartition spatiale de la végétalisation n'a bien sûr aucune influence sur la réduction du volume ruisselé.

Influence de l'hétérogénéité spatiale des précipitations :
On présente ici les résultats obtenus pour un événement caractérisé par un cumul de pluie de 8,3 mm et une durée de 6 heures. Lorsque l'on tient compte de la variabilité spatiale des précipitations, la réponse du bassin peut être modifiée de façon significative (voir Figure 52). Déjà pour la situation de référence (toits imperméables), le débit de pointe varie entre 0,10 et 0,15 m^3/s. Lorsque l'on végétalise les toitures, ces valeurs oscillent entre 0,06 et 0,11 m^3/s. Sans surprise au regard de la période de retour de l'événement étudié (1 mois), les performances de la végétalisation sont très significatives : les diminutions moyennes de volume ruisselé et de débit de pointe sont d'environ 35%. La mise en œuvre de toitures végétalisées contribue à réduire considérablement la quantité d'eaux pluviales atteignant le réseau, tandis que ΔQp varie entre 10% et 56% selon le scénario de pluie.

Il est important de remarquer que ces résultats satisfaisants sont surtout concentrés sur les conséquences du premier pic de pluie. Pour celui-ci, la réponse du bassin versant est clairement atténuée mais également très dispersée (écart-type de 0,011 m^3/s dans les deux cas). Inversement, la réponse au deuxième pic de pluies est systématiquement augmentée par l'apport des toitures végétalisées (de 0 à 33% avec une valeur moyenne de 10%). La gamme de valeurs simulées est également plus dispersée (écart-type de 0,004 m^3/s pour la situation de référence et 0,008 pour la végétalisation), ce qui augmente encore la sensibilité du bassin

versant vis-à-vis des précipitations. Les diminutions de premier débit de pointe et les augmentations du second sont en réalité très corrélées (coefficient de corrélation de 0,62), ce qui signifie que l'atténuation du premier semble provoquer une accentuation du second. Dans ce cas, le substrat stocke la pluie pendant la première partie de l'événement, avant de la libérer simultanément à l'arrivée du second pic de précipitation.

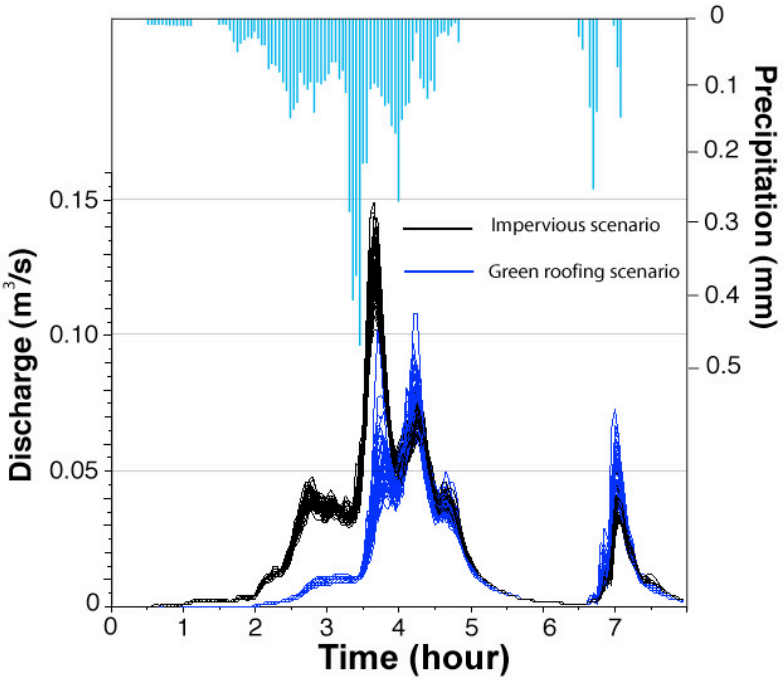

Figure 52. *Comparaison des débits simulés pour les situations de référence et végétalisée à un ensemble de 50 champs de précipitations haute résolution.*

Comme cela a déjà été mentionné précédemment, ce cas d'étude représente un nouvel exemple de situation de concomitance. Ces résultats sont liés à la fois à la répartition spatio-temporelle des précipitations et à la configuration spécifique du bassin étudié (en particulier sa géométrie, la distribution de son occupation des sols, et l'agencement de son réseau d'eaux pluviales). La superposition dans l'espace et le temps des réponses des zones imperméables et végétalisées à un événement pluvieux complexe (composé par plusieurs pics de pluie) peut générer un pic de débit supérieur à celui produit par la situation de référence (imperméable).

c) Respect de la réglementation

Les collectivités territoriales en charge des réseaux d'eaux pluviales conditionnent généralement le raccordement de toute nouvelle zone au réseau existant par le respect de règles qui peuvent varier d'un territoire à un autre (Petrucci et al., 2013). Celles-ci peuvent se matérialiser sous la forme d'une hauteur de pluie à retenir sur place (exprimé en mm) ou d'un débit de fuite à imposer au niveau de la connexion avec le réseau (exprimé en l/s/ha). Nous nous sommes donc interrogés sur la pertinence d'utiliser des toitures végétalisées pour respecter ces réglementations à l'échelle de la parcelle.

Méthode :

A cette fin, une parcelle virtuelle composée de 100 m^2 de toiture et de 100 m^2 de surface imperméables (route, parking) a été modélisée à l'aide du modèle SWMM augmenté du module TV présenté précédemment. Nous y avons imposé différentes contraintes (rétention de 5 et 10 mm, et débit de fuite de 2 et 10 l/s/ha) et testé plusieurs alternatives implémentées sur le toit pour les faire respecter : installation d'un réservoir d'une hauteur de 15 cm régulé (à 2 et 10 l/s/ha), installation d'un espace de stockage d'une hauteur égale aux prescriptions (5 et 10 mm), mise en place de toitures végétalisée de 3 et 15 cm (SE3Y=Ref et SE15Y=V1). Les

différentes simulations ont été effectuées sur une chronique de pluie de 22 ans (1990 to 2012) fournie par la direction de l'eau de Seine-Saint-Denis, et dans laquelle 6632 événements hydrologiques ont été extraits.

Contrainte de volume :
Contrairement à la situation de référence (toit imperméable), les toitures végétalisées ont permis de respecter les prescriptions de rétention (5 ou 10 mm) dans la grande majorité des cas (environ 90% de l'ensemble des événements, cf. Tableau 13). Les performances sont nettement meilleures pour le substrat le plus épais qui est capable d'assurer cette régulation pour l'ensemble des périodes de retour (environ 80% des événements classés). Pour une prescription de 10 mm, le SE3Y est limité aux événements pluvieux caractérisés par une période de retour inférieure à 1 mois (pour plus de 90% des événements). Cette contrainte est plus difficile à respecter car le substrat n'est pas capable de retenir le volume requis pour les deux surfaces (toit et imperméable). En outre, il n'a généralement pas le temps de récupérer sa capacité de rétention entre deux événements. C'est également le cas pour l'infrastructure de stockage qui semble moins performante que la toiture SE15Y malgré une capacité de rétention plus élevée. Celle-ci doit être augmentée pour atteindre une performance similaire. Notons que lorsque seule la surface du toit est considérée (et non la partie imperméable), les deux toitures végétalisées permettent de respecter les contraintes de volume pour quasiment tous les événements pluvieux.

				Période de retour des événements pluvieux							
			All	<1m	1m<<3m	3m<<6m	6m<<1a	1a<<2a	2a<<5a	5a<10a	>10a
		# événement	6332	5820	333	77	59	21	13	6	3
Règles de régulation	V = 5mm	Imp	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		SE3Y	94.8	99.8	54.6	14.3	13.6	19.0	61.5	50.0	0.0
		SE15Y	95.8	99.8	57.7	83.1	94.9	100	100	100	100
		Regulv5	95.2	99.8	54.6	18.3	22.0	19.0	38.5	33.0	33.0
	V = 10mm	Imp	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		SE3Y	86.1	92.6	10.8	2.6	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0
		SE15Y	91.0	92.9	54.6	37.2	47.5	61.9	84.6	83.3	100
		Regulv10	87.6	92.7	23.7	14.7	45.8	42.9	46.1	33.3	33.3
	Q = 2l/s/ha	Imp	42.7	46.5	0.3	0	0	0	0	0	0
		SE3Y	54.9	59.7	0.3	0	0	0	0	0	0
		SE15Y	57.6	62.7	0.3	0	0	0	0	0	0
		Regulq2	50.9	55.3	0.3	0	0	0	0	0	0
	Q = 10l/s/ha	Imp	78.3	85.0	4.2	1.3	0	0	0	0	0
		SE3Y	86.0	92.9	11.4	3.9	1.7	0	0	0	0
		SE15Y	89.2	94.9	30.3	24.7	8.5	0	0	0	0
		Regulq10	84.0	90.8	9.0	5.2	1.7	0	0	0	0

Tableau 13. *Proportion d'événements pluvieux (exprimées en %) pour lesquels les prescriptions de régulation sont respectées en fonction de l'infrastructure implémentée et de la période de retour de l'événement pluvieux*

Contrainte de débit :
L'impact des différentes infrastructures sur le respect des contraintes de débit était moins significatif, du fait du débit produit par la zone imperméable qui n'est pas régulée. Cette contribution au débit total peut facilement atteindre des valeurs supérieures au débit de fuite. Les toitures végétalisées diminuent l'occurrence de débits élevés pour les événements les plus courants, caractérisés par une période de retour inférieure à un mois pour la règle la plus restrictive (2 l/s/ha) et inférieure à 6 mois pour la plus faible (10 l/s/ha). En considérant seulement la composante de toit, les toitures végétalisées deviennent nettement plus efficaces. SE3Y assure une limitation de débit de 10 l/s/ha pour plus de la moitié des événements caractérisés par une période de retour inférieure à 6 mois, alors que SE15Y est performante pour 80% des événements, et ce quelque soit la période de retour. Les résultats sont

relativement similaires pour l'autre limitation de débit (2 l/s/ha) : 75% des événements (T <3 mois) pour SE3Y et 80% des événements sur l'ensemble des fréquences pour SE15Y.

Courbe des débits classés :
La courbe des débits classés représente les distributions des valeurs de débits calculées pour les 7 simulations (Figure 53) et permet une analyse du régime hydrologique englobant les valeurs extrêmes. Elle a montré que les deux configurations de toitures végétalisées diminuent la fréquence des débits intermédiaires (entre 5 et 0,01 l/s). Il apparait que le SE3Y est peu performant sur les hautes valeurs de débit, tandis que le SE15Y est aussi efficace que les systèmes de limitation de débit pour diminuer ces valeurs. Les infrastructures de régulation de volume ont quant à elles très peu d'influence sur la distribution des débits par rapport à la situation de référence. Enfin, comme prévu, la régulation du débit influe sur la distribution des valeurs les plus élevées (le débit le plus élevé est de 4 l/s contre 10 l/s pour la situation de référence). Néanmoins, force est de constater qu'une réduction des débits basse fréquence entraine une augmentation des débits pour les fréquences les plus élevées.

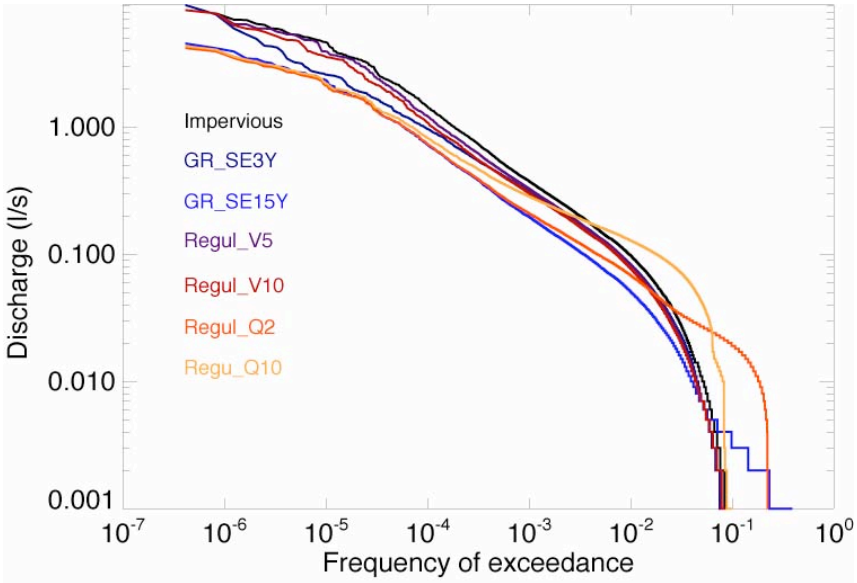

Figure 53. *Courbe des débits classés pour les 7 simulations : « Impervious » correspond à la situation de référence, GR_SE3Y et GR_SE15Y à la végétalisation de la toiture à l'aide de substrat 3 et 15 cm, Regul_V5 et Regul_V10 aux espaces de stockage de 5 et 10 mm, Regul_Q2 et Regul_Q10 aux limitations de débit de 2 et 10 l/s/ha.*

d) Aller plus loin à l'aide de multiples infrastructures bleues et vertes

Une des conclusions des travaux évoqués plus haut était qu'une large diffusion des toitures végétalisées était nécessaire pour être significativement influente sur la gestion des eaux pluviales. De manière plus réaliste, c'est couplées à d'autres techniques alternatives qu'elles peuvent être opérantes à l'échelle du bassin versant. C'est ce que nous avons démontré avec un groupe d'une dizaine d'étudiants de Master dans le cadre de la filière « Eco-conception de la ville durable » de l'ENPC. L'objectif principal de cet enseignement était de faire réaliser aux étudiants un projet d'aménagement durable à la frontière entre les communes de Champs-sur-Marne et Noisy-le-Grand (Eco-cité Descartes). Sur ce site de 10,5 ha, appelé « l'échangeur », il était question de créer un quartier mixte de logements, d'activités et de commerces, et d'en quantifier les performances environnementales, économiques et sociales. La partie hydrologie s'attachait à tester la viabilité d'infrastructures bleues et vertes (IBV) proposées par les étudiants afin de s'assurer du bon fonctionnement du réseau d'eaux pluviales et de respecter les contraintes réglementaires (voir le plan masse Figure 54). Cette étude a été réalisée via des travaux de modélisations effectués à l'aide de la plateforme pluie-

débit Multi-Hydro, où des fonctionnalités nouvelles ont été élaborées pour reproduire les pavés poreux, les noues, et connecter les toitures à ces dernières.

Figure 54. *Plan masse du projet de l'échangeur avec ces différentes infrastructures bleues et vertes*

Différents scénarios d'implantation d'IBV ont été testés. Pour chacun d'eux, la réponse hydrologique du bassin à des pluies de projet d'une durée d'une demi-heure et de périodes de retour allant de 1 mois à 20 ans a été simulée. Pour s'assurer de la pertinence d'une telle implantation, le débit résultant aux exutoires a été comparé aux contraintes réglementaires classiques de 2 et 10 l/s/ha :

- Scenario 0 : configuration « imperméable » sans aucune infrastructure.
- Scenario 1 : seuls des espaces verts (pelouse, foret, potager) sont installés.
- Scenario 2 : tous les toits sont végétalisés à l'aide d'un substrat de 3 cm.
- Scenario 3 : des noues sont implantées et touts les toits environnant y sont connectés.
- Scenario 4 : des pavés poreux sont installés sur toute la zone piétonne.
- Scenario 5 : deux bassins de rétention reprenant la grande majorité du réseau sont construits.
- Scenario 6 : toutes les infrastructures mentionnées ci-dessus sont implantées.

Les résultats de simulation ont confirmé que seule la combinaison de plusieurs infrastructures bleues et vertes permettait de répondre aux contraintes réglementaires. Prises séparément, les différentes solutions ne diminuent pas suffisamment le débit produit par le bassin, et ce même pour les événements les plus courants (voir Figure 55). Malgré cette combinaison, la réglementation la plus stricte (2 l/s/ha) n'est plus respectée dès lors que la période de retour de l'événement pluvieux excède 3 mois. Le respect de cette contrainte (proche du rejet zéro) nécessite la mise en œuvre de mesures plus radicales avec par exemple la connexion de l'ensemble du quartier aux bassins de stockage. La contrainte de 10 l/s/ha est quant à elle satisfaite quelle que soit la période de retour de l'événement pluvieux, pourvu qu'elle soit inférieure à 10 ans.

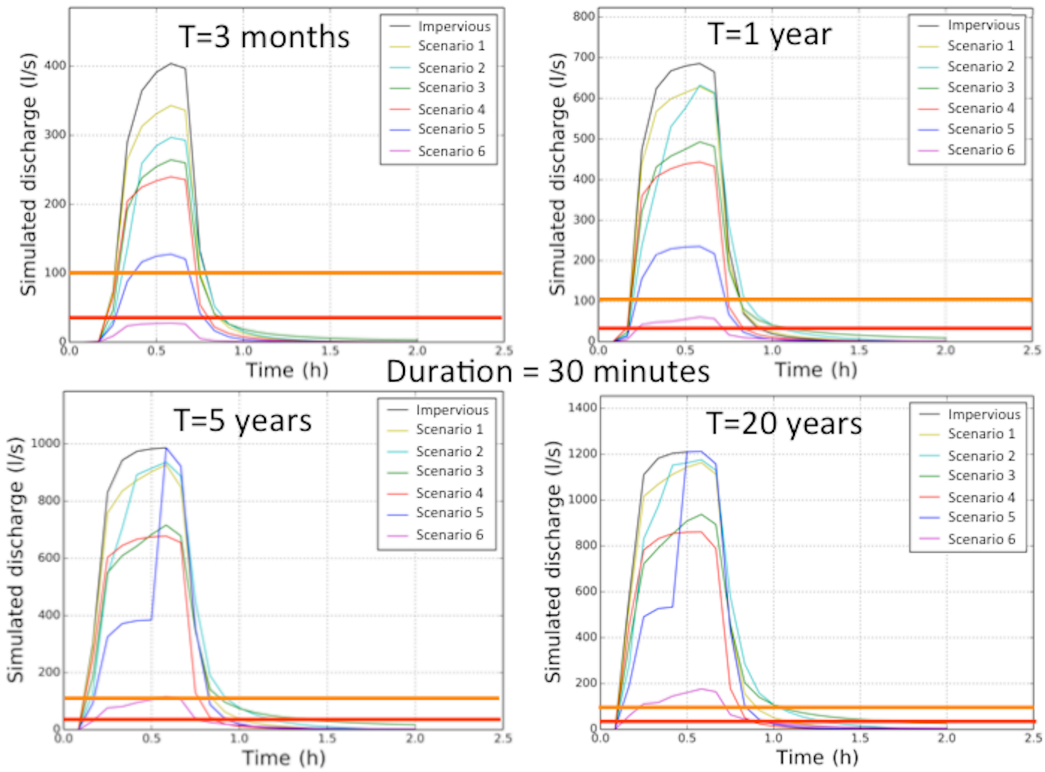

Figure 55. *Débit simulé en réponse à un épisode pluvieux d'une demi-heure pour plusieurs périodes de retour et scénarios d'infrastructures bleues et vertes. Les lignes orange et rouge représentent les contraintes de débit à 10 et 2 l/s/ha*

En complément de ces travaux et en continuité de ce qui a été fait sur le bassin du Loup (cf. Section IV.4.4), une pluie de projet pour laquelle la prescription de 10 l/s/ha était respectée a été désagrégée spatialement à l'aide d'outils multifractals pour tenir compte de la variabilité des précipitations. En premier lieu il en a résulté que la réponse du bassin imperméable (scénario 0) était très fluctuante avec un débit de pointe qui varie entre 929 et 1351 l/s (Figure 56). Cette grande variabilité perdure lorsque toutes les infrastructures bleues et vertes sont implantées. Bien que la consigne de 10 l/s/ha soit respectée lors de l'emploi d'une pluie de projet uniforme, celle-ci n'est désormais plus satisfaite dans la majorité des cas. Cela dénote une fois de plus l'importance de tenir compte des fortes variabilités spatiales et temporelles des précipitations. Ces résultats soulignent aussi les interactions complexes qui peuvent s'opérer entre un environnement urbain composite et les champs géophysiques hétérogènes auxquels il est soumis (ici les précipitations).

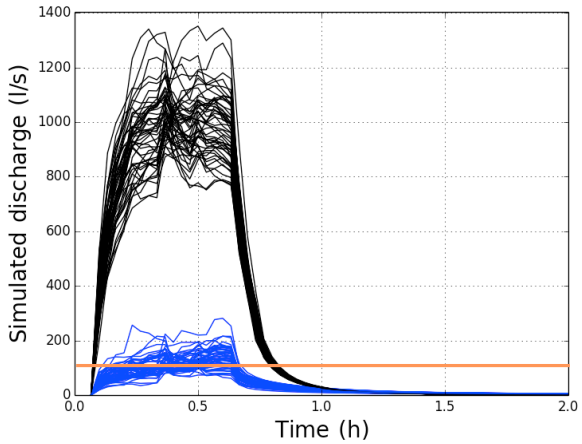

Figure 56. *Débit simulé en réponse à un épisode pluvieux d'une demi-heure désagrégé dans l'espace pour les scénarios 0 (imperméable) et 6 (IBV implantées). La droite orange représente la contrainte de débit à 10 l/s/ha*

V. Présentation du projet de recherche traitant de l'évaluation des services éco-systémiques d'une renaturation du milieu urbain

Aujourd'hui pleinement investi dans les problématiques urbaines, je poursuis mes travaux sur la renaturation de la ville et l'évaluation des performances éco-systémiques des infrastructures bleues et vertes (IBV) dans un contexte de changement climatique. Le cadre de travail de ce projet de recherche s'articule autour des questions scientifiques détaillées dans la sous-section IV.1.3 et tire bénéfice de ce qui a été présenté dans les chapitres précédents. Il a pour ambition d'être adapté à la complexité des interactions entre des processus hydro-météorologiques très hétérogènes dans l'espace et très variables dans le temps et un environnement urbain qui l'est tout autant. Il fait donc écho à la spécificité méthodologique développée par le laboratoire Hydrologie, Météorologie et Complexité de l'Ecole des Ponts ParisTech (HM&Co / ENPC) qui porte sur la variabilité multi-échelle des systèmes et environnements complexes.

V.1. Intégration du projet au sein du laboratoire HM&Co

HM&Co (https://hmco.enpc.fr/) est devenu récemment le douzième laboratoire de recherche de l'ENPC du fait de son expansion rapide et de ses nombreuses participations à des projets régionaux, nationaux et internationaux. Tournées vers l'observation, la compréhension, la modélisation et la gestion de l'eau, en tant que risque et ressource, ses activités de recherche s'intéressent aux systèmes urbains confrontés au changement climatique et à la poursuite de l'urbanisation. Sous l'impulsion de Daniel Schertzer et de Ioulia Tchiguirinskaia, HM&Co s'est positionné comme un acteur important des analyses multi-échelles en développant méthodologies et concepts novateurs reposant sur les multifractales universelles (Schertzer et al., 2012; Schertzer and Lovejoy, 1987, 2011; Schertzer and Tchiguirinskaia, 2015). Appliquées dans de nombreux domaines liés à l'hydro-météorologie, ces méthodes ont permis d'étudier champs et flux géophysiques (précipitations, vent, ruissellement…) dans toute leur complexité. Elles ont aussi été utilisées pour reproduire ces fortes variabilités –comprenant les valeurs extrêmes- sur une large gamme d'échelle.

HM&Co héberge par ailleurs la Chaire Véolia « Hydrologie pour une ville résiliente » et gère depuis 2015 un radar météorologique bande X situé sur le toit du bâtiment Bienvenüe. Celui-ci constitue –ainsi que la Vague Verte- le cœur de la Plateforme multi-échelle Fresnel actuellement en cours de développement (https://hmco.enpc.fr/portfolio-archive/fresnel-platform/). Elle est dédiée aux observations géophysiques et environnementales sur une gamme d'échelles pertinentes pour assurer une gestion et un contrôle des flux (matière, énergie) transitant dans les systèmes urbains, et ainsi développer leur résilience face aux événements extrêmes et au changement climatique.

Mon projet de recherche s'intègre donc dans ce cadre général en l'ouvrant sur une nouvelle thématique liée aux IBV et à leurs services éco-systémiques. Il tirera bénéfice de cette expertise multi-échelle, ainsi que des outils développés - ou en cours de développement – (modèle Multi-Hydro, plateforme radar par exemple). En échange, il l'enrichira de nouveaux objets d'étude (suivi thermo-hydrique de structures végétalisées), instruments de mesures expérimentales, champs d'application pour les méthodes multifractales (rafraichissement via la température, diffusion de la technique à l'échelle urbaine) ou collaborations nationale ou internationales.

Le projet se structure autour de quatre axes qui seront détaillés par la suite :

- **Axe 1 - Le suivi expérimental d'ouvrages végétalisés et la caractérisation des variabilités spatio-temporelles des processus thermo-hydriques** : l'objectif est ici de mettre en œuvre des systèmes de mesure innovants capables d'appréhender la

complexité inhérente de cette végétalisation et de créer une base de données regroupant le maximum d'informations sur de nombreux sites instrumentés. Cette méthodologie doit permettent d'avancer dans **la compréhension des processus physiques mis en jeu au sein du matériau** utilisé pour la conception d'une IBV, et la mise en relation de son comportement thermo-hydro-mécanique avec les phénomènes extérieurs auxquels il est soumis (climat).

- **Axe 2 - La simulation du comportement des IBV dans un cadre de modélisation multi-échelle et multifonctionnelle** : celui-ci permettra de développer des **outils de modélisation et d'analyse** capables de représenter les interactions entre surfaces imperméables et surfaces (pseudo)naturelles et d'en analyser les impacts à travers les échelles. Ce cadre doit permettre de combiner hydrologie, thermique, urbanisme, et biodiversité afin de mieux appréhender leurs interactions dans une démarche d'évaluation de services éco-systémiques.

- **Axe 3 - La scénarisation du changement global à l'échelle urbaine** : il s'agira d'une part d'appréhender la **manifestation du changement climatique** à petite échelle en travaillant à la création de scénarios climatiques adaptés à l'étude d'impact en milieu urbain, et d'autre part au **développement de scénarios urbanistiques**, fruits d'une analyse spatiale et d'une réflexion prospective concernant le développement futur des infrastructures bleues et vertes, et de tout ce qui pourrait encourager ou contraindre leur implémentation.

- **Axe 4 - L'étude multi-échelle des performances et impacts des IBV** dans un contexte de changement global : les modèles et scénarios de changement global développés seront utilisés pour appréhender les **enjeux liés, entre autres, à la gestion des eaux pluviales et du microclimat à différentes échelles spatio-temporelles**. Les performances potentielles des IBV, vues comme des outils d'adaptation, y seront évaluées. Ce dernier axe doit être perçu comme la déclinaison opérationnelle des activités de recherche, en lien avec les acteurs socio-économiques.

V.2. L'ENPC, un environnement de travail au cœur des problématiques urbaines

Le Campus Descartes, où se trouve l'ENPC, est aujourd'hui un lieu privilégié où se regroupe une grande partie du savoir relatif à la ville de demain. Il accueille en son sein le seul pôle de compétitivité dédié à la ville durable (Advancity, ville et mobilité durable, http://www.advancity.eu/fr/) qui a pour objectif de permettre aux établissements d'enseignement supérieur et de recherche, aux entreprises et aux collectivités territoriales de coopérer et de monter des projets collaboratifs innovants. Il est ainsi fortement lié aux territoires du Grand Paris qui offre de multiples opportunités d'expérimentation et de mise en pratique. Le campus héberge aussi : (i) un projet d'Equipement d'Excellence (Sense-City, http://sense-city.ifsttar.fr/) qui se positionne comme un démonstrateur réaliste d'innovations urbaines en fournissant un terrain d'expérimentation riche et complexe couvrant, entre autres, les performances énergétiques des bâtiments et des quartiers, la qualité et la durabilité des réseaux urbains (transport, fluides), et la qualité de l'air extérieur, des sols et des eaux, (ii) l'institut de recherche et développement Efficacity (http://www.efficacity.com/) dédié à la transition énergétique des territoires et proposant des solutions innovantes accompagnant les différents acteurs lors d'un projet d'aménagement urbain durable, (iii) le Laboratoire d'Excellence Futurs Urbains (http://www.futurs-urbains.fr/) qui par des approches multidisciplinaires s'intéresse aux interactions entre les activités humaines en ville et l'environnement, la constitution de métropoles mondialisées et la qualité de vie en ville pour tous. Le Groupe de Travail « Natures Urbaines » auquel je participe est particulièrement dédié aux questions de végétalisation de la ville.

Enfin en février 2017 l'I-Site FUTURE a été labélisé dans le cadre du programme des Investissements d'Avenir. Ce consortium regroupe l'ENPC, l'IFSTTAR, l'EIVP, l'UPEM, l'ESIEE, l'ENSG et l'ENSAVT sur le thème de « la ville de demain », et est structuré autour de trois défis : une ville économe en ressources, une ville sûre et résiliente, et une ville intelligente. Pour se faire, l'I-Site compte s'appuyer sur un niveau élevé d'interdisciplinarité, une approche multi-échelle, le développement de plateformes de démonstration et la co-innovation avec des partenaires socio-économiques. Ces 4 principes se retrouvent parfaitement dans le projet de recherche présenté ici.

V.3. Dynamique actuelle : projets en cours

Dans la continuité des projets en lien avec les IBV présentés dans le chapitre antérieur (Blue Green Dream, TVGEP, TERRACES), différentes initiatives, d'hors et déjà financées, ont débuté très récemment pour mettre en œuvre ce projet de recherche. Elles tournent autour du projet ANR EVNATURB qui débute cette année.

V.3.1. Projet ANR JCJC EVNATURB :

Ce projet, dont je suis le coordinateur, a été sélectionné dans le cadre de l'appel générique 2017 - Défi 6 « Mobilité et Systèmes urbains durables ». Débuté en pars 2018 pour une durée de 4 ans, il a pour objectif de développer une plateforme facilitant l'évaluation de certains des services éco-systémiques (rafraichissement urbain, gestion des eaux pluviales et biodiversité) prodigués par les IBV à l'échelle du projet d'aménagement, et de promouvoir une renaturation de la ville. Pour tenter de résoudre les problèmes complexes liés à ce sujet et déjà évoqués plus haut, EVNATURB projette de mettre en œuvre une approche multidisciplinaire, multi-échelle et multi-physique. Il se structure autour de quatre tâches de travail :

- Tâche 1 : Construction d'un réseau de surveillance et caractérisation des variabilités spatio-temporelles. Focalisé sur les bilans hydrique et énergétique, il s'agira de : (i) mettre en œuvre un système de mesures haute résolution, transportable et innovant, (ii) utiliser des outils analytiques adaptés pour appréhender la complexité des flux étudiés. Testé sur la Vague Verte, ce protocole a vocation à déboucher sur la création d'un réseau scientifique dédié au suivi expérimental des IBV.
- Tâche 2 : Couplage thermo-hydrique dans le cadre d'un modèle distribué, scalable, et susceptible de prendre en compte l'implantation d'IBV au sein d'un environnement urbain. Cela passe par une meilleure modélisation des complexes végétaux et des flux d'évapotranspiration. Les données expérimentales collectées lors de la Tâche 1 doivent permettre de valider les modèles développés ici.
- Tâche 3 : Caractérisation de l'implantation des IBV à l'échelle du projet d'aménagement. Il s'agira d'une part d'étudier les contraintes et objectifs liés à l'implantation d'IBV ; cela concerne la prise en compte d'enjeux géographiques et socio-économiques, ainsi que la définition d'indicateurs quantitatifs pertinents en regard du projet d'aménagement (certification, labellisation, respect des réglementations, continuité écologique). Il s'agira d'autre part de s'interroger sur la biodiversité à mettre en œuvre en fonction de ces contraintes et des services éco-systémiques attendus.
- Tâche 4 : Développement de l'interface EVNATURB et application sur des cas réels de projet d'aménagement. Cette dernière tâche consistera à valoriser le travail effectué dans les taches précédentes. Il s'agira d'évaluer les performances d'IBV implantées sur ces cas d'étude en regard des contraintes et objectifs listés pour chacun d'eux.

Le projet EVNATURB doit faire le lien entre les méthodes et résultats produits par la recherche actuelle en instrumentation et en modélisation urbaine, les problèmes pratiques émanant des sciences de l'environnement et les besoins opérationnels de la planification

urbaine. L'approche multi-échelle adoptée lui permettra de prendre en considération la variabilité spatio-temporelle des processus considérés, particulièrement forte en milieu urbain. En prenant l'hydrologie comme point de départ, elle s'étendra aux domaines connexes tels que la thermique et la biodiversité. Les activités expérimentales et de modélisation liées à l'estimation des flux d'évapotranspiration seront particulièrement pertinentes pour améliorer nos connaissances sur le comportement thermo-hydrique des IBV, et donc de leur impact sur le rafraîchissement urbain.

La plateforme EVNATURB, dont le développement est prévu tout au long du projet, est destiné à de nombreux acteurs intervenant en aménagement urbain (urbanistes, architectes, ingénieurs, certificateurs, collectivités territoriales…). Elle les guidera dans le choix de solutions bleues-vertes réellement adaptées à leurs besoins (contraintes et objectifs environnementaux précédemment définis à l'échelle du projet). La quantification de certaines de leurs performances – entre autres par le couplage thermo-hydrique – devra les accompagner dans l'obtention d'une certification environnementale.

Pour la bonne réalisation du projet, un consortium pluridisciplinaire a été constitué (voir Figure 57). Il regroupe des personnels du milieu académique français (Cerema Ile-de-France et Ouest, Agro ParisTech) et international (Imperial College London, Université de Bonn et TU Delft), ainsi que nombre d'opérationnels (Société du Grand Paris, Certivé, VulkaTec, Cabinet d'architecte Duthilleul, Bureaux d'étude des Jardin de Gally) intéressés par cette thématique.

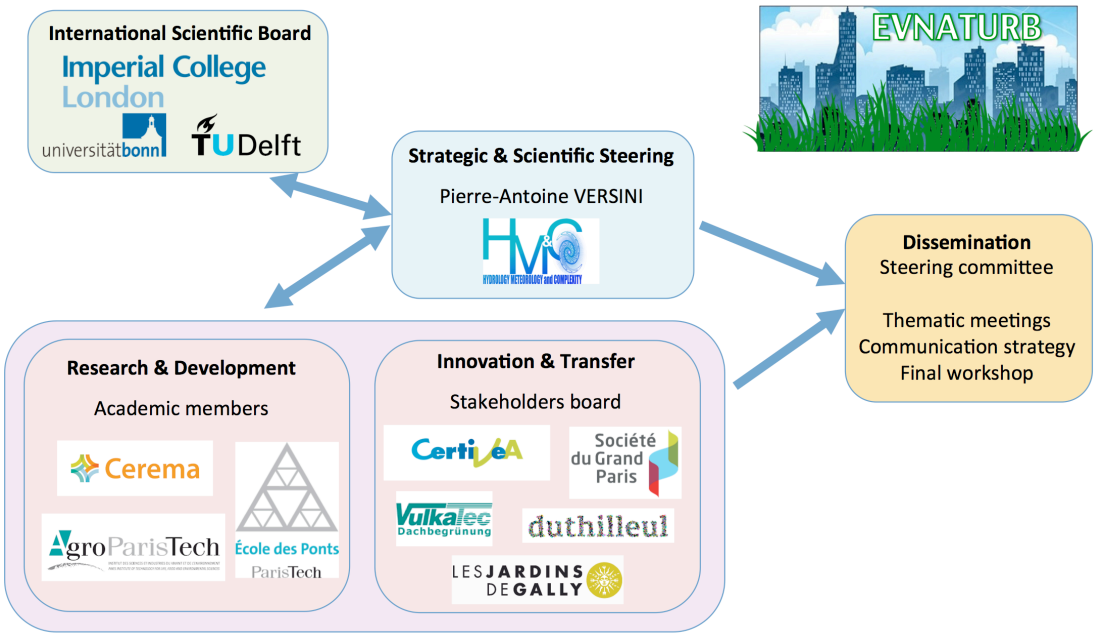

Figure 57. *Organigramme du projet ANR EVNATURB*

V.3.2. Des sites pilotes à taille réelle au service d'EVNATURB

Afin de profiter de l'exposition offerte par le campus Descartes, il semble légitime de multiplier les sites pilotes aux abords de l'ENPC. Dans cette perspective, deux infrastructures végétalisées sont en cours ou en voie d'instrumentation : la Vague Verte déjà présentée et le démonstrateur Gaudi.

La Vague Verte

L'instrumentation de la Vague Verte (cf. Section IV.3.3) poursuit son développement dans le cadre de la plateforme Fresnel. Un réseau de capteurs ubiquitaires est ainsi en cours de déploiement afin de mesurer la teneur en eau et la température en de très nombreux points du

substrat. Celui-ci comprend pour l'instant un ensemble de 32 sondes TDR sans fil qui permet de capter les variations spatio-temporelles de ces champs Ce réseau devrait prochainement se voir compléter par des micro-capteurs sans fil enterrés développés dans le cadre d'une collaboration avec l'ESIEE (ces capteurs font actuellement l'objet de tests étudiant l'effet du sol sur leurs performances).

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de la thèse ENPC interlabo sur « le suivi et la modélisation à haute résolution des flux hydriques d'une toiture végétalisée et la mise en place d'un réseau de capteurs ubiquitaires ». Débutée en octobre 2016 et réalisée en partenariat avec l'équipe Géotechnique du laboratoire Navier, cette thèse à pour objet d'instrumenter, puis de modéliser le bilan hydrique de la Vague Verte de Champs-sur-Marne. Ce travail conduit par le doctorant Filip Stanic repose sur des expérimentations en laboratoire concernant le substrat, et sur la mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil déployés *in situ*. A terme, le modèle développé sera utilisé pour simuler le comportement hydrologique d'un ouvrage sous différents scénarios climatiques et de structure (configuration du complexe végétalisé, événement pluvieux, conditions initiales, entretien...) et en évaluer les performances.

Figure 58. *Filip Stanic et le réseau de capteur TDR sans fil implanté sur la Vague Verte*

Des expérimentations plus spécifiquement dédiées à la mesure du flux de chaleur sensible et latente (évapotranspiration) intervenant dans le bilan énergétique sont aussi prévues. Ainsi l'installation d'un scintillomètre est planifiée dans le cadre du projet ANR EVNATURB pour estimer les variations spatiales et temporelles de flux sur un ensemble de surfaces urbaines comprenant la Vague Verte. Ce type d'appareil mesure la modification de l'intensité d'une onde électromagnétique due aux mouvements convectifs sur une distance allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Il permet ainsi d'estimer le flux de chaleur sensible sur une surface hétérogène. Couplé à d'autres instruments de mesure (radiation, température…), le scintillomètre permet aussi d'estimer le flux de chaleur latente. En parallèle, l'utilisation d'une chambre de transpiration capable de mesurer ponctuellement les flux de vapeur d'eau (Rana and Katerji, 2000) sera utilisée. Cela sera réalisé en collaboration avec David Ramier du Cerema Île-de-France qui est un des partenaires d'EVNATURB. Des mesures de flux à l'aide de cet appareil ont déjà été effectuées sur plusieurs couvertures

végétales ces dernières années, et il est prévu d'en réaliser sur la Vague Verte durant l'été 2018.

Le démonstrateur Gaudi

Afin de pouvoir végétaliser les espaces denses urbains, une solution technique innovante et facilement adaptable au bâti existant a été pensée par le laboratoire Navier. Elle consiste en des greffes urbaines végétalisées reposant sur des gridshells (grilles constituées de barres rectilignes articulées pouvant être déployées pour former des surfaces complexes). Ces structures sont extrêmement légères et représentent un bon compromis entre flexibilité (pour permettre le passage de la grille plane à la forme souhaitée) et rigidité (pour être structurels). L'utilisation de matériaux composites les rend de plus pérennes et parfaitement adaptées pour le support de végétation. Plusieurs prototypes de gridshells ont déjà été réalisés par Navier, dont le forum Solidays en 2011 et la cathédrale éphémère de Créteil en 2013 (Douthe et al., 2010; Tayeb et al., 2013). Ces structures allient ainsi faible coût, légèreté, souplesse, résistance, durabilité et esthétique. Un nouveau prototype ("Gaudi") dédié à la végétalisation est en cours de développement sur le site de l'Ecole des Ponts.

Figure 59. *Projet d'implantation du démonstrateur Gaudi sur le campus Descartes et premier montage en laboratoire*

L'instrumentation (mesure d'évapotranspiration et de température) pour évaluer l'impact de ce nouvel élément de mobilier urbain sur le confort thermique environnant sera effectuée dans le cadre de la thèse de Julien Cravero. Cette Thèse ENPC interlabo s'intitule « déploiement optimal de greffes urbaines végétalisées pour l'atténuation des îlots de chaleur urbains et l'évaluation de leurs performances dans le cadre d'une ACV ». Débutée en octobre 2017 et réalisée en partenariat avec l'équipe Matériaux et Structures Architecturés du laboratoire Navier, cette thèse a pour objectif la finalisation, le suivi expérimental (thermo-hydro-mécanique) et la valorisation en termes de rafraichissement urbain du démonstrateur Gaudi. Cela comprend l'étude mathématique de diverses typologies de grilles planes et de végétalisation pour explorer de nouvelles possibilités formelles, et la modélisation des flux de chaleur. Ce travail doit aussi amorcer une démarche d'ACV (Analyse de Cycle de Vie) qui tienne compte des performances thermiques pour évaluer l'impact environnemental de ces structures sur le milieu urbain.

En parallèle du prototype expérimental qui sera implanté sur le site de l'ENPC, ce nouveau concept de gridshell végétalisée a conduit à la création de la startup Urban Canopee

(http://www.urbancanopee.com/). Lauréate de la GreenTech Verte 2016 du Ministère de la transition écologique et solidaire, cette structure vise à commercialiser ce nouvel élément de mobilier urbain susceptible de combattre les îlots de chaleurs, rétablir de la biodiversité, ou de lutter contre la pollution de l'air. Afin de participer à cette aventure de valorisation de résultats scientifiques, je suis en passe de rejoindre le comité d'experts constitué d'enseignants-chercheurs de l'Ecole des Ponts.

Les travaux réalisés sur ces deux sites pilotes doivent permettre de constituer un « kit » de mesures facilement transportable (comprenant capteurs sans fil, scintillomètre, voire fibre optique). Il pourra être mis en œuvre sur d'autres types de structures (caractérisées par des complexes substrat/végétation différents) et alimenter une base de données dédiée au IBV (cf. paragraphe suivant). Il est aussi question de végétaliser le toit d'un bâtiment d'une des mini-villes de l'Equipement d'Excellence Sense-City. L'utilisation de la chambre climatique (où température, humidité et qualité de l'air peuvent être ajustés) servira à tester les performances de différents types de végétation sous des contraintes climatiques bien particulières (extrêmes). Cette proposition a été faite dans le cadre de l'appel à projet I-Site présenté plus loin.

V.4. Suivi expérimental d'IBV

Cette première partie du projet de recherche reposera donc en grande partie sur les sites pilotes présentés précédemment et vise à promouvoir une multiplication des retours d'expérience afin de : (i) **mieux comprendre le fonctionnement des ouvrages** en fonction des matériaux qui les constituent, (ii) caractériser les **variabilités spatio-temporelles des processus physiques à travers les échelles**, et (iii) suivre l'**évolution de leurs performances** dans le temps et tenir compte d'éventuelles dégradation des matériaux.

V.4.1. Etude des matériaux constitutifs

Les substrats composant généralement les complexes végétalisés urbains peuvent être assimilés à des milieux poreux (souvent non saturés) que l'on pourrait qualifiés de non « traditionnels ». En effet, constitués essentiellement de minéraux, ils sont très granulaires et diffèrent fortement de la terre végétale. A ce titre, ils nécessitent une étude particulière de leur fonctionnement thermo-hydro-mécanique. La caractérisation de ce type de substrat représente un des volets de la thèse de Filip Stanic évoquée précédemment. Issu d'un partenariat entre les laboratoires HM&Co et Navier (Pierre Delage et Yu-Jun Cui de l'équipe Géotechnique), ce travail bénéficie du soutien de l'entreprise VulkaTec, spécialiste des substrats à base de matière volcanique et qui a fournit le matériau mis en place sur la Vague Verte, ainsi que des échantillons pour nos travaux.

Différents essais sont actuellement menés en laboratoire pour déterminer le profil géotechnique du substrat (courbe de rétention hydrique, courbe de conductivité hydraulique, granulométrie, …). Ces travaux ont ainsi donné lieu au développement d'un protocole expérimental reposant sur la tensiométrie afin d'établir simultanément les courbes de rétention et de conductivité (Stanic et al., 2018a). Spécialement adapté à ce type de substrat, il permet de couvrir une large gamme de valeurs de succion. Des travaux similaires devraient être menés prochainement sur la couche de végétation qui s'est révélée être particulièrement rétentrice malgré sa faible épaisseur. L'entreprise SOPREMA, associée à ces recherches, fournira les échantillons à analyser.

Il est aussi envisagé de procéder à des essais à l'aide du microtomographe à rayon X du Laboratoire Navier. Cette plateforme permet d'observer en trois dimensions des échantillons de matériaux de manière non-destructive, et de couvrir des échelles allant du micromètre à la dizaine de centimètres. Le tomographe semble particulièrement adapté pour étudier le substrat

VulkaTec dont la granulométrie s'est avérée particulièrement hétérogène. Il est aussi possible d'appliquer aux échantillons des sollicitations combinant chargements mécaniques, thermiques et hydriques représentatives des conditions d'emploi réelles pour suivre son évolution dans le temps (tassement, érosion, modification des propriétés mécaniques).

V.4.2. Constitution d'un réseau de mesures

En parallèle des sites pilotes locaux suivis par HM&Co (Vague Verte et Démonstrateur Gaudi), et d'autres où pourra être testé le kit de mesures précédemment mentionné, la collecte de données sera étendue à d'autres types d'IBV. Nous nous appuierons pour cela sur les collaborations développées au cours de ces dernières années en France (IFSTTAR, Cerema, GMCEA, CSTB entre autres) et à l'étranger (Imperial College, Université de Wageningen, Université Pontificale Catholique du Chili, Université Pontificale Javeriana de Bogota) où des suivis expérimentaux d'IBV ont été réalisés ou sont encore en cours. Des observatoires dédiés à l'environnement urbain comme l'OTHU (http://www.graie.org/othu/) et l'ONEVU (http://www.irstv.fr/fr/observatoire-nantais-des-environnements-urbains) représentent aussi des acteurs importants dans la production de données issues de systèmes d'observation et d'expérimentation sur le long terme. L'objectif de cette base de données est de constituer un échantillon le plus large possible de structures différentes de par leur composition, leur âge, ou les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises. Ces données permettront de suivre les performances de ces infrastructures dans le temps et leur possible dégradation. Enfin, les observations collectées pourront servir à développer, alimenter et à valider des outils de modélisation pertinents, détaillés dans la section suivante. La question de la propriété, de l'accessibilité et du partage de ces données devra être discutée entre les différents instituts participants. Un rapprochement avec le pôle IST (Information Scientifique et Technique) de l'ENPC, ainsi que l'entreprise Medeley qui souhaite proposer dans les années à venir un service de partage de données, est en cours sur ce sujet.

V.4.3. Caractérisation des variabilités spatio-temporelles

La grande variabilité des champs étudiés (infiltration, ruissellement, évapotranspiration...) pose la question de leur invariance à travers les échelles tant spatiales que temporelles. En effet, en hydrologie les phénomènes en jeu, à commencer par la précipitation, sont fortement non-linéaires, et caractérisés par des champs intermittents et extrêmement variables sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles. Il est donc nécessaire d'étudier la structure de ces champs et de qualifier leur continuité/rupture à travers les échelles pour mieux appréhender leur complexité, et plus particulièrement leurs valeurs extrêmes. La caractérisation de cette variabilité spatio-temporelle, rendue possible grâce à la mise en œuvre d'un réseau de capteurs comme celui de la Vague Verte, permettra ensuite de la générer et de reproduire les phénomènes à d'autres échelles (plus grandes ou plus petites). Pour répondre à ses enjeux de non stationnarité, des outils basés sur les multifractales sont utilisées depuis les années 80 pour analyser et simuler la variabilité des précipitations, ou d'autres variables climatiques (Schertzer and Lovejoy, 1987, 2011). Ils permettent une approche de physique statistique de phénomènes complexes, et en particulier la simulation stochastique de champs géophysiques en exploitant leurs lois d'échelles. Il est ainsi possible de qualifier la variabilité de l'intermittence hors du champ moyen et d'en étudier les extrêmes. Nous nous proposons ici d'utiliser ces outils (https://hmco.enpc.fr/portfolio-archive/multifractals-toolbox/) et d'étendre leurs domaines d'application en nous intéressant à la variabilité des impacts des IBV à travers les échelles. Le doctorant Filipe Stanic réalise actuellement ce type d'analyse sur les valeurs de teneur en eau collectées sur la Vague Verte (Stanic et al., 2018c).

V.4.4. Prise en compte de la biodiversité

Cette partie vise à dresser un inventaire des principales fonctions éco-systémiques fournies par les espèces végétales et les substrats pouvant être utilisés dans les IBV. Cela concerne les

fonctions thermo-hydriques comme la rétention d'eau ou la transpiration maximale des feuilles par exemple. Mais cela implique également leurs conséquences dans l'amélioration ou la protection de la biodiversité locale. Chaque type de végétation que l'on retrouvera dans la base de données devra donc être aussi considéré en regard des habitats potentiels qu'elle peut fournir pour les oiseaux et les insectes (l'attrait pour les pollinisateurs pourra aussi être mentionné). Une revue bibliographique, centrée sur les montages expérimentaux réalisés à l'échelle de l'infrastructure ou de la parcelle, sera réalisée pour collecter ces informations. La collaboration initiée avec AgroParisTech dans le cadre du projet EVNATURB, et plus particulièrement avec Nathalie Frascaria-Lacoste, sera très féconde sur ce sujet. Un mélange entre une approche phylogénétique et une approche par traits écologiques pourrait être proposé pour classer ces sols et plantes en fonction de leurs fonctions éco-systémiques. Certaines recommandations concernant la complémentarité et la disposition des espèces à l'échelle du quartier devraient également être spécifiées (Butterfield and Suding, 2013). Ce travail prospectif et encore très peu abordé sera l'objet d'un post-doc d'un an réalisé dans le cadre d'EVNATURB.

V.5. Simulation du comportement des IBV

Cette seconde partie du projet de recherche vise à **mieux représenter le comportement thermo-hydrique des IBV** pour en quantifier et prévoir les performances à différentes échelles. A cette fin, il prévoit de : (i) développer des **couplages thermo-hydro-mécaniques**, (ii) considérer la complexité du milieu urbain et ses **interactions avec le milieu récepteur**, (iii) s'intéresser à **l'invariance d'échelle** des flux simulés. Ces travaux de modélisation devront bien entendu tirer bénéfices des suivis expérimentaux présentés précédemment.

V.5.1. Représentation à l'échelle du matériau

Il s'agira dans un premier temps de modéliser à l'échelle du matériau les processus thermo-hydro-mécaniques mis en jeu. Concernant l'infiltration par exemple, on s'interrogera sur la pertinence d'une utilisation de l'équation de Richards et des relations de Van Genuchten–Mualem (van Genuchten, 1980) pour exprimer la teneur en eau et la conductivité hydraulique. La question de la simple ou double porosité pourra être abordée. Il est aussi possible que ce type de modélisation ne soit pas adapté à un milieu poreux et granulaire complexe comme l'est le substrat utilisé en toiture. Dans ce cas, une alternative sera proposée en développant un modèle pore/solide à base (multi)fractale dans la continuité de précédents travaux (Perrier et al., 1999). Ce travail est actuellement mené par le doctorant Filip Stanic.

Une part significative des investigations concernera le couplage entre bilan hydrique et bilan énergétique et les différents flux concernés. Cela passe par une meilleure représentation des interactions entre atmosphère et végétation. Au cœur de ces échanges se trouve l'évapotranspiration dont l'estimation devra reposer tant sur les variables météorologiques que sur l'état du sol (succion, saturation, température). Une attention particulière sera aussi portée sur la modélisation de la végétation pour représenter une large gamme d'espèces, en considérant l'albédo, l'indice de surface foliaire, ou la conductance stomatique par exemple. L'évaporation provenant du sol nu, l'eau interceptée par la végétation et la transpiration des plantes pourront ainsi être étudiées séparément. Ce travail sera réalisé par le doctorant financé dans le cadre du projet EVNATUR, et co-encadré en collaboration avec le Cerema Ouest (Marjorie Musy) et AgroParisTech (Erwan Personne).

V.5.2. Représentation à l'échelle urbaine

La modélisation hydrologique à une échelle dépassant celle de la structure se fera dans le cadre du développement de la plateforme Multi-Hydro. Comme déjà évoqué, sa structure distribuée permet de prendre en compte l'hétérogénéité de l'occupation des sols propre au milieu urbain et la possible intégration d'infrastructures bleues et vertes en son sein. Sur la

base des travaux effectués à l'échelle du matériau et des données collectées sur les sites expérimentaux, il est prévu d'améliorer le module « toiture végétalisée » existant (voir Section IV.4.1) et d'étendre le **panel d'infrastructures bleues et vertes** disponibles. On essaiera de les construire sur la base d'une **représentation physique des processus** afin de mieux prendre en compte les caractéristiques des structures végétalisées (épaisseur et propriétés hydriques des substrats, type de végétation par exemple). D'autre part, le développement de la représentation des interactions entre le sol et la nappe devra être poursuivi afin d'y intégrer les IBV.

Le couplage thermo-hydrique constitue un point important de ce projet. Une collaboration avec le département Ville et Territoire du Cerema Ouest a déjà débuté dans ce sens à travers le projet ANR EVNATURB. L'objectif de ce rapprochement est de s'interroger sur la représentation des interactions des différents flux (thermiques et hydriques) à l'échelle urbaine, et de la prise en compte de leurs variabilités tant spatiales que temporelles. Un travail spécifique est ainsi prévu concernant le flux de chaleur latente, flux particulièrement important pour ce qui concerne le rafraichissement urbain et l'état de saturation initiale des substrats qui conduit leur réponse hydrologique. Les échanges radiatifs, convectifs, et conductifs, très fluctuants en milieu urbain de par l'hétérogénéité des surfaces et des reliefs, feront aussi l'objet d'une attention particulière. A cette fin, un couplage avec le modèle SOLENE-microclimat (Morille et al., 2015) est envisagé. SOLENE a pour objectif de simuler l'impact d'alternatives d'aménagement urbain à l'échelle du quartier sur le confort extérieur et la consommation énergétique des bâtiments. A l'heure actuelle, il utilise l'équation de Penman-Monteith pour représenter le flux d'évapotranspiration. Reposant essentiellement sur des données météorologiques, cette formule ne tient pas compte de l'état de saturation du sol ni du type de végétation.

Dans un même temps, la thèse de Julien Cravero s'intéressera à réaliser un couplage thermo-hydrique similaire à l'aide du modèle OpenFOAM. Valorisant les données expérimentales du gridshell GAUDI, il doit étudier l'interaction entre la façade végétalisée et son environnement proche. De par sa grande flexibilité concernant l'implémentation de typologies différentes, ce modèle permet de s'interroger sur la densité du maillage en regard des caractéristiques du champ de température résultant. Il donne aussi la possibilité d'étudier les différents champs géophysiques (vent, température, pression) à travers les échelles. L'utilisation d'un tel outil rend donc possible l'étude des échanges de chaleur entre le milieu et la structure végétalisée.

V.5.3. Et à travers les échelles ?

Le couplage entre modélisations petites et grandes échelles, entre des approches hydrodynamiques et hydrologiques, mettra en œuvre des méthodes de changement d'échelle appliquées à des matériaux et structures complexes et hétérogènes. A l'instar de ce qui a déjà été présenté sur la caractérisation des variabilités spatio-temporelles des observations, on pourra s'interroger sur l'invariance d'échelle des champs simulés (flux thermiques et hydriques) dans cet espace extrêmement hétérogène qu'est l'environnement urbain. La détermination de la structure de ces champs et de leur continuité/rupture à travers les échelles pourra faire l'objet d'une analyse multifractale.

Ces méthodes d'analyse multi-échelle pourront être appliquées à d'autres modèles hydrologiques et/ou thermiques pour comparaison. Je pense notamment au modèle semi distribué SWMM déjà cité qui est capable de représenter un certain nombre de techniques alternatives. Cette étape d'intercomparaison de modèle permettra de **se questionner sur la pertinence de l'échelle de représentation** (distribuée ou semi-distribuée, cette dernière étant -hélas- privilégiée par les opérationnels).

V.6. Scénarisation du changement global

Dans un objectif d'évaluer les performances des IBV, ainsi que les interactions entre milieu urbain et milieu naturel sur le long terme, cette troisième partie cherche à **appréhender la ville de demain à l'aune du changement global** regroupant autant les effets du changement climatique que l'évolution des centres urbains durant le XXIème siècle. Cela se traduit par le développement de méthodes susceptibles de proposer des **scénarios climatiques et urbanistiques adaptés à la traversée d'échelle**.

V.6.1. Vers des scénarios climatiques urbains

Autant l'augmentation des températures sur la France est pronostiquée par tous les scénarios climatiques, autant les tendances liées aux précipitations sont plus incertaines (Jouzel et al., 2014). Cela est dû à la position de la France, et en particulier de Paris et sa région, qui se trouvent à l'interface entre deux systèmes de circulation atmosphérique qui partagent le Nord de l'Europe (où une augmentation des précipitations hivernales est prévue) et le Sud (où une baisse généralisée est escomptée) (Vautard and Yiou, 2009). La prédiction climatique est rendue encore plus difficile à l'échelle urbaine par la nécessité de disposer de données de pluie caractérisées par de plus hautes résolutions spatiales et temporelles, soit au maximum 1 h en temps et 1 km dans l'espace, davantage compatibles avec la prise en compte des processus physiques et de leurs conséquences opérationnelles. Il a d'ailleurs été démontré que les modèles climatiques avaient particulièrement du mal à représenter les caractéristiques de champs de pluie à petite échelle (Langousis and Kaleris, 2014).

Nous souhaitons ici travailler au **développement de scénarios de changement climatique adaptés à l'échelle urbaine** à partir des sorties de modèles climatiques (GCM, RCM). Le changement d'échelle sera opéré à l'aide de techniques multifractales basées sur les propriétés d'invariance (partielle) d'échelle des phénomènes étudiés (Royer et al., 2008). Déjà présentés dans la partie précédente, ces outils permettent la réalisation de simulations stochastiques de champs de précipitation en exploitant leurs lois scalantes. A ce titre, les multifractales peuvent être considérées comme un outil de downscaling (Deidda, 2000). Dans un cadre de travail qu'il reste encore à définir (des collaborations extérieures seront nécessaires sur ce sujet), la méthodologie pourra consister à utiliser les projections climatiques effectuées sur la France et disponibles sur le portail DRIAS (modèles IPSL et CNRM produisant des projections journalières sur une maille de 12 km pour différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre). Les procédés de **descente d'échelle stochastique** seront ensuite appliqués pour obtenir des **ensembles de scénarios** compatibles avec les échelles spatio-temporelles souhaitées. Les scénarios produits (prioritairement champs de précipitations et de températures, mais aussi vent et rayonnement) permettront de s'interroger sur la manifestation du changement climatique aux petites échelles et plus particulièrement sur ses extrêmes.

V.6.2. Objectifs et contraintes environnementales liés à l'implantation des IBV

Il s'agit ici de répertorier : (i) toute contrainte externe pouvant influencer la sélection et la mise en œuvre d'IBV, et (ii) les objectifs environnementaux qu'un projet urbain peut satisfaire à l'aide d'IBV. En détails, les contraintes concernent la faisabilité de la mise en œuvre des IBV et comprennent les caractéristiques du sol (pente et pédologie), l'occupation du sol, les conditions climatiques et les règles de construction. Ces informations sont généralement compilées dans des documents d'urbanisme comme les PLU, régissant l'aménagement du territoire dans les zones urbaines. Toutes ces contraintes environnementales seront inventoriées dans le but de guider la conception d'IBV, et de prédéterminer une solution en fonction de cet environnement contextuel. Les objectifs environnementaux sont généralement définis par les autorités locales et peuvent, par exemple, concerner la gestion des eaux pluviales (débit de fuite ou volume de rétention minimum) ou la

biodiversité (promotion des espèces locales, respect d'une trame verte et bleue). Une attention particulière sera accordée aux certifications et labélisations environnementales, et plus particulièrement à la manière dont les IBV peuvent permettre de répondre à certaines exigences du référentiel HQE (voir Section V.7). Ce double inventaire sera réalisé dans le cadre d'EVNATURB (post-doc en collaboration avec AgroParisTech) sur la base d'une analyse documentaire et d'entretiens conduits auprès des parties prenantes (industriels, architectes, paysagistes, certificateurs, services opérationnels). On s'attachera aussi à étudier les méthodes d'évaluation usuellement mises en œuvre pour l'obtention de ces certifications.

V.6.3. Vers des scénarios urbanistiques de végétalisation

Comme il a été démontré dans le chapitre précédent (cf. IV.4.4), l'implantation d'une seule infrastructure, performante à l'échelle du bâtiment, devient négligeable dès lors que l'on s'intéresse à son impact à l'échelle urbaine. Une large implantation de surfaces végétalisées doit donc être opérée pour être efficace. A l'échelle de la parcelle ou de petits bassins urbains, cette planification peut être réalisée sur la base du plan masse et en concertation avec l'aménageur comme réalisé sur le site de l'Echangeur (cf. IV.4.4-d)). Cette approche exhaustive n'est plus possible à une échelle plus importante. Il est donc nécessaire de proposer des méthodes d'évaluation de potentiel d'implantation susceptibles de prendre en compte les mutations urbaines. Il s'agit ici de poursuivre les travaux présentés en Section IV.2 sur la diffusion des toitures végétalisées, et de les étendre à toutes les infrastructures bleues et vertes dans la ville d'aujourd'hui et de demain. Comme nous l'avons vu précédemment, celles-ci dépendent de deux facteurs, l'un technique relatif aux caractéristiques de la parcelle (son empreinte bâtie par exemple), et l'autre plus socio-économique en prenant en compte les règles locales d'urbanisme, la volonté des propriétaires, ou les démarches incitatives. A partir de ce constat, et sur la base des travaux effectués sur les objectifs et contraintes, l'établissement de scénarios de diffusion des IBV à grande échelle reposera donc sur :

- L'analyse des données d'occupation du sol et/ou de sous-sol qui permettra de définir un potentiel maximum de développement pour chaque type d'infrastructure étudiée. Il s'agit de définir des lois de corrélation qui induisent que pour un type de sol donné, il existe des exigences techniques et des usages propres au type d'infrastructure étudiée, conditionnant ainsi son implantation à l'échelle de la parcelle. La vision prospective devra mettre en perspective l'évolution de l'occupation des sols avec l'évolution urbaine.

- La définition de ce potentiel tenant compte des caractéristiques physiques de l'espace urbain sera ensuite pondérée à l'aide d'informations qualitatives. Pour cela, des entretiens seront réalisés auprès d'acteurs dit « leviers » (aménageurs, industriels, collectivités…) sans lesquels le potentiel ne pourrait se transformer en réalité tangible. Ces entretiens permettront de classer les scénarios par niveau de faisabilité en tenant compte des règles d'aménagement urbain et des politiques locales, de la volonté des propriétaires, de la visée d'une certification ou de l'acceptation sociale des habitants.

Ces scenarios devraient se matérialiser par des cartes localisant les potentialités d'implantation à l'échelle d'un territoire donné comme une ville ou une agglomération. Une alternative sera aussi proposée sur la base des méthodes (multi)fractales déjà évoquées pour étudier la variabilité spatio-temporelle des champs géophysiques. Des travaux ont ainsi débuté pour étudier la distribution spatiale des toitures végétalisées dans les métropoles européennes. Des demandes de données (SIG) faisant état de la localisation de ces toitures ont été adressées auprès des services concernés dans les villes de Paris, Lyon, Londres, Amsterdam, Rotterdam, Berlin, Francfort, Bruxelles, Genève… A partir des données récoltées, la dimension fractale a été calculée à l'aide d'une technique de box-counting qui détermine le nombre de pixels remplis par une toiture végétalisée à différentes résolutions (Lovejoy et al., 1987). Les

résultats partiels présentés Figure 60 montrent 3 régimes scalants distincts. Le premier (1 à 16 m) correspond aux échelles internes aux toitures (dimension fractale proche de 2). Le régime intermédiaire (16 à 512/1024 m) représente l'échelle pertinente pour l'étude de la distribution des toitures végétalisées. Sa dimension fractale très variable (entre 0,5 et 1,1) augmente avec la densité et l'homogénéité des toitures végétalisées. Enfin le troisième régime (512/1024 m à 16384 m) caractérise le remplissage de l'espace par les toitures végétalisées.

Ces travaux doivent être poursuivis pour définir de possibles lois scalantes caractérisant ces distributions de toitures végétalisées, et parvenir au développement d'un modèle susceptible de les simuler à travers les échelles urbaines. A termes, cela pourra déboucher sur la création de scénarios d'implantation d'IBV crédibles dont on pourra évaluer les performances éco-systémiques.

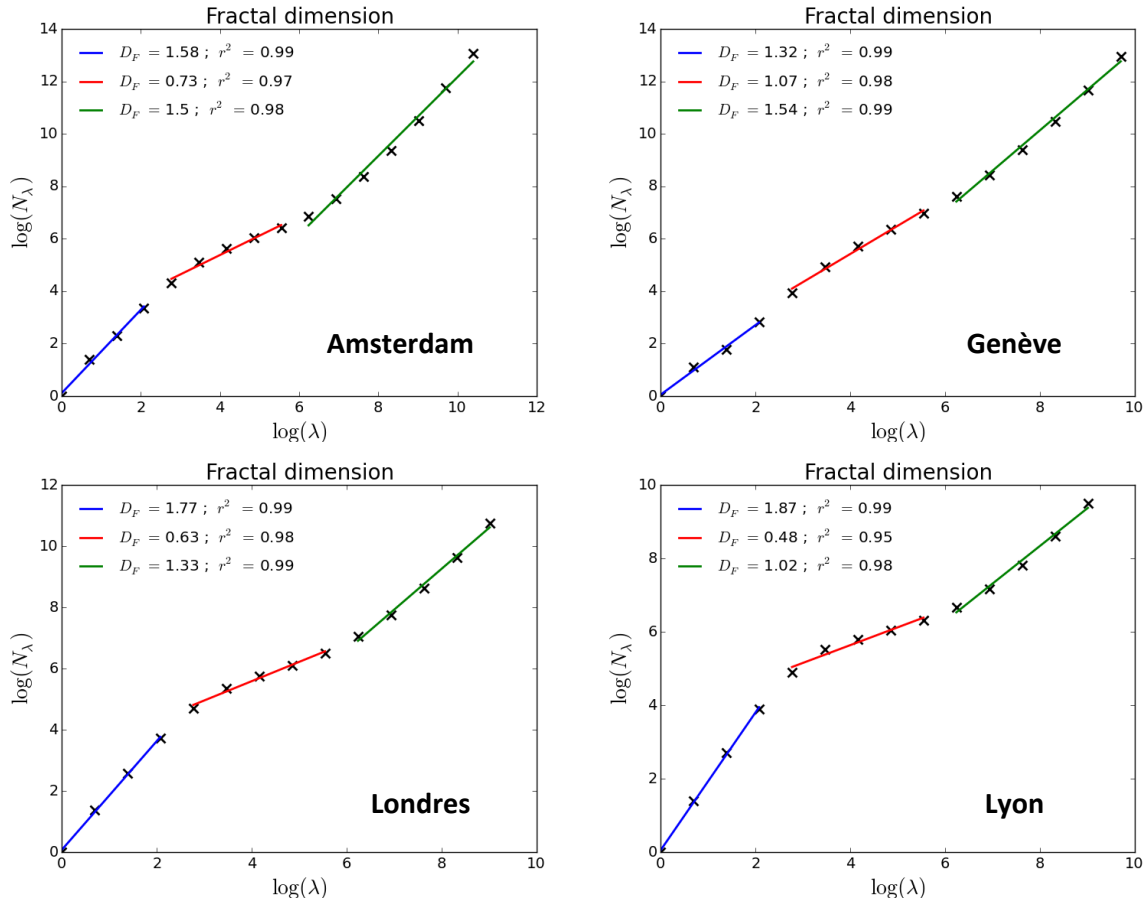

Figure 60. *Représentation des 3 régimes scalants pour les villes d'Amsterdam, Genève, Londres et Lyon*

V.7. Étude multi-échelle des performances et impacts des IBV

Le cadre de **modélisation multi-échelle** développé - capable de tenir compte de la complexité du milieu urbain et de ses interactions avec le milieu récepteur - ouvrira de nombreuses perspectives en termes d'**études d'impact**. Celui-ci rendra possible la prise en compte d'une part de scénarios climatiques (et de leur incertitude), et d'autre part de l'intégration d'IBV afin d'en estimer leurs conséquences respectives. Un tel cadre de travail permettra ainsi de s'interroger sur le **maintien de ces performances à travers les échelles**, à savoir si une augmentation de flux d'évapotranspiration ou une diminution du risque inondation visibles à une certaine échelle le sont encore à d'autres par exemple.

Ces travaux s'inscrivent clairement dans une démarche de la construction d'une ville durable et résiliente. Ils bénéficient de la dynamique actuelle créée autour du projet du Grand Paris. Ce vaste projet, qui va transformer l'agglomération parisienne en métropole mondiale du

XXIème siècle, a pour objectifs d'améliorer le cadre de vie des habitants, de corriger les inégalités territoriales et de construire une ville durable. Principalement axé autour de la construction d'un nouveau réseau de transport en commun, ce projet doit entraîner des modifications significatives en termes d'urbanisme, avec notamment la création de nouveaux pôles économiques et de nombreux logements. Dans un souci de développement durable, des IBV sont généralement prévues (voir promues) dans les projets d'aménagement planifiés lors des 15 prochaines années. Le Grand Paris représente donc un terrain idéal pour mener ces recherches. Ainsi, dans cette optique, nous sommes en train de monter plusieurs collaborations entre HM&Co et certains acteurs de ce vaste projet qui je préciserai par la suite.

V.7.1. La conception de l'ouvrage : quel matériau pour quels objectifs ? Les performances peuvent-elles perdurer dans le temps ?

La multiplication des retours d'expérience provenant de sites instrumentés favorisera les avancées dans la compréhension des processus mis en jeu au sein des matériaux constituant ces infrastructures. Ce **suivi dans le temps des propriétés thermo-hydro-mécanique** des matériaux nous renseignera aussi sur l'évolution des performances au cours du temps et éventuellement sur les procédures de maintenance à mettre en place. La modélisation de ces processus permettra de s'interroger sur la **qualité des substrats mis en œuvre**, et de déterminer des préconisations au regard des performances souhaitées et du climat de la région d'implantation. Les scénarios climatiques pourront ainsi être utilisés pour évaluer la pérennité de ces structures dans le temps. Sur ces thématiques, des contacts sont déjà établis avec les entreprise Le Prieuré (entreprise spécialisée dans les procédés de végétalisation) et VulkaTec (membre du consortium EVNATURB) qui sont très intéressées par ces sujets.

Ces travaux pourront donner lieu à la mise en place d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV). Comme déjà évoqué, ce type de procédure a pour objectif de mesurer les ressources nécessaires pour fabriquer un produit et de quantifier les impacts potentiels de cette fabrication sur l'environnement. Des travaux ont déjà été entrepris dans ce sens concernant les toitures végétalisées (Bozorg Chenani et al., 2015), mais sans tenir compte des bénéfices escomptés en gestion des eaux pluviales, ce qui est pourtant souvent avancé comme sa contribution majeure (Czemiel Berndtsson, 2010). Une analyse plus exhaustive des services éco-systémiques devra non seulement évaluer les performances en termes de rétention et de rafraîchissement, mais aussi d'isolation thermique et de biodiversité par exemple. Une démarche ACV est ainsi prévue dans le cadre de la thèse de Julien Cravero sur les gridshells végétalisés en collaboration avec Adélaïde Féraille (Navier). En s'appuyant sur le logiciel Opensource OpenLCA, développé par Green Delta (Ciroth et al., 2015), et la base de données environnementales Ecoinvent, il s'agira à la fois de mettre au point une méthode permettant d'évaluer les impacts environnementaux de telles structures, mais également de rechercher une quantification des bénéfices liés au rafraichissement urbain. La thèse souhaite donc apporter des éléments méthodologiques en vue d'améliorer l'évaluation environnementale des îlots de chaleur, en lien par exemple avec la croissance des espèces et leur captation de CO2.

V.7.2. La question du raccordement au réseau : les IBV sont-elles suffisantes pour respecter les réglementations ? Comment et dans quelle proportion ?

Tout nouveau projet d'aménagement ou de rénovation urbaine doit respecter les réglementations de rejet qui contraignent le raccordement au réseau d'eaux pluviales existant. Comme nous l'avons vu en Section IV.4.4, celles-ci peuvent être variées (débit de fuite ou volume retenu par exemple). Dans la continuité des travaux précédents, l'idée est ici de généraliser cette approche en réfléchissant sur la manière de **répondre aux contraintes de raccordement à l'aide d'un large panel d'infrastructures bleues et vertes** qui préconisent

la rétention ou l'infiltration dans le sol, et ce quelque soit la taille de la zone concernée. Cette analyse devra ainsi **tenir compte des variations spatiales et temporelles des performances des IBV dues à leurs états initiaux**, ainsi qu'à la distribution des précipitations. La superposition de deux champs multifractals (précipitation en distribution d'IBV) pourra être étudiée pour parvenir à optimiser la disposition des IBV.

Une quantification fréquentielle de ces performances pourra aussi être envisagée. Elle devra prendre en compte la période de retour de l'événement pluvieux rencontré (en reconsidérant les références de type Montana usuellement utilisés et peu adaptés aux fortes intensités ponctuelles responsables d'inondations urbaines), mais aussi l'antécédent pluviométrique symbolisé par l'état de saturation ou de taux de remplissage de la structure. Cette analyse sera effectuée sous temps présent, mais aussi avec les projections issues des scénarios climatiques petite échelle pour évaluer l'évolution du comportement d'une parcelle soumise à un changement de climat.

V.7.3. La gestion du risque inondation : les IBV sont-elles viables pour combattre les inondations ? Permettent-elles d'en faciliter la gestion ?

Comme nous l'avons vu, en milieu urbain les précipitations peuvent causer des débordements ou des déversements vers le milieu récepteur. Nous nous intéresserons donc de près à la gestion du risque inondation sur laquelle j'ai déjà beaucoup travaillé par le passé (cf. Chapitres II et IV) et le laboratoire HM&Co est très actif. Ces travaux bénéficieront donc des outils en cours de développement sur ce sujet. Il s'agira de voir dans quelle mesure les IBV peuvent être des outils pertinents de gestion de ce risque et de **statuer sur les performances individuelles et collectives potentielles de ces infrastructures**, ainsi que du **degré de diffusion nécessaire** pour parvenir à des performances satisfaisantes, et ce sur une large gamme d'échelles.

Le modèle distribué proposé pour ces travaux (Multi-Hydro) est capable d'évaluer ces impacts sur le territoire étudié et de cartographier les zones inondées. Sur cette base, il sera possible de tester les différents scénarios d'IBV classés en fonction de leur faisabilité, ainsi que les scénarios climatiques produits à petite échelle. Il sera entre autre possible d'évaluer la **possible augmentation du risque inondation dans le futur**. On s'interrogera particulièrement sur le type d'événements climatiques sur lesquels la mise en place de ces infrastructures peut agir. Dans tous les cas de figure (temps présent et temps futur, configuration de l'espace actuelle et scénarios urbanistiques), les conséquences de ces scénarios seront estimées à l'aide d'indicateurs faisant état de la fréquence des débits de pointe, des déversements et des inondations. Ils permettront d'**évaluer dans quelle mesure le volume abattu ou le ralentissement de l'écoulement engendré par ces infrastructures peuvent diminuer le risque hydrologique**. La superposition des deux champs hétérogènes que sont les précipitations et l'implantation d'IBV pourra aussi être étudiée ici.

Ce travail sera aussi l'occasion de créer des mises en situation virtuelles relatives à la gestion de crise pour voir s'il est possible **d'évaluer/prévoir les conséquences d'un épisode pluvieux** (sur les réseaux pluviaux et routiers), mais aussi en fonction de l'état initial des infrastructures mises en place (niveau des bassins, état de saturations des espaces verts). Pour cela, il est envisagé de valoriser le radar bande X, installé depuis avril 2015 sur le toit du bâtiment Bienvenüe que se partage l'ENPC et l'IFSTTAR, et géré par HM&Co. Ce radar produit des estimations de champs de précipitation à hautes résolutions spatiales (maille de 100 m) et temporelles (1 minute) et couvre une partie significative de la région Ile-de-France. Il sera possible d'utiliser ces données (estimations et prévisions) en mode pseudo-temps réel pour reproduire des épisodes pluvieux et leurs conséquences. Tout comme la question du

raccordement, ces sujets devront être menés en collaboration avec les collectivités territoriales garantes de la bonne mise en œuvre des réglementations et de la gestion du risque inondation.

V.7.4. La question du rafraîchissement urbain : Quels impacts des IBV ? Comment et dans quelle proportion ?

Le rafraîchissement potentiellement apporté par les IBV une fois quantifié à l'échelle de l'infrastructure, on se demandera dans quelle mesure il peut être étendu et évalué à l'échelle du projet d'aménagement, du quartier, voire de la ville. On s'attachera à se questionner sur la **configuration de l'espace** et le **degré de diffusion** d'IBV nécessaires en vue d'une optimisation de ces performances. Les interactions entre le climat (actuel et futur) et le microclimat représentent tout l'enjeu du couplage entre Multi-Hydro et SOLENE-microclimat, qui devrait aussi permettre de répondre aux questions de variabilités et de limites de ces performances dans l'espace et dans le temps. Un rapprochement avec le bureau d'études d'ingénierie thermique Ecoten (http://urban-comfort.eu/), situé à Prague (République tchèque), est aussi en cours sur ce sujet. Spécialisé dans l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments et des villes, Ecoten est particulièrement intéressé par nos travaux de modélisation sur le couplage thermo-hydrique pour mieux rendre compte du comportement de la végétation dans un contexte de changement climatique en milieu urbain. Il est d'ailleurs prévu de répondre avec eux à l'un des prochains appels à projet ADEME en lien avec cette thématique.

V.7.5. La quantification des performances : les IBV peuvent-elles faciliter l'obtention d'une certification environnementale ?

La mise en œuvre d'un modèle couplé thermo-hydrique pourra permettre de quantifier davantage les performances attendues des IBV. Cela se traduit d'abord par la définition d'indicateurs quantitatifs pertinents qui pourraient ensuite se décliner dans le cadre d'une **certification environnementale**, dans lesquelles l'usage de solutions « naturelles » est rarement explicite. Ces indicateurs doivent faire le lien entre les sorties des modèles et les objectifs environnementaux propres à un projet d'aménagement (évoqués dans la section V.6.2). La certification HQE par exemple promeut la « mise en place d'une stratégie de réduction de l'effet d'îlot de chaleur » (préoccupation « créer une ambiance climatique extérieure satisfaisante" de la cible 1), mais ne spécifie pas d'outils pour y parvenir. Il semble donc nécessaire de développer de quoi mesurer les niveaux de performances sur les critères visés et de s'éloigner du principe de « preuve écrite » en cours jusqu'à maintenant. La modélisation multi-échelle développée dans ce projet devrait permettre d'apporter des solutions allant dans ce sens. Dans cette perspective, des relations sont tissées avec Certivéa (partenaire d'EVNATURB), une entreprise qui conçoit, développe, et réalise des prestations de certification (HQE). L'objectif est de traduire les avancés scientifiques réalisées en suivis et modélisation de ces ouvrages en indicateurs quantitatifs. Certivéa est particulièrement intéressé par l'évolution de leurs certifications HQE infrastructure et aménagement pour lesquels aucune quantification n'est encore exigée.

A ce sujet, j'ai encadré un stage de fin d'étude d'avril à septembre 2017 (en collaboration avec le cabinet Duthilleul et la Société du Grand Paris) sur le suivi et la quantification des performances éco-systémiques de la nouvelle gare de Noisy-Champs construite dans le cadre du Grand Paris. Les objectifs de ce travail étaient de : (i) s'intéresser aux différentes innovations environnementales de cette gare, (ii) proposer une série d'indicateurs quantitatifs susceptibles d'évaluer leur pertinence et leur bon fonctionnement au regard des performances/objectifs définis dans le cahier des charges, et (iii) s'interroger sur la manière d'évaluer ces indicateurs à l'aide de travaux d'instrumentation ou de modélisation à définir par la suite. L'approche envisagée consistait à étudier les différents flux présents au sein de ce projet d'aménagement (eau, chaleur, rayonnement, mais aussi personnes, ainsi que leurs

interactions) et leurs possibles variations dans l'espace et dans le temps. Pour se faire, le stagiaire Lucas Charbonnier a travaillé sur la base de l'ensemble des documents existants (notes, plans, analyses complémentaires réalisés par des bureaux d'étude) pour comprendre les objectifs, la conception, la réalisation et le fonctionnement de cette infrastructure. Il a aussi complété cette analyse par des entretiens réalisés auprès des différents acteurs intervenant dans la réalisation de cet aménagement. Ce fut aussi l'occasion de discuter avec Certivéa et de voir comment ces travaux pourraient être valorisés dans le cadre de la certification HQE infrastructure en cours de développement. Nous espérons que cette étude débouchera prochainement sur une thèse en collaboration avec la SGP.

V.7.6. Le projet d'aménagement : vers une plateforme d'évaluation opérationnelle

Le projet EVNATURB doit déboucher sur le développement d'une plateforme d'évaluation des performances éco-systémiques des IBV à l'échelle du projet d'aménagement. Destiné à de nombreux acteurs intervenant en aménagement urbain (urbanistes, architectes, ingénieurs, certificateurs, collectivités territoriales…), elle les guidera dans le choix de solutions bleues-vertes réellement adaptées à leurs besoins (en prenant en compte contraintes et objectifs environnementaux précédemment définis à l'échelle du projet). La quantification de certaines de leurs performances – entre autres par le couplage thermo-hydrique – devra les accompagner dans l'**obtention d'une certification environnementale**. Un second post-doc est prévu sur la fin du projet pour transformer les résultats de recherche en une application dotée d'une **interface conviviale et facile d'utilisation**. Le plan masse du projet d'aménagement servira de donnée d'entrée principale. Plusieurs scénarios d'implantation d'IBV pourront être envisagés en tenant compte des contraintes géologiques, climatiques, ou réglementaires, listées pour ce site, mais aussi de la complémentarité des espèces en termes de biodiversité. Les indicateurs les plus pertinents en regard des objectifs du projet seront choisis et estimés sur la base des résultats de la modélisation. Cette plateforme sera testée sur différents projets d'aménagement à déterminer au fil du projet. Le Site de Maintenance et Remisage de Champigny-sur-Marne, doté d'une grande toiture végétalisée, a déjà été choisi par la SGP pour être un démonstrateur.

V.7.7. Les impacts sur le milieu récepteur : quel rôle des zones urbaines sur le milieu récepteur ? Les IBV peuvent-elles influencer cette relation ?

L'existence d'une corrélation entre le niveau de la nappe phréatique et les réseaux d'eaux pluviales a déjà été démontré (Barron et al., 2013; Ruban et al., 2007). La complexité des processus de sub-surface est telle que les changements engendrés par l'urbanisation nécessitent un effort de recherche important. C'est d'ailleurs le cas de la ville de Paris qui connaît un problème de déficit de recharge de nappe important du fait de la (trop) grande imperméabilisation de ses sols. L'étude à l'échelle du bassin versant naturel permettra de regarder **dans quelle mesure et sur quelle gamme d'échelles l'urbanisation peut influer sur ces flux de sub-surface**, et donc sur le remplissage des nappes et sur le débit de base des rivières concernées. A cet égard, l'utilisation de Multi-Hydro, qui sera amené à simuler les interactions avec la nappe, permettra d'étudier cette relation entre milieu urbain et milieu récepteur, et de constater si l'introduction des IBV en tant que systèmes d'infiltration peut **contribuer à restaurer les niveaux des nappes ou les débits de base de ces rivières**.

Là encore, l'utilisation des scénarios de changement global fournira une vision prospective sur les conséquences d'un changement de climat, ainsi qu'une diffusion plus large des IBV.

V.8. Perspectives complémentaires

Au gré des avancements de ces travaux, des réponses à appels à projet, ainsi que des collaborations qui en découleront, un certain nombre de perspectives peuvent être envisagées autour de la renaturation du milieu urbain. Il s'agit d'ouvrir des champs d'investigation vers d'autres thématiques, pour conforter une approche systémique et multifonctionnelle de l'utilisation des IBV, qui tienne compte des complexités et interactions multiples entre les différents champs et flux géophysiques et les populations. Cela concerne la qualité de l'eau ou de l'air par exemple, et la poursuite des travaux sur la biodiversité.

Etudier la qualité de l'eau apparait on ne peut plus légitime en regard des objectifs ambitieux de restauration et de maintien du « bon état » des masses d'eau prônés par la directive cadre sur l'eau (DCE-2000), qui pointe la nécessité de mieux comprendre la contribution des systèmes d'assainissement en termes de flux de pollution. Dans cette optique, une approche multi-échelle pour appréhender cet aspect qualitatif pourra aussi être proposée. Au niveau expérimental, cela pourra se traduire par la mesure de la qualité des eaux pluviales en sortie d'ouvrage avec un suivi continu des nitrates, de l'ammonium et des matières en suspension (MES) par exemple (ce qui est envisagé au niveau de la Vague Verte). Ces données permettront d'estimer les flux polluants véhiculés par les eaux de ruissellement et d'en déterminer la provenance (précipitation, érosion ou éventuelle fertilisation). En termes de modélisation, la dégradation physico-chimique des matériaux pourra être intégrée à l'aide d'un couplage multiphysiques à l'échelle de la structure. Aux échelles supérieures, des travaux ont aussi été lancés sur la modélisation des polluants à l'aide de Multi-Hydro.

Les effets de la végétation sur la répartition et les concentrations de polluants atmosphériques pourront aussi être étudiés. Cela nécessite de différencier la pollution gazeuse de la pollution particulaire qui peuvent être respectivement absorber/adsorber et retenus par les feuilles et branches par des processus aérodynamiques. Cela signifie aussi être capable de distinguer les différentes sources extérieurs et intérieurs de pollution atmosphérique urbaine (industrie, chauffage, transport, déchets, agriculture…). Ce sujet pourra être traité en collaboration avec le laboratoire du CEREA (http://cerea.enpc.fr/fr/) dont la pollution de l'air et la micrométéorologie des basses couches de l'atmosphère représentent le cœur de ses activités de recherche. Du point de vue de la végétation, nombre d'espèces sont aussi émettrices de composés organiques volatiles biogéniques qu'il faudra aussi appréhender pour évaluer le bilan net de la végétalisation sur la qualité de l'air environnant. Cette thématique sera à rapprocher des travaux menés sur l'empreinte carbone de la végétalisation (ACV réalisée dans le cadre de la thèse de Julien Cravero), soit le bilan entre sa capacité à stocker et séquestrer du carbone et les émissions liées à sa plantation et son entretien.

La biodiversité (déjà évoquée plus haut) et l'agriculture urbaine apparaissent comme deux sujets connexes qu'il sera intéressant de traiter. Prévue dans le projet ANR déjà cité, l'objectif d'une collaboration avec AgroParisTech est de s'interroger sur le choix de la végétation mise en œuvre au sein d'une IBV. A savoir s'il est possible de privilégier telle ou telle espèce ou substrat au regard des services qu'elle peut prodiguer, de son adaptabilité au climat (présent et à venir), mais aussi en termes d'habitat pour différentes espèces animales (prioritairement insectes et oiseaux). On pourra aussi s'interroger sur les possibles nuisances apportées par cette biodiversité (nécessité d'une maintenance ou présence de moustiques par exemple).

Ces travaux pourront s'inscrire dans le cadre de deux initiatives de grande ampleur qui seront particulièrement structurantes pour Paris et son agglomération dans les années à venir. Le projet du Grand Paris déjà cité va entrainer de fortes modifications dans et autour de la capitale, puisque la rénovation et la construction de nouvelles lignes de transport va s'accompagner de nombreux projets de réhabilitation urbaine. La promotion d'un

aménagement durable bien intégré aux tissus existants, économe en ressources, et maître de ses usages conforte la pertinence de l'approche systémique et multifonctionnelle envisagée dans ce projet de recherche. Le Grand Paris devrait donc offrir des cas d'étude particulièrement intéressants pour mettre en application les avancées théoriques de la recherche, comme c'est déjà le cas avec la future gare de Noisy-Champs.

D'autre part, le plan stratégique de résilience de la ville de Paris voté le 25 septembre 2017 représente aussi un cadre particulièrement fécond pour ce projet de recherche. Membre du réseau Rockefeller des 100 villes résilientes, Paris a développé ces deux dernières années un plan qui vise à préparer et adapter la ville aux défis présents et futurs (crue, canicule, pandémie, attaque terroriste, etc…) à travers une approche holistique et intégrée de développement durable. Structuré autour de 3 piliers (une ville inclusive et solidaire, une ville construite et aménagée pour répondre aux défis du XXIème siècle, une ville en transition qui mobilise l'intelligence collective), ce plan se décline en 35 actions dont nombres sont plus ou moins directement liées aux activités proposées dans ce projet de recherche : (i) Transformer les cours d'écoles en « oasis » îlots de fraîcheur, (ii) Mobiliser la logique « intégrée », l'innovation, et développer la nature en ville pour faire de l'espace public un vecteur d'inclusion sociale et de bien-être, (iii) Aménager des Espaces Verts « intégrés » permettant de répondre à des enjeux climatiques et sociaux, (iv) Explorer la ville des racines à la canopée, et développer de nouveaux usages dans les sous-sols et sur les toits, (v) Développer la première ZAC résiliente et adaptée au changement climatique à Saint-Vincent de Paul, (vi) Concevoir un quartier résilient exemplaire à Bercy-Charenton, (vii) Systématiser les solutions résilientes dans l'urbanisme par les documents réglementaires et les cahiers des charges. Afin d'accompagner Paris dans sa mutation, et de bénéficier de ce cadre aussi riche que prestigieux -ainsi que du relai proposé par le réseau des 100 villes- une première tentative de collaboration a été lancée dans le cadre de l'I-Site FUTURE autour de la notion de résilience urbaine. D'autres initiatives devraient voir le jour dans les mois à venir.

A l'échelle européenne, le Pacte d'Amsterdam, signé en 2016 par les ministres en charge des questions urbaines, marque la reconnaissance par l'Union Européenne des enjeux liés aux problématiques urbaines et sa volonté de mettre en place des politiques publiques cohérentes. L' « Agenda Urbain » qui en découle se structure autour de douze thèmes prioritaires, dont l'adaptation climatique et l'usage durable des « Nature-Based Solutions » sont directement en lien avec ce projet. Fondé sur des partenariats impliquant villes, États membres, la Commission et des parties prenantes telles que des ONG ou des entreprises, l'Agenda Urbain travaille à l'élaboration et à la mise en œuvre d'actions concrètes pour contribuer à une croissance intelligente, durable et inclusive. La mise en œuvre de ce plan se traduira sans conteste dans de nouveaux appels à projet qui représenteront autant d'opportunités à saisir pour l'avancement de ce projet de recherche.

Figure 61. *Vision d'un Paris végétalisé en 2050 par l'architecte Vincent Callebaut*

Enfin pour conclure, il me semble intéressant de mettre ce projet de recherche en perspective de travaux d'architecture récents. La vision des architectes pour imaginer la ville de demain, où la renaturation de la ville est souvent déjà effective, peut représenter une source d'inspiration intéressante. C'est par exemple le cas de l'architecte Belge Vincent Callebaut à qui il a été demandé d'imaginer Paris en 2050 (cf. Figure 61). Dans ce Paris végétalisé, les bâtiments haussmanniens énergivores de la rue de Rivoli ont été agrémentés de structures (gridshell !) végétales et photovoltaïques couplés à des espace d'eau. Ces dessins illustrent parfaitement la nécessité d'une co-gestion des infrastructures qui doivent fonctionner en totale interaction. Bien qu'improbable, leur réalisation théorique se heurte aujourd'hui à des blocages scientifiques déjà évoqués au début de ce chapitre. J'espère que les différentes questions de recherche égrenées au fil de ces pages, et sur lesquelles je compte m'atteler dans les années à venir, permettront d'accompagner cette rupture architecturale d'une nécessaire rupture méthodologique et conceptuelle. Le choix d'une approche systémique et multifonctionnelle pour appréhender les IBV dans l'environnement urbain, et qui rende ainsi compte des interactions multiples à travers les échelles, me semble à ce titre particulièrement adapté.

VI. Références

AEMET, 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Agencia Española de Meteorología.

Antoine, J.-M., Desailly, B., Gazelle, F., 2001. Les crues meurtrières, du Roussillon aux Cévennes//Casualty-causing flood : from the Roussillon region to the Cevennes country. Ann. Géographie 110, 597–623. https://doi.org/10.3406/geo.2001.1704

Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., Olsson, J., Beecham, S., Pathirana, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H., Nguyen, V.-T.-V., 2013. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review. Water Sci. Technol. 68, 16. https://doi.org/10.2166/wst.2013.251

Ashley, R., Lundy, L., Ward, S., Shaffer, P., Walker, L., Morgan, C., Saul, A., Wong, T., Moore, S., 2013. Water-sensitive urban design: opportunities for the UK. Proc. Inst. Civ. Eng. - Munic. Eng. 166, 65–76. https://doi.org/10.1680/muen.12.00046

Barrera-Escoda, 2011. Climate change projections for Catalonia (NE Iberian Peninsula). Part I: Regional climate modeling. Tethys J. Weather Clim. West. Mediterr. https://doi.org/10.3369/tethys.2011.8.08

Barron, O.V., Barr, A.D., Donn, M.J., 2013. Effect of urbanisation on the water balance of a catchment with shallow groundwater. J. Hydrol. 485, 162–176. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.027

Belmeziti, A., Coutard, O., de Gouvello, B., 2014. How much drinking water can be saved by using rainwater harvesting on a large urban area? Application to Paris agglomeration. Water Sci. Technol. 70, 1782. https://doi.org/10.2166/wst.2014.269

Berenguer, M., Corral, C., Sánchez-Diezma, R., Sempere-Torres, D., 2005. Hydrological Validation of a Radar-Based Nowcasting Technique. J. Hydrometeorol. 6, 532–549. https://doi.org/10.1175/JHM433.1

Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments (SMHI Report No. RHO 7).

Beven, K., Binley, A., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrol. Process. 6, 279–298. https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305

Beven, K.J., 2012. Rainfall-runoff modelling: the primer, 2nd ed. ed. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ.

Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. Hydrol. Sci. Bull. 24, 43–69. https://doi.org/10.1080/02626667909491834

Blöschl, G., Sivapalan, M., 1995. Scale issues in hydrological modelling: A review. Hydrol. Process. 9, 251–290. https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305

Borga, M., Degli Esposti, S., Norbiato, D., 2006. Influence of errors in radar rainfall estimates on hydrological modeling prediction uncertainty: ERRORS IN RADAR RAINFALL ESTIMATES. Water Resour. Res. 42, n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2005WR004559

Boudevillain, B., Andrieu, H., Chaumerliac, N., 2006. Evaluation of RadVil, a Radar-Based Very Short-Term Rainfall Forecasting Model. J. Hydrometeorol. 7, 178–189. https://doi.org/10.1175/JHM481.1

Bourque, L.B., Siegel, J.M., Kano, M., Wood, M.M., 2007. Morbidity and Mortality Associated with Disasters, in: Handbook of Disaster Research. Springer New York, New York, NY, pp. 97–112.

Bozorg Chenani, S., Lehvävirta, S., Häkkinen, T., 2015. Life cycle assessment of layers of green roofs. J. Clean. Prod. 90, 153–162. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.070

Butterfield, B.J., Suding, K.N., 2013. Single-trait functional indices outperform multi-trait indices in linking environmental gradients and ecosystem services in a complex landscape. J. Ecol. 101, 9–17. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12013

Cabello, A., Velasco, M., Barredo, J.I., Hurkmans, R.T.W.L., Barrera-Escoda, A., Sempere-Torres, D., Velasco, D., 2011. Assessment of future scenarios of climate and land-use changes in the IMPRINTS test-bed areas. Environ. Sci. Policy 14, 884–897. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.03.003

Carson, T.B., Marasco, D.E., Culligan, P.J., McGillis, W.R., 2013. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. Environ. Res. Lett. 8, 24036. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024036

Carter, T., Jackson, C.R., 2007. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. Landsc. Urban Plan. 80, 84–94. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.06.005

CEMAGREF, 1980. Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Méthode SOCOSE et CRUPEDIX.

Chancibault, K., Anquetin, S., Ducrocq, V., Saulnier, G.-M., 2006. Hydrological evaluation of high-resolution precipitation forecasts of the Gard flash-flood event (8–9 September 2002). Q. J. R. Meteorol. Soc. 132, 1091–1117. https://doi.org/10.1256/qj.04.164

Ciroth, A., Hildenbrand, J., Steen, B., 2015. Life Cycle Costing, in: Dewulf, J., De Meester, S., Alvarenga, R.A.F. (Eds.), Sustainability Assessment of Renewables-Based Products. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 215–228. https://doi.org/10.1002/9781118933916.ch14

Claverie, R., Bouyer, J., Sabre, M., Schwager, J., Mucig, C., Ramier, D., Berthier, E., Sellami, E., Versini, P.-A., de Gouvello, B., 2015. The TERRACES project – A collaborative work to understand the role of vegetative green roof in refreshing the urban ambiances. Presented at the 9th International conference on Urban Climate, Toulouse (France).

Cole, S.J., Moore, R.J., 2008. Hydrological modelling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall. J. Hydrol. 358, 159–181. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.025

Corral, C., Sempere-Torres, D., Revilla, M., Berenguer, M., 2000. A semi-distributed hydrological model using rainfall estimates by radar. Application to Mediterranean basins. Phys. Chem. Earth Part B Hydrol. Oceans Atmosphere 25, 1133–1136. https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00166-0

Czemiel Berndtsson, J., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. Ecol. Eng. 36, 351–360. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014

Dankers, R., Feyen, L., 2009. Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. J. Geophys. Res. 114. https://doi.org/10.1029/2008JD011523

DeBano, L.., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. J. Hydrol. 231–232, 195–206. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3

Deidda, R., 2000. Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework. Water Resour. Res. 36, 1779–1794. https://doi.org/10.1029/2000WR900038

Delrieu, G., Braud, I., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Fabry, F., Freer, J., Gaume, E., Nakakita, E., Seed, A., Tabary, P., Uijlenhoet, R., 2009. Weather radar and hydrology. Adv. Water Resour. 32, 969–974. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.03.006

Delrieu, G., Nicol, J., Yates, E., Kirstetter, P.-E., Creutin, J.-D., Anquetin, S., Obled, C., Saulnier, G.-M., Ducrocq, V., Gaume, E., Payrastre, O., Andrieu, H., Ayral, P.-A., Bouvier, C., Neppel, L., Livet, M., Lang, M., du-Châtelet, J.P., Walpersdorf, A., Wobrock, W., 2005. The Catastrophic Flash-Flood Event of 8–9 September 2002 in the Gard Region, France: A First Case Study for the Cévennes–Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. J. Hydrometeorol. 6, 34–52. https://doi.org/10.1175/JHM-400.1

Deque, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Glob. Planet. Change 57, 16–26. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Dorchies, D., Thirel, G., Perrin, C., Bader, J.-C., Thepot, R., Rizzoli, J.-L., Jost, C., Demerliac, S., 2016. Climate change impacts on water resources and reservoir management in the Seine river basin (France). Houille Blanche 32–37. https://doi.org/10.1051/lhb/2016047

Douthe, C., Caron, J.F., Baverel, O., 2010. Gridshell structures in glass fibre reinforced polymers. Constr. Build. Mater. 24, 1580–1589. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.037

El Tabach, E., Tchiguirinskaia, I., Mahmood, O., Schertzer, D., 2009. Multi-Hydro: a spatially distributed numerical model to assess and manage runoff processes in peri-urban watersheds. Presented at the Final Conference of the COST Action C22, Road map towards flood resilient Urban Environment.

Evensen, G., 2003. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation. Ocean Dyn. 53, 343–367. https://doi.org/10.1007/s10236-003-0036-9

Fassman-Beck, E., Voyde, E., Simcock, R., Hong, Y.S., 2013a. 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? J. Hydrol. 490, 11–20. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.004

Fassman-Beck, E., Voyde, E., Simcock, R., Hong, Y.S., 2013b. 4 Living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? J. Hydrol. 490, 11–20. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.004

Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., Principi, P., 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. Build. Environ. 45, 1890–1904. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001

Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. Urban Water J. 12, 525–542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314

Fratini, C.F., Geldof, G.D., Kluck, J., Mikkelsen, P.S., 2012. Three Points Approach (3PA) for urban flood risk management: A tool to support climate change adaptation through transdisciplinarity and multifunctionality. Urban Water J. 9, 317–331. https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.668913

Gaume, E., Borga, M., 2008. Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods: proposal of a methodology and illustrations: Post-flood field investigations in upland catchments. J. Flood Risk Manag. 1, 175–189. https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00023.x

Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., Villeneuve, J.-P., 2004. Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. J. Hydrol. 286, 135–154. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.015

GEOPLUS, 2004. Rd 999 entre nîmes et le vigan, etude hydraulique des ouvrages de franchissement. Conseil Général du Gard, DDE.

Giangola-Murzyn, A., 2014. Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville, résilience aux inondations.

Giorgi, F., Lionello, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. Glob. Planet. Change 63, 90–104. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Gires, A., Giangola-Murzyn, A., Abbes, J.-B., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Lovejoy, S., 2015. Impacts of small scale rainfall variability in urban areas: a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework. Urban Water J. 12, 607–617. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.923917

Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Lovejoy, S., 2013. Multifractal analysis of a semi-distributed urban hydrological model. Urban Water J. 10, 195–208. https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.716447

Gutmann, E.D., Rasmussen, R.M., Liu, C., Ikeda, K., Gochis, D.J., Clark, M.P., Dudhia, J., Thompson, G., 2012. A Comparison of Statistical and Dynamical Downscaling of Winter Precipitation over Complex Terrain. J. Clim. 25, 262–281. https://doi.org/10.1175/2011JCLI4109.1

Hardy, J., Gourley, J.J., Kirstetter, P.-E., Hong, Y., Kong, F., Flamig, Z.L., 2016. A method for probabilistic flash flood forecasting. J. Hydrol. 541, 480–494. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.007

Hilten, R.N., Lawrence, T.M., Tollner, E.W., 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. J. Hydrol. 358, 288–293. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.010

Hoang, C.T., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Arnaud, P., Lavabre, J., Lovejoy, S., 2012. Assessing the high frequency quality of long rainfall series. J. Hydrol. 438–439, 39–51. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.044

Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H.V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., Cudennec, C., 2013. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. Hydrol. Sci. J. 58, 1198–1255. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183

Ichiba, A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Bompard, P., Ten Veldhuis, M.-C., 2017. Scale effect challenges in urban hydrology highlighted with a distributed hydrological model. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 1–25. https://doi.org/10.5194/hess-2017-286

IPCC, 2014. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), Geneva (Switzerland).

Jonkman, S.N., Kelman, I., 2005. An Analysis of the Causes and Circumstances of Flood Disaster Deaths: An Analysis of the Causes and Circumstances of Flood Disaster Deaths. Disasters 29, 75–97. https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x

Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014. Le climat de la France au XXIe siècle - Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Direction Générale de l'Energie et du Climat.

Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A., Jones, R.G., 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. Clim. Change 92, 41–63. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9471-4

Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. Hydrol. Sci. J. 31, 13–24. https://doi.org/10.1080/02626668609491024

Lang, M., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. J. Hydrol. 225, 103–117. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00167-5

Lavabre, J., Torres, D.S., Cernesson, F., 1993. Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. J. Hydrol. 142, 273–299. https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90014-Z

Le Lay, M., Saulnier, G.M., 2007. Exploring the signature of climate and landscape spatial variabilities in flash flood events: Case of the 8-9 September 2002 Cévennes-Vivarais catastrophic event: HYDROLOGICAL INTERACTIONS ON FLASH FLOOD. Geophys. Res. Lett. 34, n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2007GL029746

Leander, R., Buishand, T.A., 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. J. Hydrol. 332, 487–496. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.006

Lenderink, G., Buishand, A., van Deursen, W., 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 1145–1159. https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007

Lenihan, J.M., Drapek, R., Bachelet, D., Neilson, R.P., 2003. CLIMATE CHANGE EFFECTS ON VEGETATION DISTRIBUTION, CARBON, AND FIRE IN CALIFORNIA. Ecol. Appl. 13, 1667–1681. https://doi.org/10.1890/025295

Letey, J., 2001. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. Hydrol. Process. 15, 2867–2875. https://doi.org/10.1002/hyp.378

Llort, X., Velasco-Forero, C., Roca-Sancho, J., Sempere-Torres, D., 2008. Characterization of Uncertainty in Radar-Based Precipitation Estimates and Ensemble Generation. Presented at the Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Helsinky.

Lovejoy, S., Schertzer, D., Tsonis, A.A., 1987. Functional Box-Counting and Multiple Elliptical Dimensions in Rain. Science 235, 1036–1038. https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1036

Maksimovic, C., Stankovic, S., Liu, X., Lalic, M., 2013. Blue green dream project's solution for urban areas in the future. Presented at the International science conference reporting for sustainability, Recici (Montenegro).

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V.K.C., Chun, K.P., Goodess, C.M., Jones, R.G., Onof, C., Vrac, M., Thiele-Eich, I., 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Rev. Geophys. 48. https://doi.org/10.1029/2009RG000314

Marsalek, J., Chocat, B., 2002. International report: Stormwater management. Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res. 46, 1–17.

McKee, T., Doesken, N., Kleist, J., 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Presented at the Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, pp. 233–236.

MOPU, 1999. Máximas Lluvias de la España peninsular (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo,). Dirección General de Carreteras, Madrid.

MOPU, 1990. Norma 5.2-IC, drenaje superficial: instrucción de carreteras (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo). Dirección General de Carreteras, Madrid.

Moreno, J., Rodriguez Urbieta, I., Zavala, G., Martin, M., 2009. Incendios y cambio climatico (No. 114), Seguridad y medio ambiante.

Morille, B., Lauzet, N., Musy, M., 2015. SOLENE-microclimate: A Tool to Evaluate Envelopes Efficiency on Energy Consumption at District Scale. Energy Procedia 78, 1165–1170. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.088

Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J.A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., Turcotte, R., 2013. On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 1189–1204. https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013

Naulin, J.-P., Payrastre, O., Gaume, E., 2013. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. J. Hydrol. 486, 88–99. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.044

Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L.G., 2009. Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. J. Hydrol. 379, 193–204. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.008

Perrier, E., Bird, N., Rieu, M., 1999. Generalizing the fractal model of soil structure: the pore–solid fractal approach. Geoderma 88, 137–164. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00102-5

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. J. Hydrol. 242, 275–301. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00393-0

Petrucci, G., Rioust, E., Deroubaix, J.-F., Tassin, B., 2013. Do stormwater source control policies deliver the right hydrologic outcomes? J. Hydrol. 485, 188–200. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.018

Poë, S., Stovin, V., Berretta, C., 2015. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. J. Hydrol. 523, 356–367. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.002

Pouget, L., Escaler, I., Guiu, R., Mc Ennis, S., Versini, P.-A., 2012. Global Change adaptation in water resources management: The Water Change project. Sci. Total Environ. 440, 186–193. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.036

Prudhomme, C., Davies, H., 2009. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate. Clim. Change 93, 197–222. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9461-6

Prudhomme, C., Wilby, R.L., Crooks, S., Kay, A.L., Reynard, N.S., 2010. Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. J. Hydrol. 390, 198–209. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.043

Quintero, F., Sempere-Torres, D., Berenguer, M., Baltas, E., 2012. A scenario-incorporating analysis of the propagation of uncertainty to flash flood simulations. J. Hydrol. 460–461, 90–102. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.045

Rana, G., Katerji, N., 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. Eur. J. Agron. 13, 125–153. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8

Rossman, L.A.., 2016. Storm Water Management Model Reference Manual. Volume I – Hydrology (No. EPA/600/R-1 5/162 A). U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH 45268.

Royer, J.-F., Biaou, A., Chauvin, F., Schertzer, D., Lovejoy, S., 2008. Multifractal analysis of the evolution of simulated precipitation over France in a climate scenario. Comptes Rendus Geosci. 340, 431–440. https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.05.002

Ruban, V., Rodriguez, F., Rosant, J.M., Larrarte, F., Joannis, C., Mestayer, P., Andrieu, H., 2007. Suivi expérimental hydrologique et énergétique d'un petit bassin versant urbain. Presented at the NOVATECH, Lyon (France), pp. 1189–1196.

Ruin, I., Gaillard, J., Lutoff, C., 2007. How to get there? Assessing motorists' flash flood risk perception on daily itineraries. Environ. Hazards 7, 235–244. https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.07.005

Saulnier, G.-M., Le Lay, M., 2009. Sensitivity of flash-flood simulations on the volume, the intensity, and the localization of rainfall in the Cévennes-Vivarais region (France): RAINFALL SIGNATURE ON FLASH-FLOODS. Water Resour. Res. 45, n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2008WR006906

Schertzer, D., Lovejoy, S., 2011. MULTIFRACTALS, GENERALIZED SCALE INVARIANCE AND COMPLEXITY IN GEOPHYSICS. Int. J. Bifurc. Chaos 21, 3417–3456. https://doi.org/10.1142/S0218127411030647

Schertzer, D., Lovejoy, S., 1987. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. J. Geophys. Res. 92, 9693. https://doi.org/10.1029/JD092iD08p09693

Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., 2015. Multifractal vector fields and stochastic Clifford algebra. Chaos Interdiscip. J. Nonlinear Sci. 25, 123127. https://doi.org/10.1063/1.4937364

Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Lovejoy, S., Tuck, A.F., 2012. Quasi-geostrophic turbulence and generalized scale invariance, a theoretical reply. Atmospheric Chem. Phys. 12, 327–336. https://doi.org/10.5194/acp-12-327-2012

Sellami-Kaaniche, E., de Gouvello, B., Gromaire, M.-C., Chebbo, G., 2014. A new method for modelling roofing materials emissions on the city scale: Application for zinc in the City of Créteil (France). Environ. Sci. Pollut. Res. 21, 5284–5296. https://doi.org/10.1007/s11356-013-2275-8

Skouri-Plakali, E., Ichiba, A., Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2018. High resolution modelling of a small urban catchment. Environ. Model. Assess.

Staes, C., Orengo, J.C., Malilay, J., RulláN, J., Noji, E., 1994. Deaths due to Flash Floods in Puerto Rico, January 1992: Implications for Prevention. Int. J. Epidemiol. 23, 968–975. https://doi.org/10.1093/ije/23.5.968

Stanic, F., Cui, Y.J., Versini, P.-A., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., 2018a. A device for the simultaneous determination of the water retention properties and the hydraulic conductivity of an unsaturated green-roof material. Geotech. Test. J.

Stanic, F., Delage, P., Cui, Y.J., Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2018b. Investigation of retention and transfer properties of green roofs: the Green Wave of Champs-sur-Marne (France). Presented at the EGU 2018, Vienne, Autriche.

Stanic, F., Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Delage, P., Cui, Y.J., 2018c. Analysis of green roof's water balance components using Universal Multifractal (UM) framework. Presented at the EGU 2018, Vienne, Autriche.

Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., Hanafin, J., Nolan, P., 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. J. Hydrol. 356, 28–45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.025

Stovin, V., Poë, S., Berretta, C., 2013. A modelling study of long term green roof retention performance. J. Environ. Manage. 131, 206–215. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026

Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., Berretta, C., 2015. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. Ecol. Eng. 85, 159–172. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.076

Szymkiewicz, R., 2002. An alternative IUH for the hydrological lumped models. J. Hydrol. 259, 246–253. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00595-9

Tayeb, F., Caron, J.-F., Baverel, O., Du Peloux, L., 2013. Stability and robustness of a 300m2 composite gridshell structure. Constr. Build. Mater. 49, 926–938. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.036

USDA, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds (Natural Resources Conservation Service No. Technical Report 55).

van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Van Wagner, C., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System (No. Forestry Technical Report 35). Canadian Forestry Service, Ottawa.

Vautard, R., Yiou, P., 2009. Control of recent European surface climate change by atmospheric flow. Geophys. Res. Lett. 36. https://doi.org/10.1029/2009GL040480

Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.-M., Viney, N.R., Teng, J., 2010. Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. J. Hydrol. 394, 447–457. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.018

Velasco-Forero, C.A., Sempere-Torres, D., Cassiraga, E.F., Jaime Gómez-Hernández, J., 2009. A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data. Adv. Water Resour. 32, 986–1002. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.10.004

Velázquez, J.A., Schmid, J., Ricard, S., Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Minville, M., Chaumont, D., Caya, D., Ludwig, R., Turcotte, R., 2013. An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 565–578. https://doi.org/10.5194/hess-17-565-2013

Vivoni, E.R., Entekhabi, D., Bras, R.L., Ivanov, V.Y., Van Horne, M.P., Grassotti, C., Hoffman, R.N., 2006. Extending the Predictability of Hydrometeorological Flood Events Using Radar Rainfall Nowcasting. J. Hydrometeorol. 7, 660–677. https://doi.org/10.1175/JHM514.1

Weeks, W.D., Boughton, W.C., 1987. Tests of ARMA model forms for rainfall-runoff modelling. J. Hydrol. 91, 29–47. https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90126-0

Willems, P., Vrac, M., 2011. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. J. Hydrol. 402, 193–205. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.030

Wright, D.B., Smith, J.A., Villarini, G., Baeck, M.L., 2013. Estimating the frequency of extreme rainfall using weather radar and stochastic storm transposition. J. Hydrol. 488, 150–165. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.003

Zappa, M., Jaun, S., Germann, U., Walser, A., Fundel, F., 2011. Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. Atmospheric Res. 100, 246–262. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.005

VII. Curriculum Vitae

Activités de recherche	
Depuis mars 2013	**Chargé de Recherche à l'Ecole des Ponts ParisTech (ENPC) : Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU), puis Hydrologie, Météorologie et Complexité (HM&Co)** Evaluation des performances éco-systémiques d'une renaturation du milieu urbain (**Coordinateur** du projet ANR EVNATURB) : - Approche multidisciplinaire (hydrologie, thermique, urbanisme, biodiversité) - Instrumentation et modélisation hautes résolutions et multi-échelle - Développement d'une plateforme d'évaluation à vocation opérationnelle Valorisation des infrastructures bleues et vertes en milieu urbain pour combattre les effets du changement climatique (Projet européen Blue Green Dream, Climate KIC) - Développement d'un réseau ubiquitaire de suivi hydrique - Modélisation hydrologique multi-échelle - Evaluation des performances hydrologiques des toitures végétalisées Rafraîchissement urbain et toitures végétalisées (Projet TERRACES, ADEME) - Etude du potentiel de végétalisation du bâti en milieu urbain : approche multi-échelle, prise en compte de facteurs techniques, historiques et politiques - Cartographie de l'impact du rafraichissement urbain Eco-conception des Villes durables (Chaire Eco-conception Vinci ParisTech) - Evaluation éco-systémique d'un projet d'aménagement : Modélisation pluridisciplinaire (efficacité énergétique, gestion de l'eau et biodiversité) Modélisation multi-échelle de la pollution due au trafic dans un environnement urbain (Projet ANR Trafipollu) Estimation des incertitudes affectant les mesures de concentrations et de flux polluants en réseau d'assainissement (Projet ANR Mentor)
Mars 2012-Février 2013	**Ingénieur Recherche au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)** Étude de l'impact hydrologique des toitures végétalisées sur le ruissellement urbain (Projet TVGEP, R2DS) - Développement d'un modèle hydrologique dédié aux toitures végétalisées (SWMM) et impact sur les déversements et débordements - Collaboration avec des opérationnels (CG92-93) et des industriels (SOPREMA)
2008-2012	**Chargé de projets au Centre de Recherche Appliquée en Hydrométéorologie de l'Université Polytechnique de Catalogne (CRAHI-UPC), Barcelone (Espagne) :** Etude de l'influence du changement global sur les ressources en eau (Projet européen WATERCHANGE, LIFE +) - Création de scénarios climatiques à l'échelle du bassin versant (downscaling) - Modélisation hydrologique distribuée et étude d'impacts - Développement d'un outil de planification, d'adaptation et d'optimisation Amélioration de la préparation et la gestion des risques de crues éclair et de coulées de boues (Projet européen IMPRINTS, FP7) - Constitution d'une base de données et inter-comparaison de modèles - Valorisation des données radar dans l'amélioration des prévisions à court terme - Prise en compte de l'incertitude lors des prévisions de débit Apport de la télédétection dans l'amélioration de la modélisation hydrologique en milieu montagneux (Projet AGORA) - Modélisation de l'accumulation et de la fusion du manteau neigeux - Assimilation de données satellite de couverture neigeuse dans le modèle Reconstruction des champs historiques journaliers de précipitation sur la région de Catalogne (Projet ARCON)

	- Développement d'une méthode statistique à base de champs de pluie radar - Réévaluation des cartes Intensité-Durée-Fréquence sur la région
2005-2007	**Doctorat au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)** Développement d'un prototype de système d'alerte inondation adapté au réseau routier - Enquêtes, visites terrain et collecte de données - Modélisation de l'aléa et caractérisation de la vulnérabilité du réseau routier - Validation des méthodes et outils développés en collaboration avec les opérationnels (SPC, SDIS)
2004	**Logisticien distribution au sein de l'ONG Première Urgence** Mission humanitaire au Libéria (**anglophone**) : - Recrutement, formation et encadrement de 70 personnes - Organisation des distributions de vivres dans des camps de réfugiés

Formation

2007	**Docteur en Hydrologie de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)** sous la direction d'Eric Gaume et d'Hervé Andrieu
2002-2003	Double cursus avec l'obtention du **diplôme d'ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes (ECN)** et du **DEA Génie Civil Eau Environnement Génie côtier** de l'Université de Nantes

Langues et Langages Informatiques

Anglais courant et professionnel
Espagnol courant et professionnel
Italien courant
Allemand, **Catalan** : notions

Systèmes d'exploitation (+ utilitaires) : Windows, Linux et Mac
Logiciels de calcul et SIG : Matlab, Scilab, IDL, Mapinfo, GRASS, QGIS
Modèles hydrologiques et thermiques : Infoworks, SWMM, HYDRUS, VS2DT, Pléiade-Comfie, OpenFoam, SOLENE-Microclimat, Multi-Hydro

Langages de programmation : Fortran, C, Bash, html, Python, R

VIII. Publications et participations à des conférences

Publications

Versini, P.A., Kotelnikova, N., Poulhes, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D. and Leurent, F., 2018. Blue and Green Infrastructures to solve stormwater management issues in an eco-designed urban project – assessment by a modelling approach. *Urban Water Journal.* En revision

Stanic F., Cui Y.J., Delage P., Versini P.-A., Schertzer D, Tchiguirinskaia I., 2018. A device for the simultaneous determination of the water retention properties and the hydraulic conductivity of an unsaturated green-roof material. *Geotechnical Testing Journal.* En revision

Skouri-Plakali I., Ichiba A., Versini P-A, Tchiguirinskaia I., Schertzer D, 2018. High resolution modelling of a small urban catchment. *Environmental Modeling & Assessment.* En revision

Versini, P.A., Gires, A., Fitton, G., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., Ni, V., Doumenc, V., 2018. ENPC Blue Green Wave: a Blue Green Dream pilot site to assess multifunctional aspect of green infrastructures. *La Houille Blanche*, 4 : 34-42

Versini, P.A., Kotelnikova, N., Poulhes, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D. and Leurent, F., 2018. A distributed modelling approach to assess the use of Blue and Green Infrastructures to fulfil stormwater management requirements. *Landscape and Urban Planning*, 173: 60-63

Versini, P.-A., 2017. Les infrastructures bleues et vertes - outils d'adaptation au changement global en milieu urbain. *Techniques de l'Ingénieur.* P4260

Versini, P.-A., 2017. Participation au "Dictionnaire passionnel de la modélisation urbaine", sous la direction de Commenges, H., Deroubaix J.-F, Bonhomme C. Edition l'œil d'or, ISBN: 978-2-913661-84-4

Versini, P.-A, Pouget, L., Mc Ennis, S., Custodio, E., Escaler, I., 2016. Climate change impact on water resources availability – Case study of the Llobregat River basin (Spain). *Hydrological Sciences Journal*, 61(14): 2496-2508.

Versini, P.A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2016. Toward an operational tool to simulate green roof hydrological impact at the basin scale: a new version of the distributed rainfall-runoff model Multi-Hydro. *Water Science and Technology*, 74(10), DOI: 10.2166/wst.2016.310

Versini, P.-A, Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B., 2015. Assessment of the hydrological impacts of green roof: from roof scale to basin scale. *Journal of hydrology*, 524: 562-575.

de Gouvello, B., Versini, P.-A., Paupardin, J., and Pruvots-Bouvatier, M., 2015. Multi-scale approach of the green roofing potential: application to the Paris agglomeration. International Conference on Water, Megacities and Climate Change, 1-4 décembre 2015, Paris (France)

Versini, P.A., Jouve, P., Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B., 2015. Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale - Study in the Hauts-de-Seine county (France). *Urban Water Journal*, 13(4) : 372-381

Versini, P.A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2015. Mesure continue des flux hydriques d'une toiture végétalisée : la Vague Verte de Champs-sur-Marne comme outil de gestion des eaux pluviales. Journées scientifiques du GFHN, 24-25 novembre 2015, Marne-la-Vallée (France). https://gfhn2015.sciencesconf.org/resource/page/id/3

Versini, P.-A., Joannis, C., Chebbo, G., 2015. Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement. Guides et Protocoles. ONEMA, 82 pp : http://www.onema.fr/IMG/pdf/Guide-Turbidite.pdf

Versini, P.A., Berenguer, M., Corral, C. and Sempere-Torres, D., 2014. An operational flood warning system for poorly gauged basins. Demonstration in the Guadalhorce basin (Spain). *Natural Hazards*, 71(3): 1355-1378.

Versini, P.A., Velasco, M., Cabello, A. and Sempere-Torres, D., 2013. Hydrological impact of forest fires and climate change in a Mediterranean basin. *Natural Hazards*, 66(2): 609-628.

Velasco, M., Versini, P.A., Cabello, A. and Barrera-Escoda, T., 2013. Assessment of flash floods taking into account climate change scenarios in the Llobregat River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 3145-3156.

Pouget, L., Escaler, I., Guiu, R., Mc Ennis, S. and Versini, P.A., 2012. Global Change adaptation in water resources management: The Water Change project. *Science of The Total Environment*, 440: 186-193.

Versini, P.-A. 2012. Evaluation of radar estimates and forecasts to prevent flash flood in real time by using a road inundation warning system, *Journal of Hydrology*, 416-417, 157-170

Versini, P.-A., 2012. Les systèmes d'alerte précoce pour les inondations soudaines (crues éclair). Techniques de l'Ingénieur. TI630-P4225

Versini, P.-A., Berenguer, M., Velasco, D, Sempere-Torres, D., and Santiago A. 2011. An operational flood warning system in Andalusia (Spain) : Presentation and first results, *HESSD*, http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/10425/2011/hessd-8-10425-2011.html

Versini, P.-A., Gaume, E., and Andrieu, H. 2010. Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information – test in a flash flood prone area (the Gard region, France). *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 10 : 793-803

Versini, P.-A., Andrieu, H., and Gaume, E. 2010. Application of a distributed hydrological model to the design of a road submersion warning system for flash flood prone areas. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 10 : 805-817

Versini, P.A., Gaume, E. and Andrieu, H., 2009. Simulations hydrométéorologiques distribuées et prévision des coupures de routes dans le Gard. *La Houille Blanche*, 6: 72-75.

Conférences

Charbonnier, L., Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2018. Monitoring the environmental impacts of an innovative subway station in Noisy-Champs : Goals and indicators. Conférence EGU, 9-13 Avril 2018, Vienne (Autriche)

Cravero, J., Versini, P.-A., Caron, J.-F., Feraille, A., Tchiguirinskaia, I., 2018. Optimal implementation of green structures for mitigating urban heat island effects. Conférence EGU, 9-13 Avril 2018, Vienne (Autriche)

Versini, P.-A., Gires A., Tchiguirinskaia, I., and Schertzer D., 2018. Green roofs implementation in European cities – A fractal analysis. Conférence EGU, 9-13 Avril 2018, Vienne (Autriche)

Versini, P.-A., Stanic, F., Schertzer, D., 2018. Measurement and characterization of space-time variability of thermo-hydric fluxes in Blue Green Solutions. Conférence EGU, 9-13 Avril 2018, Vienne (Autriche)

Stanic, F., Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D. Cui Y.J., Delage P., 2018. Analysis of green roof's water balance components using Universal Multifractal (UM) framework. Conférence EGU, 9-13 Avril 2018, Vienne (Autriche)

Stanic, F., Delage P., Cui Y.J.,Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2018. Investigation of retention and transfer properties of green roofs: the Green Wave of Champs-sur-Marne (France). Conférence EGU, 9-13 Avril 2018, Vienne (Autriche)

Versini, P.A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2017. The EVNATURB project: toward an operational platform to assess Blue Green Solutions eco-systemic services in urban environment. Conférence AGU, 11-15 Décembre 2017, Nouvelle Orléans (USA)

Charbonnier, L., Versini, P.-A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2017. Indicators to assess the environmental performances of (an innovative ?) the future Noisy-Champs subway station. Conférence AGU, 11-15 Décembre 2017, Nouvelle Orléans (USA)

Versini, P.A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2017. Green roof rainfall-runoff modelling: is the comparison between conceptual and physically based approach relevant? Conférence EGU, 23-28 Avril 2017, Vienne (Autriche)

Stanic, F., Versini, P.A., Schertzer, D., Delage, P., Tchiguirinskaia, I., Cui, Y.-J., Baudoin, G., 2017. Multi-scale monitoring of a remarkable green roof: the Green Wave of Champs-sur-Marne. Conférence EGU, 23-28 Avril 2017, Vienne (Autriche)

Versini, P.A., 2017. Desempeños de los techos verdes en la gestión del recurso hídrico, un asunto de escalas en un entorno urbano complejo, Coloquio Aguas Urbanas, 1-2 juin 2017, Cartagena (Colombie)

Versini, P.A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2016. Instrumentation et modélisation distribuée de la vague verte de Champs-sur-Marne : premiers résultats, conférence NOVATECH, 28-30 juin 2016, Lyon (France)

Versini, P.A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2016. Blue and green infrastructures implementation to solve stormwater management issues in a new urban development project – a modelling approach, Conférence EGU, 18-22 Avril 2016, Vienne (Autriche)

Versini, P.A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2015. Performance of Green roof in stormwater management regarding high-resolution precipitation fields, 10th International Urban Drainage Modelling Conference, 2015 September 20-23th, Mont-Saint-Anne (Canada)

Versini, P.A., Gires, A., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2015. Mesure continue des flux hydriques d'une toiture végétalisée : la vague verte de Champs-sur-Marne comme outil de gestion des eaux pluviales, 40ème Journées Scientifiques du GFHN, 22-25 Novembre 2015, Marne la Vallée (France)

Ramier, D., Cambus, C., Berthier, E., Versini, P.-A., 2015. Modelling of water content in road structure - The shoulder effect, 10th International Urban Drainage Modelling Conference, 2015 September 20-23th, Mont-Saint-Anne (Canada)

Versini, P.A., Gires, A., Fitton, G., Tchiguirinskaia, I., Schertzer, D., 2015. Green roof and storm water management policies: monitoring experiments on the ENPC Blue Green Wave, Conférence EGU, 12-17 Avril 2015, Vienne (Autriche)

de Gouvello, B., Versini, P.-A., Paupardin, J., and Pruvots-Bouvatier, M., 2015. Multi-scale approach of the green roofing potential: application to the Paris agglomeration. International Conference on Water, Megacities and Climate Change, 1-4 décembre 2015, Paris (France)

Claverie, R., Bouyer, J., Sabre, M., Schwager, J., Mucig, C., Ramier, D., Berthier, E., Sellami, E., Versini, P.-A., de Gouvello, B., 2015. The TERRACES project – A collaborative work to understand the role of vegetative green roof in refreshing the urban ambiances. 9th International conference on Urban Climate, Toulouse (France).

Versini, P.A., Gires, A., Abbes, J.-B., Giangola-Murzyn, A., Tchingurinskaia, I., Schertzer, D., 2014. Simulation of Green Roof Impact at Basin Scale by Using a Distributed Rainfall-Runoff Model. 13th International Conference on Urban Drainage, 7-12 Septembre 2014, Sarawak (Malaysia)

Versini, P.A., Petrucci, G. and de Gouvello, B., 2014. Green roof as a solution to solve stormwater management issues? Assessment on a long time period at the parcel scale, 6th IAHS-EGU International Symposium on Integrated Water Resources Management, 4-6 juin 2014, Bologne (Italie)

Berthier, E., Ramier, D., Versini, P.A., Pinta, P. and de Gouvello, B., 2013. FAVEUR : a functional model to assess the hydrological performance of vegetative (green) roofs, World Green Infrastructure Congress, Nantes (France).

Versini, P.A., Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B., 2013. How green roof can impact urban runoff? Hydrological impact study from roof scale to basin scale, World Green Infrastructure Congress, Nantes (France).

Claverie, R., Bouyer, J., Sabre, M., Schwager, J., Mucig, C., Ramier, D., Berthier, E., Sellami, E., Versini, P.-A., de Gouvello, B., 2013. The TERRACES project, World Green Infrastructure Congress, Nantes (France).

Versini, P.A., Jouve, P., Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B., 2013. Hydrological impact of green roofs on urban runoff at the watershed scale - Case studies in the Hauts-de-Seine county (France), conférence NOVATECH, Lyon (France)

Versini, P.A., Velasco, M., Cabello, A. and Sempere Torres, D., 2012. Future hydrological impact of forest on flash flood occurrence in a Mediterranean basin? Floodrisk conference, 20-22 Novembre 2012, Rotterdam (Pays Bas)

Versini, P.-A., Pouget, L. , Mc Ennis, S. , Guiu Carrio, R. , Sempere-Torres, D., et Escaler I., 2012. Climate change impact on water resources – Example of an anthropized basin (Llobregat, Spain), Conférence EGU, 22-27 avril 2012, Vienne (Autriche)

Versini, P.-A. , Berrenguer, M. , Sempere-Torres, D., 2012. Reconstruction of historical precipitation based on radar fields: application on Catalonia region (Spain), Conférence EGU, 22-27 avril 2012, Vienne (Autriche)

Versini, P.A., Berenguer, M., Ballinas-Gonzales, R. and Sempere-Torres, D., 2011. Hydrological validation of historical precipitation reconstruction, Conférence EGU, 3-8 avril 2011, Vienne (Autriche)

Versini, P.A. and Sempere-Torres, D., 2011. Hydrological impact of forest fires and climate change in a Mediterranean basin, 13th Plinius Conference on Mediterranean Storms, 7-9 septembre 2011, Savone (Italie)

Versini, P.A., Ballinas-Gonzales, R., Sempere-Torres, D. and Escaler, I., 2010. Hydrological study of climate change impact on the Llobregat basin, Conférence EGU, 2-7 mai 2010, Vienne (Autriche)

Versini, P.A., Corral, C., Sempere-Torres, D. and Santiago-Gahete, A., 2010. An operational food warning system in Andalucía (Spain): Presentation and first successfully results, Conférence EGU, 2-7 mai 2010, Vienne (Autriche)

Versini, P.A., Corral, C. and Velasco, D., 2009. About the advantage of combining hydrological now-casting with a vulnerability analysis to improve risk alerts in flash flood prone area, Conférence EGU, 19-24 avril 2009, Vienne (Autriche)

Versini, P.-A., Gaume, E. and Andrieu, H., 2008. A prototype of road warning system in flood prone area. Flood Risk Conference, 30 septembre – 2 octobre 2008, Oxford (UK)

Versini, P.A., Gaume, E. and Andrieu, H., 2008. A simple method based on GIS to estimate the hydrological risk along a road network, Conférence EGU, 13-18 avril 2008, Vienne (Autriche)

IX. Encadrements et animations

- Thèse (2018-) : sujet sur le suivi expérimental et la modélisation des flux de chaleur au sein de Solutions Bleues Vertes, financé par le projet ANR EVNATURB dont je suis le coordinateur et pour lequel je suis en recherche de candidat
- Stage de Master 2 (2018) : Alejandra Castellanos Diaz sur la mesure d'évapotranspiration de structures végétalisées et la caractérisation des variabilités spatio-temporelles des flux thermiques
- Thèse (2017-) : Julien Cravero (HMCo/Navier, Directeurs de thèse : Ioulia Tchiguirinskaïa et Jean-François Caron) sur le déploiement optimal de greffes urbaines végétalisées pour l'atténuation des îlots de chaleur urbains et l'évaluation de leurs performances dans le cadre d'une ACV
- Stage de fin d'étude (2017) : Lucas Charbonnier (HM&Co) sur la mise en place d'indicateurs quantitatifs pour l'évaluation des performances éco-systémiques d'une gare innovante. Deux présentations ont été faite en congrès et un article est en cours de préparation sur ce sujet
- Stage de Master 2 (2016) : Elektra Skouri-Plakali sur la mise en œuvre d'une modélisation hydrologique haute résolution et la question de la représentation du un bassin versant urbain dans le modèle. Ce travail a débouché sur la rédaction d'un article en cours de révision
- Thèse (2016-) : Filip Stanic (HMCo/Navier, Directeurs de thèse : Daniel Schertzer et Pierre Delage) sur le suivi et la modélisation à haute résolution des flux hydriques d'une toiture végétalisée et la mise en place d'un réseau de capteurs ubiquitaires. Plusieurs communications (conférences, articles) ont déjà été réalisés.
- Stage de Master 1 (2015) : Anne-Sophie Marcou et Aurianne Vienney (LEESU) sur le Potentiel actualisable des toitures végétalisées en Seine-Saint-Denis
- Post-doctorat (2014) : Emna Sellami-Kaaniche (LEESU) sur la détermination du potentiel de végétalisation à l'échelle de l'agglomération parisienne.
- Encadrement de projets multidisciplinaires dans le cadre du Master SAGE depuis 2013 : différents sujets mêlant sciences humaines et sociales (SHS) et sciences dures (hydrologie et ingénierie) en rapport avec les toitures végétalisées : les toitures terrasses végétalisées dans les PLU, potentiel de végétalisation dans l'habitat collectif, influence des collectivités locales dans la diffusion de la technique, détermination du potentiel sur les villes de Lyon, Nantes et Nancy.
- Thèse (2008-2012) : Romeo Ballinas (CRAHI, Directeur de thèse : Daniel Sempere-Torres) sur la création de scénarios climatiques régionalisés (précipitations et températures).
- Thèse (2009-2012) : Jean-Philippe Naulin (IFSTTAR, Directeur de thèse : Eric Gaume) sur le développement d'un prototype pré-opérationnel de prévision des coupures de routes par inondation lors des pluies intenses dans la région Cévennes-Vivarais.
- Thèse (2008-2011) : Felipe Quintero (CRAHI , Directeur de thèse : Daniel Sempere-Torres) sur la prise en compte des différentes sources d'incertitude intervenant dans l'estimation de débit dans le cadre de la prévision de crue.
- Stage de fin d'étude (2009-2010) : Rafael Rico (CRAHI) sur le développement d'un modèle de fusion-accumulation de neige capable de se greffer au modèle hydrologique.
- Stage de fin d'étude (2007) : Anne-Laure Tiberi-Wadier (LCPC) sur la critique des données pluie et débit sur différents bassins versants de la région Cévennes-Vivarais et

l'utilisation d'un modèle simplifié (cascade de Nash), étude bibliographique sur l'utilisation des données de sol en modélisation hydrologique.

- Coordinateur du projet ANR EVNATURB (2018-2022)
- Participation à des jurys de thèse : Jean-Philippe Naulin (2012) sur la Modélisation hydrologique distribuée pour la prévision des coupures de routes par inondation (IFSTTAR, France), Alejandro Gómez Cubillos (2017) sur la Proposition d'améliorations technologiques de toitures végétalisées adaptées au climat tropical andin (Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, Colombie)
- Contributeur à la base documentaire « Environnement » des Techniques de l'Ingénieur
- Participation au dépôt de brevet (n° 1853484) concernant une structure corolle de gridshell végétalisée appelé « Structure élastique et procédé de mise en place correspondant »
- Participation au Groupe de travail Transversal « Nature en Ville » dans le cadre du Labex Futurs Urbains
- Participation au Groupe de travail Eau/Végétation/Sol dans le cadre de l'Equipement d'Excellence Sense-City
- Coordination de la rédaction d'un guide à destination des opérationnels sur la mesure de turbidité en réseau d'assainissement pour le compte de l'ONEMA (http://www.onema.fr/sites/default/files/Guide-Turbidite.pdf).
- Coordination de la rédaction d'un guide à destination des opérationnels sur la prise en compte des incertitudes affectant les mesures de concentrations et de flux polluants en réseau d'assainissement dans le cadre de l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine).
- Participation à la rédaction d'un guide opérationnel sur l'utilisation des toitures végétalisées dans la gestion des eaux pluviales pour le compte des conseils généraux du 92 et 93.
- Depuis 2013, tuteur référant pour des étudiants de l'ENPC effectuant leur stage scientifique à l'étranger.
- Organisation et participation à une mission de retour d'expérience : En collaboration avec l'Observatoire Hydrologique Méditerranéen Cévennes Vivarais (OHMCV), un retour d'expérience a été organisé suite aux événements pluvieux de septembre 2005 survenus dans le Sud du Gard. Ces travaux ont consisté à collecter les données hydro-météorologiques, puis pratiquer une série d'interviews et de relevés de section à l'aide des laisses de crue (estimation des débits), pour retracer la chronologie de l'événement.
- Reviewer pour les journaux suivants : Urban Water Journal, Journal of Hydrology, Urban Forestry and Urban Greening, Water, Water Resources Management, Sustainability, Science of the total Environment, Resources, Conservation & Recycling, Advances in Water Resources, Hydrological Science Journal, Environmental Science and Policy, Journal of Urban Planning, landscape and environmental Design.

X. Valorisation à travers l'enseignement

- Création d'un site internet (http://hmco-enpc.wix.com/bgd-enpc-lessons) regroupant une vingtaine de supports de cours réalisés dans le cadre du projet européen Blue Green Dream et destinés à promouvoir l'utilisation des infrastructures bleues et vertes dans les projets d'aménagement urbain : législation, performances hydrologiques, thermiques, énergétiques, présentation de cas d'étude, outils de modélisation…
- Participation au suivi de projet de la filière « Eco-conception de la ville durable » (Master 2 à l'ENPC, dans le cadre d'Efficacity) : suivi et encadrement d'un groupe d'une dizaine d'étudiants devant proposer un projet d'aménagement à Champs-sur-Marne. Cours magistral sur les bases théoriques de la modélisation hydrologique, présentation des modèles et mise en place d'une modélisation adaptée à l'aide de Multi-Hydro afin de simuler la réponse hydrologique du plan masse réalisé par les étudiants, comprenant de nombreuses infrastructures bleues et vertes (toitures végétalisées, noues, bassins), et de tester son aptitude à répondre aux contraintes réglementaires.
- Cours sur les bonnes et mauvaises utilisations des modèles dans le cadre du module Méthodologie de la modélisation et applications urbaines (MMAUR) à l'Ecole des Ponts ParisTech (depuis 2017).
- TD d'hydrologie statistique (12h) dans le cadre du Master SAGE depuis 2013 : Prédétermination des crues et des étiages (critique d'échantillons de données, ajustement de lois théoriques, évaluation des crues rares et détermination des intervalles de confiance), analyse des données historiques de plusieurs stations et détermination du débit centennal.
- Cours et TD d'hydrologie urbaine (12h) dans le cadre du Master GTESD depuis 2014 : modélisation dynamique des réseaux d'assainissement, dimensionnement d'ouvrage, modélisation pluie-débit, réalisation d'un diagnostic de fonctionnement du réseau et étude des impacts de l'implantation d'un nouveau quartier sur la commune de Noisy-le-Grand.
- Cours d'Hydrologie environnementale dans le cadre du Master nucléaire (CEA) : cycle de l'eau, observations et modélisation, nappes et rivières, ressources en eau.
- Cours et TD de Modélisations Physiques et Mathématiques (36h) à l'École Nationale d'Architecture de Nantes de 2005 à 2007 : En charge des cours magistraux et de l'organisation des TD dispensés à une partie de la promotion (100 étudiants) : trigonométrie, mécanique des structures (forces et moments) et analyse fonctionnelle.