



HAL
open science

Les bonnes réponses pour les bonnes raisons : Une démarche de modélisation hydrologique distribuée représentative des processus dans les bassins versants

Flora Branger

► To cite this version:

Flora Branger. Les bonnes réponses pour les bonnes raisons : Une démarche de modélisation hydrologique distribuée représentative des processus dans les bassins versants. Sciences de l'environnement. Université Grenoble Alpes, 2019. tel-03991373

HAL Id: tel-03991373

<https://hal.inrae.fr/tel-03991373>

Submitted on 15 Feb 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.

Copyright

MÉMOIRE

Pour obtenir

L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Terre, Univers, Environnement

Présenté par

Flora BRANGER

préparé au sein de l'unité de recherche RiverLy de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea), Lyon-Villeurbanne, France
dans l'Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement

Les bonnes réponses pour les bonnes raisons :

Une démarche de modélisation hydrologique distribuée représentative des processus dans les bassins versants

Habilitation soutenue publiquement le **14 juin 2019**,
devant le jury composé de :

M. Markus Hrachowitz

Associate professor, TU Delft, Pays-Bas, Rapporteur

Mme Agnès Ducharne

Directeur de Recherche CNRS, UMR Metis, Paris, France, Rapporteur

M. Roger Moussa

Directeur de Recherche INRA, UMR LISAH, Montpellier, France, Rapporteur

Mme Sylvie Barraud

Professeur, INSA Lyon, France, Examineur

M. Cédric Legoût

Maître de Conférences, Université Grenoble Alpes, France, Examineur

M. Vazken Andréassian

Chercheur, Irstea Antony, France, Examineur



Table des matières

1	Introduction	13
1.1	Une définition de la modélisation hydrologique	13
1.2	La modélisation pour la compréhension des processus	14
1.3	Enjeux méthodologiques pour la modélisation hydrologique distribuée	18
1.3.1	La structure des modèles	18
1.3.2	L'identification des paramètres	19
1.3.3	L'évaluation des modèles	20
1.4	Mon positionnement scientifique	21
2	Construction de modèles hydrologiques distribués modulaires et multi-échelles	23
2.1	Les plate-formes de modélisation	23
2.1.1	La plate-forme LIQUID	25
2.1.2	La plate-forme JAMS	25
2.2	Panorama des modèles hydrologiques développés	27
2.2.1	Organisation des écoulements dans les petits bassins versants périurbains : PUMMA	27
2.2.2	Impact de l'évolution de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales : J2000P	29
2.2.3	Genèse des écoulements pouvant conduire à des crues rapides en contexte Méditerranéen : Simpleflood	30
2.2.4	Impact du changement climatique et des usages sur la ressource en eau : J2000 Rhône	32
2.3	Le maillage des modèles distribués	34

2.4	Mise en perspective	37
3	Quantification de l'impact des activités humaines sur la ressource en eau	41
3.1	Impact de l'évolution de l'urbanisation et de la gestion des eaux pluviales sur les bassins versants périurbains	41
3.1.1	Premiers résultats	41
3.1.2	Impacts de scénarios d'occupation du sol et de gestion des eaux pluviales en 2030	42
3.1.3	La suite : le projet Consequans	45
3.2	Ressource en eau, changement climatique et adaptation	46
3.2.1	Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050	46
3.2.2	Impact du changement global sur la ressource en eau dans le bassin du Rhône	50
3.3	Mise en perspective	55
4	Formalisation du lien entre données, expertise de terrain et modèles hydrologiques	59
4.1	Observation de terrain de long terme	59
4.1.1	L'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine	59
4.1.2	Le bassin versant expérimental de l'Yzeron	61
4.1.3	Structuration, bancarisation et mise à disposition des données issues d'observatoires hydrologiques	62
4.2	Incertitudes sur les séries de débits	63
4.3	Les signatures hydrologiques	66
4.3.1	Exploitation des séries hydrologiques traditionnelles	67
4.3.2	Exploitation de données alternatives	69
4.3.3	Pertinence et représentativité des signatures hydrologiques	72
4.4	Mise en perspective	73
5	Conclusions générales et perspectives	77
5.1	Bilan de mon activité scientifique	77

5.2	Contributions méthodologiques	78
5.3	Contexte institutionnel	80
5.4	Perspectives scientifiques	80
5.4.1	Lien entre expertise, données et modèles	80
5.4.2	Amélioration continue de la modélisation hydrologique distribuée et élargissement à d'autres processus d'intérêt	81
5.4.3	Hydrologie large échelle	82
5.5	Transfert vers les opérationnels	83
5.6	Remarques finales	83
	Bibliographie	83
	A Curriculum Vitae	103
	B Extrait du dossier d'autorisation d'inscription à la HDR (juillet 2018)	109

Table des figures

1.1	Approche d'allers-retours entre observations et modélisation pour la compréhension des processus. Source : Braud <i>et al.</i> (2014).	15
1.2	Modification des surfaces drainées du bassin versant de la Chaudanne par la présence de zones urbaines imperméables et de réseaux d'assainissement séparatifs et unitaires. Source : Jankowsky <i>et al.</i> (2013).	16
1.3	Séries temporelles typiques dans un bassin versant anthropisé : débit et température sur la rivière Charbonnières montrant des rejets réguliers d'eau chaude dans la rivière. Source : https://bdoh.irstea.fr/YZERON/	17
2.1	Principe et principales fonctionnalités d'une plate-forme de modélisation.	24
2.2	Principe de fonctionnement du modèle J2000. Les paramètres de J2000 sont représentés en italique. Les paramètres en gras sont globaux (une seule valeur pour tout le bassin), les autres sont distribués. Source : Branger <i>et al.</i> (2013).	26
2.3	Maillage du modèle hydrologique PUMMA construit sur le bassin de la Chaudanne. Source : Jankowsky (2011).	28
2.4	Maillage du modèle hydrologique J2000P construit sur le bassin versant de l'Yzeron. Source : Labbas (2015).	30
2.5	Modèle hydrologique Simpleflood construit sur le bassin versant de l'Ardèche par Adamovic (2014).	31
2.6	Maillage du modèle hydrologique J2000-Rhône.	33
2.7	Workflow du logiciel de pré-processing des modèles JAMS HRU-delin.	35
3.1	Usages des sols pris en compte et simulés par le modèle changement d'usage et repris pour les scénarios d'évolution de l'urbanisation. Source : Labbas (2015)	42
3.2	Cartographie des taux de connexion pour les sous-bassins mixtes selon les différents scénarios de gestion des eaux pluviales. Source : Labbas (2015)	43

3.3	Exemples de techniques alternatives étudiées localement et dont on souhaite intégrer une paramétrisation dans J2000P. Site expérimental OTHU de l'éco-campus de Lyon, suivi dans le cadre du programme Micromegas (2016-2018)	45
3.4	Changements de (a) débits, (b) maximum du stock de neige, (c) évapotranspiration réelle sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. A gauche (1) : évolution des moyennes annuelles des variables de 1960 à 2065, 330*6 projections en gris et médiane de chaque modèle en couleurs. A droite (2) : distributions des changements annuels de chaque variable pour chaque modèle. Source : Magand (2014)	47
3.5	Changements mensuels entre période future et période passée (futur - passé) de (a) débits, (b) maximum de stock de neige, (c) évapotranspiration réelle et (d) stock d'eau souterrain sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Médiane de chaque modèle en couleur et distributions globales en gris. Source : Magand (2014)	49
3.6	Impact du changement climatique et de scénarios d'irrigation sur la ressource en eau - zone de test Saône Amont. Gauche : localisation de la zone dans le bassin du Rhône. Milieu : zoom sur les HRUs irriguées colorées selon le type d'irrigation et leur organisation amont/ aval. Droite : tableau du WSI mensuel pour les différents scénarios climatiques (R : temps présent ; 2.6, 4.5 et 8.5 temps futur horizon lointain. Les valeurs numériques de WSI sont exprimées en codes couleurs qualitatifs (niveaux de stress nul à sévère). Source : Branger <i>et al.</i> (2016)	52
3.7	Indicateur de pression annuelle sur la ressource de la consommation d'eau potable à l'horizon 2085 selon deux scénarios d'évolution de la consommation, par rapport à l'année de référence 2009 et pour les scénarios de changement climatique 2.6 et 8.5. La ressource en eau disponible tient déjà compte de la gestion des barrages hydro-électriques et des prélèvements pour l'irrigation. Source : Branger <i>et al.</i> (2016)	53
3.8	Pression mensuelle de la demande en eau potable sur la ressource en eau naturelle ou influencée pour l'année 2009 et pour quatre stations contrastées (dans l'ordre de droite à gauche et de haut en bas) : l'Ouche à Crimolois U1334020 (860 km^2), l'Yzeron à Francheville V3015020 (129 km^2), le Rhône à Beaucaire V7200010 (exutoire), la Durance à Serre-Ponçon X0500010 (3580 km^2). Source : Branger <i>et al.</i> (2016)	54
4.1	Instrumentation du bassin versant de l'Yzeron dans le cadre de l'OTHU et de RBV / OZCAR	61
4.2	Vue de la station Charbonnières sur le bassin versant de l'Yzeron, et courbe de tarage et enveloppe d'incertitudes calculées à l'aide de la méthode BaRatin. Source : Horner (2014).	64
4.3	Chronique de débit sur la station de Taffignon sur le bassin versant de l'Yzeron pour l'année 2014. Incertitude totale de la série de débit et décomposition de l'incertitude selon le pas de temps de la chronique. D'après Horner <i>et al.</i> (2018b).	65
4.4	Débits observés et simulés par le modèle J2000-Rhône adapté à l'Ardèche à la station de Meyras (100 km^2) sur la période avril-décembre 2012. Source : Horner (en cours).	67

4.5	Principes de calcul des signatures hydrologique de récession caractéristique et seuil de mise en eau saisonnière, et résultats pour la station de l’Ardèche à Meyras. Source : Horner (en cours).	68
4.6	Indicateur d’intermittence construit à partir de données limnimétriques distribuées issues de capteurs low-cost. Observations et simulations issues du modèle hydrologique PUMMA pour l’année 2009.	70
4.7	Signatures hydrologiques construites à partir des séries temporelles d’humidité du sol. Source Branger et McMillan (2019).	71
4.8	Forme de la distribution de l’humidité du sol - test de représentativité spatiale sur des couples de stations proches (distances de 300 m à 12.5 km). Source : Branger et McMillan (2019).	72
4.9	Signatures d’humidité du sol - test de pouvoir discriminant à large échelle par rapport au climat. Source : Branger et McMillan (2019).	74
5.1	Le 3 octobre 1988 à Nîmes - rond point de la Sernam. Photo : Midi Libre	84

Liste des tableaux

3.1	Bilan en eau moyen (exprimé en mm/an et en nombre moyen de déversements par an par les déversoirs d'orage) pour les différents scénarios d'usage du sol et de gestion des eaux pluviales, et à l'échelle du bassin versant de l'Yzeron total. Ruissellement, Interflow et Débit de base sont les composantes du débit total dans la rivière Qrivière. Source : Labbas (2015)	44
3.2	Modèles utilisés dans le projet R2D2-2050 et leurs principales caractéristiques. .	46

Chapitre 1

Introduction

1.1 Une définition de la modélisation hydrologique

Depuis sa naissance en tant que science au XVII^{ème} siècle - Perrault (1674) conceptualisa le cycle de l'eau et réalisa le premier bilan hydrologique connu, l'hydrologie peut être définie comme la discipline qui étudie comment l'eau qui tombe du ciel sous forme de pluie ou de neige, forme les écoulements des rivières. Le cycle de l'eau fait maintenant partie des connaissances bien établies et est enseigné aux enfants dans les écoles dès l'âge de 4 ans. Mais c'est également toujours un sujet de recherche : si les principaux processus hydrologiques et les grands compartiments dans un bassin versant sont pour la plupart bien identifiés et définis (évaporation, infiltration, ruissellement de surface, écoulements souterrains dans les aquifères, etc), leur formalisation mathématique et leur quantification sont encore des objets de recherche à part entière. C'est précisément l'objet de la modélisation hydrologique, qui peut être définie comme la formalisation mathématique des processus hydrologiques dans un bassin versant, et la mise en œuvre de cette formalisation mathématique dans un outil de simulation numérique qui soit capable de reconstituer l'évolution d'un certain nombre de variables hydrologiques dans le temps et dans l'espace (et notamment le débit dans la rivière à l'exutoire du bassin versant).

Le modèle est un des outils fondamentaux pour le développement des connaissances en hydrologie, dans la mesure où il permet de formaliser les connaissances acquises ou les hypothèses formulées sur les processus, et de les tester en comparant les résultats de simulations aux hypothèses formulées, aux lois fondamentales de la physique telles que la conservation de la masse, et aux observations de terrain. C'est le paradigme du modèle *testeur d'hypothèse*, déjà présent dans un des articles fondateurs de la modélisation hydrologique (Freeze et Harlan, 1969), repris par Grayson *et al.* (1992) et explicité plus récemment par Fenicia *et al.* (2008b); Clark *et al.* (2011); Hrachowitz *et al.* (2013). Par ailleurs, l'eau étant une ressource vitale pour les sociétés humaines en même temps qu'une source de danger (crues et inondations), un des enjeux de la modélisation hydrologique est aussi d'avoir de véritables capacités prédictives, pour répondre à des questions très concrètes de gestion de la ressource, de planification, de prévision des crues, etc (Sivapalan, 2003a).

Contrairement à d'autres disciplines proches comme l'océanographie, la météorologie, ou même l'hydraulique fluviale et l'hydrogéologie, il n'existe pas de cadre théorique général, comme les équations de Navier-Stokes, de Saint-Venant, ou de Boussinesq, qui conduirait à une approche

de modélisation incontestable, acceptée et implémentée par l'ensemble des modèles. De plus, d'un point de vue académique, l'hydrologie se situe à la croisée de plusieurs disciplines, chacune porteuse d'une vision particulière : géologie, physique, sciences de l'atmosphère et météorologie, géographie, génie civil..., comme en témoigne la variété des départements universitaires auxquels sont rattachés les laboratoires d'hydrologie. En conséquence, il existe une biodiversité considérable de modèles hydrologiques, provenant de cadres disciplinaires différents, utilisant des approches théoriques différentes, avec aussi des objectifs différents, fondamentaux ou appliqués. Classifier ces modèles est apparu très rapidement comme une tâche assez vaine, tant le spectre est large (Todini, 1988). On peut néanmoins distinguer les modèles, en suivant Hrachowitz et Clark (2017), par leur niveau de discrétisation spatiale (modèles globaux, semi-distribués ou distribués), le type de formalisation mathématique (équations différentielles issues de la microphysique des sols, comme l'équation de Richards, ou formalisation plus macroscopique à base de réservoirs). On utilise souvent le terme *mécaniste* ou *à base physique* pour désigner les modèles basés sur l'équation de Richards par opposition aux modèles de type réservoir qui sont dits *conceptuels*, bien que ces termes soient en réalité impropres car les modèles basés sur la microphysique sont en réalité largement conceptuels aux échelles auxquelles ils sont en général appliqués (Beven, 1989). De plus, ainsi que relevé par Hrachowitz et Clark (2017), le terme *à base physique* contient un biais psychologique car il renvoie implicitement à l'idée que ce type de modèles est par essence meilleur que les autres car représentant la vraie physique. On considère également souvent que les termes *distribué* et *à base physique* sont synonymes. Certes les modèles basés sur l'équation de Richards sont nécessairement distribués, mais il existe aussi des modèles distribués reposant sur des approches réservoir, ainsi que tout un continuum entre ces deux extrêmes.

Au-delà des postures caricaturales et des polémiques sur la prééminence de telle ou telle approche, un des résultats les plus importants des dernières années est le changement de paradigme de la recherche en modélisation hydrologique, qui était jusqu'à récemment très focalisée sur les capacités prédictives des modèles et la performance, et montre maintenant une préoccupation plus importante pour la compréhension des processus (Hrachowitz *et al.*, 2013). Les modèles hydrologiques distribués sont à ce titre particulièrement intéressants, car ils représentent explicitement la variabilité du sol et du sous-sol, l'organisation des paysages, et les différentes pratiques de gestion de l'eau. Ils peuvent donc permettre de formuler et tester des hypothèses de fonctionnement des bassins versants de façon assez naturelle.

1.2 La modélisation pour la compréhension des processus

L'approche du modèle testeur d'hypothèse pour la compréhension des processus est une démarche itérative, faite d'allers-retours entre modèle et observations, ainsi que représenté sur la Figure 1.1, et également décrit par Kirchner (2006); McMillan *et al.* (2011); Clark *et al.* (2011, 2017). Cela consiste à construire un modèle perceptuel de fonctionnement d'un bassin versant à partir des données issues du terrain; puis à traduire ce modèle perceptuel dans un modèle hydrologique. L'analyse des désaccords entre résultats de simulation du modèle et observations permet de remettre en cause certaines des hypothèses faites dans le modèle, et aussi de définir de nouvelles données à acquérir, pour relancer la démarche dans une étape supplémentaire et ainsi progresser pas à pas.

Pour un modélisateur, la mise en œuvre de ces différentes étapes est délicate. En effet, les bassins versants sont des objets complexes et finalement assez mal connus : une bonne

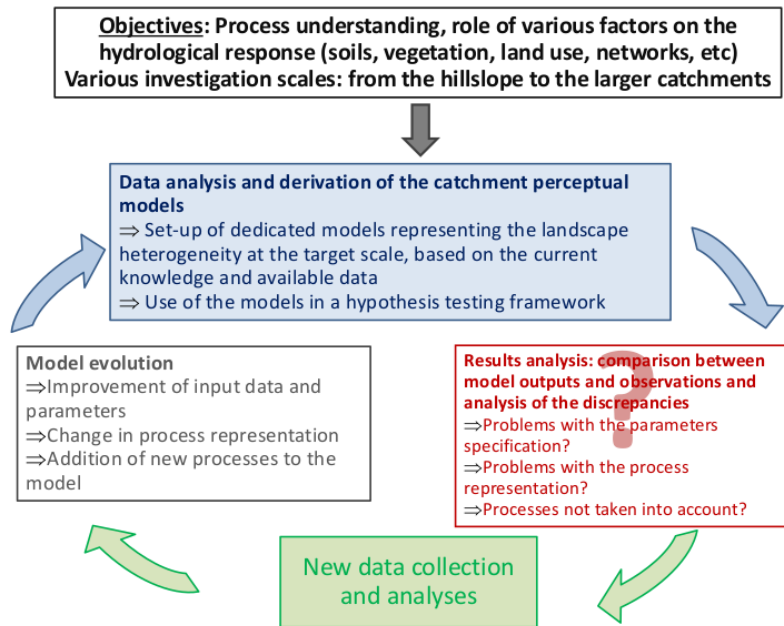


FIGURE (1.1) Approche d’allers-retours entre observations et modélisation pour la compréhension des processus. Source : Braud *et al.* (2014).

partie des processus se passe dans un sous-sol inaccessible dans lequel on ne peut réaliser que des mesures indirectes, et d’une grande hétérogénéité avec de nombreuses discontinuités pas toujours faciles à identifier. La démarche naturelle pour appréhender cette hétérogénéité est de réduire la taille du système, et de concentrer des mesures, observations et modélisations sur des bassins expérimentaux de petite taille, voire des versants, dans l’idée de mieux distinguer les processus élémentaires (McDonnell *et al.*, 2007). Malheureusement, ces études détaillées mettent souvent en évidence des processus encore plus complexes qui ne sont pas forcément perçus sur des bassins plus grands (Sivapalan, 2003b) : flux préférentiel à travers des macropores (Flury *et al.*, 1994; Feyen *et al.*, 1999), connectivité intermittente de compartiments souterrains (Detty et McGuire, 2010), ou le *paradoxe de l’eau vieille*, contradiction entre la réaction rapide de petits bassins aux événements pluvieux et le long temps de séjour de cette eau dans le bassin indiquée par les traceurs géochimiques (Kirchner, 2003).

La présence humaine est par ailleurs prédominante sur la plupart des bassins versants dans le monde, et ce sans même aborder le réchauffement climatique. Que ce soit par la modification de la végétation (agriculture, gestion forestière), l’imperméabilisation des sols (urbanisation), la modification de l’écoulement des rivières (détournements, barrages), les prélèvements d’eau dans les cours d’eau ou la nappe (eau potable, irrigation), ou les rejets, l’homme a un impact majeur sur de nombreux aspects du cycle hydrologique, à plusieurs échelles spatiales et temporelles, et parfois depuis des millénaires (Sivapalan *et al.*, 2012; Montanari *et al.*, 2013). A titre d’exemple, la Figure 1.2 présente les contours possibles du bassin versant de la Chaudanne, un petit bassin versant expérimental de quelques km^2 situé aux environs de Lyon, et étudié par Jankowfsky *et al.* (2013) (voir aussi en 4.1). L’imperméabilisation des sols due à l’urbanisation, et encore plus les réseaux d’assainissement modifient considérablement les aires drainées du bassin par rapport au contour topographique (en gris sur la Figure). Du fait de la présence d’un réseau d’assainissement unitaire (c’est-à-dire mélangeant les eaux usées et les eaux pluviales), le contour du bassin versant varie aussi au cours du temps. Certaines zones ne sont connectées à la rivière

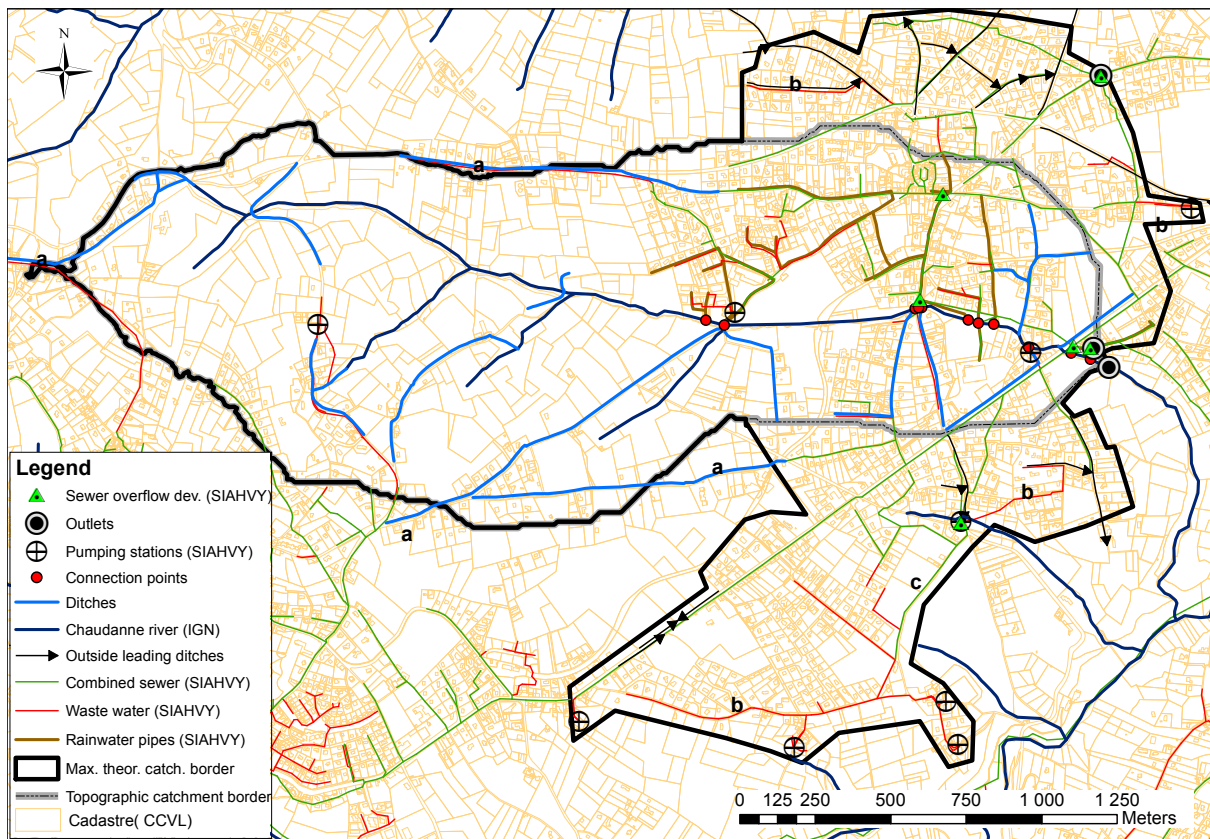


FIGURE (1.2) Modification des surfaces drainées du bassin versant de la Chaudanne par la présence de zones urbaines imperméables et de réseaux d'assainissement séparatifs et unitaires. Source : Jankowsky *et al.* (2013).

qu'en période d'événement pluvieux via des déversoirs d'orage, faisant varier la taille du bassin de 2.88 à 4.10 km^2 (Jankowfsky *et al.*, 2013).

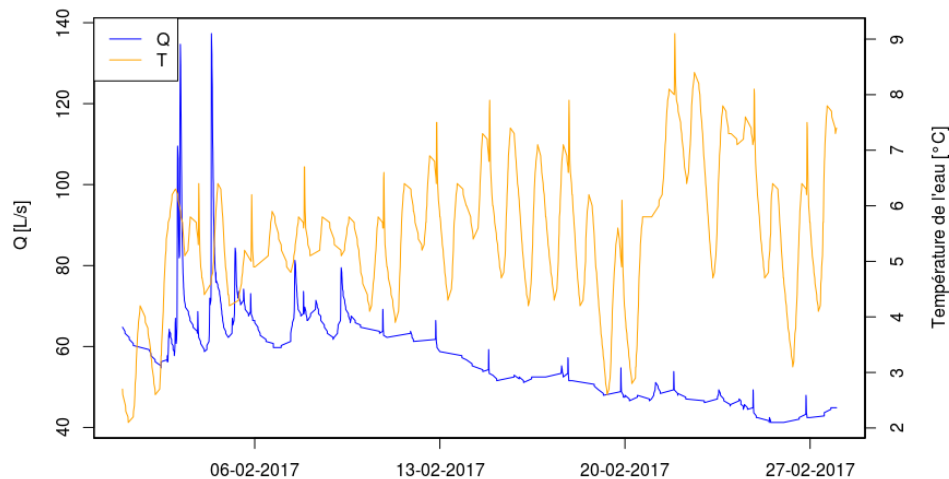


FIGURE (1.3) Séries temporelles typiques dans un bassin versant anthropisé : débit et température sur la rivière Charbonnières montrant des rejets réguliers d'eau chaude dans la rivière. Source : <https://bdoh.irstea.fr/YZERON/>

Certaines influences échappent par ailleurs à toute cartographie ou autorisation administrative et ne sont décelables que par l'analyse détaillée des données de terrain. La Figure 1.3 montre un extrait de séries temporelles de débit et température mesurés sur le bassin expérimental de l'Yzeron (voir section 4.1). Le graphique montre des rejets très brefs d'eau, à intervalles réguliers (tous les deux jours environ), qui peuvent passer inaperçus lors des épisodes pluvieux ou être attribués au bruit naturel de la mesure de hauteur d'eau (la variation de hauteur ne dépassait pas 1 cm). Seule la visualisation en parallèle de la température de l'eau, qui indiquait des hausses nettes de température en même temps que celle des débits, a permis d'identifier qu'il s'agissait de rejets d'eau chaude, qui depuis ont été identifiés comme provenant de la piscine d'un hôtel proche.

Pour des impacts clairement identifiés, soit parce qu'ils sont macroscopiques et documentés (grands barrages hydroélectriques pour lesquels on peut reconstituer des débits naturalisés, Kuentz 2013), soit par chance parce qu'on peut les identifier à partir des données et de la connaissance du terrain (exemple de la Figure 1.3), combien passent inaperçus, se compensent ou sont liés entre eux de façon inextricable ? Nos mesures de terrain, et en particulier les débits que l'on observe dans les rivières, sont donc la résultante d'une multitude de processus et d'interventions humaines. En regard de cette complexité, la tâche de formalisation et quantification des processus dans un modèle hydrologique apparaît comme bien décourageante. Un modèle est nécessairement une simplification de la réalité, mais jusqu'où aller ? Que peut-on chercher à représenter, que doit-on négliger ? Et comment sait-on qu'un modèle est bon ?

1.3 Enjeux méthodologiques pour la modélisation hydrologique distribuée

Du point de vue du modélisateur qui souhaite construire un modèle représentatif des processus hydrologiques, ces questions peuvent être reformulées sous forme d'enjeux méthodologiques. Il existe une littérature abondante soulevant et commentant ces enjeux, pour la modélisation hydrologique en général, et la modélisation distribuée en particulier. Pour citer quelques exemples :

- Beven (1989), se concentrant sur les modèles dits à base physique, soulève déjà la question de l'adéquation entre les équations de la microphysique et la tailles des mailles des modèles, les problèmes d'identification de paramètres effectifs qui ne correspondent pas aux mesures de terrain, et les difficultés de calibration de ces modèles. En 2001, il généralise cette vision en identifiant pour les modèles distribués des enjeux de structure (non linéarité et échelle), de paramétrage (équifinalité et incertitude), et d'articulation entre la théorie hydrologique générale et les cas particuliers des bassins versants d'application (Beven, 2001).
- Kirchner (2006) commente aussi d'une manière générale l'inadéquation de la structure de nombreux modèles hydrologiques pour représenter correctement le fonctionnement des bassins versants, et souligne particulièrement les problèmes de surparamétrisation en comparant les modèles à des marionnettes mathématiques qui peuvent ainsi fournir les bonnes réponses, mais pas nécessairement pour les bonnes raisons.
- Clark *et al.* (2016) proposent une réflexion sur la structure des modèles hydrologiques, et notamment les connexions entre la structure des modèles et celle des paysages (compromis entre la fidélité au terrain et la complexité des modèles), les problématiques de changement d'échelle, et les procédures d'évaluation de différentes structures de modèles. Deux autres enjeux sont identifiés par Clark *et al.* (2017) : l'identification des paramètres, et les performances de calcul.
- Enfin, Hrachowitz et Clark (2017) reviennent sur les approches de modélisation hydrologique existantes et les critiques habituelles qui peuvent être faites, et qui portent sur la structure des modèles et leur degré d'adaptation à la complexité des bassins versants, la surparamétrisation et la calibration des modèles, et le besoin de méthodes d'évaluation plus discriminantes et physiquement interprétables.

On voit donc que depuis 30 ans, les questions méthodologiques soulevées portent essentiellement sur la structure des modèles, l'identification des paramètres et l'évaluation des modèles. Ces questions sont au cœur de la démarche de modélisation pour la compréhension des processus. Elles sont développées ci-après dans le contexte particulier des modèles distribués.

1.3.1 La structure des modèles

Choisir la structure d'un modèle consiste à sélectionner les processus à prendre en compte et les représentations de ces processus, ainsi que leur discrétisation spatiale. Dans une logique de compréhension des processus, on peut être amené à vouloir représenter le plus finement possible ce que l'on connaît du bassin versant, de façon à être fidèle à la réalité. Il y a néanmoins un compromis à trouver avec la complexité du modèle, qui doit rester maîtrisable. Cette problématique est théorisée par le concept d'*échelle*, déjà introduit par Klemeš (1983), puis explicité par Blöschl (2001) et Sivapalan (2003b) notamment. Sont ainsi distinguées l'approche ascendante ou *bottom-up*, qui est la plus naturelle puisqu'elle consiste à partir des observations détaillées à fine échelle, à les modéliser de façon également détaillée avec des modèles distribués, puis à

graduellement simplifier le modèle lorsqu'on aborde des bassins versants de plus grande taille, et l'approche descendante ou *top-down*, qui consiste plutôt à travailler directement à l'échelle de bassins versants de plus grande taille, et à complexifier le modèle par étapes successives en fonction des données (Sivapalan *et al.*, 2003). Cette démarche de partir du petit pour simplifier en allant vers le grand paraît naturelle. En pratique, les modèles issus d'approches ascendantes ne sont en général pas simplifiés, mais simplement appliqués sur des bassins de plus grande taille avec des mailles plus grandes, ce qui pose la question de la représentativité des paramètres et du sens physique des de ces modèles (Kirchner, 2006). Par ailleurs de nombreux exemples d'approches descendantes peuvent maintenant être trouvées dans la littérature (Eder *et al.*, 2003; Clark *et al.*, 2009; Kirchner, 2009; Gharari *et al.*, 2015), mais aboutissent en général des modèles globaux de structure très simple, qui restent assez éloignés des processus élémentaires tels qu'observés sur le terrain. En particulier, les modèles distribués sont encore très majoritairement sous-tendus par des approches ascendantes.

1.3.2 L'identification des paramètres

L'estimation des valeurs des paramètres d'un modèle hydrologique peut se faire de plusieurs manières. Si les paramètres correspondent à des grandeurs physiques mesurables, on peut attribuer des valeurs issues de mesures de terrain ou de la littérature. Lorsqu'il n'y a pas de données disponibles ou que les paramètres ne correspondent pas à des grandeurs physiques mesurables, on recourt à une procédure de calibration qui sélectionne les valeurs de paramètres optimisant les performances du modèle (en général sur la simulation de débits). La calibration est devenue une étape incontournable dans l'application des modèles hydrologiques (Klemeš, 1983). Il a été montré que même pour des modèles a priori physiques et n'en ayant en théorie pas besoin, la calibration permet d'optimiser le fonctionnement du modèle et de meilleures performances (Smith *et al.*, 2013). En contrepartie, la calibration induit évidemment des problèmes, notamment parce que les séries temporelles de débit utilisées comme objectifs par les algorithmes d'optimisation ne contiennent pas assez d'information pour identifier correctement les valeurs de paramètres. Jakeman et Hornberger (1993) ont ainsi montré que dans un processus de calibration classique, les séries hydrologiques de pluie et débit ne permettent de contraindre efficacement qu'un modèle global avec moins de 6 paramètres. Les modèles plus complexes sont donc surparamétrés, ce qui induit une équifinalité (plusieurs jeux de paramètres peuvent aboutir à des performances similaires, Beven 1993). De plus, la surcalibration (Andréassian *et al.*, 2012) peut amener les paramètres à compenser des défauts de structure du modèle, des biais sur les forçages climatiques, voire des erreurs sur les données de débit utilisées pour la calibration. Un exemple éclairant de compensation est donné par Sikorska et Renard (2017), qui ont calibré un modèle hydrologique simulant des hauteurs d'eau (donc intégrant une courbe de tarage inversée pour faire la transformation débit-hauteur), et ont montré que la calibration induisait une forte modification de la courbe de tarage, qui compensait des biais et incertitudes sur les autres composantes du modèle.

Par construction, les modèles distribués ont beaucoup de paramètres, déjà du fait de leur structure plus complexe que les modèles globaux, et ensuite parce que potentiellement chaque maille du modèle peut avoir des valeurs de paramètres différentes. On peut donc facilement aboutir à plusieurs milliers, voire dizaines de milliers de paramètres à estimer, ce qui dépasse les capacités des algorithmes d'optimisation, et conduit de toutes façons à une équifinalité massive. Les démarches de calibration en modélisation distribuée visent donc en premier lieu à réduire l'espace des paramètres à optimiser. On peut pratiquer une semi-calibration : certains para-

mètres considérés comme bien connus sont fixés a priori et sortis de la calibration, que l'on dispose de mesures de terrain, ou qu'il existe des valeurs tabulées dans des bases de données internationales (comme les coefficients cultureux pour la modulation de l'évapotranspiration potentielle, Allen *et al.* 1998). On utilise aussi des transformations qui permettent de passer de paramètres distribués à des paramètres globaux, de façon à simplifier le problème d'optimisation tout en conservant une certaine variabilité spatiale : coefficients multiplicatifs globaux (Bandaragoda *et al.*, 2004; Krause *et al.*, 2006), ou méthodes de régionalisation plus ou moins élaborées (Götzinger et Bárdossy, 2007; Pokhrel *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2013). Ces méthodes permettent de résoudre le problème de la calibration d'un point de vue pratique, mais laissent entier le problème de la surcalibration et des compensations. Or un point particulièrement important dans la démarche de modélisation pour la compréhension des processus, et un point fort des modèles distribués, est justement le sens physique des paramètres. La calibration peut faire perdre le lien des paramètres avec la physique et les observations de terrain, ce qui réduit du coup l'intérêt de ce type de modèles (qui deviennent juste des modèles conceptuels plus compliqués que les autres). Pour mieux identifier les compensations et y remédier, les approches de décomposition des sources d'incertitude sont prometteuses, comme par exemple les approches bayésiennes proposées par Kavetski *et al.* (2006a,b); Renard *et al.* (2010, 2011). Elles sont malheureusement encore hors de portée pour les modèles distribués.

De nombreux modélisateurs préfèrent donc encore une calibration manuelle, de manière à injecter une certaine expertise physique pour guider le processus de calibration (Smith *et al.*, 2013). Mais cette approche peut être critiquée car elle est nécessairement subjective et ne peut que difficilement prendre en compte les interactions entre paramètres (Beven, 1989). Face à ces difficultés, des approches de non-calibration peuvent être proposées (Smith *et al.*, 2012; McMillan *et al.*, 2016). L'idée est de conserver le lien explicite entre les valeurs de paramètres et les données de terrain ou le raisonnement hydrologique, ainsi que d'éviter les compensations entre paramètres, structure du modèle, et biais sur les données d'entrée, quitte à perdre en performance.

1.3.3 L'évaluation des modèles

A défaut de pouvoir formellement valider un modèle (Oreskes *et al.*, 1994), la quantification de la qualité des simulations du modèle est importante pour les modélisateurs, car elle conditionne l'utilisation qui va pouvoir être faite du modèle par la suite. Il existe plusieurs méthodologies et guides de bonnes pratiques pour s'assurer d'une évaluation du modèle la plus objective et rigoureuse possible (Klemeš, 1986; Refsgaard, 1997; Refsgaard et Henriksen, 2004). Néanmoins, la stratégie standard et massivement employée dans la communauté hydrologique reste le calage-contrôle sur les débits, c'est-à-dire le calage des paramètres pour maximiser un critère de performance sur les débits simulés, et ensuite le calcul du même critère de performance sur une série indépendante (sur une autre période la plupart du temps). Le critère de performance le plus classique est le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970).

Le critère de performance est la seule métrique actuelle pour évaluer la qualité des modèles. C'est sur lui que repose la totalité du processus de calibration, et donc d'identification des paramètres. Mais quelle est la significativité de la performance? Est-ce que le modèle est bon seulement parce que le critère est bon? Krause *et al.* (2005); Schaeffli et Gupta (2007) mettent en évidence les difficultés d'interprétation des valeurs obtenues pour différents critères de performance, et pour le critère de Nash en particulier. Plusieurs pistes ont été proposées :

le développement de nouveaux critères de performance plus représentatifs de l'ensemble des processus hydrologiques sur un bassin (Gupta *et al.*, 2009) ; des méthodes d'optimisation multi-objectifs permettant de prendre en compte simultanément plusieurs critères (Fenicia *et al.*, 2007; Efstratiadis et Koutsoyiannis, 2010) ; ou encore l'utilisation de plusieurs stations à l'intérieur d'un bassin dans le cas de modèles semi-distribués ou distribués, avec ou sans optimisation simultanée (Uhlenbrook et Sieber, 2005; Moussa *et al.*, 2007).

L'utilisation de critères numériques de performance pour évaluer la qualité des modèles est critiquée par Gupta *et al.* (2008) : en effet, cela revient à réduire l'ensemble de la structure et des paramètres d'un modèle à une seule valeur scalaire, avec une importante perte d'information (Jakeman et Hornberger, 1993). Wagener (2003) souligne que la performance n'est qu'un des aspects de l'évaluation d'un modèle, et qu'il faut notamment s'assurer de son réalisme. Ce besoin de réalisme est évidemment primordial dans une démarche de modélisation représentative des processus. Il est formulé par Kirchner (2006) comme *les bonnes réponses pour les bonnes raisons*, reprenant Grayson *et al.* (1992) et Klemes (1986) : ce n'est pas parce qu'un modèle reproduit correctement des observations selon un critère de performance qu'il représente réellement les processus hydrologiques et le fonctionnement du bassin versant. En d'autres termes, les critères de performance manquent de *pouvoir de diagnostic* (Gupta *et al.*, 2008), au sens qu'ils ne sont pas capables d'identifier les processus bien ou mal représentés dans un modèle, et de donner des indications pour les corriger.

Ces critiques sont encore plus vraies pour les modèles hydrologiques distribués, du fait des problèmes rencontrés pour l'identification des paramètres déjà mentionnés, mais aussi parce que ces modèles produisent de grandes quantités de données (potentiellement toutes les variables calculées sur toutes les mailles), qui pourraient donner des clefs de compréhension des processus, mais qui souvent ne sont pas utilisées. On peut donc dire que les modèles distribués sont sous-évalués. Le développement de nouvelles approches d'évaluation est donc nécessaire. Le cadre d'évaluation-diagnostic utilisant des signatures hydrologiques proposé par Gupta *et al.* (2008) est en cela prometteur.

1.4 Mon positionnement scientifique

A l'issue de ma thèse, j'ai eu la chance d'être recrutée fin 2006 au Cemagref (devenu Irstea en 2012) dans l'unité de recherche Hydrologie-Hydraulique à Lyon (HHLY). En un peu plus de 10 ans, j'ai encadré 4 doctorants et 20 étudiants de Master ou niveau équivalent et j'ai participé à 12 projets de recherche, dont 4 dont j'ai assuré la coordination. En 2015-2016, dans le cadre d'une mobilité scientifique longue financée par Irstea, j'ai eu l'opportunité de réaliser un post-doc tardif et de passer un an en Nouvelle-Zélande, dans le laboratoire d'hydrologie du National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), pour travailler avec Hilary McMillan sur les signatures hydrologiques.

Mon activité scientifique est centrée sur la modélisation hydrologique dans un objectif de compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, des mécanismes de genèse des écoulements, et de quantification de l'impact des activités humaines sur les processus hydrologiques et sur la ressource en eau. Je travaille à plusieurs échelles, du petit bassin versant périurbain de quelques kilomètres carrés au grand bassin versant aménagé de plusieurs dizaines de milliers de km^2 . Je m'efforce de développer des modèles hydrologiques distribués représentatifs des processus hydrologiques sur ces différents bassins, et donnant autant que possible *les*

bonnes réponses pour les bonnes raisons. Mon travail de recherche s'appuie sur des allers-retours entre observations et modélisation illustrés par la Figure 1.1 et s'accompagne d'une réflexion méthodologique sur les enjeux décrits en partie 1.3, en particulier sur la structure des modèles hydrologiques et leur évaluation.

Ce mémoire présente ma démarche scientifique et les principaux résultats obtenus au cours des 10 dernières années. Le premier chapitre décrit ma démarche de construction de modèles hydrologiques distribués pour la compréhension des processus et propose une réflexion méthodologique sur la structure des modèles. Le second chapitre aborde les questions d'impact de l'activité humaine sur la ressource en eau et présente mes résultats sur les bassins versants périurbains et les grands bassins versants alpins aménagés. Enfin, le dernier chapitre a trait à l'évaluation des modèles et plus généralement la question de la formalisation du lien entre données, expertise de terrain et modèles hydrologiques. Il présente mon activité d'observation sur le bassin versant expérimental de l'Yzeron et mon implication dans l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU), mes travaux sur la quantification des incertitudes sur les séries hydrologiques, ainsi que mes développements plus récents sur les signatures hydrologiques.

Chapitre 2

Construction de modèles hydrologiques distribués modulaires et multi-échelles

L'utilisation de modèles hydrologiques pour la compréhension des processus requiert de pouvoir implémenter de multiples modèles facilement modifiables, correspondant à autant d'hypothèses de fonctionnement. Conceptuellement, cela revient à considérer le modèle hydrologique comme une combinaison de conceptualisations de processus, et à chercher, pour un bassin versant donné, laquelle est la mieux appropriée (Leavesley *et al.*, 2002). Cela a conduit au développement de *modelling frameworks* ou plate-formes de modélisation, qui sont les supports d'une modélisation hydrologique flexible et modulaire pour le test d'hypothèses (Clark *et al.*, 2008; Fenicia *et al.*, 2011). Ma démarche de modélisation est en phase avec cette approche, et consiste à développer non pas un unique modèle hydrologique distribué, mais plutôt plusieurs modèles, en m'appuyant sur des plate-formes de modélisation. Chacun de ces modèles vise à formaliser le mieux possible les processus hydrologiques, en fonction des échelles spatiales et temporelles d'intérêt, des objectifs spécifiques des différentes études ou projets, et des caractéristiques des bassins versants d'application. La description de cette démarche est l'objet de ce chapitre. Les sections suivantes présentent de façon succincte les principaux modèles développés au cours de mes recherches sur différentes questions scientifiques, en mettant en relief à chaque fois la stratégie suivie pour la sélection des processus à représenter et le choix des conceptualisations dans un objectif de compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins.

2.1 Les plate-formes de modélisation

Une plate-forme de modélisation peut être définie comme un outil informatique qui permet la construction et la mise en œuvre rapides de modèles, à partir de composantes réutilisables et interchangeables, et qui offre la possibilité d'en rajouter facilement de nouvelles. Ces outils sont nés de l'essor de la programmation orientée objet dans les années 2000, et de ses capacités naturelles à représenter des objets dynamiques en interaction les uns avec les autres (Argent, 2004). Initialement développées en écologie pour représenter le fonctionnement d'écosystèmes complexes (eau, végétation, nutriments, populations d'animaux, pressions humaines), les plate-

formes de modélisation ont rapidement investi le champ de l'hydrologie en considérant les bassins versants comme des ensembles d'objets hydrologiques en interaction.

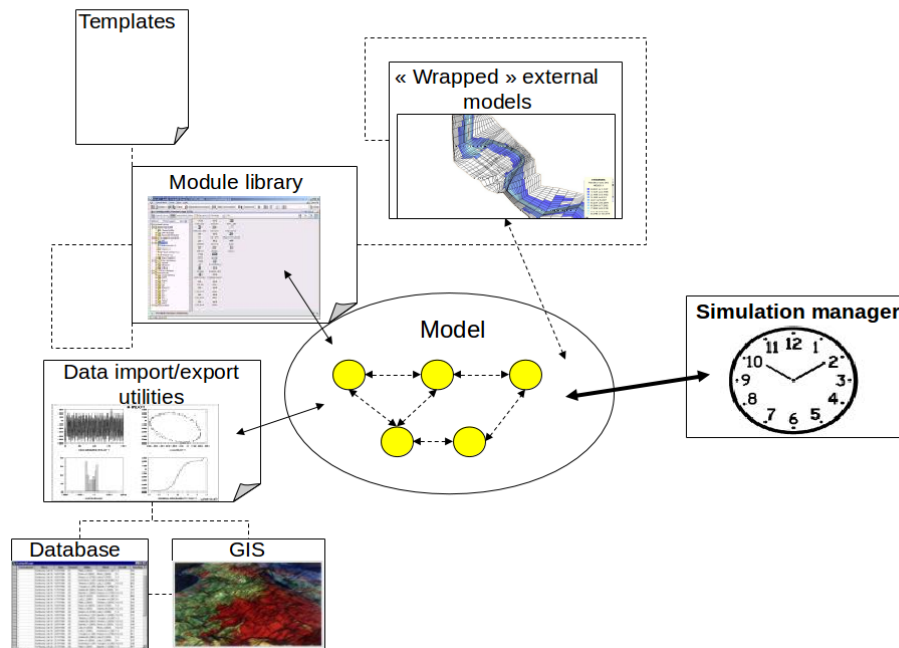


FIGURE (2.1) Principe et principales fonctionnalités d'une plateforme de modélisation.

En pratique, les fonctionnalités offertes par une plateforme de modélisation peuvent être résumées comme telles (voir Figure 2.1) :

- un système d'assistance à la construction et l'insertion dans la plate-forme de nouvelles composantes. Ces composantes peuvent être soit développées entièrement dans la plate-forme, soit issues de modèles existant par ailleurs (dits aussi modèles patrimoniaux). Dans le premier cas, la plate-forme pourra par exemple proposer une interface graphique ou bien des composantes pré-écrites dans un langage de programmation donné (éventuellement un langage simplifié). Dans le second cas, la plate-forme fournira des outils pour encapsuler le code existant et le rendre compatible avec les autres composantes ;
- une bibliothèque de composantes déjà prêtes à l'emploi, qui pourra être enrichie au fil des contributions ;
- un système d'aide à l'assemblage de ces composantes pour former des modèles, par le biais d'interfaces graphiques ou en définissant un protocole simple pour choisir les composantes et les connecter entre elles ;
- éventuellement une bibliothèque de modèles pré-assemblés ;
- des fonctionnalités de pré- et post-traitement, permettant la préparation des données d'entrée (interfaçage avec des bases de données et des Systèmes d'Information Géographique notamment), et la visualisation des sorties des modèles ainsi construits ;
- enfin, le cœur de la plate-forme, un mécanisme qui permet le couplage temporel, mais également spatial de ces composantes, et la gestion des simulations.

La modularité et la flexibilité des plate-formes, ainsi que leur potentiel pour le travail collaboratif et la capitalisation de savoir-faire, ont conduit à de nombreux développements pour l'hydrologie. Une des plus anciennes plate-formes est le MMS (Modular Modelling System, Leavesley *et al.*, 1996). On peut également citer les plate-formes FUSE (Clark *et al.*, 2008),

Superflex (Fenicia *et al.*, 2011), OMS (Object Modelling System, David *et al.*, 2013), JAMS (Kralisch *et al.*, 2007), eWater Source (Kim *et al.*, 2015), ou OpenMI (Buahin et Horsburgh, 2018). En France, à la fin des années 2000, sont apparus LIQUID (Branger *et al.*, 2010), mais aussi OpenFluid (Fabre *et al.*, 2010), Canoe-Hydrobox (Ross *et al.*, 2011), ou encore PALM (Buis *et al.*, 2006).

2.1.1 La plate-forme LIQUID

J'ai d'abord contribué au développement de la plate-forme de modélisation LIQUID (Branger *et al.*, 2010), codée en C++, avec laquelle j'avais travaillé pendant ma thèse (Branger, 2007). Les objets hydrologiques considérés étaient des entités spatiales indépendantes, connectées les unes aux autres dans le temps et dans l'espace, et qui pouvaient avoir n'importe quelle forme, rappelant le concept de *Hydrological Response Unit* ou *HRUs* (Flügel, 1995). Le caractère particulièrement innovant de LIQUID était que ces objets étaient totalement indépendants les uns des autres ; en particulier chacun avait son propre pas de temps, variable, et avait la capacité d'être interrompu lorsqu'une information était transmise par les autres objets. Le développement de LIQUID s'est arrêté fin 2011, principalement pour des problèmes juridiques et de propriété intellectuelle (la plate-forme était développée par une société privée). LIQUID avait des défauts, notamment la grande complexité de la description des connexions spatiales entre objets qui rendait la définition et la mise en œuvre d'un modèle longue et difficile, la lourdeur des outils nécessaires pour la gestion des entrées et sorties des modèles (PostgreSQL/PostGIS installé en serveur local sur la machine de l'utilisateur), et un niveau de codage en C++ devenu au fil du temps assez élevé et dans lequel les hydrologues n'étaient pas forcément complètement autonomes. Mais LIQUID contenait aussi des innovations importantes (notamment les aspects de complète autonomie dans le temps et l'espace des objets modélisés) qui sont à ce jour sans équivalent, et avait des performances numériques remarquables compte-tenu de la complexité des modèles. Outre mon propre travail, LIQUID a donné lieu à quatre autres thèses : celles de Judicaël Dehotin (2007), Hocine Hénine (2010), Sonja Jankowsky (2011) et Olivier Vannier (2013), ainsi que de façon indirecte celle de Pedro Sanzana (2018). J'ai encadré la thèse de Sonja Jankowsky et contribué à l'encadrement de celle de Pedro Sanzana.

Ma contribution à LIQUID n'a pas été le développement de la plate-forme elle-même, qui a été réalisé par les ingénieurs informaticiens de la société Hydrowide. Cependant, ayant été une des premières utilisatrices de LIQUID, j'ai fortement contribué à la définition de ses concepts, et bien sûr au développement des modèles hydrologiques (Branger *et al.*, 2010).

2.1.2 La plate-forme JAMS

Depuis 2010 je m'investis dans la plate-forme de modélisation JAMS en collaboration avec l'Université Friedrich Schiller à Iéna, en Allemagne (Kralisch *et al.*, 2007). JAMS est développé en Java avec une licence open-source. JAMS utilise le même concept de maillage irrégulier en HRUs que LIQUID. Cependant, il n'y a pas la même notion d'autonomie complète des objets les uns par rapport aux autres. Notamment, le pas de temps de simulation est fixe et identique pour tous les objets, et les connexions spatiales entre objets sont prescrites d'amont en aval. Cette moindre souplesse dans les interactions entre objets est contrebalancée par une plus grande facilité de mise en œuvre des modèles, une plus grande modularité, et des temps de calcul incomparablement plus courts. Il est beaucoup plus facile de développer des composantes, créer

des modèles et des variations sur la base du même modèle dans JAMS que ce ne l'était dans LIQUID, ce qui permet de profiter au mieux des avantages de l'approche plate-forme. JAMS a été à ce jour la plate-forme utilisée pour trois thèses dont j'ai assuré ou assure l'encadrement : celle de Marko Adamovic (2014), Mériem Labbas (2015), et Ivan Horner (en cours). Hors de mon encadrement direct, les thèses en cours de Jordi Bolibar, Bastien Richard et Peng Huang s'appuient également en partie sur JAMS et plus particulièrement sur le modèle J2000.

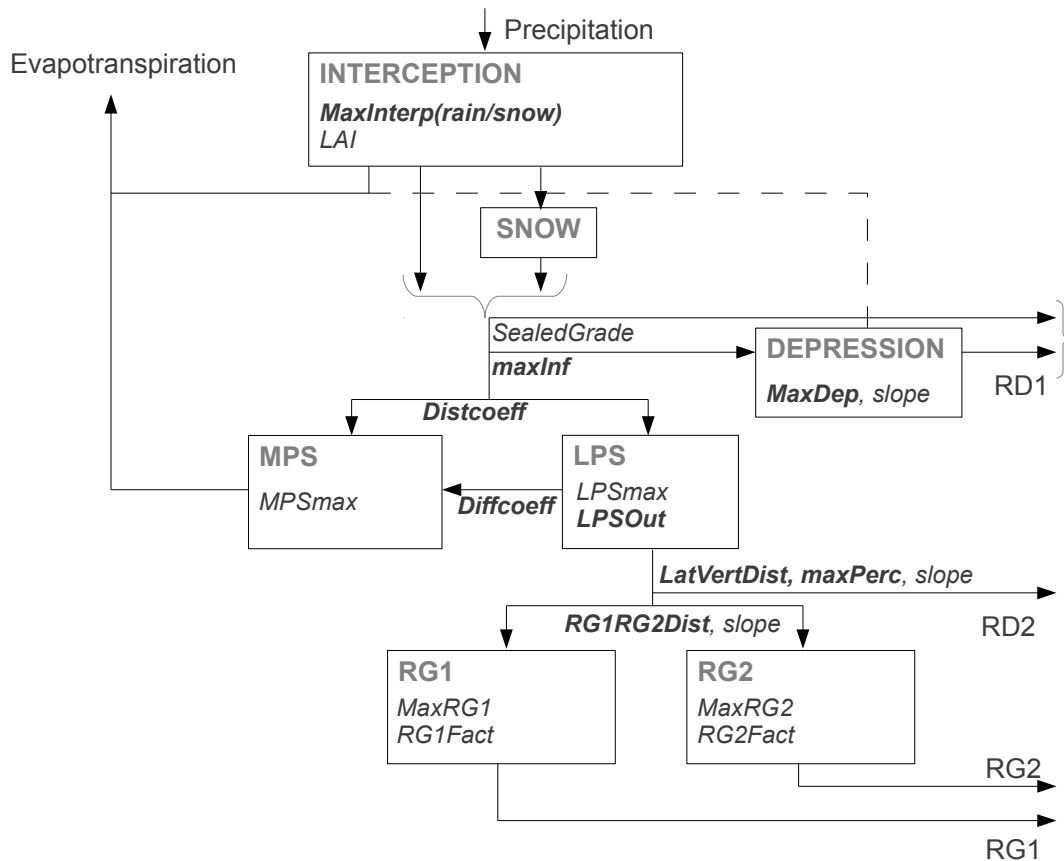


FIGURE (2.2) Principe de fonctionnement du modèle J2000. Les paramètres de J2000 sont représentés en italique. Les paramètres en gras sont globaux (une seule valeur pour tout le bassin), les autres sont distribués. Source : Branger *et al.* (2013).

Le modèle hydrologique distribué de base de la plate-forme JAMS est le modèle J2000 (Krause, 2002; Krause *et al.*, 2006). Il a été développé à l'origine pour les besoins de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, visant à quantifier les ressources en eau à l'échelle des masses d'eau telles que définies par la directive donc plutôt sur des bassins de méso- à grande échelle (quelques dizaines à plusieurs milliers de km^2). J2000 propose donc une représentation complète des processus hydrologiques sur un bassin versant avec une approche simplifiée s'appuyant sur des bilans en eau dans des réservoirs : partition pluie-neige, évapotranspiration sur la base d'une évapotranspiration de référence modulée par des coefficients culturaux, évolution du manteau neigeux, infiltration dans le sol, ruissellement de surface, percolation vers la nappe, écoulement dans la nappe et routage dans le réseau hydrographique (voir Figure 2.2). Une attention particulière est portée aux paramètres, qui ont un sens physique et peuvent soit être rapportés à des grandeurs mesurables sur le terrain (porosité, capacité au champ pour les sols), documentés dans des bases de données (indice de surface foliaire, coefficients culturaux), ou correspondent à des hypothèses de fonctionnement hydrologique explicites (poids de la pente des HRUs pour la

partition entre écoulement de subsurface et percolation vers la nappe pour le paramètre global *LatVertDist* par exemple, voir Figure 2.2). La discrétisation spatiale s’appuie sur des HRUs issues du croisement de la topographie, de la géologie, de la pédologie et de l’occupation du sol. Le pas de temps de J2000 est par défaut le pas de temps journalier. J2000 continue à être développé à Iéna et plusieurs variantes existent : J2000-S se focalise sur des bassins versants agricoles de quelques dizaines de km^2 et représente les cycles de l’azote et du phosphore et les transferts de nutriments (Fink *et al.*, 2007) ; une version de J2000 avec glaciers est utilisée en Himalaya (Nepal *et al.*, 2014; Nepal, 2016; Nepal *et al.*, 2017) ; une version prenant en compte l’irrigation et les barrages hydroélectriques en contexte tropical a été appliquée au Vietnam (Firoz *et al.*, 2018). Une version avec érosion sur les bassins versants agricoles est utilisée en Afrique du Sud (Steudel *et al.*, 2015). J2000 est aussi utilisé au Brésil (Machado *et al.*, 2016). Mes premiers travaux dans JAMS ont consisté, à partir de 2010, à prendre en main J2000 et à l’appliquer sur un certain nombre de bassins versants, pour différentes questions : impact de l’évolution de l’occupation du sol sur le bassin versant de l’Yzeron (Jandot, 2010; Branger *et al.*, 2012b, 2013) ; influence de la dynamique hydrologique liée à la fonte de la neige sur le transport sédimentaire sur le bassin versant de l’Arvan (Fougerit, 2011) ; identification des processus de génération des crues éclair en contexte méditerranéen (Huza, 2013). Puis j’ai commencé à développer mes propres modèles, en m’appuyant plus ou moins sur la structure de base de J2000.

2.2 Panorama des modèles hydrologiques développés

2.2.1 Organisation des écoulements dans les petits bassins versants périurbains : PUMMA

Les modèles dédiés à la compréhension de l’organisation des écoulements dans les petits bassins versants (quelques kilomètres carrés) ont été développés dans LIQUID. Le modèle directement issu de mon travail de thèse, BVFT, avait pour objectif de représenter le fonctionnement d’un petit bassin versant agricole et le rôle des aménagements hydro-agricoles (drainage agricole, haies, fossés) dans l’organisation des écoulements (Branger *et al.*, 2008), avec une discrétisation spatiale reprenant la carte du parcellaire. Ce travail a été étendu par Jankowsky (2011), et a abouti au modèle PUMMA, pour l’exploration du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants périurbains.

Le travail sur le modèle PUMMA était lié au site expérimental du bassin versant de l’Yzeron situé dans l’Ouest lyonnais et présenté au chapitre 4.1, ainsi qu’à un projet ANR coordonné par Isabelle Braud, le projet AVuPUR (Braud *et al.*, 2010). L’objectif était de représenter le fonctionnement de petits bassins versants dans lesquels l’hydrologie est fortement modifiée par la présence de surfaces imperméables (bâti, routes, parkings), ainsi que par les aménagements de bords de routes (fossés) et le réseau d’assainissement souterrain, de manière à comprendre l’organisation des écoulements, les contributions relatives des zones urbaines et rurales, et leurs variations au cours du temps (notamment les connexions et déconnexions de certaines parties du bassin pendant les épisodes pluvieux). Le contexte du bassin versant de l’Yzeron est caractérisé par des pentes marquées, un substrat géologique de type socle (granite et gneiss) avec uniquement des petits aquifères locaux déconnectés les uns des autres, des sols peu profonds, et des cours d’eau intermittents ayant des temps de réaction rapides (Braud *et al.*, 2013).

L’approche de Jankowsky (2011) a consisté à représenter l’hydrologie à l’échelle de la par-

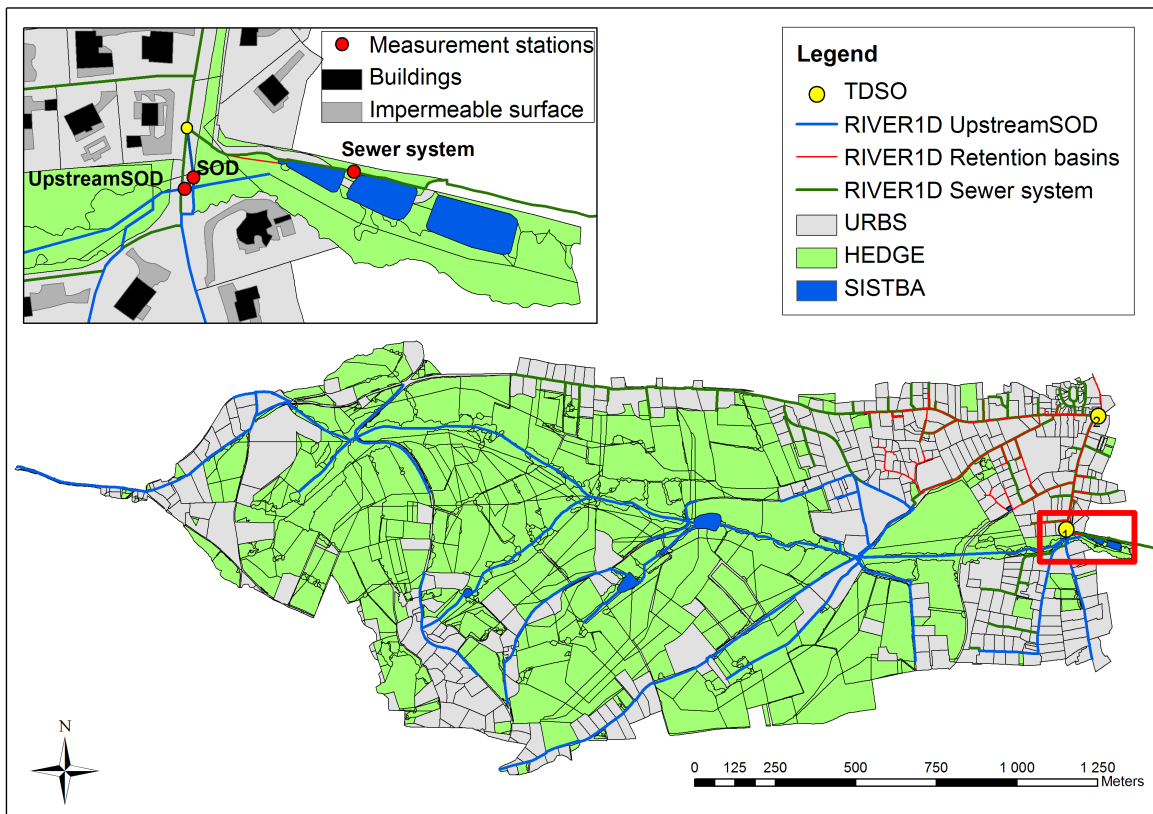


FIGURE (2.3) Maillage du modèle hydrologique PUMMA construit sur le bassin de la Chaudanne.
 Source : Jankowsky (2011).

celle cadastrale (voir Figure 2.3), et à prendre en compte les réseaux artificiels souterrains et leurs interactions avec l’hydrologie naturelle (connexions du réseau à la rivière par les déversoirs d’orage et drainage de la nappe par le réseau), mais aussi l’influence des zones imperméabilisées (bâti, routes, parkings) dans la génération du ruissellement, et l’effet des aménagements de bords de routes (fossés). Sur la base du modèle hydrologique BVFT dont la plupart des modules ont été repris (infiltration dans les sols, évapotranspiration, formation de nappes superficielles, transferts latéraux dans la zone saturée, transfert nappe-rivière et routage dans le réseau hydrographique), les processus manquants et les objets du paysage correspondants ont été ajoutés : ruissellement de surface, bassins de rétention, déversoirs d’orage, et parcelles cadastrales urbaines, à partir de la partie production du modèle hydrologique URBS (Rodriguez *et al.*, 2008). Des modifications ont été faites dans certains modules issus de BVFT, notamment dans le module HEDGE utilisé pour représenter les parcelles rurales pour le couplage avec le routage du ruissellement de surface, ainsi que dans le module d’écoulement en rivière RIVER1D pour la gestion des assecs. L’utilisation d’un pas de temps de calcul variable a permis d’apporter une attention particulière à la réactivité du bassin. PUMMA pouvait prendre en compte des pluies au pas de temps de la minute. Il a été appliqué sur les petits bassins versants de la Chaudanne (Jankowsky *et al.*, 2014) et du Mercier (Fuamba *et al.*, 2019).

Les simulations réalisées ont permis d’identifier un contraste saisonnier important dans les contributions respectives des zones rurales et urbaines du bassin : les écoulements d’hiver proviennent essentiellement des zones rurales et sont formés d’écoulement de subsurface ; tandis que le ruissellement sur les surfaces urbaines imperméables forme l’essentiel des écoulements pendant les crues d’été. Néanmoins, Jankowsky *et al.* (2014) ont montré que le taux de réinfiltration du ruissellement produit par les surfaces urbaines était plus important sur ce bassin périurbain que sur des bassins urbains plus classiques (Rodriguez *et al.*, 2008).

2.2.2 Impact de l’évolution de l’occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales : J2000P

Le modèle J2000P a été développé au cours de la thèse de Mériem Labbas (2015) portant aussi sur le fonctionnement des bassins versants périurbains. Par rapport au modèle PUMMA, l’objectif était de disposer d’un modèle plus simple, applicable sur des bassins versants plus grands, et plus facile à utiliser pour répondre à des questions de gestion de l’eau à l’échelle des territoires d’intérêt (agglomération, bassin de drainage de station d’épuration), et notamment aux questions d’impact de l’évolution de l’occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales. La taille de bassin versant visée est typiquement quelques dizaines à une centaine de km^2 . D’un point de vue hydrologique, on vise à caractériser, comme dans PUMMA, les interactions entre les parties urbaines et rurales d’un bassin versant, mais plutôt du point de vue de l’évolution de la ressource (bilans en eau, variations saisonnières), la réaction des bassins versants en temps de pluie étant déjà assez bien traitée par les modèles d’hydrologie urbaine classique (Lipeme Kouyi *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 2017). Il ne s’agissait donc pas de suivre précisément les chemins de l’eau à travers chaque parcelle cadastrale, mais de caractériser plus globalement la réponse de parties du bassin versant d’occupations du sol différentes (urbain / rural) et par des modes de gestion des eaux pluviales différentes (réseau unitaire, réseau séparatif, rétention à la source), sans pour autant représenter chaque ouvrage individuel. Le travail de Labbas a donc consisté à sélectionner les processus spécifiques du périurbain à conserver pour une approche à méso-échelle. Il s’agit donc d’une simplification par rapport au modèle PUMMA, mais aussi d’une complexification par rapport au modèle J2000, dont l’application précédente sur le bassin de

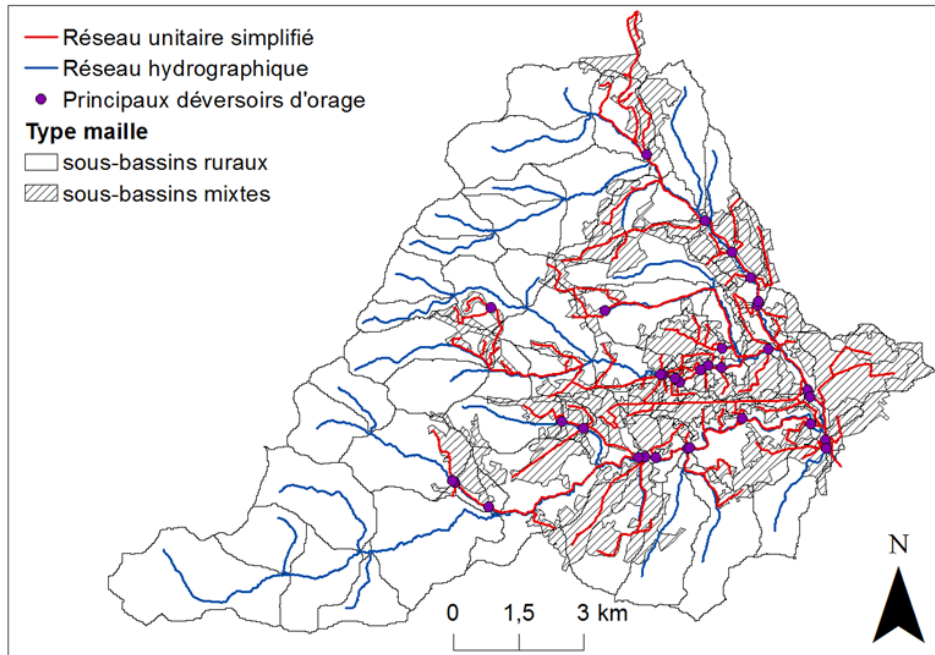


FIGURE (2.4) Maillage du modèle hydrologique J2000P construit sur le bassin versant de l'Yzeron. Source : Labbas (2015).

l'Yzeron avait montré certaines limites (Branger *et al.*, 2013).

Concrètement, J2000P a été construit à partir de J2000. Le modèle a été passé au pas de temps horaire pour une meilleure prise en compte de la dynamique du bassin pouvant influencer sur les bilans hydrologiques. Les réseaux d'assainissement et les déversoirs d'orage ont été ajoutés au modèle ; et les taux d'imperméabilisation ont été spatialisés au niveau de la HRU et non au niveau de la classe d'occupation du sol comme dans J2000, de manière à prendre en compte de façon plus fine les variations de taux d'imperméabilisation. Pour les HRUs mixtes (drainées à la fois par le réseau hydrographique naturel et le réseau d'assainissement), un taux de connexion au réseau modulable, qui transfère directement une partie du ruissellement de surface produit au réseau d'assainissement, a été introduit. J2000P a été appliqué sur le bassin versant de l'Yzeron (Figure 2.4) dans l'Ouest lyonnais (Labbas *et al.*, 2015), ainsi que sur le bassin versant de la Chézine, à Nantes, dans le cadre du projet EC2CO Rosenhy (Gudefin, 2013). Les résultats obtenus sont présentés au chapitre 3.

2.2.3 Genèse des écoulements pouvant conduire à des crues rapides en contexte Méditerranéen : Simpleflood

Le modèle semi-distribué Simpleflood a été développé dans le cadre de la thèse de Marko Adamovic (2014) et du projet ANR Floodscale, coordonné par Isabelle Braud, et qui avait pour objectif de mieux comprendre et quantifier, à différentes échelles, les processus pouvant aboutir aux crues éclair caractéristiques des régions méditerranéennes (Braud *et al.*, 2014). En parallèle d'une modélisation développée par Vannier (2013), sur la base de colonnes de sol dans lesquelles les écoulements verticaux dans le sol étaient représentés par l'équation de Richards, l'objectif était de tester une approche de modélisation plus simple, conduite par l'analyse de données, et de quantifier son applicabilité à l'échelle régionale. Adamovic a repris l'approche

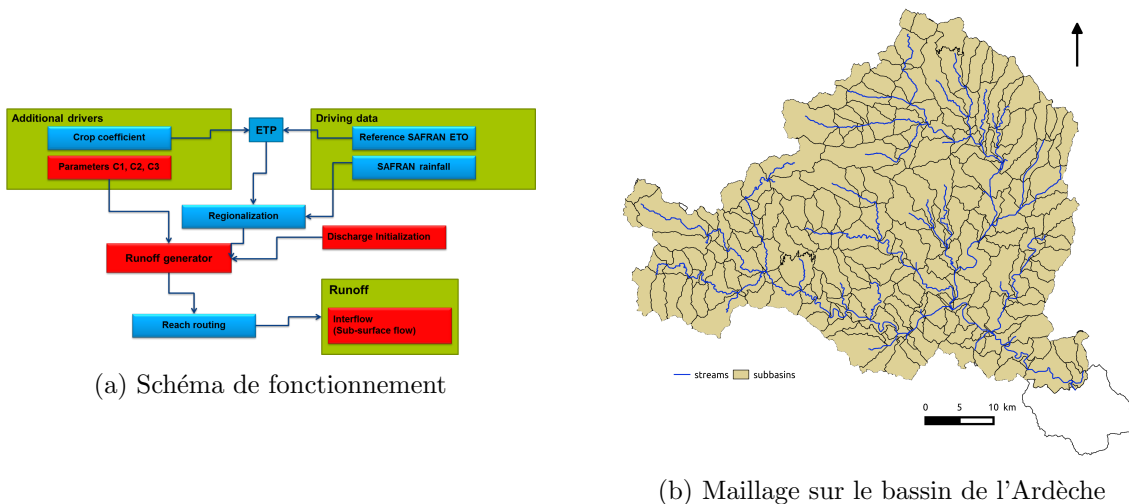


FIGURE (2.5) Modèle hydrologique Simpleflood construit sur le bassin versant de l'Ardèche par Adamovic (2014).

de Kirchner (2009), selon laquelle le bassin versant est un système dynamique simple, dont les paramètres sont dérivés directement des fluctuations du débit durant les périodes de récession. Il fonde son analyse sur des relations entre stock d'eau et débit avec une hypothèse principale : le débit ne dépend que du stock d'eau total dans le bassin versant. Cela permet de dériver des équations différentielles non-linéaires du premier ordre pour simuler la relation pluie-débit. Adamovic a testé cette approche sur plusieurs sous-bassins du bassin versant de l'Ardèche (de quelques kilomètres carrés à une centaine de km^2) et a proposé des adaptations pour le contexte Méditerranéen, caractérisé par une très forte évapotranspiration. En particulier, il a proposé de n'utiliser que les récessions de la période hivernale (hors période de végétation) pour la détermination des trois paramètres de la fonction de sensibilité au débit servant de base au modèle, de façon à limiter le biais induit par l'évapotranspiration (Adamovic *et al.*, 2015). Un modèle a été ensuite construit sur l'ensemble du bassin versant de l'Ardèche (environ 2000 km^2), en faisant intervenir une spatialisation par sous-bassins pour tenir compte de la variabilité spatiale de la pluie et de la géologie, qui est apparue comme un facteur prépondérant pour la détermination des coefficients de régression (Adamovic *et al.*, 2016).

Au final, le modèle Simpleflood est un modèle semi-distribué à pas de temps horaire. Le modèle de génération de débit dans chaque sous-bassin issu de l'approche de Kirchner (2009) a été incorporé à JAMS, et combiné avec les modules d'évapotranspiration et de routage dans le réseau hydrographique issu de J2000 (Figure 2.5). Il existe aussi une variante de Simpleflood proposant un couplage avec le modèle hydrodynamique 1D MAGE (Doussière, 2007), et une application de Simpleflood sur le bassin versant du Gardon (Coussot, 2015). Simpleflood a été comparé sur le bassin versant de l'Ardèche au modèle J2000 issu du travail de Huza (2013), ainsi qu'à l'approche ascendante de Vannier *et al.* (2016). Les deux approches de modélisation, bien que différentes, ont toutes deux conclu à la prépondérance des processus de subsurface dans la génération des écoulements, et ont identifié la géologie comme facteur principal contrôlant ces écoulements, ce qui est en accord avec l'ensemble des résultats du projet Floodscale (Braud *et al.*, 2016).

2.2.4 Impact du changement climatique et des usages sur la ressource en eau : J2000 Rhône

La dernière famille de modèles a pour origine la question scientifique de l'impact du changement climatique et des usages sur la ressource en eau, sur des bassins de grande taille. Ces recherches ont été conduites dans la cadre de plusieurs projets, sur la Durance (10000 km^2) (Sauquet, 2015; Sauquet *et al.*, 2016), ou sur le Rhône (100000 km^2) (Branger *et al.*, 2016, 2018). Le modèle J2000-Rhône a été développé spécifiquement pour répondre à cette question. En termes de résolution spatiale, on est donc à une échelle macroscopique. On s'intéresse aux bilans hydrologiques et aux contributions des différents compartiments sur des sous-bassins de plusieurs dizaines de km^2 , ou par grands types d'occupation du sol. En termes de résolution temporelle, on est plutôt à l'échelle des bilans annuels ou saisonniers et on s'intéresse moins aux réactions événementielles rapides. En termes de processus hydrologiques, la prise en compte de la neige devient cruciale car les bassins comportent une partie alpine importante. Il faut également représenter les usages de l'eau qui ont un impact à cette échelle : fonctionnement des grands barrages hydro-électriques et dérivations, prélèvements pour l'irrigation, et consommation d'eau potable dans les grandes agglomérations. Par ailleurs, il faut s'adapter aux données disponibles, qui ne sont pas forcément très détaillées. Pour l'irrigation par exemple, le Recensement Général Agricole, pour des raisons de confidentialité, ne diffuse pas la localisation exacte des parcelles irriguées. On a accès seulement à un pourcentage de surfaces irriguées par canton administratif. Enfin, un dernier facteur important est d'avoir des temps de calculs rapides, car des simulations de scénarios de changement climatique, couplés à des scénarios d'usage, peuvent engendrer plusieurs centaines de simulations continues d'une centaine d'années chacune.

Pour J2000-Rhône, les conceptualisations de processus et le pas de temps journalier du modèle J2000 ont été repris, avec quelques simplifications du module de neige pour diminuer le nombre de paramètres (Gouttevin *et al.*, 2017). Des développements supplémentaires ont été réalisés pour la modélisation des usages, sous formes de composantes développées dans JAMS et couplées aux composantes d'hydrologie naturelle de J2000 : la demande agricole pour l'irrigation, les besoins en eau potable et la gestion des principaux ouvrages de stockage et transferts interbassins (liés à la production hydroélectrique et à l'irrigation principalement).

- La modélisation des prélèvements pour l'irrigation s'appuie sur une approche à base de bilan hydrique considérant le réservoir sol. L'eau d'irrigation est destinée à couvrir le besoin en eau des plantes. La demande en eau pour l'irrigation dans chaque HRU est paramétrée par les coefficients culturaux, la profondeur racinaire, l'indice de surface foliaire, la période réglementaire d'irrigation autorisée et le type d'irrigation (gravitaire, par aspersion, goutte-à-goutte). Elle intègre la notion de stress toléré pour déclencher ou non l'irrigation et de déficit en eau du réservoir des sols (le déficit doit être comblé partiellement ou complètement par l'irrigation). La fonction est activée sur les HRUs à occupation des sols agricole décrites par grand type de culture, et qui sont sélectionnées aléatoirement à l'intérieur d'un canton administratif de façon à correspondre avec la surface irriguée connue. L'eau est prélevée dans le cours d'eau le plus proche et le prélèvement est modulé par la quantité d'eau disponible.
- La demande en eau potable s'exprime au travers d'un modèle économétrique empirique basé sur les données disponibles à l'échelle des communes et reliant la consommation associée à des facteurs explicatifs (structure de l'habitat, climat, revenu fiscal, prix de l'eau, etc.).
- La modélisation du fonctionnement des ouvrages de stockage s'appuie sur une fonction d'objectif journalier de remplissage / vidange des réservoirs. Cette fonction est issue

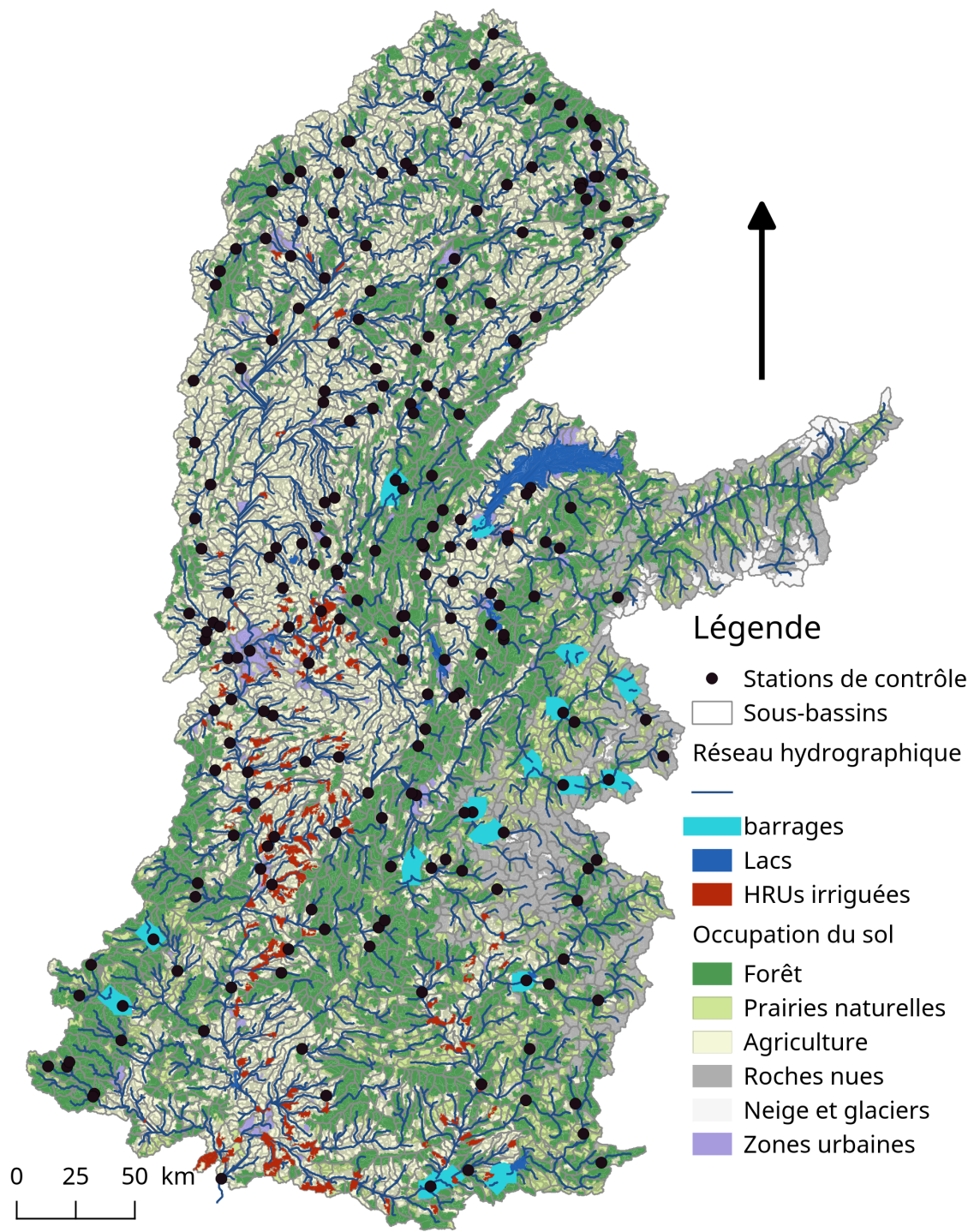


FIGURE (2.6) Maillage du modèle hydrologique J2000-Rhône.

d'un travail de quantification des perturbations moyennes des ouvrages réalisé à partir de comparaisons de données (Cipriani et Sauquet, 2014). Cette fonction objectif intègre donc la gestion des barrages pour l'hydro-électricité, mais aussi les autres usages (irrigation, tourisme), ainsi que les contraintes réglementaires (débits réservés). La perturbation réelle appliquée sur le débit simulé en aval immédiat du barrage est modulée par la quantité d'eau disponible dans la rivière et l'état de remplissage du réservoir.

La discrétisation spatiale du modèle J2000-Rhône sur le bassin versant du Rhône, avec la localisation des barrages et des HRUs irrigués, est représentée Figure 2.6. Les résultats obtenus avec ce modèle sont présentés au chapitre 3.

2.3 Le maillage des modèles distribués

La particularité des modèles hydrologiques distribués est que les écoulements sont générés sur des mailles élémentaires, puis sont transmis de maille en maille et agrégés pour aboutir à des débits dans le réseau hydrographique. C'est grâce à ces mailles élémentaires que l'hétérogénéité du bassin versant et la présence d'aménagements anthropique peuvent être pris en compte explicitement. La définition de ces mailles fait partie des choix de modélisation de façon aussi importante que la sélection des processus hydrologiques pris en compte dans le modèle et le choix des équations pour représenter ces processus (Fenicia *et al.*, 2016). Il existe plusieurs types de maillages pour les modèles hydrologiques distribués (Branger *et al.*, 2012a). Certains modèles sont en réalité semi-distribués, et ne font pas de transfert de maille à maille mais transfèrent directement les écoulements produits à l'exutoire des sous-bassins (Arnold et Fohrer, 2005). Beaucoup de modèles s'appuient sur des mailles carrées régulières, issues en général du modèle numérique de terrain (Maxwell et Miller, 2005; Kumar *et al.*, 2013). L'inconvénient des maillages en grille est qu'il est souvent plus difficile de représenter des éléments plus petits que la taille de la maille (en particulier les éléments du paysage linéaires, comme les routes, les fossés), et en particulier des aménagements d'origine humaine qui interagissent avec les écoulements topographiques naturels (voir exemple du bassin versant de la Chaudanne présenté en 1.2). De plus les modèles sont souvent dépendants de la taille de la maille, ce qui peut poser des problèmes de paramétrisation (Kumar *et al.*, 2013). Les maillages en triangles irréguliers sont plus adaptables pour représenter des éléments linéaires (Ivanov *et al.*, 2004a,b), mais ils sont délicats à mettre en œuvre sur de grands bassins versants. Le concept de Hydrological Response Unit (HRU) ou Unité de Réponse Hydrologique, a été développé pour dépasser ces limitations (Flügel, 1995). Le principe est de constituer, en croisant des informations cartographiques aux échelles d'intérêt, des mailles que l'on pense homogènes du point de vue des processus et représentatives des principaux contrôles de la réponse hydrologique. Ces HRUs peuvent être de tailles variables, résolvant ainsi le problème de la représentation des éléments de petite taille, et celui de la dépendance à la résolution de la maille. Elles sont également de formes irrégulières, ce qui permet la prise en compte d'éléments linéaires. Enfin, ces HRUs sont cohérentes avec les contrôles de la réponse hydrologique, et permettent souvent des structures de modèles plus simples (Fenicia *et al.*, 2016). Les modèles que j'ai développés, dans LIQUID comme dans JAMS, reprennent le concept de HRU pour la constitution du maillage, pour ces raisons.

La construction du maillage d'un modèle en HRUs est par contre une tâche difficile. Il faut réaliser le croisement des différentes sources d'information spatiale pour délimiter les mailles (modèle numérique de terrain, carte d'occupation des sols, carte pédologique, localisation des barrages ou d'autres discontinuités hydrologiques), et définir les connexions entre ces mailles

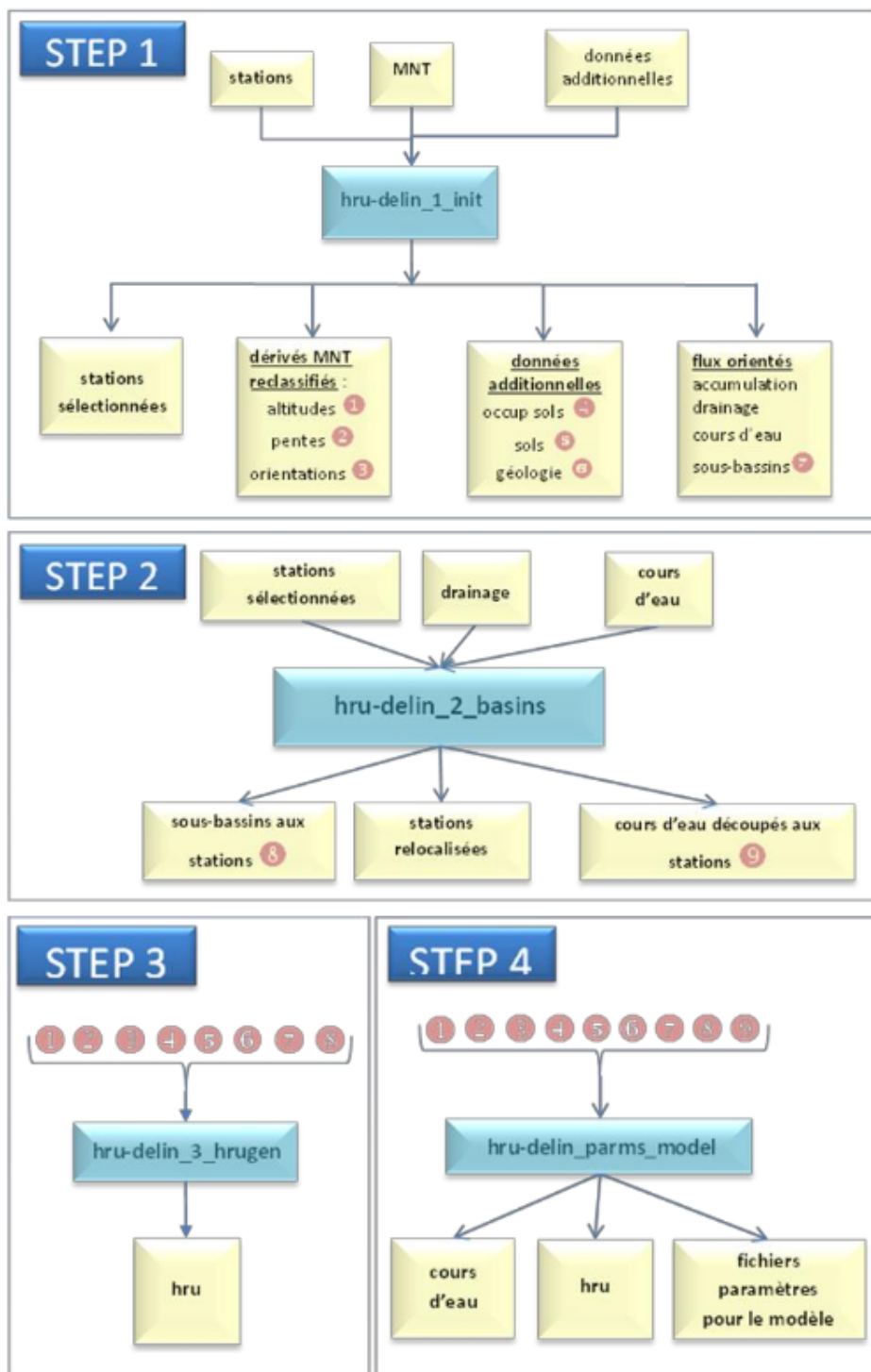


FIGURE (2.7) Workflow du logiciel de pré-processing des modèles JAMS HRU-delin.

pour aboutir à la topologie du modèle hydrologique. La plupart des logiciels d'information géographique disposent de fonctionnalités d'analyse de terrain qui sont capables de délimiter les sous-bassins versants, localiser le réseau hydrographique et construire des plans de drainage à partir d'une grille régulière de modèle numérique de terrain. Cependant déterminer la topologie sur des éléments irréguliers requiert des fonctions avancées d'analyse spatiale et de topologie qui ne sont pas disponibles dans les logiciels. De plus, des traitements géométriques supplémentaires sur la forme et l'homogénéité des mailles peuvent être requis pour répondre à des contraintes numériques du modèle (Sanzana *et al.*, 2019b). Il s'agit d'un travail de développement spécifique en géomatique, qui demande des compétences de programmation particulières. Les logiciels de pré-processing qui permettent l'automatisation de ces tâches sont en général passés sous silence dans la littérature scientifique. Ils sont pourtant indispensables pour l'utilisation des modèles hydrologiques. Ce sont eux qui rendent les modèles déployables sur des bassins versants réels et leur permettent de dépasser le stade de prototypes. Ils permettent aussi de tester les modèles dans différentes configurations dans une démarche de tests d'hypothèses. En bref, les logiciels de pré-processing sont la condition de la pérennité des modèles hydrologiques (Branger *et al.*, 2012a).

Pour les modèles de LIQUID comme pour les modèles de JAMS, j'ai supervisé le développement de logiciels de pré-processing dédiés. Le développement de GéoPUMMA (Sanzana *et al.*, 2013, 2017) a été lancé en parallèle de la thèse de Sonja Jankowsky (2011), et a été poursuivi dans la thèse de Pedro Sanzana (2018). GéoPUMMA traite la génération du maillage du modèle PUMMA et d'une manière plus générale de tout modèle hydrologique distribué détaillé pour lequel la prise en compte d'éléments linéaires est importante (fossés, réseaux d'assainissement etc). GéoPUMMA réalise des traitements sur des données vectorielles, ce qui permet une meilleure prise en compte des éléments linéaires. HRU-delin (Branger *et al.*, 2016) est le logiciel des modèles hydrologiques de JAMS, inspiré du logiciel GRASS-HRU développé à Iéna (Schwartz, 2008). Dans HRU-delin, la génération des HRUs se fait sur la base de calculs raster, mieux adaptés aux grands bassins versants, en plusieurs étapes présentées sur la Figure 2.7. HRU-delin prend notamment en compte la présence de stations hydrométriques de contrôle dans la délimitation des sous-bassins (voir Figure 2.6 pour l'application sur le bassin du Rhône), avec une fonction de relocalisation automatique des stations dans le cas où le positionnement sur le réseau hydrographique n'est pas assez précis. GéoPUMMA et HRU-delin reposent tous les deux sur le logiciel SIG open-source GRASS, qui est le seul SIG libre topologique, et donc assez puissant pour traiter des questions de connexions entre mailles. Ils sont tous les deux diffusés gratuitement sous une licence open-source.

Le développement de ces logiciels a demandé un temps et des efforts considérables. Cependant ce sont eux qui nous permettent aujourd'hui d'avoir des modèles hydrologiques réellement applicables, diffusables, et de réaliser des tests : influence de la résolution spatiale de la donnée d'occupation du sol sur un bassin périurbain (Branger *et al.*, 2013) ; impact de l'évolution de l'urbanisation et de la gestion des eaux pluviales sur le bassin de l'Yzeron (Labbas, 2015) ; impact de différents usages de l'eau sur le bassin du Rhône (Branger *et al.*, 2016, 2018). Par ailleurs, ces logiciels, bien que fortement liés aux modèles pour lesquels ils ont été développés, sont aussi utilisables pour d'autres modèles hydrologiques de mêmes types. Par exemple, les modèles développés dans LIQUID ne sont malheureusement maintenant plus utilisables. Mais GéoPUMMA a néanmoins montré son intérêt pour la construction du maillage d'un autre modèle (Sanzana *et al.*, 2019a).

2.4 Mise en perspective

Ce chapitre a présenté une assez grande variété de modèles hydrologiques distribués, développés pour des questions scientifiques liées au fonctionnement hydrologique des bassins versants et à l'impact des activités humaines sur ce fonctionnement, et appliqués sur des bassins contrastés, notamment en termes de tailles (3 km^2 à 100000 km^2). Ils ont en commun d'avoir été développés de façon modulaire dans des plate-formes de modélisation, et de s'appuyer sur des mailles en unités irrégulières de type HRU, mieux à même de représenter la variabilité des paysage et les aménagements d'origine humaine qui peuvent influencer fortement les processus hydrologiques. La détermination de ces HRUs est par ailleurs une étape de la construction des modèles dont il ne faut pas négliger l'importance.

Ces modèles ont permis de progresser sur la compréhension des processus hydrologiques, notamment sur les contributions respectives aux écoulements des zones rurales et urbaines des bassins versants périurbains (modèle PUMMA), et sur les processus de génération des écoulements à l'échelle régionale dans les bassins versants Méditerranéens, ainsi que sur les facteurs contrôlant ces écoulements (modèle Simpleflood). Ils ont aussi permis d'éclairer les conséquences de modifications de l'occupation du sol, d'usages de l'eau et du changement climatique sur les bilans hydrologiques des bassins et sur le régime hydrologique des cours d'eau (modèles J2000P et J2000-Rhône, dont les résultats sont présentés au chapitre 3).

Réflexion méthodologique sur la démarche de conception des modèles

Ma démarche de modélisation vise à construire des modèles représentatifs des processus, en étant adaptés aux questions scientifiques posées, et aux échelles temporelles et spatiales considérées. Par rapport à l'état de l'art, cette démarche se place résolument dans un équilibre entre approche bottom-up et top-down. L'idée est de sélectionner directement les processus d'intérêt et leur conceptualisation à l'échelle pertinente, en étant guidé par les objectifs d'application des modèles (Jakeman *et al.*, 2006). La démarche emprunte à la philosophie bottom-up la spatialisation des modèles et la relative richesse des processus hydrologiques de base considérés (débit issu de trois composantes différentes provenant de réservoirs différents dans les modèles de la famille J2000 par exemple, ou encore représentation de l'infiltration et de la formation de zones saturées dans le sol par l'équation de Richards dans certains modèles développés dans la plate-forme LIQUID). Elle se rapproche de l'approche top-down par la sélection de conceptualisations simplifiées à base de réservoirs pour les modèles de grande échelle. On peut aussi citer les modules d'usages du modèle J2000-Rhône en exemple : le module de barrage s'appuie sur des reconstitutions moyennes du fonctionnement des ouvrages en stockage / restitution d'eau plutôt que sur des règles de gestion de chaque ouvrage (qui pourtant correspondent le plus à la réalité à l'échelle locale). De même faute de pouvoir accéder à l'information de la localisation exacte des zones irriguées, le choix a été fait de les sélectionner aléatoirement.

Le modèle Simpleflood correspond plus directement à une approche de type top-down. La confrontation du modèle proposé par Kirchner (2009) aux données d'observation du bassin d'étude a identifié des manques au niveau de la prise en compte de l'évapotranspiration dans ce type de bassin versant. Une autre partie du travail a porté sur l'identification des paramètres du modèle et la recherche de facteurs influents sur ces paramètres. Le modèle final Simpleflood est donc plus complexe que l'original : il est semi-distribué, avec une représentation de l'évapotranspiration plus élaborée (dépendant notamment de l'occupation du sol) et une paramétrisation

dépendant de la géologie dominante de chaque sous-bassin.

Mis à part pour le modèle Simpleflood, cette démarche de modélisation est néanmoins caractérisée par une sélection des processus a priori. Dès lors se pose la question de la validation a posteriori de ces choix de modélisation. Une des idées fortes de l'approche top-down est qu'il faut complexifier le modèle uniquement si la confrontation avec des observations de terrain donne de bonnes raisons de le faire. Cette démarche est illustrée parfaitement par les travaux de Fenicia *et al.* (2008a,b). Dans le cas des modèles qui ont été présentés ici, la même question se pose : est-ce qu'il y a des processus importants qui n'ont pas été pris en compte ou de façon insuffisamment détaillée ? Ou au contraire, y a-t-il dans le modèle des représentations inutilement complexes ? Les méthodes et les résultats d'évaluation des modèles hydrologiques que j'ai développés ne sont volontairement pas présentés dans ce chapitre. Ils peuvent être trouvés dans les publications citées en référence pour chaque modèle. D'une manière générale, les modèles n'ont pas été calibrés, même si des modifications de paramètres ont pu être faites suite à des tests de sensibilité pas à pas, notamment par Jankowsky *et al.* (2014) et Labbas (2015). L'évaluation proprement dite, assez classique (comparaison à des séries de débits observées et calcul d'indicateurs de performance comme le biais en volume ou le critère de Nash), a en général conclu que les modèles permettaient de reproduire raisonnablement les observations et donc étaient considérés comme aptes à des applications prédictives, qui sont présentées dans le chapitre 3. A travers ces évaluations, on a pu identifier des processus manquants dans certains cas, comme par exemple les transferts d'eau dans les réseaux d'assainissement et les connexions réseau-rivière par les déversoirs d'orage pour les applications au périurbain du modèle J2000 (Branger *et al.*, 2013), ce qui d'ailleurs a conduit au développement de J2000P. Par contre, le cas contraire, c'est à dire l'identification de processus inutilement détaillés, est beaucoup plus difficile et n'a évidemment pas été fait. Et dans l'ensemble, l'évaluation de l'adéquation de la structure des modèles été largement faite de façon informelle, sur la base de l'expertise du modélisateur. On ne peut donc pas dire que les modèles hydrologiques que j'ai développés ont été complètement évalués. Cela renvoie à la question plus générale de l'évaluation des modèles hydrologiques distribués présentée en 1.3. Il manque clairement des protocoles d'évaluation adaptés pour ce type de modèles, qui puissent permettre de cibler plus précisément certains processus ou conceptualisations. Des éléments dans ce sens sont donnés au chapitre 4.

Intérêt des plate-formes de modélisation

Actuellement, les plate-formes de modélisation ne sont plus aussi visibles qu'elles ont pu l'être il y a une dizaine d'années. Les modèles hydrologiques occupent toujours le devant de la scène. Cependant, ils ont bénéficié en termes d'informatique de l'approche plate-forme. Les architectures sont moins monolithiques, plus modulaires, ce qui facilite la déclinaison de familles de modèles et la capitalisation. Comme souligné par Clark *et al.* (2017), la modularité des codes est une condition nécessaire à la pérennité et l'extensibilité des modèles hydrologiques, surtout en période de ressources humaines et financières limitées.

Outre ces aspects pratiques et organisationnels, je vois plusieurs intérêts à la construction de modèles dans des plate-formes de modélisation. Le premier est qu'elles permettent de construire des modèles hydrologiques sur mesure pour chaque bassin versant. Cela a été conceptualisé par Beven (2000) sous le terme de *uniqueness of place*, et peut être critiqué comme manquant de généralité pour progresser sur la connaissance des processus hydrologiques. En effet les processus hydrologiques universels que l'on cherche à identifier et reproduire dans les modèles sont

masqués par les particularités des bassins versants ; et donc il serait plus utile d'appliquer les mêmes modèles en masse sur un grand nombre de bassins versants (Andréassian *et al.*, 2009). Pour ma part, je considère que la construction de modèles par agrégation des processus dans un contexte particulier (objectifs / données) permet de progresser pas à pas sur la compréhension générale des processus hydrologiques en abordant à chaque fois un aspect particulier ou nouveau. Par exemple le développement du modèle J2000-Rhône nous a conduits à travailler plus spécifiquement sur les processus de neige. Les connaissances acquises dans une expérience particulière peuvent ensuite être réutilisées dans d'autres contextes, et permettre ainsi une élaboration progressive du Grand Puzzle Hydrologique. Par ailleurs, s'il est indéniable que des expériences multiples sur des bassins très contrastés contribueront à faire progresser la connaissance hydrologique, cela peut aussi être fait en agrégeant les expériences de l'ensemble de la communauté scientifique, notamment à travers des expériences d'intercomparaison (voir aussi partie 3.2.1).

Un autre intérêt que je vois à l'utilisation de plate-formes est de provoquer des rencontres en termes de conceptualisations hydrologiques. C'est en effet un moyen de faire communiquer des conceptions de processus différentes qui en temps normal ne sont pas mises en interaction. Dans les modèles développés dans la plate-forme LIQUID on a été amenés à faire communiquer entre eux des modules basés sur l'équation de Richards et d'autres sur des approches de type réservoir. Cela a nécessité de s'interroger sur la signification des variables simulées par chaque modèle et susceptibles d'être échangées : la hauteur de nappe correspond-elle à la même grandeur physique dans chaque module, est-ce qu'elles sont comparables ? Cette sortie forcée d'un cadre conceptuel unique conduit aussi à questionner nos modèles, nos approches, et donc contribue à faire progresser la modélisation.

Chapitre 3

Quantification de l'impact des activités humaines sur la ressource en eau

Les modèles hydrologiques développés et présentés dans le chapitre précédent ont un objectif de compréhension du fonctionnement des bassins versants et de réflexion sur les structures de modèles adaptées aux différentes échelles et questions posées, mais répondent aussi à des objectifs d'application, en lien avec des enjeux de gestion de l'eau. L'exploitation des modèles pour réaliser des tests de scénarios ou des projections, et apporter ainsi des réponses quantitatives à des questions d'aménagement ou de stratégie d'adaptation donne son sens à ma démarche de recherche.

Ce chapitre présente les résultats obtenus sur deux thématiques d'application : l'impact des modes de gestion des eaux pluviales dans un contexte de croissance de l'urbanisation, notamment au travers de la thèse de Labbas (2015), et l'impact du changement climatique et des stratégies d'adaptation des usages de l'eau au travers des projets R2D2 2050 (Sauquet, 2015) et MDR (Branger *et al.*, 2016).

3.1 Impact de l'évolution de l'urbanisation et de la gestion des eaux pluviales sur les bassins versants périurbains

3.1.1 Premiers résultats

J'ai réalisé les premières études d'impact de l'évolution de l'urbanisation sur le bassin versant périurbain de l'Yzeron avec le modèle J2000 classique au pas de temps journalier. Ce modèle ne comportant pas de représentation du réseau d'assainissement, le seul facteur qui a pu être étudié est l'évolution des surfaces imperméables, à partir de cartes d'occupation du sol produites par des géographes dans le cadre du projet AVuPUR (Jacqueminet *et al.*, 2013). J'ai étudié l'impact de la source de données d'occupation du sol (Branger *et al.*, 2013), et pour une même source (cartes issues de l'imagerie satellite SPOT) l'impact de l'augmentation des zones urbaines sur 20 ans (Branger *et al.*, 2012b). Les résultats ont porté sur les bilans en eau et les variations

saisonniers des composantes du débit. Ils ont montré que ni la source de données ni l'évolution de l'urbanisation n'ont, sur les plus grands sous-bassins, d'influence majeure sur le débit total. Par contre, des différences significatives sur les contributions au débit (partition débit de base / ruissellement de surface) ont été trouvées, indiquant une modification des bilans en eau sur le bassin du fait de l'urbanisation. Il est aussi apparu que la résolution des données d'occupation du sol est un facteur important à prendre en compte dans ce type d'étude.

3.1.2 Impacts de scénarios d'occupation du sol et de gestion des eaux pluviales en 2030

Ce travail a également été réalisé sur le bassin versant de l'Yzeron dans le cadre de la thèse de Labbas (2015). Il a pu s'appuyer sur le modèle hydrologique J2000P, mieux adapté que J2000 notamment par la prise en compte du réseau d'assainissement et des déversoirs d'orage. Le travail de définition des scénarios d'occupation du sol a également été plus complet et plus abouti, et a pu être doublé de la définition de scénarios de gestion des eaux pluviales.

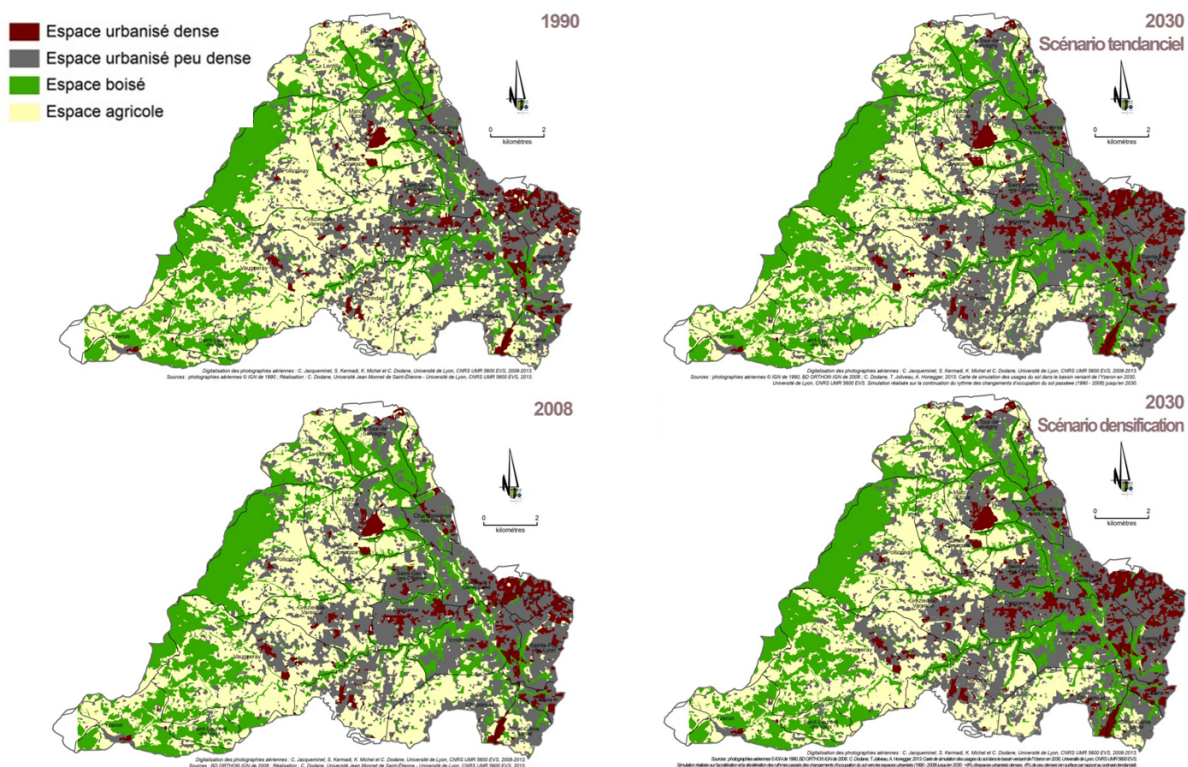


FIGURE (3.1) Usages des sols pris en compte et simulés par le modèle changement d'usage et repris pour les scénarios d'évolution de l'urbanisation. Source : Labbas (2015)

La construction de scénarios prospectifs d'occupation du sol en 2030 sur le bassin versant de l'Yzeron a été faite en collaboration avec des géographes, par un travail de prospective territoriale (Dodane *et al.*, 2014). Une typologie d'usage des sols a été définie. L'usage des sols est différent de l'occupation du sol dans le sens où il décrit les activités humaines sur le territoire, et non les propriétés physiques des surfaces (surface bâtie, sol nu, végétation etc). C'est l'usage des sols qui est la variable pertinente dans les travaux de prospective territoriale, à charge ensuite pour l'hydrologue de convertir ces usages en taux d'imperméabilisation. Une typologie d'usage pertinente pour l'hydrologie a été définie : espaces urbanisés denses, espaces urbanisés

peu denses, espaces boisés, espaces agricoles. On a également distingué les espaces urbanisés anciens (apparus avant 2008) et récents (apparus après 2008) pour permettre de construire des scénarios réalistes de gestion des eaux pluviales. Le modèle de changement d’usage LUCM a été calé sur les changements d’usage observés entre 1990 et 2008, puis des simulations ont été réalisées pour l’horizon 2030 selon plusieurs scénarios (Labbas, 2015) :

- Scénario tendanciel : rythme des changements d’usage du sol jusqu’en 2030 identique à celui entre 1990 et 2008 ;
- Scénario planification : continuation du rythme des changements d’usage du sol passé (1990 - 2008) jusqu’en 2030, avec prise en compte de trois contraintes réglementaires de la planification : 1) les zones à urbaniser des Plans Locaux d’Urbanisme, 2) les périmètres de protection du foncier agricole (PENAP : Protection des Espaces Naturels et Agricoles Périurbains), 3) les périmètres environnementaux et les risques (Espaces Naturels Sensibles, Zones Naturelles d’Intérêt Ecologique, Floristique et Faunistiques, Plan de Prévention du Risque Inondation) ;
- Scénario densification : accélération du rythme des changements d’usage (+9% d’espaces urbanisés denses en surface par rapport au scénario tendanciel) et sur la décélération des espaces urbanisés peu denses (−6%).

La cartographie des différents usages en 1990 et 2008, ainsi que les résultats des simulations du modèle de changement d’usage pour les scénarios tendanciel et densification sont montrés sur la Figure 3.1.

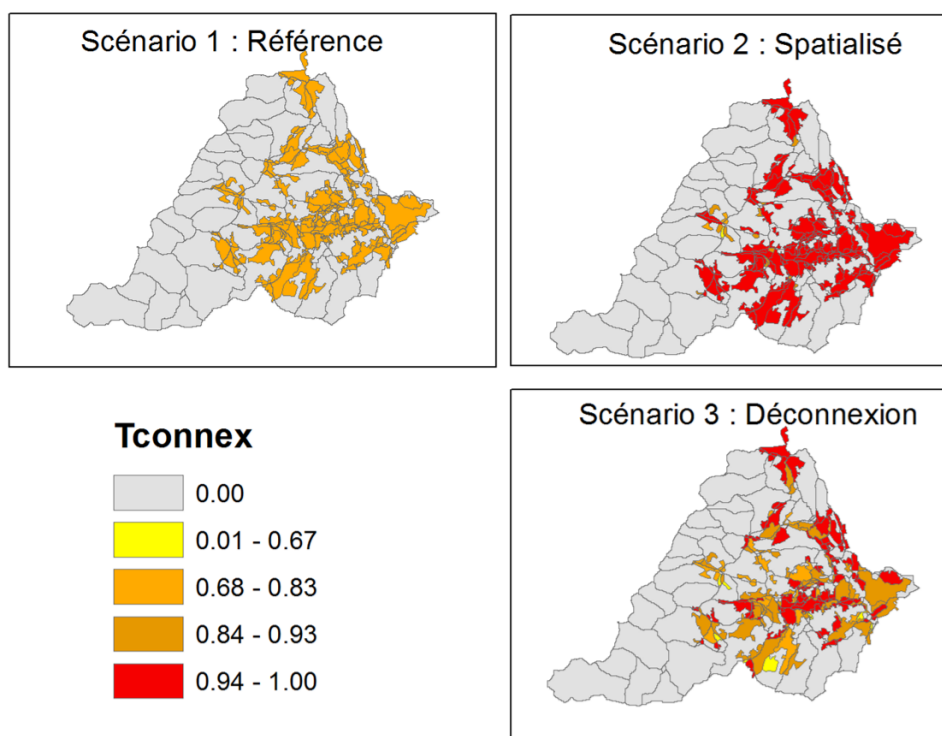


FIGURE (3.2) Cartographie des taux de connexion pour les sous-bassins mixtes selon les différents scénarios de gestion des eaux pluviales. Source : Labbas (2015)

En parallèle des scénarios d’usage des sols, trois scénarios de gestion des eaux pluviales ont été définis et sont présentés sur la Figure 3.2.

- Scénario de référence : dans les sous-bassins mixtes (drainés à la fois par le réseau hydrographique naturel et le réseau d’assainissement, voir Figure 2.4), 70% du ruissellement sur surfaces imperméables est connecté au réseau d’assainissement. Les 30% restant sont

Année	1990	2008	2030	2030	2030	2030	2030
Scénario usage sol			Tend.	Plan.	Dens.	Dens.	Dens.
Scénario eaux pluviales	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.	Spatialisé	Déconnexion
Qrivière	175	171	170	172	172	157	161
Ruissellement	53	57	63	63	62	47	51
Interflow	43	41	39	40	40	40	40
Débit de base	79	73	68	69	70	70	70
Qréseau	35	39	41	40	40	55	51
Nb déversements	7	10	14	12	12	34	25

TABLE (3.1) Bilan en eau moyen (exprimé en mm/an et en nombre moyen de déversements par an par les déversoirs d'orage) pour les différents scénarios d'usage du sol et de gestion des eaux pluviales, et à l'échelle du bassin versant de l'Yzeron total. Ruissellement, Interflow et Débit de base sont les composantes du débit total dans la rivière Qrivière. Source : Labbas (2015)

connectés à la rivière.

- Scénario spatialisé : dans les sous-bassins mixtes, le ruissellement produit par les surfaces imperméables des usages urbains est connecté au réseau, selon la fraction de surfaces imperméables de l'urbain ancien et récent de chaque HRU (taux spatialisé).
- Scénario déconnexion : dans les sous-bassins mixtes, seul le ruissellement produit par les surfaces imperméables de l'usage urbain ancien (dense et peu dense) est connecté au réseau. Le ruissellement produit par les surfaces imperméables de l'usage urbain récent est déconnecté du réseau unitaire et rejoint la rivière. Le taux de connexion est égal à la fraction de surfaces imperméables de l'urbain ancien de chaque HRU.

Les simulations ont été réalisées sur 15 ans avec des forçages atmosphériques identiques (période 2005-2012) pour tous les scénarios.

Les résultats des différents scénarios peuvent être comparés sur la Table 3.1. En ce qui concerne l'impact des changements d'usage du sol, ils confirment les résultats qui avaient été obtenus avec J2000 (Branger *et al.*, 2012b). L'extension de l'urbanisation, à l'échelle du bassin versant total, ne modifie pas significativement le débit total dans la rivière (qui reste quasi identique entre 2008 et 2030), mais par contre modifie ses composantes, par l'augmentation du ruissellement de surface et la diminution du débit de base. L'augmentation du débit dans le réseau (qui correspond à la diminution du débit dans la rivière entre 1990 et 2008) a par contre un impact important sur le nombre de déversements des déversoirs d'orage sur le bassin. La comparaison des différents scénarios d'usage 2030 entre eux (Tendanciel, Planification et Densification, pour un même scénario de gestion des eaux pluviales dit de Référence) est un peu décevante. Elle montre un bilan en eau quasiment identique : un tout petit peu plus de débit de base et un peu moins d'eau dans le réseau et moins de déversements, mais rien de significatif. Il est vrai que les cartes obtenues sont très proches les unes des autres, comme on peut le voir sur la Figure 3.1. Le résultat le plus net concerne les scénarios de gestion des eaux pluviales. Une prise en compte spatialisée du taux de surfaces imperméables induit une augmentation du taux de connexion au réseau (voir Figure 3.2), et en conséquence une chute importante du ruissellement de surface connecté à la rivière. Cela baisse d'autant le débit dans le cours d'eau, et augmente le débit dans le réseau. Les déversements par les déversoirs d'orage sont plus que doublés. La

comparaison entre les scénarios Spatialisé et Déconnexion (qui correspond aux politiques de gestion à la source des eaux pluviales maintenant mises en œuvre au niveau des collectivités) montre un impact non négligeable d'une déconnexion partielle, notamment sur le nombre de déversements.

Ces résultats sont à nuancer, notamment car les scénarios de gestion des eaux pluviales sont beaucoup plus grossiers que les scénarios d'usage des sols qui ont été construits de façon plus élaborée et en plus grande cohérence avec le monde réel. De plus, si le modèle hydrologique a été validé pour l'occupation du sol 2008 avec le scénario de référence pour la gestion des eaux pluviales (Labbas *et al.*, 2015), il faudrait aussi tester la pertinence du scénario Spatialisé sur la période présente. Néanmoins, on peut retenir de ce travail que la gestion des eaux pluviales semble avoir un effet plus important sur le fonctionnement hydrologique du bassin que l'évolution de l'urbanisation elle-même (au sens de l'évolution des surfaces imperméables). C'est un résultat important pour les gestionnaires de l'eau sur ces territoires (Agence de l'Eau, syndicat de rivière, collectivités), qui les encourage dans les politiques d'incitation à la déconnexion et la rétention à la source des eaux pluviales.

3.1.3 La suite : le projet Conscequans

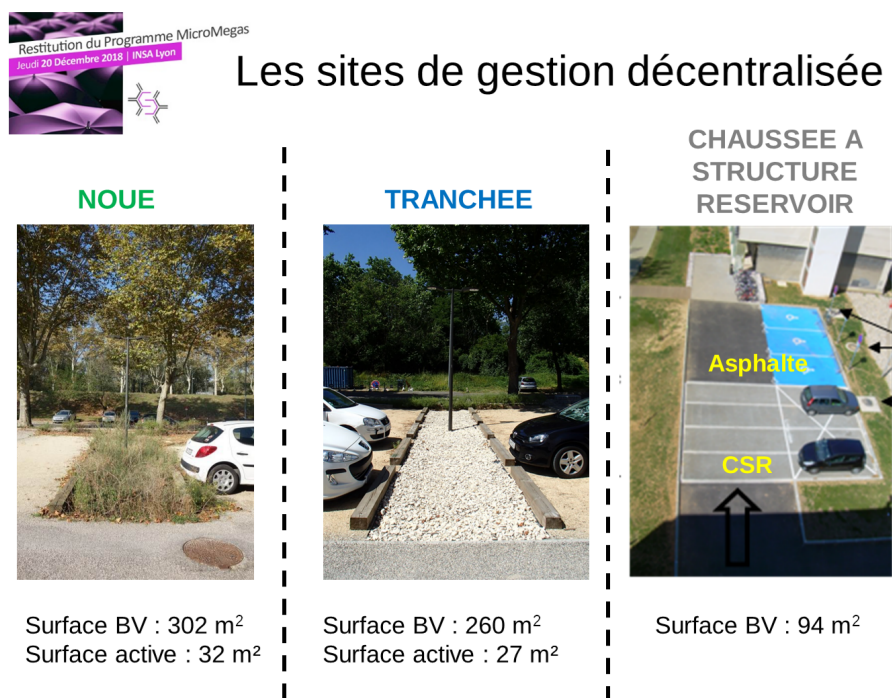


FIGURE (3.3) Exemples de techniques alternatives étudiées localement et dont on souhaite intégrer une paramétrisation dans J2000P. Site expérimental OTHU de l'éco-campus de Lyon, suivi dans le cadre du programme Micromegas (2016-2018)

La suite de ce travail a commencé début 2019 avec le projet Conscequans, que je coordonne avec des collègues du laboratoire INSA DEEP, et financé pour deux ans par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Ce projet a pour objectif de quantifier le rôle de la gestion des eaux pluviales sur l'ensemble de composantes du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant et sur le long terme, par le biais de la simulation numérique. Il s'agit de caractériser une

Modèle	Type	Mise en œuvre	Référence
GR5J	Global	Optimisation $KGE(\sqrt{Q})$	Pushpalatha <i>et al.</i> (2011)
MORDOR	Global	Optimisation $KGE(Q)$	Garçon (1999)
CEQUEAU	Semi-distribué	Optimisation	Hendrickx (2001)
CLSM	Distribué	Calibration manuelle	Ducharne <i>et al.</i> (2000)
J2000	Distribué	Analyse de sensibilité manuelle	Krause <i>et al.</i> (2006)
ORCHIDEE	Distribué	Pas de calibration	Krinner <i>et al.</i> (2005)

TABLE (3.2) Modèles utilisés dans le projet R2D2-2050 et leurs principales caractéristiques.

désimperméabilisation réussie pour répondre à des questions opérationnelles :

- La gestion à la source des eaux pluviales permet-elle réellement de réguler l'ensemble des composantes du cycle hydrologique à l'échelle d'un bassin versant, et si oui, quel niveau d'effort est-il nécessaire de garantir (nombre d'ouvrages, surface drainée par ces ouvrages, types d'ouvrage) ?
- Dans un contexte d'augmentation de température et d'intensification probable des épisodes pluvieux (changement climatique), ces ouvrages répondront-ils toujours de manière adéquate ?

Nous pourrions donc raffiner les scénarios de gestion des eaux pluviales, et quantifier plus précisément selon différents indicateurs (bilan hydrologique, crues, étiages) leurs impacts. Il est aussi prévu d'ajouter une composante changement climatique. Ce projet permettra d'améliorer le modèle J2000P, en intégrant la paramétrisation du fonctionnement de différents types d'ouvrages de rétention à la source, en s'appuyant notamment sur les travaux menés à DEEP (Ross *et al.*, 2011) et les données issues de sites expérimentaux (voir Figure 3.3 et section 4.1).

3.2 Ressource en eau, changement climatique et adaptation

3.2.1 Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050

Les travaux présentés ci-dessous ont été menés dans le cadre du projet R2D2-2050 financé par le Programme Gestion et Impact du Changement Climatique du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et coordonné par Eric Sauquet (Sauquet, 2015; Sauquet *et al.*, 2016). Il a consisté à élaborer une vision prospective de la gestion de l'eau du bassin versant de la Durance (10000 km^2) à l'horizon 2050, à l'aide d'une chaîne de modèles représentant le climat, la ressource en eau naturelle, la demande en eau pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable, le fonctionnement des grands ouvrages hydrauliques, et des scénarios de développement socio-économique. Il s'agissait donc d'un projet multidisciplinaire (climatologie, hydrologie, agronomie, sociologie) qui a aussi mobilisé les acteurs du territoire de la Durance notamment autour d'ateliers participatifs.

Du point de vue de l'hydrologie, la démarche a consisté à modéliser la ressource en eau dite naturelle et son évolution sous changement climatique, avec six modèles hydrologiques de conceptions variées (voir Table 3.2), dans l'objectif d'estimer les incertitudes de la chaîne *Modèle global de climat - Méthode de descente d'échelle - Modèle hydrologique* (Vidal *et al.*,

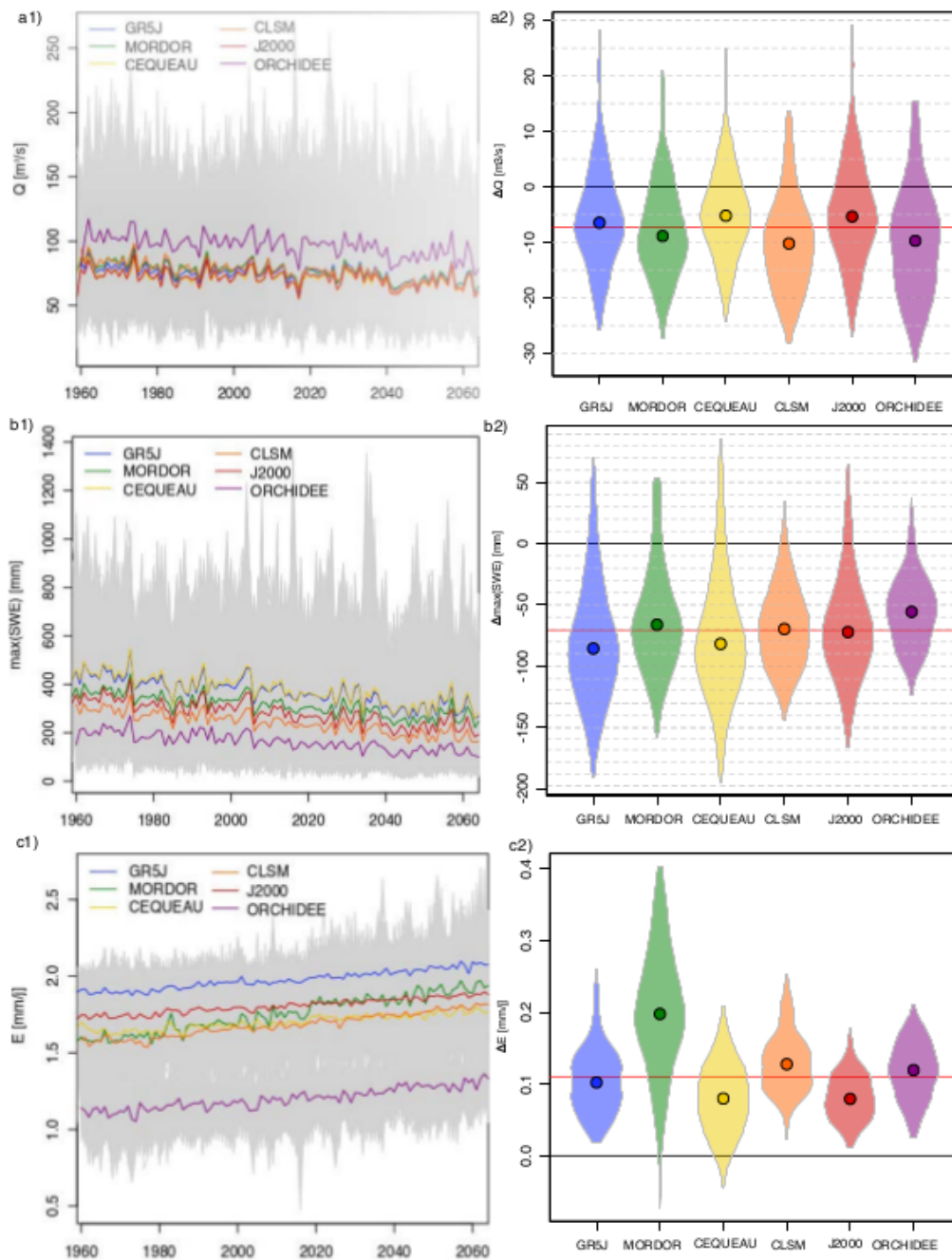


FIGURE (3.4) Changements de (a) débits, (b) maximum du stock de neige, (c) évapotranspiration réelle sur le bassin de la Durancé à Serre-Ponçon. A gauche (1) : évolution des moyennes annuelles des variables de 1960 à 2065, 330*6 projections en gris et médiane de chaque modèle en couleurs. A droite (2) : distributions des changements annuels de chaque variable pour chaque modèle. Source : Magand (2014)

2016). Chaque modèle a été mis en œuvre par le partenaire du projet qui en avait la maîtrise, d’abord en temps présent selon ses approches habituelles (notamment en termes de stratégie de calage). Les modèles ont été évalués comme tels par confrontation à des observations de débit journalières sur un ensemble de stations de contrôle (Sauquet, 2015). Pour la partie projections climatiques, les données issues du projet ENSEMBLES ont été utilisées (Johns *et al.*, 2011). Ont été sélectionnées 11 simulations de modèles climatiques globaux pour le scénario d’émission A1B (4 modèles avec 1 à 6 simulations chacun correspondant à différentes conditions initiales), qui ont été croisées avec 3 méthodes de désagrégation statistiques fournissant chacune 100 réalisations. Concrètement les forçages utilisés pour les modèles hydrologiques ont été reconstruits à partir du forçage Du0 développé lors du projet (Magand *et al.*, 2018), sur la base de dates analogues. 330 simulations sur la période du 1er août 1958 au 31 juillet 2065 ont été réalisées par l’ensemble des 6 modèles (avec quelques adaptations pour certains modèles compte-tenu de leurs temps de calcul). Les résultats de l’étude de l’incertitude de l’ensemble de la chaîne de modélisation ne sont pas présentés ici pour se concentrer sur les résultats particuliers de la modélisation hydrologique, mais ont conclu à un impact non négligeable de la partie modélisation hydrologique dans l’incertitude de la chaîne complète (Vidal *et al.*, 2016).

Les résultats présentés sont issus du travail de thèse de Magand (2014) qui a réalisé l’analyse de l’ensemble des résultats des simulations. La comparaison entre la période présente et la période future a été faite en comparant les moyennes interannuelles de chaque variable sur la période 2036-2065 et la période 1980-2009. Les projections climatiques utilisées dans le projet montrent une augmentation de la température, et une diminution en moyenne des précipitations avec une forte disparité saisonnière et spatiale (Magand, 2014). Il n’y a notamment pas de diminution significative des précipitations en hiver, et une diminution plus marquée à l’aval du bassin. Les Figures 3.4 et 3.5 montrent respectivement l’évolution des variables annuelles (débit, maximum de stock de neige exprimé en équivalent eau ou SWE, et évapotranspiration (dite réelle pour les modèles qui utilisent l’évapotranspiration potentielle), et les changements entre futur et passé sur les variables mensuelles, pour le sous-bassin de la Durance à Serre-Ponçon (3580 km^2).

A l’échelle annuelle, les résultats montrent une diminution globale du débit même si ce n’est pas forcément significatif pour toutes les chaînes de modèles (Magand, 2014). Les distributions des changements de débits sont assez similaires entre les modèles ; on observe une dispersion entre modèles plus faible que la variabilité pour un seul modèle (Figure 3.4 a2). On observe également une diminution nette du maximum de stock de neige, et une augmentation de l’évapotranspiration. La réponse sur l’évapotranspiration est beaucoup moins homogène que les autres variables entre les modèles. A l’échelle mensuelle, l’évolution saisonnière des débits montre une augmentation en fin d’hiver/ début de printemps et diminution forte à la fin printemps / début de l’été. Ces modifications du régime de débit sont liées à un déphasage de la fonte de la neige qui commence plus tôt, avec une diminution du stock de neige liée à la diminution de la précipitation neigeuse et une fonte plus précoce (Figures 3.5 a et b). Enfin, les résultats montrent une augmentation de l’évapotranspiration tout au long de l’année mais avec une dynamique saisonnière très différente d’un modèle à l’autre. La saisonnalité est par exemple très marquée pour CLSM et MORDOR qui simulent une diminution nette de l’augmentation d’évapotranspiration entre futur et présent en fin d’été (qui peut être attribuée au stress hydrique), alors que d’autres modèles restent stables tout au long de l’année (GR5J) (Figure 3.5 c).

La comparaison entre modèles est très instructive. Le modèle ORCHIDEE est à part pour des raisons propres à la représentation des processus dans ce modèle (représentation de la neige

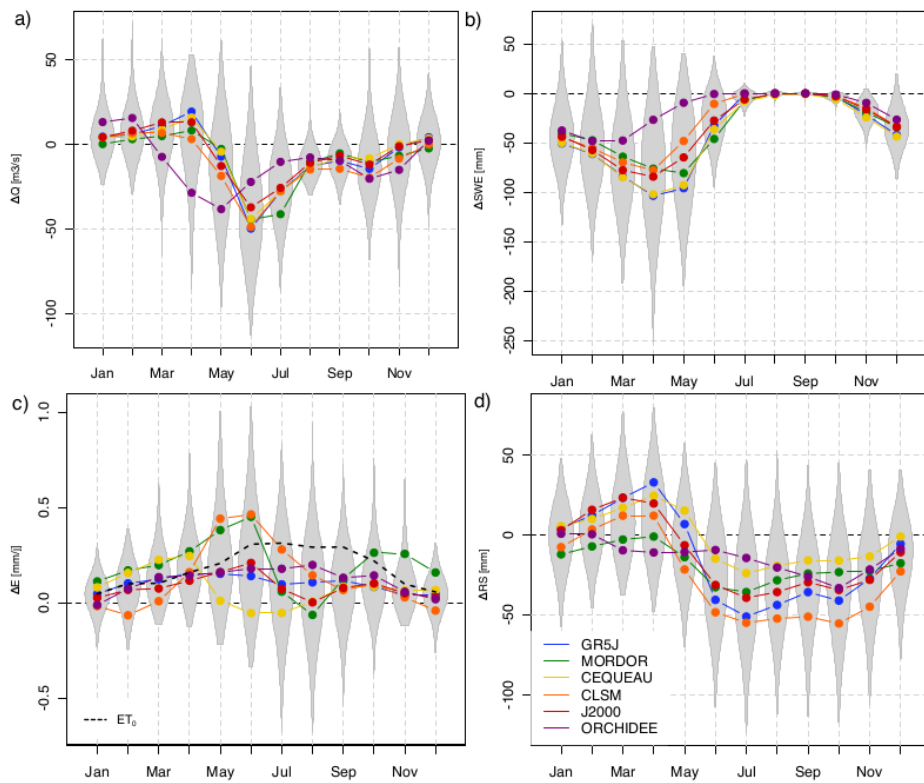


FIGURE (3.5) Changements mensuels entre période future et période passée (futur - passé) de (a) débits, (b) maximum de stock de neige, (c) évapotranspiration réelle et (d) stock d'eau souterrain sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Médiane de chaque modèle en couleur et distributions globales en gris. Source : Magand (2014)

non adéquate) et à sa mise en œuvre dans le projet sans calage spécifique au bassin (Magand, 2014). Les autres modèles produisent des résultats assez similaires sur les débits et la neige. La définition du stock d'eau souterraine utilisé pour présenter la Figure 3.5 d a été compliquée du fait des différences entre structures des modèles. On arrive à des disparités très importantes de tailles de réservoir ; cependant en termes de changements on obtient finalement des résultats assez similaires. Il y a par contre beaucoup plus de variabilité sur l'évapotranspiration, ce qu'on voit de façon encore plus nette sur les changements mensuels qui ont parfois des dynamiques très différentes. Cela montre que les modèles peuvent fournir les mêmes débits du fait du calage réalisé sur le temps présent, mais que cela n'empêche pas des divergences d'apparaître pour d'autres processus non contraints par cette variable. L'évapotranspiration en est un exemple typique : les modèles utilisés dans le projet avaient différentes conceptualisations de l'évapotranspiration (évapotranspiration potentielle avec des degrés de raffinement divers ou bilans d'énergie). Si l'on reprend le concept des bonnes réponses pour les bonnes raisons de Kirchner (2006), on a un exemple très clair de modèles qui donnent tous la même (bonne ?) réponse mais invoquent pour cela des raisons différentes, qui sont mises en évidence lorsqu'on regarde d'autres variables. Cela donne à réfléchir sur la structure des modèles.

3.2.2 Impact du changement global sur la ressource en eau dans le bassin du Rhône

Le fleuve Rhône et ses affluents se caractérisent par une grande diversité de régimes hydrologiques naturels (du comportement glaciaire aux influences pluviales méditerranéennes) et par des modifications parfois profondes de ces régimes du fait des activités humaines. Le changement global pourrait modifier le fonctionnement du bassin et remettre en cause les règles de partage de la ressource, faisant émerger de nouveaux territoires en déséquilibre quantitatif quant à la ressource en eau. Afin d'examiner les questionnements sur l'avenir du Rhône et de ses affluents, Irstea, avec les soutiens financiers de l'Agence de l'eau, de la Compagnie Nationale du Rhône et des fonds européens FEDER a engagé l'action de recherche *Modélisation Distribuée du Rhône* dont j'ai assuré la coordination (Branger *et al.*, 2016, 2018), pour la construction d'un modèle hydrologique distribué représentatif des processus, incluant une représentation simple des principaux usages de l'eau (irrigation, alimentation en eau potable, déviation/stockage pour l'hydro-électricité), et ayant pour objectif de comparer l'effet des évolutions possibles des territoires, qu'elles soient purement climatiques ou socio-économiques, et de mesurer l'impact de mesures d'économie d'eau, de façon à pouvoir définir des stratégies d'adaptation. C'est le modèle J2000-Rhône présenté en 2.2.4. A l'issue de la phase de développement et de test du modèle, de premières simulations prospectives ont été réalisées. Ce sont des scénarios très simples et la démarche a été beaucoup moins élaborée que pour le projet R2D2 par exemple. Simplement, il s'agissait d'un exercice de faisabilité et d'un démonstrateur du potentiel de J2000-Rhône en tant qu'outil d'aide à la décision.

Quelques résultats de cet exercice sont présentés ci-dessous. Les projections climatiques utilisées sont issues du portail DRIAS et ont été réalisées par le CNRM en 2014 (expérience CNRM 2014). Elles sont issues d'une seule simulation du modèle global de climat ARPEGE-Global, désagrégée à l'échelle régionale par le modèle ALADIN avec une correction quantile-quantile, et pour trois scénarios d'émission produits par le 5ème rapport d'évaluation du GIEC : les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (Jouzel *et al.*, 2014). Le chiffre de chaque scénario correspond au forçage radiatif total pour l'année 2100 (en W/m^2), que l'on peut relier à une concentration en CO2. Chaque scénario a un profil d'évolution particulier jusqu'en 2100. Ainsi, le RCP 2.6, plus

optimiste, considère un pic puis un déclin du forçage radiatif (effet de politiques de réduction des émissions). Le RCP 4.5 considère une augmentation puis une stabilisation avant 2100. Le scénario RCP 8.5, pessimiste, considère un profil d'évolution croissant jusqu'en 2100 (sans politique climatique). D'après Jouzel *et al.* (2014), le scénario A1B mentionné précédemment (utilisé dans le projet R2D2) se situe entre les RCP 4.5 et 8.5.

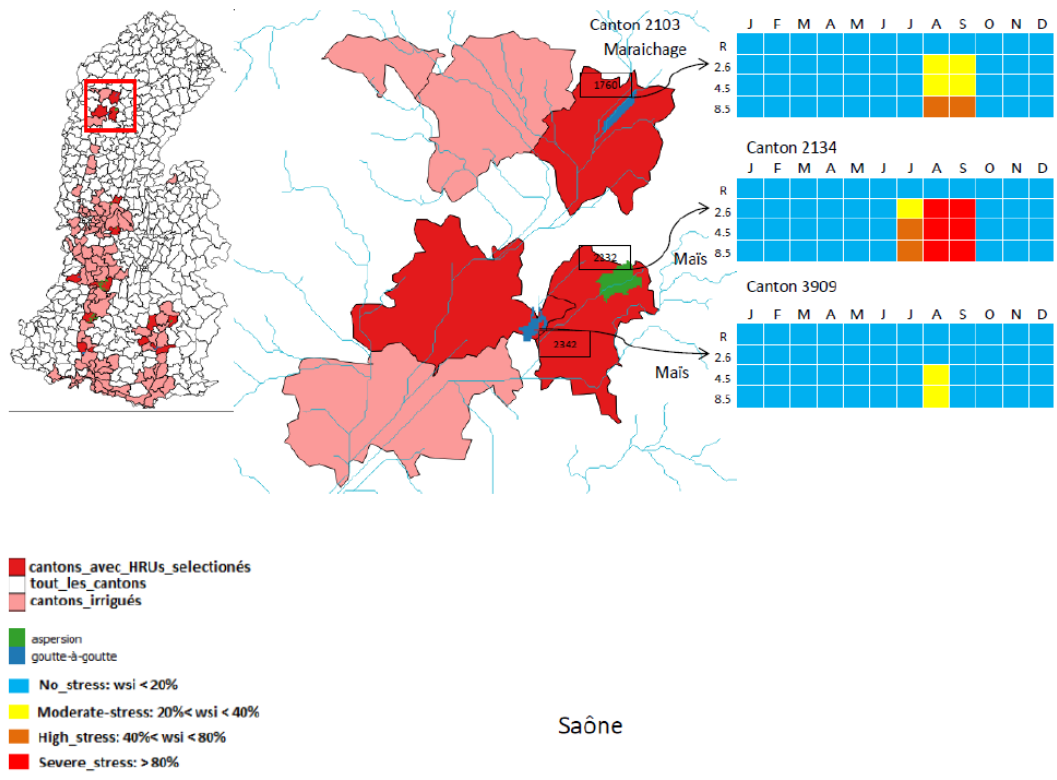
Vulnérabilité de l'irrigation sous changement climatique et adaptation

Cet exercice a consisté à simuler, sous changement climatique, différents scénarios d'irrigation. L'effet du changement climatique et des scénarios d'irrigation testés est quantifié par un indice de stress hydrique, qui est égal à la demande en eau pour l'irrigation divisé par la quantité d'eau disponible (WSI ou Water Stress Index). Trois périodes sont distinguées : la période de temps présent, dite aussi période de référence R (1970-2005), la période future à horizon moyen 2030-2065 et la période future à horizon lointain 2065-2100. Les deux scénarios d'usage considérés pour la période future sont : mode d'irrigation identique au temps présent, et basculement généralisé vers une irrigation en goutte-à-goutte. Le WSI a été calculé pour chaque cours d'eau correspondant aux HRUs irrigués des zones de test, sur une base mensuelle interannuelle (moyenne mensuelle interannuelle sur chaque période).

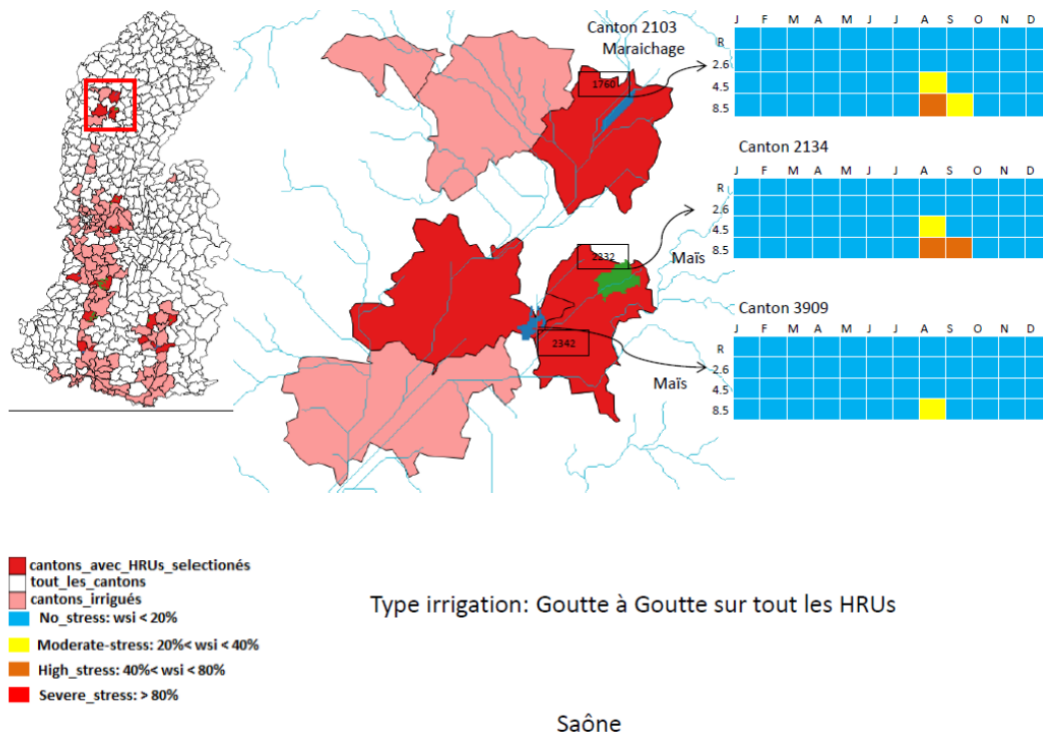
Les résultats sont présentés Figure 3.6. Ils montrent l'apparition d'un stress modéré à sévère en période future sur les mois d'été (juillet-août - septembre), plus grave pour les HRUs irrigués par aspersion du fait de la demande en eau plus importante de cette technique d'irrigation. La comparaison entre les deux scénarios d'irrigation montre que le basculement en goutte-à-goutte généralisé réduit considérablement le stress sur les espaces autrefois irrigués en aspersion (canton 2134), qui reste en deçà d'un niveau sévère sous le scénario climatique le plus extrême. Les répercussions du *tout goutte-à-goutte* affectent aussi les cantons qui étaient déjà irrigués en goutte-à-goutte (ex : canton 3909). C'est là un effet de la modélisation hydrologique distribuée, qui rend compte, à l'aval, de modifications susceptibles d'affecter la ressource en eau à l'amont (en l'occurrence, moins de prélèvements à l'amont dans le scénario *tout goutte-à-goutte*, augmentant la ressource disponible à l'aval). Cet effet révèle la plus-value d'une modélisation intégrée des usages, par rapport à une confrontation ressource-demande incapable de tenir compte finement des répercussions aval de prélèvements amont.

Vulnérabilité de la consommation d'eau potable par rapport aux autres usages sous changement climatique et adaptation

Ce test a permis d'exploiter des scénarios de consommation d'eau potable dans le futur, construits par des économistes (Branger *et al.*, 2016). De manière similaire aux tests précédents sur l'irrigation, on a utilisé un indicateur de pression sur la ressource défini par le rapport de la demande de consommation en eau potable par rapport à la ressource disponible. Des simulations ont été conduites sans prendre en compte et en prenant en compte les modifications dues aux barrages hydro-électriques et les prélèvements opérés pour l'eau potable, permettant de quantifier la pression due à la consommation d'eau potable par rapport aux autres usages. En termes de changement climatique, deux horizons futurs légèrement différents du test précédent ont été définis, un horizon proche dit 2032 (période 2022-2042) et un horizon lointain dit 2085 (période 2075-2095). Deux scénarios de consommation d'eau potable future (tendance haute et tendance basse) ont été définis et appliqués. L'irrigation et les barrages n'ont pas été modifiés

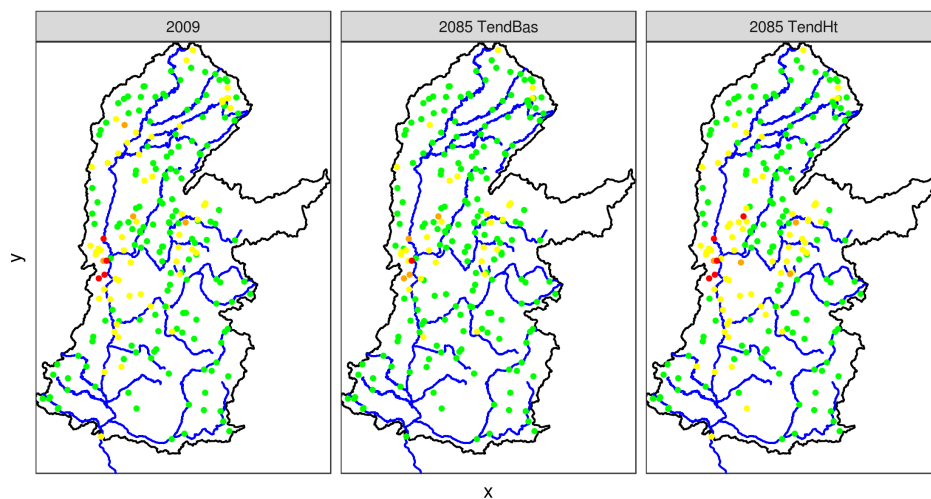


(a) Scénario du maintien des modes d'irrigation actuels

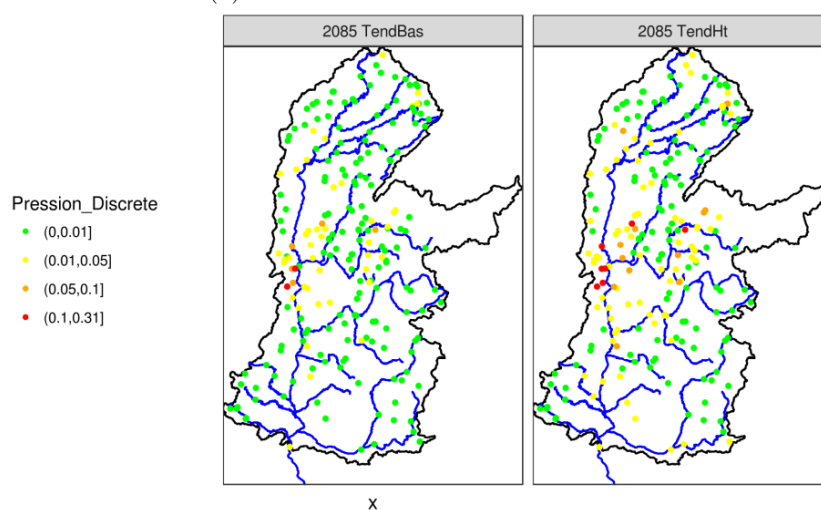


(b) Scénario de bascule généralisée vers du goutte-à-goutte

FIGURE (3.6) Impact du changement climatique et de scénarios d'irrigation sur la ressource en eau - zone de test Saône Amont. Gauche : localisation de la zone dans le bassin du Rhône. Milieu : zoom sur les HRUs irrigués colorés selon le type d'irrigation et leur organisation amont/ aval. Droite : tableau du WSI mensuel pour les différents scénarios climatiques (R : temps présent ; 2.6, 4.5 et 8.5 temps futur horizon lointain). Les valeurs numériques de WSI sont exprimées en codes couleurs qualitatifs (niveaux de stress nul à sévère). Source : Branger *et al.* (2016)



(a) RCP 2.6 horizon 2085



(b) RCP 8.5 horizon 2085

FIGURE (3.7) Indicateur de pression annuelle sur la ressource de la consommation d'eau potable à l'horizon 2085 selon deux scénarios d'évolution de la consommation, par rapport à l'année de référence 2009 et pour les scénarios de changement climatique 2.6 et 8.5. La ressource en eau disponible tient déjà compte de la gestion des barrages hydro-électriques et des prélèvements pour l'irrigation. Source : Branger *et al.* (2016)

par rapport au temps présent. L'indicateur de pression a été calculé à l'échelle annuelle sur 217 sous-bassins versants en prenant en compte les consommations d'eau potable des communes situées sur ces bassins. La Figure 3.7 présente les résultats obtenus pour l'horizon futur 2085 et pour une ressource en eau déjà influencée par les barrages et l'irrigation. Cet horizon futur a été comparé à l'année de référence pour la consommation d'eau potable en temps présent qui est l'année 2009 (voir Branger *et al.* (2016) pour plus d'explications).

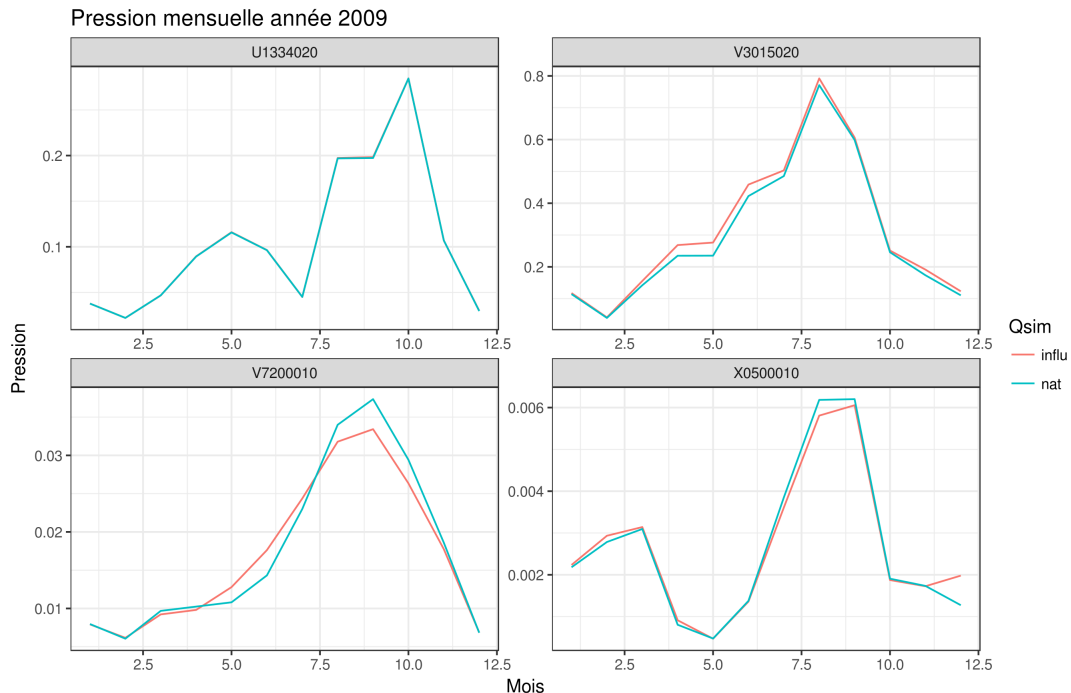


FIGURE (3.8) Pression mensuelle de la demande en eau potable sur la ressource en eau naturelle ou influencée pour l'année 2009 et pour quatre stations contrastées (dans l'ordre de droite à gauche et de haut en bas) : l'Ouche à Crimolois U1334020 (860 km^2), l'Yzeron à Francheville V3015020 (129 km^2), le Rhône à Beaucaire V7200010 (exutoire), la Durance à Serre-Ponçon X0500010 (3580 km^2). Source : Branger *et al.* (2016)

Comme on le voit sur la carte de l'année 2009, la pression annuelle de la consommation en eau potable sur la ressource est en général faible ; inférieure à 1% pour la plupart des stations. Elle est égale à 1.17% sur l'année sur le bassin versant complet. Cependant on observe plusieurs cas pour lesquels la pression sur la ressource est supérieure à 10%. Les stations problématiques correspondent à des bassins versants situés à proximité ou dans l'agglomération de Lyon. Cela met en lumière l'effet de l'hypothèse de prélèvements pour l'eau potable situés dans le bassin versant où se situe cette commune. C'est évidemment souvent faux, et d'autant plus visible que les bassins versants sont petits. Un des bassins apparaissant les plus impactés est celui de l'Yzeron à Francheville (voir aussi Figure 3.8). Une partie des communes situées sur ce bassin (les plus peuplées) fait partie de Lyon Métropole et à ce titre bénéficie de l'alimentation en eau potable provenant des champs captants du Rhône, et non de l'Yzeron. Ces résultats sont aussi à nuancer par le fait que l'année 2009, choisie comme référence pour le modèle économétrique de consommation d'eau potable, est une année plutôt sèche avec un cumul moyen de précipitation sur le bassin de 1016 mm se tenant dans le premier quartile pour la période 1981-2010 (moyenne à 1191 mm et médiane à 1220 mm). Malgré ce biais important, les résultats apportent un éclairage intéressant sur le lien entre population, consommation d'eau potable et ressource locale.

La Figure 3.8 montre les pressions mensuelles sur quatre sous-bassins correspondant aux

quatre classes de pression montrées sur les cartes, par rapport à la ressource naturelle et influencée. On voit que la pression mensuelle peut monter jusqu'à 80% de la ressource pour le cas de l'Yzeron à Francheville sur les mois d'été. On peut également voir une influence des barrages et/ou de l'irrigation pour tous les bassins sauf l'Ouche à Crimolois. Pour l'Yzeron à Francheville, il s'agit uniquement d'irrigation, qui aggrave légèrement la situation, surtout à la fin du printemps. Pour la station de la Durance à Serre-Ponçon, l'influence est uniquement due au barrage et a pour effet de diminuer légèrement la pression en été (ressource plus importante du fait du soutien d'étiage) et de l'augmenter en début d'hiver (ressource plus faible du fait du stockage dans la retenue). Pour cette station, on observe deux pics de pression, qui correspondent à l'activité touristique sports d'hiver en février-mars et estivale en été. Enfin sur l'ensemble du bassin du Rhône (station du Rhône à Beaucaire) on n'observe qu'un seul pic en pression en été. Les barrages et les prélèvements pour l'irrigation contribuent à faire baisser cette pression légèrement en plein été, et à l'augmenter légèrement au printemps.

Concernant les scénarios climatiques, le scénario 2.6 se révèle moins contraint pour la pression de la consommation en eau potable (Figure 3.7), pour laquelle les deux scénarios d'usage aboutissent à une situation similaire, voire meilleure, que pour l'année 2009. La pression sur la ressource est par contre beaucoup plus importante pour le scénario 8.5. Pour ce scénario climatique, la combinaison avec la tendance haute du scénario d'usage conduit à une pression particulièrement importante sur les sous-bassins de taille petite et moyenne, surtout en été. On voit donc que les usages de l'eau ont un impact d'autant plus fort que le contexte climatique est tendu. Ces résultats suggèrent qu'en matière de pression sur la ressource dans le futur, les usages et donc la gestion de l'eau semblent avoir plus de poids que l'aléa climatique lui-même. Cette question mériterait d'être approfondie avec une approche adaptée.

3.3 Mise en perspective

Stratégies d'adaptation pour limiter les effets du changement global

Ce chapitre a retracé les travaux et présenté les résultats obtenus par l'application des modèles hydrologiques développés sur l'impact des activités humaines sur la ressource en eau. Ces résultats issus de la thèse de M. Labbas, du projet R2D2 ou du projet MDR n'ont pour l'instant été que très partiellement publiés. Il reste donc un important travail de valorisation à faire, qui impliquera d'homogénéiser les méthodologies pour les tests de scénarios, reprendre certaines simulations, nettoyer les résultats, compléter les indicateurs d'impact. Il est donc probable que les résultats définitifs soient différents de ceux présentés ici. A ce stade, on peut tout de même remarquer un trait commun entre les applications sur l'impact de l'urbanisation sur le bassin de l'Yzeron et à l'application usages et changement climatique sur le bassin du Rhône. D'après nos résultats, la gestion de l'eau (via les politiques d'infiltration à la source des eaux pluviales ou les changements d'usage) semble avoir un impact pouvant potentiellement compenser l'évolution du climat, ou de la population. Cela indique qu'il y a des gains importants à attendre de stratégies d'adaptation appropriées pour la ressource en eau. C'est un résultat intéressant pour l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, qui est un partenaire important pour tous ces projets et qui se trouve conforté dans sa politique d'incitation aux économies d'eau. Le fait que ces économies d'eau, changements de pratiques, peuvent être faits, non seulement parce que c'est le seul levier sur lequel on peut jouer, mais aussi parce que cela peut avoir un vrai impact à l'échelle du bassin versant, est important en termes de communication auprès des

acteurs du monde de l'eau et du grand public.

Vers l'élargissement multidisciplinaire

Plusieurs projets faisant suite aux travaux présentés ici sont en cours, ou en cours de montage. Le projet Consequans a été mentionné et brièvement présenté. Dans la continuité du projet MDR, je participe au comité de pilotage d'une thèse (Richard, en cours) et à un projet financé par l'AERMC (RADHY-Buech) sur le couplage entre le modèle hydrologique J2000 et un modèle multi-agents reproduisant le comportement des agriculteurs pour l'irrigation. Je suis par ailleurs en train de construire un projet sur l'amélioration des modules d'usage dans J2000-Rhône et la construction de scénarios d'irrigation et gestion des barrages plus réalistes. Enfin, je commence à aborder les questions d'impact au-delà de la seule ressource en eau : co-construction du projet CHYPSTER sur l'impact de l'occupation des sols sur les transferts de contaminants alliant hydrologues, chimistes et microbiologistes, sur les bassins expérimentaux de l'Yzeron et de la Claduègne (Nord *et al.*, 2017) ; participation aux projets OSR et Continuum sur les sources de sédiments sur le bassin versant du Rhône ; encadrement de travaux exploratoires sur l'impact du changement climatique et des usages sur les habitats de poissons sur le bassin du Rhône (Guichonnet, 2018) ; participation à une proposition de projet européen sur l'impact du changement climatique sur l'écologie des cours d'eau intermittents (projet DRYVER).

Enseignements méthodologiques pour la modélisation hydrologique

D'un point de vue plus méthodologique, je retire deux enseignements des travaux présentés ici. Tout d'abord, les expériences d'intercomparaison de modèles comme celle réalisée dans le projet R2D2 sont extrêmement intéressantes et bénéfiques pour les modélisateurs. Au-delà des questions de performance (quel modèle est le meilleur) qui n'ont pas grand intérêt, elles permettent de comparer et remettre en question les choix de conceptualisation de certains processus et de paramétrisation, même (et surtout) lorsqu'il n'existe pas de données d'observation dédiées. Dans le cas de l'expérience multi-modèles R2D2, les modèles simulaient tous à peu près les mêmes débits, mais avec des conceptualisations de processus très différentes, ce qui s'est vu au moment de quantifier les réserves d'eau dans le sol de chaque modèle, et encore plus nettement dans les résultats sur l'évapotranspiration. Ce genre d'expérience peut donc contribuer à la compréhension des processus hydrologiques et la recherche de *bonnes réponses pour les bonnes raisons*, ainsi que souligné par Clark *et al.* (2017) et montré par les expériences d'intercomparaison publiées (Refsgaard et Knudsen, 1996; Reed *et al.*, 2004; Breuer *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2012, 2013; De Boer-Euser *et al.*, 2017; Eeckman *et al.*, 2019). En pratique, l'organisation de telles expériences est une tâche difficile, et encore plus pour des modèles distribués qui sont plus gourmands en données et plus longs à mettre en œuvre que des modèles globaux (Smith *et al.*, 2004, 2013). Dans R2D2, il a fallu plus d'un an et plusieurs réunions pour définir un protocole de modélisation commun, définir les données d'entrée, les variables à simuler, les formats, etc. L'analyse des résultats a également demandé un travail considérable. Néanmoins je pense que ces expériences doivent être poursuivies et étendues, à travers des projets de recherche dédiés.

Le second enseignement est que les collaborations multidisciplinaires sont non seulement bénéfiques pour servir de bases de discussions avec des acteurs opérationnels et répondre à des questions concrètes de gestion de l'eau, mais elles nourrissent aussi le développement du modèle hydrologique. J'ai eu la chance de travailler avec des géographes, économistes, biolo-

gistes, chimistes. A chaque fois, il a fallu trouver un vocabulaire commun, trouver les variables d'échange et les points de contact entre la modélisation hydrologique et les autres modélisations. Des questions non anticipées sont apparues, comme la différence entre usage du sol (land use) et occupation du sol (land cover), qui ne sont pas neutres pour l'hydrologie qui a besoin de taux d'imperméabilisation des surfaces ; ou encore l'importance de la représentation du réseau hydrographique dans le modèle d'habitat de poissons (Guichonnet, 2018). Ces échanges ont été très stimulants pour développer mon travail de modélisation, à la fois pour développer des nouvelles composantes du modèle, mais aussi pour questionner les représentations des processus hydrologiques et la paramétrisation des modèles.

Chapitre 4

Formalisation du lien entre données, expertise de terrain et modèles hydrologiques

L'évaluation des modèles est la dernière étape du processus de modélisation, qui consiste à valider ou invalider les choix faits en termes de structure, paramétrisation ou mise en œuvre des modèles par confrontation avec des observations. C'est une étape-clef de la démarche scientifique pour le développement de connaissances, car elle permet de revisiter les hypothèses de fonctionnement introduites dans le modèle et d'en formuler de nouvelles (Kirchner, 2006; Clark *et al.*, 2016, 2017). Plus précisément, c'est l'itération de ces confrontations entre modèles et observations qui fait avancer la connaissance, comme présenté sur la Figure 1.1.

Pour nourrir ces allers-retours entre modèles et observations, il faut disposer de données de terrain de bonne qualité et trouver des moyens de les exploiter pour l'évaluation des modèles au-delà du simple calcul de critères de performance. Ce chapitre présente mes travaux et résultats sur trois aspects de cette question : l'observation de terrain de long terme, le calcul des incertitudes sur les séries hydrologiques et la formalisation de traits caractéristiques de fonctionnement des bassins versants à travers les signatures hydrologiques.

4.1 Observation de terrain de long terme

4.1.1 L'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine

L'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU) est né en 1999 d'une volonté de structurer plusieurs laboratoires lyonnais travaillant sur les rejets urbains et leur impact sur les milieux naturels, autour de suivis de terrain de qualité et de long terme. Par rapport à des campagnes de mesures sporadiques financées au gré des projets, la longue durée d'observation sur un même site est vue comme la garantie d'une bonne qualité et d'une bonne représentativité des données recueillies, par une meilleure connaissance des sites et une meilleure maîtrise des systèmes de mesure. L'OTHU a dès le départ été soutenu par des acteurs opérationnels, en particulier la Métropole de Lyon, qui met ses équipements à disposition, et apporte des fi-

nancements importants. L'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et le GRAIE (groupe de recherche, animation technique et information sur l'eau, structure associative visant au partage des connaissances issues de la recherche et à l'amélioration des pratiques de gestion de l'eau) sont également des soutiens importants de l'OTHU depuis sa création.

L'OTHU est porté par 12 équipes de recherche appartenant à 9 établissements d'enseignement et de recherche régionaux (BRGM, IRSTEA, ENTPE, ECL, INSA, Universités Lyon 1, Lyon 2 et Lyon 3 et Vetagrosup), et travaillant dans plusieurs disciplines : l'hydrologie, l'hydraulique, la chimie, la biologie, la microbiologie, l'écologie, la géographie et les sciences sociales. L'activité première de l'OTHU est le travail d'observation et de collecte de données. L'observation est actuellement structurée autour de trois sites principaux : le site Django Reinhardt à Chassieu, emblématique de la problématique de l'infiltration dans la nappe de l'Est Lyonnais, le bassin versant de l'Yzeron, représentatif des petites rivières périurbaines de l'Ouest Lyonnais, et l'Ecocampus de la Doua, où sont suivis des dispositifs de gestion à la source des eaux pluviales. Ces sites principaux sont complétés par des sites satellites plus faiblement instrumentés, et des sites ateliers qui correspondent à d'anciens sites expérimentaux potentiellement remobilisables en fonction des besoins, et des pilotes de laboratoire. Des mesures en continu (pluviométrie, débit, hauteurs d'eau, profondeur de la nappe, humidité du sol, conductivité, température...) sont complétées par des prélèvements automatiques déclenchés sur événement (paramètres physico-chimiques, micropolluants, microbiologie), et des campagnes de mesure récurrentes.

Les sites expérimentaux et les données collectées servent d'ossature pour la construction de projets de recherche académique ou finalisée. Les équipes de l'OTHU définissent tous les 4 ans un programme de recherche en appui sur l'observatoire, avec la participation des partenaires opérationnels (Métropole de Lyon et Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse notamment), qui donne les directions de pistes communes pour la construction de projets et la recherche de financement. Les thèmes principaux de ce programme de recherche sont l'adaptation des systèmes urbains de gestion de l'eau aux changements globaux (climat, urbanisation), les impacts environnementaux et sanitaires de ces systèmes, la qualité et la gestion des sédiments issus de ces systèmes, et la gestion à la source des eaux pluviales. Parmi les projets marquants récents ou en cours, on peut citer les ANR AVuPUR (Vulnérabilité des rivières périurbaines, 2008-2011), INVASION (Contaminants microbiens introduits lors d'événements pluvieux dans les rivières en milieu péri-urbain : conséquences écologiques et dangers pour la santé, 2008-2012), CABRRES (CAractérisation chimique, microbiologique, écotoxicologique, spatio-temporelle des contaminants des Bassins de Retenue des eaux pluviales urbaines : évaluation et gestion des Risques Environnementaux et Sanitaires associés, 2012-2017), INFILTRON (Dispositif INFILTRON pour une évaluation des fonctions infiltration et filtration des sols urbains dans un contexte de gestion des eaux pluviales, 2017-2021) et FROG (Réponses fonctionnelles des aquifères souterrains aux pratiques d'infiltration en milieu urbain, 2017-2021). L'OTHU assure également une animation scientifique et technique à travers des séminaires (séminaire des doctorants, séminaires thématiques), des journées techniques et une participation aux animations techniques du GRAIE.

Je suis impliquée dans l'OTHU depuis 2007, notamment à travers la gestion du bassin versant expérimental de l'Yzeron présenté ci-après et en tant que représentante d'Irstea dans le comité de gestion de l'OTHU qui décide de l'attribution des financements et organise l'animation scientifique de l'observatoire. Depuis 2019, j'assume la co-présidence de l'Observatoire aux côtés de Gislain Lipeme-Kouyi de l'INSA. L'originalité principale de l'OTHU tient au caractère pérenne de l'observation placé comme centre de l'activité, autour de laquelle s'organisent et se construisent des projets de recherche, en lien étroit avec les acteurs opérationnels. Cela rend l'OTHU unique dans le paysage de la recherche en hydrologie urbaine en France. Les équipes de

l'OTHU mettent aussi en œuvre le diptyque observation-modélisation, comme par exemple sur l'hydraulique des écoulements et la dynamique des sédiments dans les bassins d'infiltration (Yan *et al.*, 2014), les dynamiques d'infiltration dans la nappe (Goutaland *et al.*, 2013), le fonctionnement hydrologique de techniques d'infiltration à la source (Bertrand-Krajewski et Herrero, 2018), ou l'hydrologie des bassins versants péri-urbains (Sun *et al.*, 2017). L'observation sur le long terme de différentes composantes du cycle urbain de l'eau et des ouvrages de gestion permet de nourrir la modélisation hydrologique à différentes échelles spatiales et temporelles, comme présenté au chapitre 3.

4.1.2 Le bassin versant expérimental de l'Yzeron

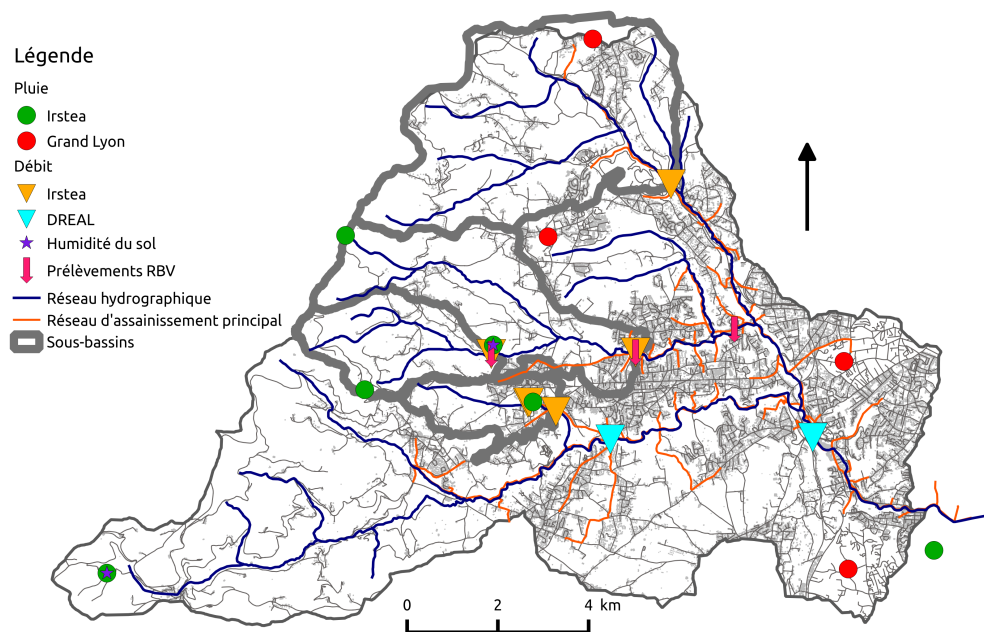


FIGURE (4.1) Instrumentation du bassin versant de l'Yzeron dans le cadre de l'OTHU et de RBV / OZCAR

Je suis responsable scientifique du bassin versant expérimental de l'Yzeron depuis 2007. Il s'agit d'un bassin d'environ 150 km^2 , situé en périphérie ouest de l'agglomération lyonnaise. Il subit depuis le XXème siècle l'influence du développement de la ville de Lyon. Cela se traduit par une augmentation de l'imperméabilisation dans son aval urbain mais aussi à partir des villages satellites, ainsi qu'une déprise agricole au profit des forêts dans sa partie amont. C'est donc un bassin représentatif du milieu périurbain avec une occupation du sol très hétérogène (Jacqueminet *et al.*, 2013). D'un point de vue hydrologique, le bassin est caractérisé par un relief marqué (altitude du point culminant du bassin 912 m ; altitude de l'exutoire 162 m), des sols peu profonds sur substrat de type gneiss et granite, avec une faible capacité de stockage. La pluie moyenne annuelle est de 830 mm (Labbas, 2015). Les cours d'eau du bassin sont intermittents, avec de longues périodes d'étiage en été, et des crues importantes et rapides à l'automne (Braud *et al.*, 2013). L'observation expérimentale sur ce bassin a débuté en 1997 et s'est concentrée initialement sur deux petits sous-bassins de quelques kilomètres carrés connexes, et d'occupation

des sols contrastées. Le bassin de la Chaudanne, plus urbanisé, était équipé d'un dispositif de suivi en amont / aval d'un déversoir d'orage ; alors que le bassin du Mercier était considéré comme le témoin d'un fonctionnement hydrologique plus naturel du fait de son occupation du sol dominée par l'activité agricole et les forêts.

En 2007, le suivi expérimental a été étendu à l'ensemble du bassin de l'Yzeron, en faisant la jonction avec le suivi opérationnel réalisé par la DREAL Auvergne Rhône Alpes en aval du bassin (stations hydrométriques de Craponne, 47 km^2 depuis 1969 et de Taffignon, station exutoire à 129 km^2 , depuis 1988, sur la rivière Yzeron), et le réseau de postes pluviométriques de la Métropole de Lyon. Le suivi pluviométrique a été complété par 4 postes notamment sur la partie amont du bassin. Trois stations hydrométriques ont également été installées selon une stratégie de bassins versants emboîtés, de façon à pouvoir étudier les effets d'échelle et les propagations amont-aval. Plus récemment, le dispositif d'observation a été complété par deux profils d'humidité du sol, ainsi que par des prélèvements préliminaires de qualité de l'eau, visant à la fois à compléter la connaissance des polluants présents sur le bassin, mais aussi à apporter des éléments sur les origines de l'eau et les contributions des différents compartiments hydrologiques. L'état actuel du dispositif expérimental sur le bassin est présenté Figure 4.1. Le dispositif de suivi du bassin a été conçu d'emblée pour servir la modélisation hydrologique spatialisée et a été utilisé comme tel par les travaux résumés dans les chapitres précédents. En tant que responsable scientifique du bassin, je conçois, planifie et suis l'extension du réseau de stations (choix des sites, dimensionnement, suivi des travaux etc), en lien avec l'équipe technique en charge de l'installation et la maintenance de terrain. Je m'assure aussi du bon fonctionnement des sites et de la bancarisation des données. Je suis depuis septembre 2018 également coordinatrice de l'équipe technique (dite Pôle Mesures Physiques) qui assure le suivi des sites et équipements expérimentaux de l'ancienne unité de recherche HHLY, soit 4 personnes pour 4 observatoires de terrain et un hall hydraulique expérimental.

Le bassin versant de l'Yzeron est maintenant un des sites principaux de l'OTHU, sur lequel travaillent en plus des hydrologues, des géographes, géomorphologues, chimistes et microbiologistes. Depuis 2015, le bassin a également rejoint le Réseau de bassins versants (RBV) et l'infrastructure de recherche OZCAR (Gaillardet *et al.*, 2018), aux côtés de la plupart des bassins versants expérimentaux français.

4.1.3 Structuration, bancarisation et mise à disposition des données issues d'observatoires hydrologiques

Les données de terrain ne sont réellement utilisables et exploitables que si elles sont correctement structurées, sauvegardées et mises à disposition. Cela correspond au concept de *FAIR data* (Findable Accessible Interoperable Reusable) mis en avant dans le cadre de l'open-data et qui peut être repris pour l'ensemble des observations environnementales (Witt *et al.*, 2019). Dans le cas de l'observation de long terme, cela est d'autant plus important que les données à bancariser deviennent très vite très nombreuses. De plus, sur le long terme, plusieurs personnes peuvent se relayer dans le travail de terrain, occasionnant de nombreuses possibilités de perte d'informations précieuses. Il est donc particulièrement important d'intégrer l'acquisition de données dans les observatoires dans un processus complet allant de la validation des données jusqu'à leur mise à disposition des chercheurs, des partenaires opérationnels, et du grand public. La structuration de la donnée est pour cela très importante, car elle définit les informations nécessaires en plus des données numériques elles-mêmes, et la façon d'organiser ces informations (Horsburgh *et al.*,

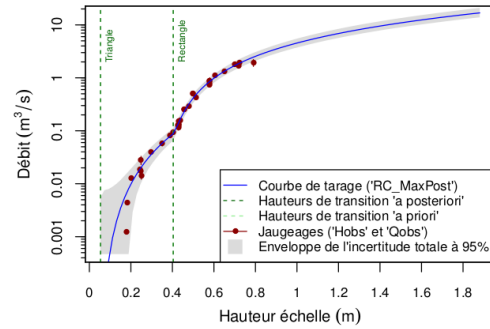
2011). Par exemple, pour des données hydrologiques, il faut être capable de décrire la nature de l'échantillonnage temporel : donnée instantanée, cumul (cas typique des données pluviométriques), moyenne (cas typique de concentrations en diverses substances obtenues à partir de prélèvements d'eau asservis au débit). Pour des données non mesurées directement, comme le débit qui est issu de mesure de hauteur d'eau et d'une loi de transformation (aussi appelée courbe de tarage), il faut pouvoir définir ce qu'est la courbe de tarage, décrire comment elle peut être modifiée au cours du temps etc. Il existe dans la littérature des propositions de structuration de données hydrologiques prenant en compte ces différents aspects (Horsburgh *et al.*, 2008).

Dans la continuité du travail de gestion scientifique du bassin expérimental de l'Yzeron, je coordonne depuis 2011 le développement et le déploiement de l'application BDOH ou Base de Données pour les Observatoires en Hydrologie (Branger *et al.*, 2014). BDOH est l'outil de bancarisation et de mise à disposition des données issues de l'ensemble des observatoires hydrologiques de long terme dans lesquels sont impliquées des équipes d'Irstea. BDOH est constitué d'une base de données relationnelle structurant les données selon les concepts énoncés plus haut. Les différents utilisateurs accèdent aux données à travers une application web, <https://bdoh.irstea.fr>. Les gestionnaires des sites de mesure, au terme de leur procédure de validation des données, les importent dans BDOH et peuvent les gérer. BDOH intègre plusieurs fonctionnalités pour faciliter le contrôle et la manipulation des données : visualisation des points de contrôle, calculs automatiques de données dérivées (débits, flux) par des lois de transformation, bancarisation des lois de transformation et suivi de leur historique conversions de données. En ce qui concerne la mise à disposition, les données sont visualisables et consultables librement, avec plusieurs fonctionnalités de visualisation graphique. Elles peuvent être téléchargées gratuitement par les utilisateurs inscrits sur l'application avec différentes options de format, pas de temps, etc. A l'heure actuelle, BDOH rassemble plus de 57 millions d'enregistrements issus de 11 observatoires différents et d'équipes localisées sur 4 implantations d'Irstea en France, ainsi que de contributeurs externes (IGE Grenoble, UMR Espace). Comme tous les projets de ce type, BDOH est en perpétuelle évolution. Mes tâches consistent à coordonner les demandes des différentes équipes utilisant BDOH, animer les discussions et la prise de décision pour des développements importants, mobiliser et encadrer l'équipe technique interne chargée des développements, rechercher des financements pour soutenir cette équipe technique, et faire l'interface entre les développeurs et les utilisateurs.

4.2 Incertitudes sur les séries de débits

Les développements sur les incertitudes sont nés en partie du travail d'exploitation des données de terrain sur le bassin de l'Yzeron. En travaillant sur des événements pluvieux sur le bassin de la Chaudanne, nous nous sommes rendu compte que le débit sur la station amont (2.7 km^2) étaient plus élevés que ceux de la station située 700 m en aval (4.1 km^2) (voir Figure 1.2 pour une carte du bassin versant). Il était tentant d'avancer des explications physiques, notamment des pertes par infiltration dans le lit sableux de la rivière, mais nous nous sommes ravisés et avons commencé par interroger la qualité des transformations hauteur-débit sur nos stations. A quelle précision connaissions nous nos débits ? Est-ce que la différence entre les débits observés ne venait pas plutôt de l'incertitude sur cette variable ? (réponse plusieurs années plus tard : oui).

Ces interrogations ont été un des points de départ de la méthode BaRatin pour estimer



(a) Section de contrôle de la station Charbonnières (b) Courbe de tarage et enveloppe d'incertitude à 95%

FIGURE (4.2) Vue de la station Charbonnières sur le bassin versant de l'Yzeron, et courbe de tarage et enveloppe d'incertitudes calculées à l'aide de la méthode BaRatin. Source : Horner (2014).

les courbes de tarage et leur incertitude. Cette méthode combine une analyse physique sur les contrôles hydrauliques dans le chenal de la rivière (contrôle par le chenal / contrôle par la section notamment lorsqu'il y a des seuils et des déversoirs), et l'exploitation de l'information apportée par les mesures ponctuelles directes de débits ou jaugeages, le tout dans un cadre bayésien (Le Coz *et al.*, 2014). Cette approche permet d'estimer la courbe de tarage de façon plus fiable qu'en calant empiriquement une loi puissance (voir polynômiale) sur les jaugeages, puisqu'elle prend en compte explicitement le fonctionnement hydraulique du site, et notamment la succession des contrôles en fonction de la gamme de débit. De plus elle permet d'obtenir une incertitude sur la courbe de tarage. Cette réalisation collective de l'unité de recherche HHLY, alliant hydraulique, hydrométrie, statistique et suivi de terrain hydrologique, a donné lieu à un logiciel distribué gratuitement, qui est maintenant utilisé par les services opérationnels d'hydrométrie en France, ainsi sur des stations hydrométriques dans le monde entier (Zeroual *et al.*, 2016; Lundquist *et al.*, 2016; Francke *et al.*, 2018; Kiang *et al.*, 2018). BaRatin a été appliqué à toutes les stations du bassin versant de l'Yzeron (Horner, 2014), ce qui a permis une révision des courbes de tarage et une estimation de leur incertitude (voir exemple présenté Figure 4.2 sur la station hydrométrique du Charbonnières).

Dans la continuité, nous avons propagé l'incertitude aux séries chronologiques de débit, en formalisant et propageant aussi l'incertitude sur les mesures de hauteur d'eau, qui sont souvent négligées (Horner *et al.*, 2018b). En effet, sur les petits cours d'eau intermittents du bassin versant de l'Yzeron, les écoulements avec de très faibles hauteurs d'eau sont les plus fréquents, et peuvent avoir un impact sur l'incertitude de la série de débits, en plus de l'incertitude de la courbe de tarage. Horner *et al.* (2018b) ont testé l'impact de l'incertitude de hauteur d'eau sur les séries de débit à différents pas de temps, pour un panel de 6 stations en France. La Figure 4.3 montre les résultats obtenus sur la station hydrométrique de Taffignon située à l'exutoire du bassin versant de l'Yzeron et qui faisait partie du panel. On y voit que l'incertitude sur la hauteur d'eau a une part importante de l'incertitude totale, à quasiment tous les pas de temps et surtout pour les bas débits. Les résultats sur le panel de stations utilisé par Horner *et al.* (2018b) montrent un impact de l'incertitude sur les hauteurs d'eau variable et qui dépend des configurations locales (hydraulique du site, sensibilité de la relation dQ/dh à bas débit), et du régime hydrologique. Dans le cas de la station de Taffignon, avec un régime hydrologique quasi intermittent et beaucoup de valeurs de débit très faibles, la sensibilité est accrue. Ces résultats ont aussi été confirmés par Horner *et al.* (2018a) qui a fait une étude de sensibilité aux bas débits avec des séries reconstituées sur des déversoirs fictifs. Ce retour a été important pour la

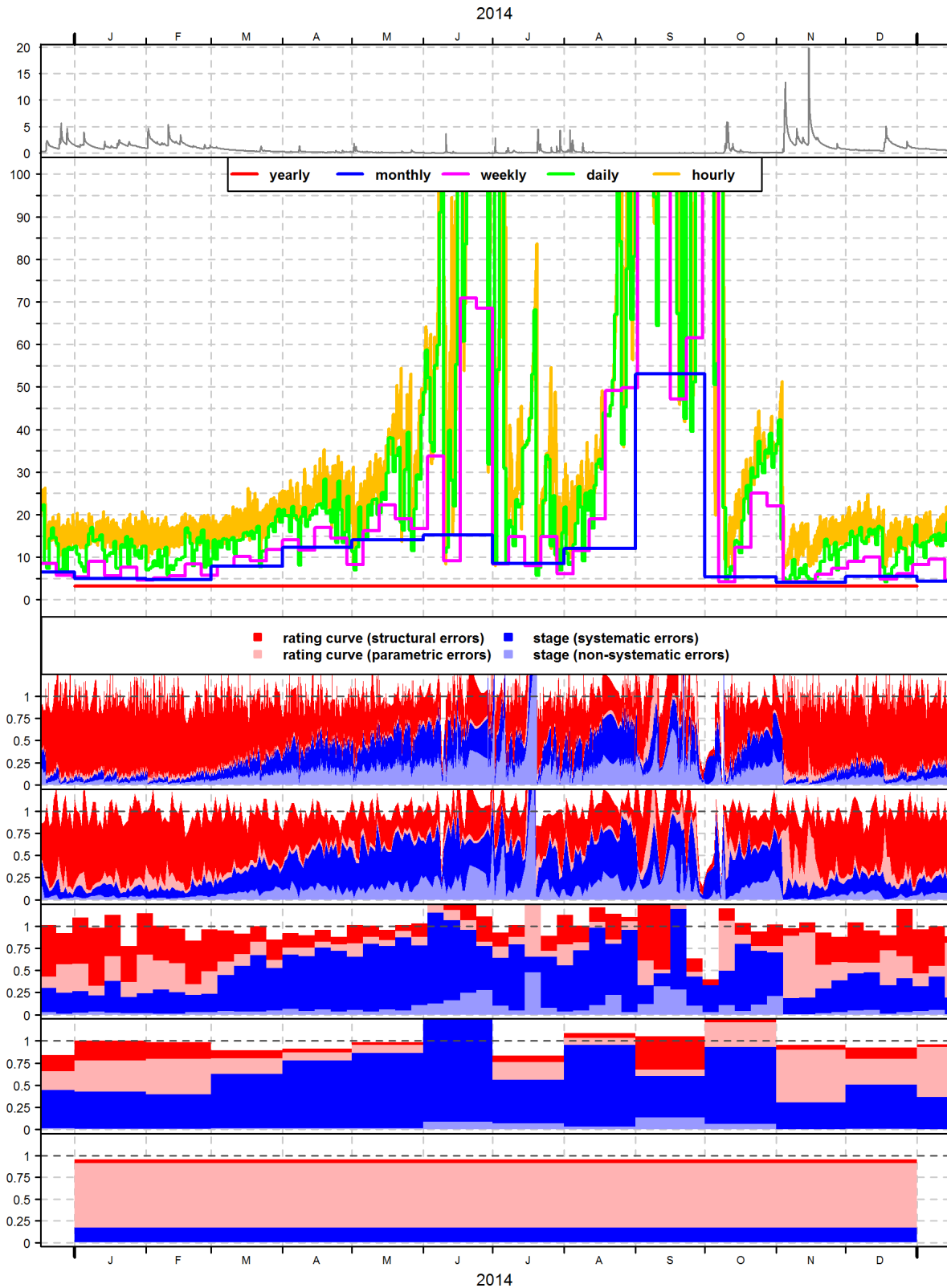


FIGURE (4.3) Chronique de débit sur la station de Taffignon sur le bassin versant de l'Yzeron pour l'année 2014. Incertitude totale de la série de débit et décomposition de l'incertitude selon le pas de temps de la chronique. D'après Horner *et al.* (2018b).

gestion des stations hydrométriques et l'équipement des sites. Il nous a conduits à requalifier nos stations hydrométriques sur l'Yzeron en réalisant des travaux (construction de seuils) pour améliorer nos relations hauteur-débit et les rendre moins sensibles.

4.3 Les signatures hydrologiques

Le concept de signature hydrologique a été introduit par Gupta *et al.* (2008) pour le diagnostic des modèles hydrologiques. C'est un terme générique qui désigne un ensemble d'indicateurs dérivés des données de terrain pour identifier et quantifier, à différentes échelles spatiales et temporelles, les propriétés émergentes des bassins versants (McMillan *et al.*, 2011, 2014). La comparaison des signatures dérivées des observations et celles dérivées des simulations d'un modèle peut donc donner des indications sur les processus bien ou mal représentés dans le modèle. Les signatures sont également un moyen de formaliser les connaissances et l'expertise que peuvent avoir les hydrologues sur les bassins versants (Blöschl, 2001). De nombreux indicateurs peuvent être utilisés comme signatures hydrologiques. Certains sont des indicateurs très classiques connus depuis longtemps en hydrologie et construits à partir des données de pluie ou de débit : coefficient de ruissellement annuel et courbe de débits classés pour caractériser le régime hydrologique général, base flow index pour caractériser la contribution souterraine au débit, pente des récessions pour caractériser la relation entre stock d'eau dans le bassin et débit, coefficient de ruissellement à l'échelle événementielle ou temps de montée pour caractériser la réactivité du bassin aux événements pluvieux. L'utilisation de signatures hydrologiques est maintenant courante pour évaluer et comparer différentes structures de modélisation, comme en témoigne un état de l'art de plus en plus abondant (Yilmaz *et al.*, 2008; Clark *et al.*, 2011; Euser *et al.*, 2013; McMillan *et al.*, 2014; Hrachowitz *et al.*, 2014; Euser *et al.*, 2015; Ley *et al.*, 2016; Schaeffli, 2016). Les développements autour des signatures hydrologiques se font maintenant principalement sur l'intégration de signatures dans des stratégies de calage de modèles multi-objectifs (Shafii et Tolson, 2015; Shafii *et al.*, 2017; Fenicia *et al.*, 2018; Larabi *et al.*, 2018). Cependant, les signatures utilisées sont toujours un peu les mêmes, en général extraites de la courbe de débit classés (Flow Duration Curve). Un champ de recherche encore assez peu exploré est l'amélioration des signatures hydrologiques elles-mêmes, par la définition de nouvelles signatures, plus explicitement liées à des comportements spécifiques des bassins versants ou des compartiments des modèles, et donc interprétables plus facilement. Ces signatures peuvent faire intervenir d'autres sources de données que la pluie et le débit. Par exemple, McMillan *et al.* (2014) ont utilisé des données d'humidité du sol pour déterminer des seuils de génération du ruissellement lors d'événements pluvieux. Schaeffli (2016) a défini des signatures s'appuyant sur le débit et la température ciblant spécifiquement les processus liés à la neige dans les bassins versants. L'amélioration des signatures hydrologiques passe aussi par la définition de critères permettant de faire le tri entre les différentes signatures (McMillan *et al.*, 2017; Addor *et al.*, 2018).

J'ai commencé à travailler sur les signatures hydrologiques en 2015, à l'occasion d'un séjour d'un an au NIWA en Nouvelle-Zélande avec Hilary McMillan. Je travaille résolument dans la direction de l'amélioration des signatures hydrologiques et de leur interprétation physique, selon deux axes principaux présentés ci-dessous :

- la reformulation des données hydrologiques traditionnelles (pluie - débit) sous forme de signatures de façon à reproduire de façon automatisée et quantifiable l'expertise de l'hydrologue dans la comparaison entre modèle et données ;

— l'exploitation de sources alternatives de données.

4.3.1 Exploitation des séries hydrologiques traditionnelles

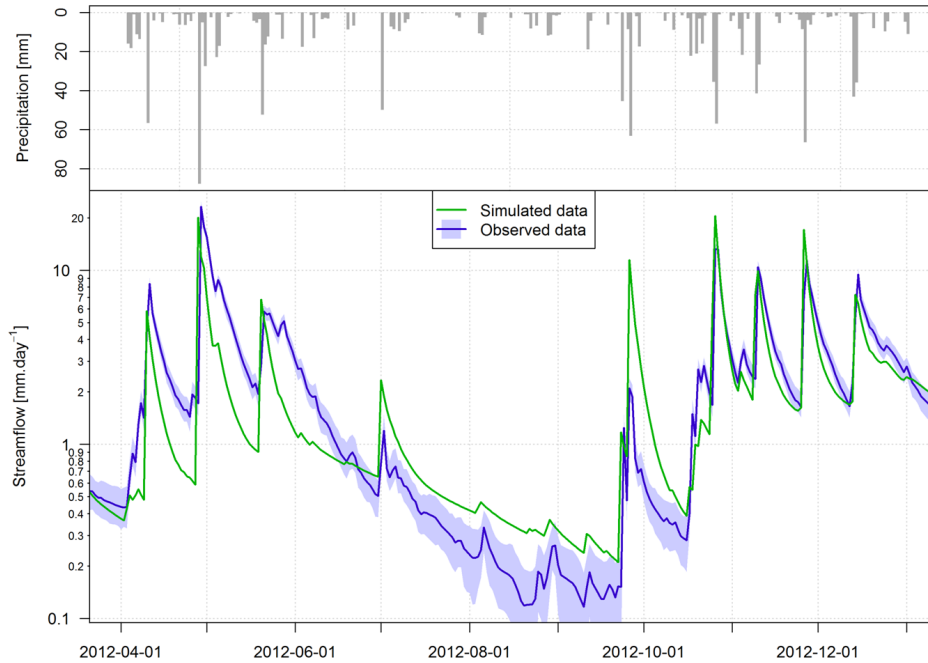


FIGURE (4.4) Débits observés et simulés par le modèle J2000-Rhône adapté à l'Ardèche à la station de Meyras (100 km^2) sur la période avril-décembre 2012. Source : Horner (en cours).

Ce travail est réalisé dans le cadre de la thèse d'Ivan Horner qui doit se terminer en fin d'année 2019. Ivan Horner met en œuvre une démarche de construction de signatures hydrologiques à partir de données hydrologiques courantes (pluie, débit, température), en travaillant à partir de données du bassin versant de l'Ardèche et du site CZO américain Southern Sierra dans le cadre d'une collaboration internationale avec Hilary McMillan aux USA et parrainée par l'IR OZCAR. La démarche peut être décrite à partir de la Figure 4.4, qui présente un extrait de chronique de débit journalier, observée et simulée à partir du modèle J2000-Rhône appliqué spécifiquement sur le bassin de l'Ardèche. Le calcul de performance à partir des simulations sur la période 1985-2015 et pour un modèle non calibré indique un KGE à 0.77 et un NSE à 0.63. Ce sont donc des simulations de bonne qualité. Cependant une comparaison visuelle assez fine entre observations et simulation permet d'aller plus loin pour identifier les principaux défauts du modèle qu'on peut lister comme suit, en allant du plus général vers le plus spécifique (voir Figure 4.4) :

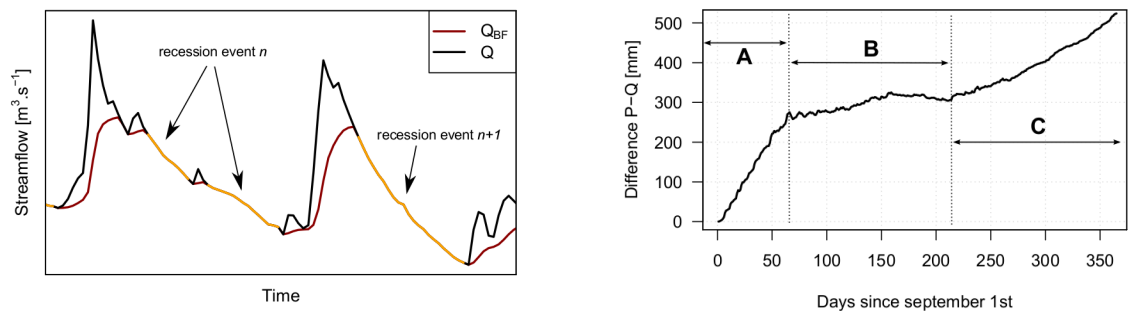
- il y a globalement un léger biais de sous-estimation des débits par le modèle (en volume total) qui est visible malgré l'échelle log du graphique qui écrase les hauts débits ;
- il y a une moins grande variabilité des débits simulés par rapport aux observations ; notamment les hauts débits simulés sont moins hauts et les bas débits simulés sont moins bas ;
- au niveau de la saisonnalité, on peut voir une variation d'amplitude saisonnière des débits nettement moins marquée pour le modèle que pour les observations : le niveau du débit de base simulé monte moins haut en hiver et descend moins bas en été ;
- toujours au niveau de la saisonnalité, on peut voir un léger retard du modèle pour

atteindre le niveau de hautes eaux hivernal (période du 15-30 octobre) ;

- à l'échelle des événements, on voit lors des récessions que les débits simulés descendent trop tôt et trop vite, tandis qu'à plus long terme lors des longues récessions, ils finissent par être stabilisés à des niveaux plus hauts que les observations.

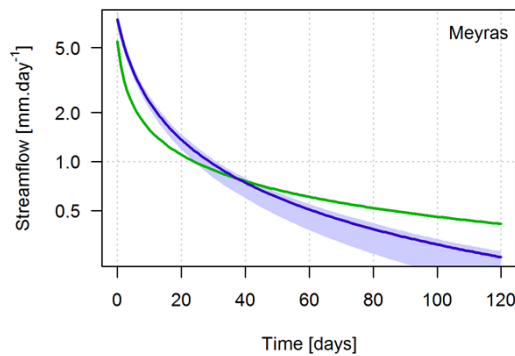
Le pas de temps du modèle J2000-Rhône (journalier) ne permet pas par contre de regarder plus en détails la réponse événementielle (valeur et timing des pics, temps de montée) qui dans le cas du sous-bassin de l'Ardèche à Meyras est infra-journalière.

La démarche d'Ivan Horner consiste à construire un jeu de signatures permettant de formaliser ces observations, en essayant de décrire l'ensemble des caractéristiques de la réponse hydrologique utiles pour un modèle de type J2000-Rhône orienté sur les ressources en eau et les simulations de long terme. Il s'agit donc de développer des indicateurs chiffrés et calculables de manière automatique à partir des séries hydrologiques. Le jeu de signatures auxquelles il a abouti est composé de signatures classiques (coefficient de ruissellement pour la partie bilan en eau, pente de la courbe de débits classés pour la variabilité des valeurs de débit, Base Flow Index), et de nouvelles signatures. La Figure 4.5 en présente deux, caractérisant les récessions et la mise en eau saisonnière du bassin.

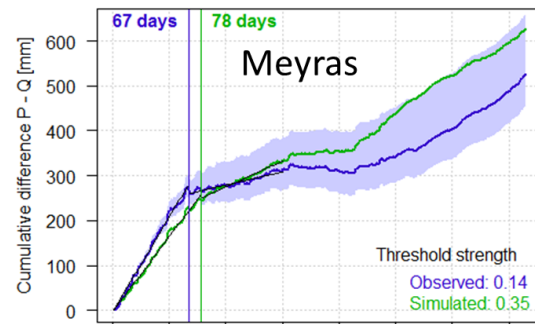


(a) Extraction des récessions

(b) Détection du seuil de mise en eau saisonnière



(c) Récession caractéristique pour l'Ardèche à Meyras (en bleu : simulations ; en vert : observations)



(d) Seuil saisonnier pour l'Ardèche à Meyras (sur débits moyens interannuels)

FIGURE (4.5) Principes de calcul des signatures hydrologique de récession caractéristique et seuil de mise en eau saisonnière, et résultats pour la station de l'Ardèche à Meyras. Source : Horner (en cours).

Pour la caractérisation des récessions, on extrait les parties décroissantes des hydrogrammes après événements pour lesquelles le débit est égal au débit de base, et qui durent au moins 10 jours. Sur chaque récession individuelle est calée une loi puissance (hypothèse linéaire en log) (voir équation 4.1). Sur l'ensemble des valeurs des paramètres a et b obtenus pour toutes les récessions, les valeurs médianes sont prises pour définir la récession caractéristique. La signature est donc constituée des valeurs des paramètres a et b . On voit sur la Figure 4.4(c) que la récession

caractéristique reconstituée à partir des observations et des simulations rend bien compte du problème qui avait été identifié lors de l’analyse visuelle de l’hydrogramme.

$$\frac{dQ}{dt} = aQ^b \quad (4.1)$$

Pour le seuil de mise en eau saisonnière, la signature est obtenue en calculant la différence cumulée de pluie et de débit (P-Q) à partir d’une date pivot fixe (choisie ici le 1er septembre). On repère ensuite le changement de pente de la courbe (à partir d’un calage de droite par segments). La signature est donnée par la date du changement de pente détecté à partir de la date pivot (nombre de jours), ainsi que par le rapport entre les deux pentes qui caractérise l’amplitude de la rupture de pente. Cette signature peut être calculée annuellement ou sur des débits interannuels moyens. La Figure 4.4(d) montre que cette signature permet bien de détecter et quantifier le retard du modèle pour la mise en eau du bassin à l’automne.

D’autres signatures, non présentées ici, sont spécifiques aux bassins à influence nivale marquée, d’après Schaefli (2016). Le reste du travail d’Ivan Horner consiste à formaliser les liens entre paramètres entre signatures et paramètres du modèle J2000 à travers une analyse de sensibilité, de façon à réaliser le diagnostic du modèle. C’est un travail en cours de finalisation et dont la valorisation scientifique est en cours (Horner *et al.*, 2019a,b). Un stage de Master débuté en mars 2019 en appui à la thèse doit permettre d’étendre le diagnostic au modèle J2000-Rhône pour plusieurs sous-bassins contrastés du bassin du Rhône.

4.3.2 Exploitation de données alternatives

Bien que très utiles pour l’évaluation des modèles hydrologiques (Seibert et McDonnell, 2002; Fenicia *et al.*, 2008a), et en particulier des modèles distribués, les données autres que le débit sont encore assez peu utilisées. Une des principales raisons à cela est que ce ne sont pas des données naturellement intégratrices comme le débit, mais souvent des données ponctuelles (hauteur d’eau, profondeur de nappe, humidité du sol...). Elles sont donc en général peu représentatives spatialement (la zone représentative de la mesure est en général beaucoup plus petite qu’une HRU de modèle hydrologique distribué), influencées par des conditions locales non prises en compte dans le modèle, et parfois difficiles à comparer directement aux variables simulées par le modèle du fait de sa conceptualisation. C’est typiquement le cas pour l’humidité du sol comme on a pu le voir dans l’expérience du projet R2D2 (voir 3.2.1). Dans d’autres cas, les données peuvent être de trop mauvaise qualité pour être comparées directement à des sorties de modèles. Il y a donc un vrai enjeu à extraire de ces données des signatures hydrologiques qui permettraient de les exploiter utilement (Hrachowitz *et al.*, 2013). Deux exemples sont présentés ici.

Dérivation d’indicateurs à partir de hauteurs d’eau distribuées

Le travail présenté ici a été réalisé à l’occasion du séjour scientifique de Musandji Fuamba à Irstea (Fuamba *et al.*, 2019). Il a consisté à réutiliser des données de hauteur d’eau distribuées en divers points du réseau hydrographique intermittent du bassin du Mercier, pour évaluer le modèle PUMMA. Des capteurs limnimétriques à bas coût avaient été installés et suivis pendant 2 ans pour le travail de thèse de Sarrazin (2012) pour observer les variations du réseau hydrographique actif lors d’événements pluvieux. Du fait de leur manque de précision et des

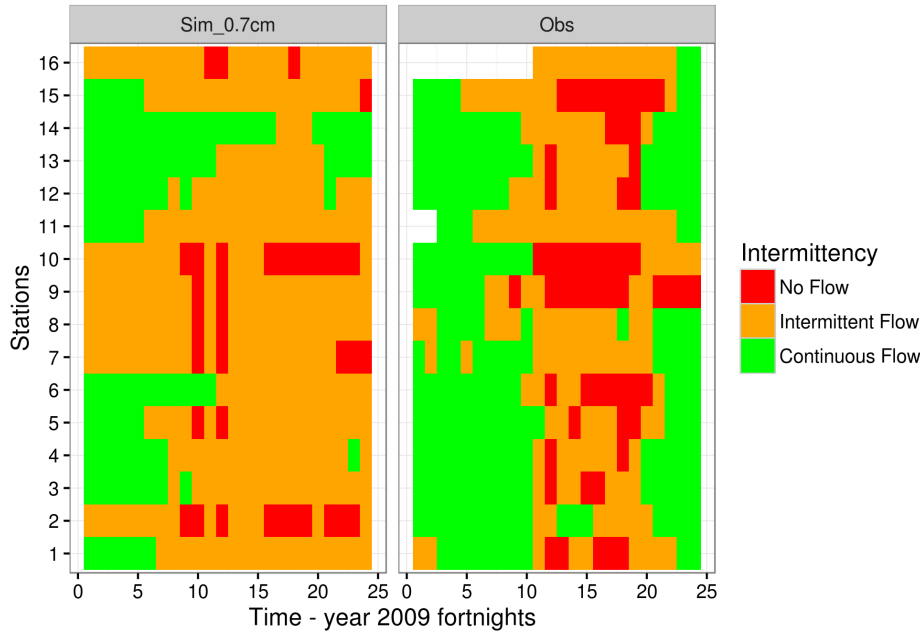


FIGURE (4.6) Indicateur d'intermittence construit à partir de données limnimétriques distribuées issues de capteurs low-cost. Observations et simulations issues du modèle hydrologique PUMMA pour l'année 2009.

particularités locales des sites d'installation des capteurs, il n'était pas envisageable de dériver des séries de débit de ces données, ni de les utiliser directement pour les comparer aux hauteurs d'eau simulées par PUMMA. Pour évaluer la capacité du modèle à reproduire l'intermittence des cours d'eau dans le bassin, un indicateur spécifique a été construit (Figure 4.6). Cet indicateur est calculé sur des périodes de deux semaines et considère un seuil de hauteur d'eau caractéristique d'un écoulement, estimé par Sarrazin à 1 cm pour les capteurs limnimétriques sur le Mercier :

- si le niveau d'eau est au-dessus de ce seuil pendant toute la période, on considère qu'on est en phase d'écoulement actif;
- si le niveau d'eau reste en-dessous de ce seuil pendant toute la période, on est en période d'assec;
- dans le cas restant (niveau variant autour du seuil), on est en période d'intermittence.

En termes de processus, ce caractère d'intermittence sur une période de deux semaines peut être relié à la dynamique saisonnière du débit de base sur le bassin ainsi qu'au seuil de mise en eau à l'automne déjà identifié en 4.3.1. La Figure 4.6 montre les résultats obtenus à partir des données observées pour l'année 2009 et pour le modèle. La valeur du seuil étant importante et n'ayant aucune raison d'être la même pour le modèle et pour les observations, plusieurs valeurs ont été testées (Fuamba *et al.*, 2019). La valeur de seuil la plus appropriée (0.7 cm) a été conservée pour la Figure 4.6. On y voit que le modèle parvient à reproduire à peu près la variation saisonnière des écoulements (notamment le passage à un écoulement intermittent, puis sec en été) pour une bonne partie des sites. Par contre il parvient beaucoup plus rarement à reproduire correctement la remise en eau du bassin à l'automne.

Construction de signatures à partir de données d'humidité du sol

Le second exemple correspond au travail que j'ai réalisé avec Hilary McMillan en Nouvelle-Zélande (Branger et McMillan, 2019). Il a été consacré à la construction de signatures hydrologiques à partir de données d'humidité du sol. La Nouvelle-Zélande dispose en effet d'un réseau de capteurs d'humidité du sol (avec un capteur un peu particulier, l'Aquaflex - Hedley et Yule, 2009) couplé aux stations météorologiques. Ces capteurs sont localisés sur l'ensemble du territoire, dans des conditions climatiques et géologiques contrastées. Nous avons donc pu constituer un jeu de données intéressant pour la définition et le test de signatures. Au contraire des débits, il n'existe pas de signatures classiques pour l'humidité du sol. Nous avons défini les signatures en tâchant de décrire là encore l'ensemble de la réponse hydrologique : valeurs caractéristiques et indicateurs de la dynamique de l'humidité du sol, à différentes échelles temporelles (long terme, échelle saisonnière et échelle événementielle).

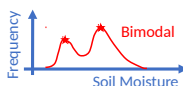
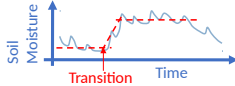
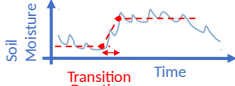
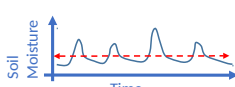
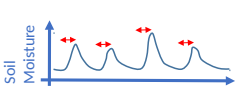
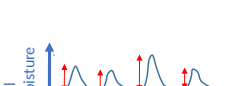
Signature	Schematic	Description
Distribution Type		Probability density function of the daily series of soil moisture, classified as unimodal / bimodal / multi-modal.
Transition Date		Start date of transition between stable summer / winter states, calculated only for bimodal distributions.
Transition Duration		Time between start and end dates of transition between stable summer / winter states, calculated only for bimodal distributions.
Field Capacity		Winter equilibrium soil moisture value, distinguished as the point of "change of slope" between fast drainage and slower drainage during the 3 days after a storm.
Event Rising Time		Time between the start of the event and the soil moisture peak.
Event Normalised Amplitude		Difference between the maximum soil moisture value during the event and the soil moisture value at the first time step of the event, normalized by the average soil moisture at the site.

FIGURE (4.7) Signatures hydrologiques construites à partir des séries temporelles d'humidité du sol. Source Branger et McMillan (2019).

Les six signatures sont présentées Figure 4.7. Le type de distribution caractérise la forme générale de la fonction de densité de probabilité de la signature. Une forme bimodale par exemple est caractéristique d'un fort contraste saisonnier : humidité forte en hiver (températures basses et beaucoup de précipitations) et faible en été (températures élevées et peu de précipitations). A l'échelle saisonnière, la date et la durée de transition caractérisent le passage entre le niveau d'humidité bas de l'été au niveau plus haut de l'hiver (ou inversement pour la transition de l'hiver vers l'été). Cette transition est souvent difficile à reproduire par les modèles comme on l'a vu dans les exemples précédents. La capacité au champ correspond à la teneur en eau résiduelle du sol après drainage libre lors d'un événement. C'est un indicateur connu en agronomie qui

peut être vu comme caractéristique des capacités du sol à retenir l'eau. C'est notamment un paramètre du modèle J2000 (Krause *et al.*, 2006). La signature mise au point permet d'estimer la capacité au champ à partir de séries temporelles d'humidité du sol. Enfin, le temps de montée et l'amplitude sont des caractéristiques de la réponse événementielle inspirés des indicateurs sur le débit.

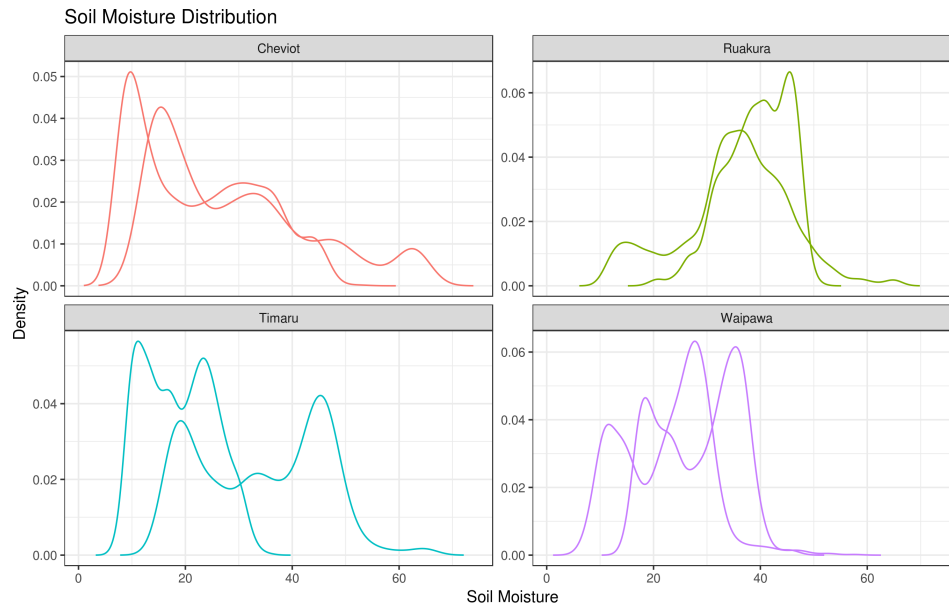


FIGURE (4.8) Forme de la distribution de l'humidité du sol - test de représentativité spatiale sur des couples de stations proches (distances de 300 m à 12.5 km). Source : Branger et McMillan (2019).

L'intérêt de ces signatures peut être illustré par la Figure 4.8, qui présente les fonctions densité de probabilité de l'humidité du sol pour plusieurs paires de sites (stations situées non loin les unes des autres). On voit que pour chaque paire les courbes sont différentes, et les valeurs des pics aussi, ce qui illustre très bien la dépendance aux conditions locales. Par contre malgré ces différences, on perçoit bien que la forme des courbes est la même pour les sites de chaque paire, et le nombre de modes est identique. La signature type de distribution (unimodale, bimodale, multimodale) permet donc de dépasser les limites habituelles des données d'humidité du sol dans une perspective de comparaison à des sorties de modèles.

4.3.3 Pertinence et représentativité des signatures hydrologiques

En parallèle, je mène aussi avec Hilary McMillan une réflexion sur la pertinence et la représentativité des signatures. En effet, l'usage de signatures hydrologiques se multiplie. Il est courant de reprendre des signatures d'une étude à l'autre sans réellement interroger le fait que ces signatures peuvent être redondantes, ou ne cibler qu'une partie des processus hydrologiques d'un bassin, ou être peu informatives (McMillan *et al.*, 2017). Nous avons donc proposé cinq critères pour aider à la sélection d'un jeu de signatures hydrologiques :

1. Identifiabilité : l'incertitude sur les signatures doit être inférieure à leur gamme de variation ;
2. Robustesse : les valeurs de signatures doivent être indépendantes du processus de mesure de la donnée : type de capteur, pas de temps, profondeur d'installation etc ;

3. Cohérence : cela consiste à éliminer les signatures dépendantes de caractéristiques non hydrologiques. Un exemple typique est la taille de bassin versant. La plupart du temps cela peut être corrigé ;
4. Représentativité : les signatures doivent représenter le fonctionnement moyen du bassin et non un fonctionnement local ;
5. Pouvoir discriminant : les signatures doivent être capables de discriminer des fonctionnements hydrologiques différents, et a contrario fournir des valeurs similaires pour des bassins semblables sur le processus visé.

Trois de ces critères ont été mis en application pour l'évaluation des signatures dérivées des données d'humidité du sol (Branger et McMillan, 2019) : nous avons testé la robustesse, la représentativité spatiale, et le pouvoir discriminant. La Figure 4.8 illustre une partie du test de représentativité spatiale. La Figure 4.9 présente les résultats du test de pouvoir discriminant des signatures d'humidité du sol par rapport aux cinq classes de climat répertoriées en Nouvelle-Zélande (Branger et McMillan, 2019). On y voit une claire différence selon les climats de la capacité du champ, du type de distribution, des dates de transition et de la durée de transition été-hiver. Pour les signatures événementielles, le résultat est moins net mais on voit néanmoins des différences, notamment pour le climat CX (Cool eXtremely wet) qui correspond à des forts cumuls de précipitations annuels (plusieurs mètres) et présente une amplitude de réponse plus élevée et un temps de montée plus faible que les autres.

4.4 Mise en perspective

Des bienfaits du travail de terrain

L'expérience de la gestion du site expérimental du bassin de l'Yzeron et mon implication dans l'OTHU m'ont appris les bienfaits du travail de terrain pour se rendre compte de la réalité de la mesure, y compris pour des données aussi banales en hydrologie que la pluie et le débit. Le travail de construction de stations hydrométriques, le suivi de la construction des courbes de tarage, le développement de BaRatin pour le calcul des incertitudes m'ont conduit à m'interroger systématiquement sur la donnée que je récupère, même lorsqu'elle est issue des bases de données disponibles en ligne comme la Banque Hydro en France. BaRatin est adopté de façon grandissante par les services hydrométriques français, ce qui est un fait encourageant. A terme, il serait souhaitable de pouvoir produire (et récupérer) des séries hydrologiques systématiquement accompagnées d'une estimation de l'incertitude selon une méthode documentée.

Le bassin versant de l'Yzeron arrive maintenant à un certain niveau de maturité en termes de mesures hydrologiques de base (pluie-débit). Les dernières stations de mesure installées, celles d'humidité des sols, devraient permettre de tester en France les signatures hydrologiques développées en Nouvelle-Zélande sur ce type de données. Nous commençons à construire maintenant des collaborations multidisciplinaires en nous appuyant sur une hydrologie solide. Des perspectives intéressantes sont en cours de concrétisation pour aborder la problématique de la qualité de l'eau, avec des chimistes et des microbiologistes. Nous cherchons à développer une approche intégrée biogéochimique et hydrologique pour déterminer les sources et le transfert de polluants sur des bassins versants d'usage mixte, et notamment séparer la pollution d'origine urbaine de la pollution d'origine rurale agricole. C'est aussi une piste prometteuse de nouvelles signatures pour aider à l'évaluation des modèles hydrologiques (McMillan *et al.*, 2012).

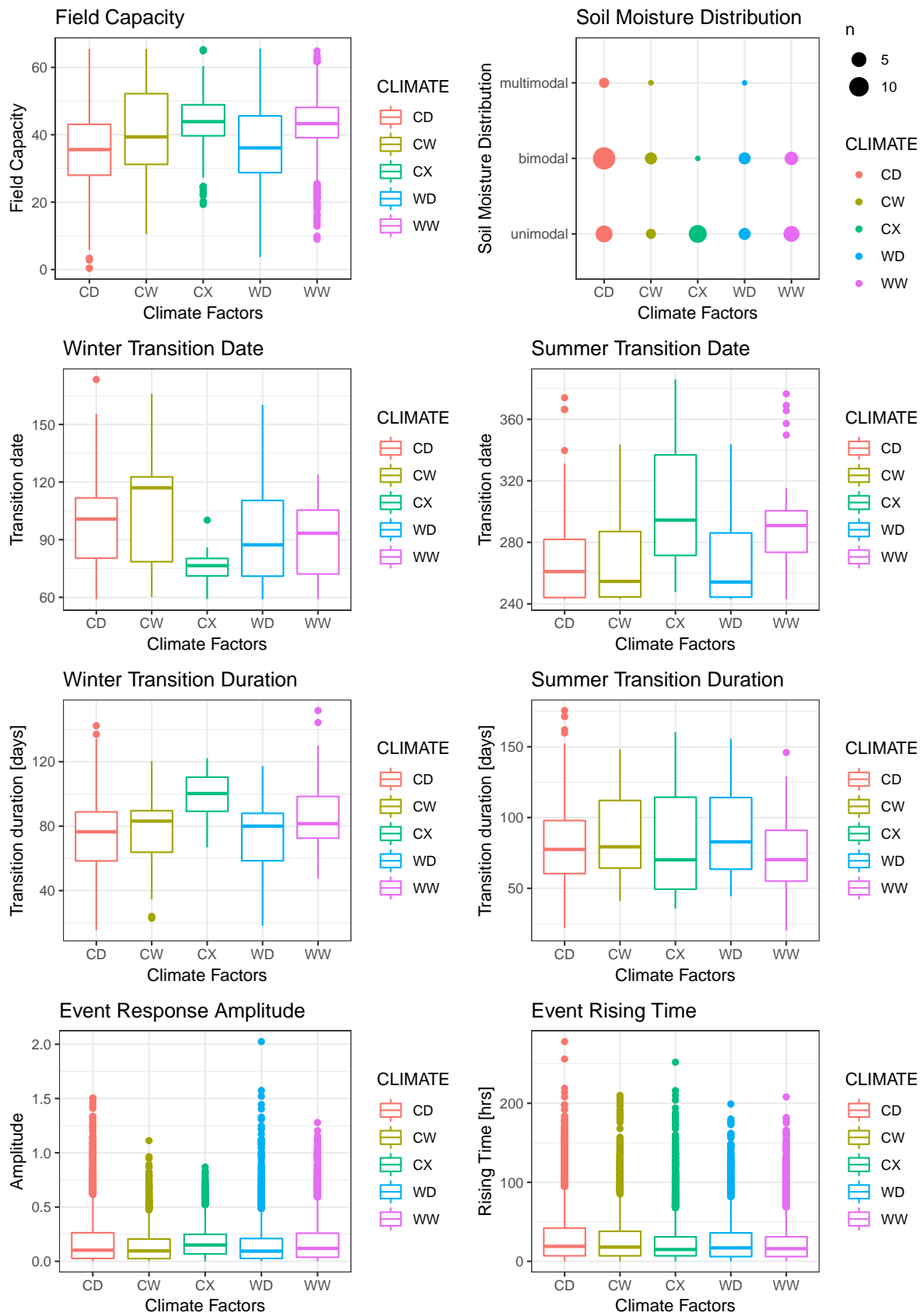


FIGURE (4.9) Signatures d'humidité du sol - test de pouvoir discriminant à large échelle par rapport au climat. Source : Branger et McMillan (2019).

Le futur de la bancarisation de données

BDOH est un outil central et incontournable pour la valorisation des observatoires hydrologiques d'Irstea. Les développements de la base de données et de son application seront poursuivies. En termes de perspectives, l'enjeu le plus important pour améliorer la visibilité de nos observatoires et l'accessibilité aux données est de développer l'interopérabilité de BDOH, c'est à dire de développer des fonctionnalités d'échange automatique d'informations sur les données (les métadonnées), voire à terme des données elles-mêmes. L'interopérabilité des systèmes d'information environnementaux fait l'objet de développements importants (Horsburgh *et al.*, 2016), dans lesquels l'Open Geospatial Consortium (OGC) joue un rôle actif. Il existe maintenant des standards qui décrivent les formats d'échange, comme par exemple le standard WaterML spécifiquement dédié aux observations hydrologiques (OGC, 2012). En étant interopérable, BDOH pourra transmettre automatiquement des informations sur les données qu'elle contient aux différents agrégateurs (bases de métadonnées institutionnelles ou thématiques, plate-formes d'open-data), ce qui contribuera fortement à sa visibilité. Proposer un portail de métadonnées alimenté automatiquement est également un des objectifs de l'infrastructure de recherche OZCAR. Une des difficultés à résoudre sera le sous-financement chronique des établissements pour ce genre de tâches, qui demandent des moyens humains spécifiquement dédiés et souvent inexistant dans les laboratoires. Une autre perspective pour BDOH est un élargissement à la bancarisation et la mise à disposition de données cartographiques acquises sur les observatoires (cartes d'occupation des sols, plans du réseau d'assainissement par exemple), et de doter l'application d'une interface cartographique qui facilitera la recherche de données. Nous sommes par ailleurs en train de préparer la diffusion du code sous une licence open-source, de façon à disséminer le savoir-faire acquis et permettre à d'autres observatoires hydrologiques d'en profiter et d'implémenter leur propre BDOH.

Une ambition pour l'OTHU

L'OTHU a maintenant 20 ans et doit faire face à plusieurs défis. L'OTHU a la grande chance de bénéficier du soutien récurrent de partenaires opérationnels, notamment l'Agence de l'Eau RM & C et la Métropole de Lyon. Cependant, le mode de financement notamment de la part de l'Agence de l'Eau vient de changer ; il est passé d'une subvention récurrente pour l'observation à un financement sur projets. Cela ne nous permet plus de soutenir l'observation de terrain au même niveau qu'auparavant. Il a donc fallu remettre en question notre stratégie d'observation, et prendre des décisions difficiles de fermeture de certains sites et de réduction forte des mesures récurrentes sur d'autres. Il faut également gérer, au niveau de l'animation scientifique, l'effet de compétition induit par les nouveaux appels d'offres internes. Il y a donc un très fort enjeu d'animation scientifique pour nourrir la dynamique du collectif de recherche dans un contexte un peu modifié.

Le second défi auquel l'OTHU fait face, et sur lequel je peux apporter une contribution spécifique, est celui de la capitalisation des données. L'OTHU a, en vingt ans, produit une très grande quantité de données, qui certes ont pour la plupart été valorisées scientifiquement, mais qui souffrent encore d'une bancarisation hétérogène et par conséquent d'une assez faible visibilité. L'OTHU n'est pas le seul ; la capitalisation des données est un enjeu récurrent pour tous les observatoires environnementaux, et qui devient particulièrement important dans le contexte de fusion des infrastructures d'observation au niveaux français (OZCAR) et européen (réseau eLTER) (Gaillardet *et al.*, 2018). Je peux mettre au service de l'OTHU mon expérience sur la

bancarisation et la mise à disposition de données. Un premier pas sera la construction d'une base de métadonnées interoperable pour mieux faire connaître nos jeux de données, en s'appuyant sur la Métropole de Lyon qui développe une politique d'open-data ambitieuse, et dispose désormais d'une plate-forme ouverte (data.grandlyon.com) qu'elle nous propose d'intégrer.

Les signatures hydrologiques

Les travaux menés sur les signatures hydrologiques sont prometteurs. C'est une façon de formaliser les allers-retours entre observation et modélisation. A l'heure actuelle, la méthodologie de diagnostic est encore en cours de construction. Mais les résultats obtenus ont déjà permis de progresser. Par exemple dans le cas du modèle PUMMA sur le bassin du Mercier, nous pensions a priori que le fait que le modèle ne simule que du ruissellement de surface par excès de saturation (et pas de ruissellement Hortonien par excès d'infiltration) allait poser problème (Jankowsky *et al.*, 2014). Les résultats de l'évaluation du modèle à l'aide de signatures ont permis de montrer que cela n'était pas de premier ordre par rapport à une prise en compte de profondeurs des sols variables (Fuamba *et al.*, 2019). On a donc pu prioriser les améliorations à apporter au modèle sur une base plus objective que le simple ressenti du modélisateur. C'est typiquement ce qu'une démarche de diagnostic vise à apporter.

Chapitre 5

Conclusions générales et perspectives

5.1 Bilan de mon activité scientifique

Mon activité scientifique est principalement consacrée à la modélisation hydrologique distribuée pour la compréhension des processus et la quantification de l'impact des activités humaines sur la ressource en eau. J'ai un profil d'hydrologue penchant plutôt du côté de la physique (focus sur les processus, interprétation physique du sens des modèles et des résultats de simulations) que des mathématiques appliquées qui traitent les aspects numériques de la modélisation. Que ce soit par mon travail direct, ou à travers mes encadrements d'étudiants et de jeunes scientifiques, j'ai développé plusieurs modèles hydrologiques distribués de conceptualisations et complexité variées, adaptés à des tailles de bassins versants allant de quelques km^2 à plusieurs centaines de milliers de km^2 , et à des objectifs différents, fondamentaux ou appliqués. Les modèles hydrologiques les plus importants ont été présentés dans ce mémoire, ainsi que les résultats scientifiques qu'ils ont permis d'obtenir :

- PUMMA, pour comprendre et représenter les interactions entre processus urbains et ruraux sur de petits bassins versants périurbains ;
- J2000P, pour quantifier à plus grande échelle l'impact de l'évolution de l'urbanisation et des pratiques de gestion des eaux pluviales sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin ;
- SIMPLEFLOOD, pour proposer une vision simplifiée des processus de génération des écoulements pouvant conduire à des crues sur un bassin versant méditerranéen de méso-échelle ;
- J2000-Rhône, pour quantifier l'impact du changement climatique et de stratégies d'usages de l'eau sur un grand bassin versant anthropisé et aménagé, comportant une partie alpine.

Mon activité de modélisation a un lien fort avec l'observation de terrain, activité que je mène dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU). Je suis fortement investie dans la conservation à long terme des données issues des observatoires hydrologiques, à travers la coordination du développement de la base de données et application BDOH à Irstea. Je contribue aussi au développement de méthodes de quantification des incertitudes des séries de données hydrologiques.

Enfin, j'ai développé plus récemment un axe de recherche sur la formalisation du lien entre

données, interprétation hydrologique et modèles, porté par le développement de signatures hydrologiques. Je travaille plus spécifiquement sur la définition et l'amélioration de signatures hydrologiques, issues de données de pluie-débit ou d'autres sources de données, qui soient plus facilement interprétables d'un point de vue physique, et qui ciblent plus particulièrement certaines composantes des modèles hydrologiques distribués. Les travaux réalisés ont permis de construire des signatures caractérisant la forme des récessions après événements pluvieux, la dynamique saisonnière de reprise des écoulements dans un bassin, la dynamique d'accumulation et de fonte de la neige, l'intermittence des écoulements dans le réseau hydrographique, ainsi que les dynamiques saisonnières et événementielles de l'humidité du sol. Ces signatures ont toutes vocation à être utilisées pour l'évaluation et l'amélioration des modèles hydrologiques distribués, et en particulier ceux que je développe.

5.2 Contributions méthodologiques

Mon activité s'est accompagnée d'une réflexion permanente sur la démarche de modélisation. Y a-t-il une approche intrinsèquement meilleure qu'une autre, notamment vis-à-vis des processus hydrologiques ? Comment sélectionner les processus à représenter dans un modèle ? Comment confirmer ou infirmer les hypothèses de fonctionnement formulées à travers les modèles ? J'ai vu et pratiqué un assez large spectre de modèles et de conceptualisations des processus hydrologiques. Mon travail contribue donc à la progression des connaissances et pratiques sur certains enjeux méthodologiques de la modélisation tels qu'identifiés et explicités en partie 1.3 de ce mémoire.

Structure des modèles

J'ai développé des modèles de conceptions variées, notamment utilisant des approches basées sur l'équation de Richards et sur des approches de type réservoir, qui parfois ont été combinées dans le même modèle. Aucun élément ne me permet d'affirmer qu'un choix de structure a été intrinsèquement meilleur qu'un autre. Par contre, mes modèles ont clairement tous été développés dans des objectifs différents, et ne peuvent pas être substitués l'un à l'autre. L'effort d'adaptation de la structure aux objectifs d'utilisation du modèle (qui doivent donc être explicités dès le départ) et à la taille du bassin versant considéré (en lien avec les objectifs), me paraît donc être un élément clef pour progresser. On peut qualifier cette démarche de modélisation d'intermédiaire entre les approches dites *bottom-up* et *top-down*. En pratique, ce type d'approche est rendu possible par l'utilisation de plate-formes de modélisation, qui permettent la construction de modèles de façon modulaire. Les intercomparaisons de modèles ont également un grand intérêt pour faire circuler les idées et les concepts.

Evaluation des modèles

Il m'est apparu au fil du temps que la question de l'évaluation des modèles est véritablement la question centrale pour le développement de modèles hydrologiques. En effet, quels que soient les choix de structure ou de paramétrisation d'un modèle, il faut pouvoir confronter les hypothèses faites avec les observations. Le concept des allers-retours entre observations et modèles pour avancer sur la connaissance des processus hydrologiques est largement connu, partagé et

revendiqué. Mais l'état des connaissances et des pratiques sur la façon de formaliser ces allers-retours est encore balbutiant. Tant que la communauté hydrologique ne sera pas capable de formaliser en quoi les modèles sont bons ou mauvais, avec des interprétations physiques, les modèles ne progresseront pas. Mon travail sur les signatures hydrologiques, à partir de sources de données multiples, vise à lever ce verrou et me paraît le plus prometteur pour l'avenir proche.

Identification des paramètres

L'identification des paramètres est un sujet que j'ai pour l'instant peu abordé directement. Comme présenté en partie 1.3, les méthodes de calibration actuelles pour les modèles hydrologiques distribués ont de fortes limitations. Outre la surparamétrisation des modèles et les problèmes d'équifinalité, la surcalibration, et notamment la compensation par la calibration des paramètres de biais sur les forçages atmosphériques, peut induire une perte du sens physique du modèle. A titre d'exemple, dans la construction du modèle J2000-Rhône, nous avons testé deux sources de données différentes pour l'estimation des précipitations en zone de montagne. Les différences se sont révélées très importantes (en moyenne 400 mm/an, et jusqu'à 1000 mm/an sur les zones alpines, Branger *et al.* 2016), et fortement impactantes sur les débits simulés par le modèle, et donc sa performance. Une calibration aurait très certainement pu compenser cela, mais au prix d'une perte de signification physique des paramètres du modèle, qui représentent des processus hydrologiques au sol et ne sont pas censés porter d'information sur les biais de précipitation. D'une manière générale dans ma démarche de modélisation, j'ai donc plutôt fait le choix de la non calibration avec éventuellement un ajustement de paramètres manuel au cas par cas, quitte à perdre en performance.

Conclusions

A ce stade de mon expérience de recherche sur la modélisation hydrologique, ma première conviction est que nous avons besoin de sortir des carcans sémantiques sur les types de modèles, rejoignant en ce sens l'opinion de Hrachowitz et Clark (2017). Le terme *à base physique* n'a pas de sens pour un modèle hydrologique. Beaucoup plus que la structure du modèle, c'est la démarche de modélisation dans son ensemble qui a une préoccupation physique ou pas, et peut ainsi contribuer à faire avancer les connaissances sur les processus hydrologiques. Je préfère donc plutôt parler de *démarche orientée processus* lorsqu'on me demande quel type de modèle je développe.

La seconde leçon que je tire de mon expérience est l'intérêt d'avoir des modèles ancrés dans la réalité et les territoires, appliqués et utilisés pendant de longues années sur des bassins versants réels, quels que soient leur taille et leur statut (bassin versant expérimental ou non). Beaucoup de théories hydrologiques élégantes sont appliquées de façon jetable sur un bassin versant pris sur catalogue, et ne vont ainsi pas au-delà du *proof of concept*. C'est certes rentable du point de vue de la publication scientifique. Mais la connaissance hydrologique vient aussi du travail de long terme, dans les bassins expérimentaux et en partenariat avec les acteurs opérationnels. Il faut en général plusieurs années pour construire, paramétrer, évaluer et exploiter un modèle hydrologique distribué sur un bassin versant. Cela peut être vu comme une faiblesse (coût de déploiement important) ; mais ce temps long permet l'incorporation de plus d'expérience de terrain et de connaissances dans les modèles, ce qui est une grande force (Beven, 2001).

5.3 Contexte institutionnel

Le contexte institutionnel dans lequel j'exerce mon activité de recherche mérite d'être mentionné. En effet il est dans une phase de recomposition commencée en 2018 et qui durera vraisemblablement plusieurs années. L'unité de recherche Hydrologie-Hydraulique dans laquelle j'ai été recrutée en 2007 a disparu en 2018 dans une réorganisation d'Irstea autour de ses implantations régionales. La nouvelle unité de recherche à laquelle j'appartiens, RiverLy, est beaucoup plus grande et surtout multidisciplinaire car elle regroupe, outre des hydrologues et des hydrauliciens, des chimistes, écotoxicologues, écologues, biologistes et microbiologistes. En parallèle, les thèmes de recherche, qui étaient des réseaux transversaux aux unités de recherche et qui assuraient une animation disciplinaire au niveau national, ont également disparu. D'un point de vue disciplinaire, l'hydrologie n'a donc plus d'espace propre au sein du département Eaux d'Irstea. De plus, au 1er janvier 2020, Irstea fusionnera avec l'INRA, qui est un établissement de recherche dix fois plus gros. Les laboratoires faisant de l'hydrologie d'Irstea et de l'INRA devraient pouvoir se retrouver dans un département Aqua, mais les contours en restent encore imprécis et la place de l'hydrologie aux côtés des autres disciplines (chimie, biologie, écologie etc) est inconnue. Il n'est donc pas facile d'avoir une idée claire de ce à quoi ressemblera le paysage de l'hydrologie dans le futur établissement d'ici quelques années, et sur le site de Lyon en particulier. Mais on peut aussi le voir comme un champ d'opportunités pour proposer de nouvelles perspectives.

5.4 Perspectives scientifiques

Les directions scientifiques qui me paraissent les plus intéressantes pour la poursuite de mon activité de recherche, et également potentiellement structurantes pour l'hydrologie dans le contexte institutionnel en recomposition décrit ci-dessus, sont listées ci-après.

5.4.1 Lien entre expertise, données et modèles

La poursuite du développement de méthodes pour objectiver l'expertise sur les modèles hydrologiques distribués, en lien avec les données d'observation, et fiabiliser leurs résultats, est la perspective la plus importante. Par construction, les modèles distribués seront toujours plus complexes et plus difficiles à mettre en œuvre que des modèles globaux ; et ils auront de moins bonnes performances selon les indicateurs classiques. Il me paraît important de disposer de méthodes et outils pour mieux maîtriser ces modèles et au final mieux mettre en valeur leur potentiel. Cela passera par la consolidation du travail sur les signatures hydrologiques et son élargissement à d'autres variables et observations, y compris des observations satellitaires par exemple. La collaboration que j'ai développée sur ce sujet avec Hilary McMillan est fructueuse ; j'espère qu'elle se poursuivra et qu'elle pourra être élargie à d'autres collaborations internationales.

L'observation de terrain jouera bien sûr un rôle fondamental dans la construction de cette méthodologie de diagnostic. Il est donc important de continuer à soutenir l'observation de long terme, d'autant plus qu'elle est un facteur important de synergies régionales. Je continuerai donc de m'investir dans l'animation de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine, en

collaboration avec les autres équipes scientifiques partenaires de l’observatoire. En tant que coprésidente de l’OTHU, le point particulier sur lequel je pourrai apporter ma contribution est celui de la structuration, bancarisation et mise à disposition des données, qui est un facteur important de visibilité des observatoires en général (et de l’OTHU en particulier) et dispose d’une marge de progression certaine. Mon expérience dans la coordination du développement de BDOH pourra être mise à profit.

Enfin, la quantification des incertitudes sur l’ensemble de la chaîne de modélisation et pour les modèles hydrologiques distribués me paraît être une perspective à la fois très importante, et également porteuse au niveau collectif. La distinction des différentes sources d’incertitudes et la quantification de leurs influences respectives, devrait permettre de lever des verrous actuellement rencontrés pour la calibration des modèles hydrologiques distribués, en lien avec le développement de méthodes d’évaluation basées sur les signatures. Dans l’unité de recherche RiverLy, en hydrologie, nous disposons actuellement de compétences sur la reconstruction de forçages atmosphériques spatialisés avec estimation de leur incertitude (Leblois et Creutin, 2013; Caillouet *et al.*, 2016, 2019; Devers *et al.*, 2019), sur l’analyse de sensibilité et l’assimilation de données (Lauvernet *et al.*, 2009), et sur la quantification des incertitudes pour des modèles hydrologiques globaux (Kavetski *et al.*, 2006a,b; Renard *et al.*, 2010, 2011). Il y a donc matière à former un beau projet collectif.

5.4.2 Amélioration continue de la modélisation hydrologique distribuée et élargissement à d’autres processus d’intérêt

Les modèles hydrologiques que j’ai développés, principalement sur mes terrains de jeu privilégiés qui sont le bassin versant de l’Yzeron et le bassin versant du Rhône, ont vocation à continuer à être nourris, améliorés, appliqués sur le long terme. Je vise, grâce à l’amélioration des méthodes d’évaluation et au développement progressif de meilleures stratégies d’identification des paramètres, à améliorer la représentation des processus hydrologiques. Cela pourra aller de pair avec l’élargissement de la modélisation à d’autres processus d’intérêt, notamment pour l’ouvrir à plus de collaborations multidisciplinaires et plus d’applications : érosion et transport sédimentaire, hydrogéologie karstique, transport de nutriments et contaminants, température de l’eau, couplages avec des modèles d’hydraulique de rivières aménagées, socio-économiques de comportement d’acteurs, habitat, voire même histoire et archéologie.

Cette perspective est dans la continuité directe des applications des modèles que j’ai présentées dans ce mémoire, et pour lesquelles plusieurs projets multidisciplinaires sont démarrés ou en cours de montage. L’UR RiverLy est un cadre idéal pour développer cette perspective, du fait de sa multidisciplinarité organisée autour de l’objet cours d’eau. Cet élargissement multidisciplinaire peut aussi se faire à travers d’autres structures, notamment dans le paysage de la recherche lyonnaise : l’OTHU bien sûr qui est dédié à ce genre de travaux depuis sa création, mais aussi par exemple le labex IMU (Intelligences des Mondes Urbains) centré sur la ville, et qui associe aux laboratoires scientifiques les opérationnels des collectivités locales, et des acteurs du monde socio-économique.

Un point de vigilance dans la construction de collaborations multi-disciplinaires reste cependant l’équilibre entre les intérêts propres de chaque discipline, qui doit être maintenu dans un intérêt mutuel. En particulier, les questions de recherche propres à l’hydrologie quantitative (processus de génération des écoulements, impacts sur la ressource en eau) doivent continuer à

être considérées et nourries.

5.4.3 Hydrologie large échelle

A large échelle, le bassin versant du Rhône cumule les intérêts en tant que bassin d'application pour mon activité de modélisation hydrologique : proximité géographique, climats et régimes hydrologiques variés, usages de l'eau et enjeux liés à l'eau multiples mais plutôt bien documentés, présence de plusieurs bassins versants expérimentaux sources de données précieuses, et relations suivies avec des gestionnaires (Agence de l'Eau, Métropole de Lyon, syndicats de rivière) et des acteurs du monde socio-économique (producteurs d'hydro-électricité). Cependant, on peut se poser la question d'élargir encore ce terrain de jeu, et de passer à la construction de modèles hydrologiques à l'échelle nationale. Les modèles hydrologiques nationaux ont un intérêt certain. Ils sont souvent utilisés pour des applications de prévision (crues, étiages, prévision saisonnière). Il en existe aux USA (Regan *et al.*, 2018), au Danemark (Henriksen *et al.*, 2003), aux Pays-Bas (de Lange *et al.*, 2014), en Nouvelle-Zélande (McMillan *et al.*, 2016) pour citer quelques exemples. En France il existe déjà des modèles hydrologiques à l'échelle nationale, en particulier le modèle SIM, qui est utilisé en opérationnel par Météo-France pour la prévision saisonnière (Habets *et al.*, 2008), ou le modèle GR-SD (De Lavenne *et al.*, 2019). Un modèle national basé sur une approche de type J2000 pourrait avoir un intérêt, du fait de son maillage en unités irrégulières HRUs permettant une représentation plus explicite de la variabilité de l'occupation du sol, et parce qu'il intègre des aménagements anthropiques et les grands usages de l'eau (irrigation, eau potable, production d'hydroélectricité). Cette vision intégrée des socio-hydrosystèmes à l'échelle nationale pourrait permettre de réaliser des reconstructions historiques (avec entrée en service progressive des aménagements, occupation des sols variable dans le temps) et / ou des projections futures.

L'échelle nationale est une échelle d'intérêt naturelle pour l'appui aux politiques publiques, et donc correspond à une demande nette de plusieurs financeurs de la recherche, en France et en Europe. Cela peut être un projet collectif porteur, notamment en collaboration avec les autres équipes d'hydrologie d'Irstea qui travaillent déjà à l'échelle nationale. C'est également une piste d'intérêt pour les intercomparaisons de modèles, même s'il serait sans doute plus raisonnable de commencer par des bassins versants spécifiques.

Au-delà des enjeux techniques évidents pour le déploiement d'un modèle à l'échelle nationale, cette perspective ouvre aussi des questions scientifiques si l'on veut que le modèle ne soit pas réduit à un simple outil mais conserve un intérêt en tant qu'objet de recherche. Comment articuler le déploiement d'un modèle à l'échelle nationale (ou au-delà) avec une démarche orientée processus ? Dans une application en masse sur un grand nombre de bassins versants, on n'aura pas accès à la même quantité ni qualité de données que sur un bassin versant spécifique, et l'expertise sur les bassins est absente ou superficielle. Cela met en relief encore plus crûment le besoin d'avancer sur les méthodologies d'évaluation, et par conséquent de calage des modèles hydrologiques distribués, pour que les modèles puissent continuer à fournir *les bonnes réponses pour les bonnes raisons*.

5.5 Transfert vers les opérationnels

Irstea est institut de recherche appliquée avec un lien fort avec l’expertise et l’appui aux politiques publiques. Ce lien particulier devrait être maintenu lors de la fusion avec l’INRA. Dans ce contexte, la question du transfert de connaissances, méthodes et outils issus des résultats de la recherche se pose naturellement. Le transfert vers les opérationnels est aussi un des objectifs et une des grandes forces de l’OTHU.

Via l’OTHU je participe au transfert de connaissance à destination des opérationnels (Métropole de Lyon, Agence de l’Eau, autres collectivités locales, bureaux d’études), via notamment des journées techniques thématiques et la rédaction de fiches techniques. La méthodologie et le logiciel BaRatin sont également diffusés dans et pris en main par la communauté opérationnelle de l’hydrométrie en France et à l’étranger.

Les méthodes et logiciels que je développe dans le cadre de mon activité de recherche ont dès le départ été conçus pour être partagés, avec des collaborateurs scientifiques, mais aussi des acteurs techniques (bureaux d’étude), industriels ou gestionnaires (services de l’État, collectivités territoriales). Le choix de développer des outils open-source (logiciels libres) a aussi été motivé par cet intérêt. Les modèles hydrologiques que je développe ont maintenant atteint des niveaux de maturité suffisants pour que cette dissémination soit envisageable. Suite au projet Modélisation Distribuée du Rhône (2013-2016, Agence de l’Eau Rhône-Méditerranée-Corse, CNR) dont j’ai co-assuré la coordination, le modèle hydrologique J2000 Rhône a été transféré à la Compagnie Nationale du Rhône, qui souhaite l’utiliser pour réanalyser les étiages passés (Akouba, 2018) et pour estimer des projections de la ressource future sous changement climatique. D’autres projets de dissémination du modèle J2000-Rhône sont en cours de maturation. Je prévois d’accompagner ces utilisateurs et d’élargir cette dissémination à d’autres acteurs, et asseoir ainsi mon expertise.

5.6 Remarques finales

Le 3 octobre 1988, j’avais 10 ans et j’habitais à Nîmes. En regardant depuis la fenêtre de ma chambre la rue se transformer en rivière à l’occasion d’un épisode cévenol particulièrement intense (450 mm de pluie en six heures, voir Figure 5.1), j’étais loin de me douter que je ferais de l’étude du phénomène naturel de la transformation de la pluie en débit mon métier. Plusieurs décennies plus tard, je mesure le chemin parcouru et je me dis que j’ai fait (ou que le hasard m’a fait faire) les bons choix. L’hydrologie est une science passionnante, qui donne lieu à des développements théoriques fondamentaux tout en étant profondément ancrée dans la vie réelle, et touchant chaque individu au quotidien.



FIGURE (5.1) Le 3 octobre 1988 à Nîmes - rond point de la Sernam. Photo : Midi Libre

Bibliographie

- M. ADAMOVIC : *Development of a data-driven distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. Application to the Ardèche catchment, France.* Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2014.
- M. ADAMOVIC, F. BRANGER, I. BRAUD et S. KRALISCH : Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. *Journal of Hydrology*, 541, Part A:173–189, 2016.
- M. ADAMOVIC, I. BRAUD, F. BRANGER et J. KIRCHNER : Assessing the simple dynamical systems approach in a mediterranean context : application to the ardèche catchment (france). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19:2427–2449, 2015.
- N. ADDOR, G. NEARING, C. PRIETO, A.J. NEWMAN, N. LE VINE et M.P. CLARK : A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space. *Water Resources Research*, 54(11):8792–8812, 2018.
- Y. AKOUBA : Étude des étiages du bassin versant du Rhône. Mémoire de D.E.A., Sorbonne Université Master 2 Sciences de l’Univers, Environnement, Ecologie Parcours Hydrologie-Hydrogéologie, 2018.
- R.G. ALLEN, L.S. PEREIRA, D. RAES et M. SMITH : Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rapport technique, FAO irrigation and drainage paper 56, 1998.
- V. ANDRÉASSIAN, N. LE MOINE, C. PERRIN, M.-H. RAMOS, L. OUDIN, T. MATHEVET, J. LERAT et L. BERTHET : All that glitters is not gold : The case of calibrating hydrological models. *Hydrological Processes*, 26(14):2206–2210, 2012.
- V. ANDRÉASSIAN, C. PERRIN, L. BERTHET, N. LE MOINE, J. LERAT, C. LOUMAGNE, L. OUDIN, T. MATHEVET, M.-H. RAMOS et A. VALÉRY : Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10):1757–1764, 2009.
- R.M. ARGENT : An overview of model integration for environmental applications - components, frameworks and semantics. *Environmental Modelling and Software*, 19:219–234, 2004.
- J.G. ARNOLD et N. FOHRER : Swat2000 : Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3):563–572, 2005/// 2005.
- C. BANDARAGODA, D.G. TARBOTON et R. WOODS : Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project. *Journal of Hydrology*, 298(1-4):178–201, 2004.

- J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI et P. HERRERO : Urban stormwater management by green infrastructure : Design and comparison of three scenarios. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 8:1084–1093, 2018.
- K. BEVEN : Changing ideas in hydrology : the case of physically based models. *Journal of Hydrology*, 105:157–172, 1989.
- K. BEVEN : Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16(1):41–51, 1993.
- K. BEVEN : How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1):1–12, 2001.
- K. J. BEVEN : Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2):203–213, 2000.
- G. BLÖSCHL : Scaling in hydrology. *Hydrological processes*, 15:709–711, 2001.
- J. BOLIBAR : *Estimation des contributions glaciaires aux apports hydrologiques sur le bassin versant du Rhône : temps présent et futur*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, en cours.
- F. BRANGER : *Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagements hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides. Application au bassin versant de la Fontaine du Theil (Ille-et-Vilaine)*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007.
- F. BRANGER, I. BRAUD, S. DEBIONNE, P. VIALLET, J. DEHOTIN, H. HENINE, Y. NEDELEC et S. ANQUETIN : Towards multi-scale integrated hydrological models using the liquid framework. overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling and Software*, 25:1672–1681, 2010.
- F. BRANGER, I. BRAUD, P. VIALLET et S. DEBIONNE : Modelling the influence of landscape management practices on the hydrology of a small agricultural catchment. In S.S.Y. WANG, M. KAWAHARA, K.P. HOLTZ, T. TSUJIMOTO et Y. TODA, éditeurs : *8th International Conference on HydroScience and Engineering*, pages 586–594, Nagoya, Japan, 2008.
- F. BRANGER, I. GOUTTEVIN, F. TILMANT, T. CIPRIANI, C. BARACHET, M. MONTGINOUL, C. LE GROS, E. SAUQUET, I. BRAUD et E. LEBLOIS : Un modèle hydrologique distribué pour étudier l'impact du changement global sur la ressource en eau dans le bassin versant du Rhône. In *3ème conférence internationale IS Rivers, 4-8 juin 2018, Lyon, France*, 2018.
- F. BRANGER, I. GOUTTEVIN, F. TILMANT, T. CIPRIANI, C. BARACHET, M. MONTGINOUL, C. LE GROS, E. SAUQUET, I. BRAUD et E. SAUQUET : Modélisation hydrologique distribuée du Rhône : rapport final. Rapport technique, Irstea - Agence de l'Eau RMC, CNR, 2016.
- F. BRANGER, S. JANKOWFSKY, O. VANNIER, P. VIALLET, S. DEBIONNE et I. BRAUD : Use of open-source GIS for the pre-processing of distributed hydrological models. In E. BOCHER et M. NETELER, éditeurs : *Geospatial free and open source software in the 21st century*, pages 35–48. Springer, 2012a. ISBN 978-3-642-10594-4.
- F. BRANGER, S. KERMADI, C. JACQUEMINET, K. MICHEL, M. LABBAS, P. KRAUSE, S. KRALLISCH et I. BRAUD : Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach. *Journal of Hydrology*, 505:312–325, 2013.

- F. BRANGER, S. KERMADI, P. KRAUSE, M. LABBAS, C. JACQUEMINET, C. MICHEL, I. BRAUD et S. KRALISCH : Investigating the impact of two decades of urbanization on the water balance of the yzeron peri-urban catchment, france. *In* A. SEPPELT, A. VOINOV, S. LANGE et D. BANKAMP, éditeurs : *Proceedings of the iEMSs Sixth Biennial Meeting : International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2012)*, volume <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>, Leipzig, Germany, July 2012 2012b. International Environmental Modelling and Software Society.
- F. BRANGER et H. MCMILLAN : Deriving hydrological signatures from soil moisture data. *Hydrological Processes*, submitted, 2019.
- F. BRANGER, F. THOLLET, M. CROCHEMORE, M. POISBEAU, N. RAIDELET, P. FARISSIER, M. LAGOUY, G. DRAMAIS, J. LE COZ, A. GUÉRIN, G. TALLEC, J. PESCHARD, N. MATHYS, S. KLOTZ et M. TOLSA : Le projet Base de Données pour les Observatoires en Hydrologie : un outil pour la bancarisation, la gestion et la mise à disposition des données issues des observatoires hydrologiques de long terme à Irstea. - Database for hydrological observatories : a tool for storage, management and access of data produced by the long-term hydrological observatories of Irstea. *La Houille Blanche*, 1:33–38, 2014.
- I. BRAUD, J. ANDRIEU, P.-A. AYRAL, C. BOUVIER, F. BRANGER, J. CARREAU, G. DELRIEU, J. DOUVINET, R. FREYDIER, E. LEBLOIS, J. LE COZ, P. MARTIN, G. NORD, N. PATRIS, S. PEREZ, B. RENARD, J.-L. SEIDEL et J.-P. VANDERVAERE : Floodscale : Observation et modélisation hydrométéorologique multi-échelles pour la compréhension et la simulation des crues éclair. Rapport scientifique final. resereport, ANR-2011 BS56 027 01, 2016.
- I. BRAUD, P.-A. AYRAL, C. BOUVIER, F. BRANGER, G. DELRIEU, J. LE COZ, G. NORD, J.-P. VANDERVAERE, S. ANQUETIN, M. ADAMOVIC, J. ANDRIEU, C. BATIOU, B. BODEVILLAIN, P. BRUNET, J. CARREAU, A. CONFOLAND, J.-F. DIDON-LESCOT, J.-M. DOMERGUE, J. DOUVINET, G. DRAMAIS, R. FREYDIER, S. GÉRARD, J. HUZA, E. LEBLOIS, O. LE BOURGEOIS, R. LE BOURSICAUD, P. MARCHAND, P. MARTIN, L. NOTTALE, N. PATRIS, B. RENARD, J.-L. SEIDEL, J.-D. TAUPIN, O. VANNIER, B. VINCENDON et A. WIJBRANS : Multi-scale hydro-meteorological observation and modelling for flash flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9):3733–3761, 2014.
- I. BRAUD, P. BREIL, F. THOLLET, M. LAGOUY, F. BRANGER, C. JACQUEMINET, S. KERMADI et K. MICHEL : Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485(0):5–23, 2013. ISSN 0022-1694.
- I. BRAUD, K. CHANCIBAULT, S. DEBIONNE, G. LIPEME KOUYI, B. SARRAZIN, C. JACQUEMINET, H. ANDRIEU, D. BÉAL, E. BOCHER, H. BOUTAGHANE, F. BRANGER, P. BREIL, B. CHOCAT, J. COMBY, J. DEHOTIN, G. DRAMAIS, C. FURUSHO, M. GAGNAGE, E. GONZALEZ-SOSA, L. GROSPRÊTRE, A. HONEGGER, S. JANKOWFSKY, T. JOLIVEAU, S. KERMADI, M. LAGOUY, E. LEBLOIS, J.-Y. MARTIN, P.-O. MAZAGOL, K. MICHEL, N. MOLINES, M.-L. MOSINI, C. PUECH, F. RENARD, F. RODRIGUEZ, L. SCHMITT, F. THOLLET et P. VIALLET : The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) : experimental setup, modelling strategy and first results. *In Proceedings of the 7th Novatech 2010 Conference*, page 10pp, Lyon, France, June 28-July 1 2010 2010.
- L. BREUER, J.A. HUISMAN, P. WILLEMS, H. BORMANN, A. BRONSTERT, B. CROKE, H.-G. FREDE, T. GRÄFF, L. HUBRECHTS, A. J. JAKEMAN, G. KITE, J. LANINI, G. LEAVESLEY, D. LETTENMAIER, G. LINDSTRÖM, J. SEIBERT, M. SIVAPALAN et N. R. VINEY : Assessing

- the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (LUCHEM) I : Model intercomparison with current land use. *Advances in Water Resources*, 32:129–146, 2009.
- C.A. BUAHIN et J.S. HORSBURGH : Advancing the Open Modeling Interface (OpenMI) for integrated water resources modeling. *Environmental Modelling and Software*, 108:133–153, 2018.
- S. BUIS, A. PIACENTINI et D. DÉCLAT : Palm : a computational framework for assembling high-performance computing applications. *Concurrency : practice and experience*, 18:231–245, 2006.
- L. CAILLOUET, J.-P. VIDAL, E. SAUQUET et B. GRAFF : Probabilistic precipitation and temperature downscaling of the Twentieth Century Reanalysis over France. *Climate of the Past*, 12(3):635–662, 2016.
- L. CAILLOUET, J.-P. VIDAL, E. SAUQUET, B. GRAFF et J.-M. SOUBEYROUX : SCOPE Climate : A 142-year daily high-resolution ensemble meteorological reconstruction dataset over France. *Earth System Science Data*, 11(1):241–260, 2019.
- T. CIPRIANI et E. SAUQUET : Altération de l’hydrologie des cours d’eau par des ouvrages hydrauliques. Rapport technique, Irstea - Onema, 2014.
- Martyn P. CLARK, Andrew G. SLATER, David E. RUPP, Ross A. WOODS, Jasper A. VRUGT, Hoshin V. GUPTA, Thorsten WAGENER et Lauren E. HAY : Framework for Understanding Structural Errors (FUSE) : A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 44(12), 2008.
- M.P. CLARK, M.F.P. BIERKENS, L. SAMANIEGO, R.A. WOODS, R. UIJLENHOET, K.E. BENNETT, V.R.N. PAUWELS, X. CAI, A.W. WOOD et C.D. PETERS-LIDARD : The evolution of process-based hydrologic models : Historical challenges and the collective quest for physical realism. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7):3427–3440, 2017.
- M.P. CLARK, H.K. McMILLAN, D.B.G. COLLINS, D. KAVETSKI et R.A. WOODS : Hydrological field data from a modeller’s perspective : Part 2. Process-based evaluation of model hypotheses. *Hydrological Processes*, 25:523–543, 2011.
- M.P. CLARK, D.E. RUPP, R.A. WOODS, H.J. Tromp-van MEERVELD, N.E. PETERS et J.E. FREER : Consistency between hydrological models and field observations : Linking processes at the hillslope scale to hydrological responses at the watershed scale. *Hydrological Processes*, 23(2):311–319, 2009.
- M.P. CLARK, B. SCHAEFLI, S.J. SCHYMANSKI, L. SAMANIEGO, C.H. LUCE, B.M. JACKSON, J.E. FREER, J.R. ARNOLD, R.D. MOORE, E. ISTANBULLUOGLU et S. CEOLA : Improving the theoretical underpinnings of process-based hydrologic models. *Water Resources Research*, 52(3):2350–2365, 2016.
- C. COUSSOT : Assessing and modelling hydrological behaviours of mediterranean catchments using discharge recession analysis. Mémoire de D.E.A., Msc Management of Hydrometeorological Hazards - University of Grenoble - University of Volos, 2015.
- O. DAVID, J.C. ASCOUGH, W. LLOYD, T.R. GREEN, K.W. ROJAS, G.H. LEAVESLEY et L.R. AHUJA : A software engineering perspective on environmental modeling framework design : The Object Modeling System. *Environmental Modelling and Software*, 39:201–213, 2013.

- T. DE BOER-EUSER, L. BOUAZIZ, J. DE NIEL, C. BRAUER, B. DEWALS, G. DROGUE, F. FENICIA, B. GRELIER, J. NOSSENT, F. PEREIRA, H. SAVENIJE, G. THIREL et P. WILLEMS : Looking beyond general metrics for model comparison - lessons from an international model intercomparison study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1):423–440, 2017.
- W.J. de LANGE, G.F. PRINSEN, J.C. HOOGEWOUDE, A.A. VELDHUIZEN, J. VERKAIK, G. ESSINK, P. van WALSUM, J. DELSMAN, J. HUNINK, H. MASSOP et T. KROON : An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis : The Netherlands Hydrological Instrument. *Environmental Modelling & Software*, 59:98 – 108, 2014.
- A. DE LAVENNE, V. ANDRÉASSIAN, G. THIREL, M.-H. RAMOS et C. PERRIN : A regularization approach to improve the stepwise calibration of a semi-distributed hydrological model. *Water Resources Research*, in revision, 2019.
- J. DEHOTIN : *Prise en compte de l'hétérogénéité des surfaces continentales dans la modélisation hydrologique distribuée. Exemple d'application avec des données du haut-bassin de la Saône.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- J. DETTY et K. MCGUIRE : Topographic control on shallow groundwater dynamics : implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment. *Hydrological Processes*, 24:2222–2236, 2010.
- A. DEVERES, J.-P. VIDAL, C. LAUVERNET, B. GRAFF et O. VANNIER : A framework for high-resolution meteorological reanalysis through offline data assimilation in an ensemble of downscaled reconstructions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, in revision, 2019.
- C. DODANE, T. JOLIVEAU et A. RIVIÈRE-HONEGGER : Simulating land use change to anticipate the becoming of a territory. Critical analysis of a geopropective experience in a peri-urban catchment (Yzeron, Lyon metropolitan area) [Simuler les évolutions de l'utilisation du sol pour anticiper le futur d'un territoire : Analyse critique d'une expérience de géopropective dans un bassin versant périurbain de l'agglomération lyonnaise]. *CyberGeo*, 2014, 2014.
- F. DOUSSIÈRE : *Projet de recherche sur la prévision des inondations. étude de la rivière ardèche.* Rapport technique, Cemagref HH Lyon, MEDD, 2007.
- A. DUCHARNE, R.D. KOSTER, M.J. SUAREZ, M. STIEGLITZ et P. KUMAR : A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model 2. Parameter estimation and model demonstration. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105 (D20):24823–24838, 2000.
- G. EDER, M. SIVAPALAN et H.-P. NACHTNEBEL : Modelling water balances in an Alpine catchment through exploitation of emergent properties over changing time scales. *Hydrological Processes*, 17:2125–2149, 2003.
- J. EECKMAN, S. NEPAL, P. CHEVALLIER, G. CAMENSULI, F. DELCLAUX, A. BOONE et A. DE ROUW : Comparing the ISBA and J2000 approaches for surface flows modelling at the local scale in the Everest region. *Journal of Hydrology*, 569:705–719, 2019.
- A. EFSTRATIADIS et D. KOUTSOYIANNIS : One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling : A review [Une décennie d'approches de calage multi-objectifs en modélisation hydrologique : Une revue]. *Hydrological Sciences Journal*, 55(1):58–78, 2010.

- T. EUSER, M. HRACHOWITZ, H.C. WINSEMIUS et H.H.G. SAVENIJE : The effect of forcing and landscape distribution on performance and consistency of model structures. *Hydrological Processes*, 29(17):3727–3743, 2015.
- T. EUSER, H. WINSEMIUS, M. HRACHOWITZ, F. FENICIA, S. UHLENBROOK et H. SAVENIJE : A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17:1893–1912, 2013.
- J.C. FABRE, X. LOUCHART, R. MOUSSA, C. DAGÈS, F. COLIN, M. RABOTIN, D. RACLOT, P. LAGACHERIE et Voltz M. : Openfluid : a software environment for modelling fluxes in landscapes. In *LANDMOD2010*, Montpellier, France, 2010. Symposcience. ISBN 978-2-7592-0859-3.
- F. FENICIA, D. KAVETSKI, P. REICHERT et C. ALBERT : Signature-domain calibration of hydrological models using approximate bayesian computation : Empirical analysis of fundamental properties. *Water Resources Research*, 54(6):3958–3987, 2018.
- F. FENICIA, D. KAVETSKI et H.H.G. SAVENIJE : Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling : 1. Motivation and theoretical development. *Water Resources Research*, 47(11), 2011.
- F. FENICIA, D. KAVETSKI, H.H.G. SAVENIJE et L. PFISTER : From spatially variable streamflow to distributed hydrological models : Analysis of key modeling decisions. *Water Resources Research*, 52(2):954–989, 2016.
- F. FENICIA, J.J. MCDONNELL et H.H.G. SAVENIJE : Learning from model improvement : On the contribution of complementary data to process understanding. *Water Resources Research*, 44(6), 2008a.
- F. FENICIA, H.H.G. SAVENIJE, P. MATGEN et L. PFISTER : A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 43(3), 2007.
- F. FENICIA, H.H.G. SAVENIJE, P. MATGEN et L. PFISTER : Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resources Research*, 44(1), 2008b.
- H. FEYEN, H. WUNDERLI, H. WYDLER et A. PAPRITZ : A tracer experiment to study flow paths of water in a forest soil. *Journal of Hydrology*, 225(3-4):155–167, 1999/12/6 1999.
- M. FINK, P. KRAUSE, S. KRALISCH, U. BENDE-MICHL et W. FLÜGEL : Development and application of the modelling system j2000-s for the eu-water framework directive. *Advances in Geosciences*, 11:123–130, 2007.
- A.B.M. FIROZ, A. NAUDITT, M. FINK et L. RIBBE : Quantifying human impacts on hydrological drought using a combined modelling approach in a tropical river basin in central Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1):547–565, 2018.
- M. FLURY, H. FLUHLER, W. A. JURY et J. LEUENBERGER : Susceptibility of Soils to Preferential Flow of Water - a Field-Study. *Water Resources Research*, 30(7):1945–1954, 1994.
- W.-A. FLÜGEL : Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9(3-4):423–436, 1995.

- V. FOUGERIT : Caractérisation des processus hydro-sédimentaires sur le bassin versant de l'Arvan (Savoie) et modélisation. Mémoire de seconde année, Ecole Centrale Paris, 2011.
- T. FRANCKE, S. FOERSTER, A. BROSINSKY, E. SOMMERER, J.A. LOPEZ-TARAZON, A. GÜNTNER, R.J. BATALLA et A. BRONSTERT : Water and sediment fluxes in Mediterranean mountainous regions : Comprehensive dataset for hydro-sedimentological analyses and modelling in a mesoscale catchment (River Isábena, NE Spain). *Earth System Science Data*, 10(2):1063–1075, 2018.
- R.A. FREEZE et R.L. HARLAN : Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 9(3):237–258, 1969.
- M. FUAMBA, F. BRANGER, I. BRAUD, E. BATCHABANI, P. SANZANA, B. SARRAZIN et S. JANKOWSKY : Value of distributed water level and soil moisture data in the evaluation of a distributed hydrological model : Application to the PUMMA model in the Mercier catchment (6.6 km²) in France. *Journal of Hydrology*, 569:753–770, 2019.
- J. GAILLARDET, I. BRAUD, F. HANKARD, S. ANQUETIN, O. BOUR, N. DORFLIGER, J.R. de DREUZY, S. GALLE, C. GALY, S. GOGO, L. GOURCY, F. HABETS, F. LAGGOUN, L. LONGUEVERGNE, T. LE BORGNE, F. NAAIM-BOUVET, G. NORD, V. SIMONNEAUX, D. SIX, T. TALLEC, C. VALENTIN, G. ABRIL, P. ALLEMAND, A. ARÈNES, B. ARFIB, L. ARNAUD, N. ARNAUD, P. ARNAUD, S. AUDRY, V.B. COMTE, C. BATIOU, A. BATAIS, H. BELLOT, E. BERNARD, C. BERTRAND, H. BESSIÈRE, S. BINET, J. BODIN, X. BODIN, L. BOITHIAS, J. BOUCHEZ, B. BOUDEVILLAIN, I.B. MOUSSA, F. BRANGER, J.J. BRAUN, P. BRUNET, B. CACERES, D. CALMELS, B. CAPPELAERE, H. CELLE-JEANTON, F. CHABAU, K. CHALIKAKIS, C. CHAMPOLLION, Y. COPARD, C. COTEL, P. DAVY, P. DELINE, G. DELRIEU, J. DEMARTY, C. DESSERT, M. DUMONT, C. EMBLANCH, J. EZZAHAR, M. ESTÈVES, V. FAVIER, M. FAUCHEUX, N. FILIZOLA, P. FLAMMARION, P. FLOURY, O. FOVET, M. FOURNIER, A.J. FRANCEZ, L. GANDOIS, C. GASCUEL, E. GAYER, C. GENTHON, M.F. GÉRARD, D. GILBERT, I. GOUTTEVIN, M. GRIPPA, G. GRUAU, A. JARDANI, L. JEANNEAU, J.L. JOIN, H. JOURDE, F. KARBOUT, D. LABAT, Y. LAGADEUC, E. LAJEUNESSE, R. LASTENNET, W. LAVADO, E. LAWIN, T. LEBEL, C. LE BOUTEILLER, C. LEGOUT, Y. LEJEUNE, E. LE MEUR, N. LE MOIGNE, J. LIONS, A. LUCAS, J.P. MALET, C. MARAIS-SICRE, J.C. MARÉCHAL, C. MARLIN, P. MARTIN, J. MARTINS, J.M. MARTINEZ, N. MASSEI, A. MAUCLERC, N. MAZZILLI, J. MOLÉNAT, P. MOREIRA-TURCQ, E. MOUGIN, S. MORIN, J.N. NGROUPAYOU, G. PANTHOU, C. PEUGEOT, G. PICARD, M.C. PIERRET, G. POREL, A. PROBST, J.L. PROBST, A. RABATEL, D. RACLOT, L. RAVANEL, F. REJIBA, P. RENÉ, O. RIBOLZI, J. RIOTTE, A. RIVIÈRE, H. ROBAIN, L. RUIZ, J.M. SANCHEZ-PEREZ, W. SANTINI, S. SAUVAGE, P. SCHOENEICH, J.L. SEIDEL, M. SEKHAR, O. SENGTAHEUANGHOUNG, N. SILVERA, M. STEINMANN, A. SORUCO, G. TALLEC, E. THIBERT, D.V. LAO, C. VINCENT, D. VIVILLE, P. WAGNON et R. ZITOUNA : OZCAR : The French network of critical zone observatories. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 2018.
- R. GARÇON : Overall rain-flow model for flood forecasting and pre-determination [modele global pluie-debit pour la previsio et la predetermination des crues]. *La Houille Blanche*, 54 (7-8):88–95, 1999.
- S. GHARARI, M. HRACHOWITZ, F. FENICIA, H. GAO et H. SAVENIJE : Using expert knowledge to increase realism in environmental system models can dramatically reduce the need for calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18:4839–4859, 2015.

- D. GOUTALAND, T. WINIARSKI, L. LASSABATERE, J.S. DUBÉ et R. ANGULO-JARAMILLO : Sedimentary and hydraulic characterization of a heterogeneous glaciofluvial deposit : Application to the modeling of unsaturated flow. *Engineering Geology*, 166:127–139, 2013.
- I. GOUTTEVIN, M. TURKO, F. BRANGER, E. LEBLOIS et J.-E. SICART : Amélioration de la modélisation hydrologique distribuée en conditions naturelles dans les alpes. Rapport technique, Irstea - Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2017.
- R.B. GRAYSON, I.D. MOORE et T.A. MCMAHON : Physically based hydrologic modeling : 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 28(10):2659–2666, 1992.
- L. GUDEFIN : Modélisation hydrologique spatialisée du bassin versant péri-urbain de la chézine avec le modèle j2000. Mémoire de D.E.A., Ecole des Mines d'Alès, option Management des Risques et Environnement - Risques Majeurs, 2013.
- N. GUICHONNET : Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône. Mémoire de D.E.A., ENGEES, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 2018.
- H. GUPTA, H. KLING, K. YILMAZ et G. MARTINEZ : Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377:80–91, 2009.
- H. GUPTA, T. WAGENER et Y. LIU : Reconciling theory with observations : elements of a diagnostic approach to model evaluation. *Hydrological Processes*, 22:3802–3813, 2008.
- J. GÖTZINGER et A. BÁRDOSSY : Comparison of four regionalisation methods for a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 333(2-4):374–384, 2007.
- F. HABETS, A. BOONE, J. L. CHAMPEAUX, P. ETCHEVERS, L. FRANCHISTÉGUY, E. LEBLOIS, E. LEDOUX, P. LE MOIGNE, E. MARTIN, S. MOREL, J. NOILHAN, P. QUINTANA SEGUÍ, F. ROUSSET-REGIMBEAU et P. VIENNOT : The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(D6), 2008.
- C. HEDLEY et I. YULE : A method for spatial prediction of daily soil water status for precise irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 96:1737–1745, 2009.
- F. HENDRICKX : Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhône [Impact of climate change on the hydrology of the Rhône catchment]. *Hydroécologie appliquée*, 13:77–100, 2001.
- H.J. HENRIKSEN, L. TROLDBORG, P. NYEGAARD, T.O. SONNENBORG, J.C. REFSGAARD, B. MADSEN et H.J. HENRIKSEN : Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280(1-4):52–71, 2003.
- I. HORNER : Quantification des incertitudes hydrométriques et bilans hydrologiques sur le bassin versant de l'Yzeron (ouest lyonnais). Mémoire de D.E.A., AgroCampus Ouest, 2014.
- I. HORNER : *Evaluation-diagnostic de modèles distribués à l'aide des signatures hydrologiques : construction d'une méthodologie multi-échelles incorporant les incertitudes de mesure*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, en cours.

- I. HORNER, F. BRANGER, H. MCMILLAN, O. VANNIER et I. BRAUD : Characterizing and quantifying snow processes using hydrological signatures : application to the Southern Sierra CZO catchments (California, USA). *Hydrological processes*, in preparation, 2019a.
- I. HORNER, F. BRANGER, H. MCMILLAN, O. VANNIER et I. BRAUD : Using hydrological signatures to improve the parameter specification of a distributed model. *in preparation*, 2019b.
- I. HORNER, J. LE COZ, B. RENARD et F. BRANGER : The impact of control sensitivity on hydrometric uncertainties [impact de la sensibilité des contrôles hydrauliques sur les incertitudes hydrométriques]. *Howille Blanche*, 2018-February(1):27–35, 2018a.
- I. HORNER, B. RENARD, J. LE COZ, F. BRANGER, H.K. MCMILLAN et G. PIERREFEU : Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*, 54(3):1952–1976, 2018b.
- J.S. HORSBURGH, A.K. AUFDENKAMPE, E. MAYORGA, K.A. LEHNERT, L. HSU, L. SONG, A.S. JONES, S.G. DAMIANO, D.G. TARBOTON, D. VALENTINE, I. ZASLAVSKY et T. WHITENACK : Observations Data Model 2 : A community information model for spatially discrete Earth observations. *Environmental Modelling and Software*, 79:55–74, 2016.
- J.S. HORSBURGH, D.G. TARBOTON, D.R. MAIDMENT et I. ZASLAVSKY : A relational model for environmental and water resources data. *Water Resources Research*, 44(5), 2008.
- J.S. HORSBURGH, D.G. TARBOTON, D.R. MAIDMENT et I. ZASLAVSKY : Components of an environmental observatory information system. *Computers and Geosciences*, 37(2):207–218, 2011.
- M. HRACHOWITZ et M.P. CLARK : Hess opinions : The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8):3953–3973, 2017.
- M. HRACHOWITZ, O. FOVET, L. RUIZ, T. EUSER, S. GHARARI, R. NIJZINK, J. FREER, H. H. G. SAVENIJE et C. GASCUEL-ODOUX : Process consistency in models : The importance of system signatures, expert knowledge, and process complexity. *Water Resources Research*, 50(9):7445–7469, 2014.
- M. HRACHOWITZ, H.H.G. SAVENIJE, G. BLÖSCHL, J.J. MCDONNELL, M. SIVAPALAN, J.W. POMEROY, B. ARHEIMER, T. BLUME, M.P. CLARK, U. EHRET, F. FENICIA, J.E. FREER, A. GELFAN, H.V. GUPTA, D.A. HUGHES, R.W. HUT, A. MONTANARI, S. PANDE, D. TETZLAFF, P.A. TROCH, S.A. UHLENBROOK, T. WAGENER, H.C. WINSEMIUS, R.A. WOODS, E. ZEHE et C. CUDENNEC : A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6):1198–1255, 2013.
- P. HUANG : *Un cadre méthodologique pour l'appréciation des vulnérabilités des modes de gestion des réserves sous changement global – Application au lac de l'Oule (Pyrénées)*. Thèse de doctorat, Irstea - Université de Grenoble, en cours.
- J. HUZA : Assessment of the hydrological functioning of the ardèche catchment using a distributed modelling approach. Mémoire de D.E.A., University of Wageningen, Netherlands, 2013.

- H. HÉNINE : *Couplage des processus hydrologiques reliant parcelles agricoles drainées, collecteurs enterrés et émissaire à surface libre : intégration à l'échelle du bassin versant*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2010.
- V.Y. IVANOV, E.R. VIVONI, R.L. BRAS et D. ENTEKHABI : Catchment hydrologic response with a fully distributed triangulated irregular network model. *Water Resources Research*, 40:W11102, 2004a.
- V.Y. IVANOV, E.R. VIVONI, R.L. BRAS et D. ENTEKHABI : Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology : a fully-distributed physically-based approach. *Journal of Hydrology*, 298(1-4):80–111, 2004b.
- C. JACQUEMINET, S. KERMADI, K. MICHEL, D. BÉAL, M. GAGNAGE, F. BRANGER, S. JANKOWFSKY et I. BRAUD : Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments : Application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *Journal of Hydrology*, 485:68–83, 2013.
- A. J. JAKEMAN et G. HORNBERGER : How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. *Water Resources Research*, 29(8):2637–2649, 1993.
- A.J. JAKEMAN, R.A. LETCHER et J.P. NORTON : Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling and Software*, 21(5):602–614, 2006.
- A. JANDOT : Développement et évaluation d'une modélisation hydrologique simplifiée sur le bassin versant de l'Yzeron dans le cadre du projet avupur. Mémoire de D.E.A., ENSIACET, 2010.
- S. JANKOWFSKY : *Understanding and modelling of hydrological processes in small peri-urban catchments using an object-oriented and modular distributed approach. Application to the Chaudanne and Mercier sub-catchments (Yzeron catchment, France). Compréhension et modélisation des processus hydrologiques dans de petits bassins péri-urbains à l'aide d'une approche de modélisation distribuée orientée-objet et modulaire. Application aux sous-bassins de la Chaudanne et du Mercier (bassin de l'Yzeron, France)*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- S. JANKOWFSKY, F. BRANGER, I. BRAUD, J. GIRONAS et F. RODRIGUEZ : Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments : Application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes*, 27(25):3747–3761, 2013.
- S. JANKOWFSKY, F. BRANGER, I. BRAUD, F. RODRIGUEZ, S. DEBIONNE et P. VIALLET : Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments : Development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models. *Journal of Hydrology*, 517:1056–1071, 2014.
- T.C. JOHNS, J.-F. ROYER, I. HÖSCHEL, H. HUEBENER, E. ROECKNER, E. MANZINI, W. MAY, J.-L. DUFRESNE, O.H. OTTERÅ, D.P. van VUUREN, D. Salas y MELIA, M.A. GIORGETTA, S. DENVIL, S. YANG, P.G. FOGGI, J. KÖRPER, J.F. TJIPUTRA, E. STEHFEST et C.D. HEWITT : Climate change under aggressive mitigation : The ENSEMBLES multi-model experiment. *Climate Dynamics*, 37(9-10):1975–2003, 2011.
- J. JOUZEL, G. OUZEAU, M. DÉQUÉ, M. JOUINI, S. PLANTON, R. VAUTARD et M. VRAC : Le climat de la France au XXIème siècle. Scénarios régionalisés – Édition 2014 pour la métropole

- et les régions d'outre-mer. Rapport technique, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2014.
- D. KAVETSKI, G. KUCZERA et S.W. FRANKS : Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling : 1. theory. *Water Resources Research*, 42(3):W03407, 2006a.
- D. KAVETSKI, G. KUCZERA et S.W. FRANKS : Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling : 2. application. *Water Resources Research*, 42(3):W03408, 2006b.
- J.E. KIANG, C. GAZOORIAN, H. MCMILLAN, G. COXON, J. LE COZ, I.K. WESTERBERG, A. BELLEVILLE, D. SEVREZ, A.E. SIKORSKA, A. PETERSEN-ØVERLEIR, T. REITAN, J. FREER, B. RENARD, V. MANSANAREZ et R. MASON : A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation. *Water Resources Research*, 54(10):7149–7176, 2018.
- S.S.H. KIM, D. DUTTA, C.A. EGAN, J. DUGGE, R. SINGH, G.P. DAVIS et J.M. RAHMAN : Custom functionality and integrative approaches for hydrological modelling tools for water resources planning and management. *Journal of Hydroinformatics*, 17(1):75–89, 2015.
- J.W. KIRCHNER : A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. *Hydrological Processes*, 17(4):871–874, 2003. cited By 25.
- J.W. KIRCHNER : Getting the right answers for the right reasons : link measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42:W03S04, 2006.
- J.W. KIRCHNER : Catchments as simple dynamical systems; catchment characterization, rainfall-runoff modelling, and doing hydrology backward. *Water Resources Research*, 45:W02429, 2009.
- V. KLEMEŠ : Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology*, 65(1-3):1–23, 1983.
- V. KLEMEŠ : Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1):13–24, 1986.
- S. KRALISCH, P. KRAUSE, M. FINK, C. FISCHER et W.-A. FLÜGEL : Component based environmental modelling using the JAMS framework. In L. OXLEY et D. KULASIRI, éditeurs : *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation*, pages 812–818. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2007 2007.
- P. KRAUSE : Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27:663–673, 2002.
- P. KRAUSE, F. BASE, U. BENDE-MICHL, M. FINK, W. FLUGEL et B. PFENNING : Multiscale investigations in a mesoscale catchment - hydrological modelling in the Gera catchment. *Advances in Geosciences*, 9:53–61, 2006.
- P. KRAUSE, D. BOYLE et F.d BÄSE : Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5:89–97, 2005.
- G. KRINNER, N. VIOVY, N. de NOBLET-DUCOUDRÉ, J. OGÉE, J. POLCHER, P. FRIEDLINGSTEIN, P. CIAIS, S. SITCH et I.C. PRENTICE : A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1):1–33, 2005.

- A. KUENTZ : *Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance. Recherches historiques et reconstitutions*. Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), 2013.
- R. KUMAR, L. SAMANIEGO et S. ATTINGER : Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. *Water Resources Research*, 49(1):360–379, 2013.
- M. LABBAS : *Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales. Application au bassin de l'Yzeron (130 km²)*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2015.
- M. LABBAS, F. BRANGER et I. BRAUD : Development and evaluation of a periurban distributed hydrological model - Application to the Yzeron catchment (150 km²) [Développement et évaluation d'un modèle hydrologique distribué pour des bassins périurbains - Application au bassin de l'Yzeron (150 km²)]. *La Houille Blanche*, 5:84–91, 2015.
- S. LARABI, A. ST-HILAIRE, F. CHEBANA et M. LATRAVERSE : Multi-criteria process-based calibration using functional data analysis to improve hydrological model realism. *Water Resources Management*, 32(1):195–211, 2018.
- C. LAUVERNET, J.-M. BRANKART, F. CASTRUCCIO, G. BROQUET, P. BRASSEUR et J. VERRON : A truncated Gaussian filter for data assimilation with inequality constraints : Application to the hydrostatic stability condition in ocean models. *Ocean Modelling*, 27(1-2):1–17, 2009.
- J. LE COZ, B. RENARD, L. BONNIFAIT, F. BRANGER et R. LE BOURSICAUD : Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : A bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509:573–587, 2014.
- G.H. LEAVESLEY, S.L. MARKSTROM, M.S. BREWER et R.J. VIGER : The modular modeling system (mms) - the physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management. *Water, Air and Soil Pollution*, 90:303–311, 1996.
- G.H. LEAVESLEY, S.L. MARKSTROM, P.J. RESTREPO et R.J. VIGER : A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 16:173–187, 2002.
- E. LEBLOIS et J.-D. CREUTIN : Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field : Adaptation of the turning band method. *Water Resources Research*, 49(6):3375–3387, 2013.
- R. LEY, H. HELLEBRAND, M.C. CASPER et F. FENICIA : Comparing classical performance measures with signature indices derived from flow duration curves to assess model structures as tools for catchment classification. *Hydrology Research*, 47(1):1–14, 2016.
- G. LIPEME KOUYI, D. FRAISSE, N. RIVIÈRE, V. GUINOT et B. CHOCAT : One-dimensional modelling of the interactions between heavy rainfall-runoff in an urban area and flooding flows from sewer networks and rivers. *Water Science and Technology*, 60(4):927–934, 2009.
- J.D. LUNDQUIST, J.W. ROCHE, H. FORRESTER, C. MOORE, E. KEENAN, G. PERRY, N. CRISTEA, B. HENN, K. LAPO, B. MCGURK, D.R. CAYAN et M.D. DETTINGER : Yosemite Hydroclimate Network : Distributed stream and atmospheric data for the Tuolumne River watershed and surroundings. *Water Resources Research*, 52(9):7478–7489, 2016. cited By 6.

- A.R. MACHADO, E. WENDLAND et P. KRAUSE : Hydrologic Simulation for Water Balance Improvement in an Outcrop Area of the Guarani Aquifer System. *Environmental Processes*, 3(1):19–38, 2016.
- C. MAGAND : *Impacts du changement climatique sur l'hydrologie de la Durance. Incertitudes liées aux choix de modélisation*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2014.
- C. MAGAND, A. DUCHARNE, F. TILMANT, N. LE MOINE, E. SAUQUET, T. MATHEVET, J.-P. VIDAL et C. PERRIN : Building hybrid near-surface reanalysis adapted to mountainous regions : Example of the DuO product over the Durance basin, France [Hybridation de réanalyses météorologiques de surface pour les zones de montagne : Exemple du produit DuO sur le bassin de la Durance]. *Houille Blanche*, 3:77–85, 2018.
- R.M. MAXWELL et N.L. MILLER : Development of a coupled land surface and groundwater model. *Journal of Hydrometeorology*, 6(3):233–247, 2005.
- J.J. McDONNELL, M. SIVAPALAN, K. VACHÉ, S. DUNN, G. GRANT, R. HAGGERTY, C. HINZ, R. HOOPER, J. KIRCHNER, M.L. RODERICK, J. SELKER et M. WEILER : Moving beyond heterogeneity and process complexity : A new vision for watershed hydrology. *Water Resources Research*, 43(7), 2007.
- H. McMILLAN, D. BOOKER et C. CATTOEN : Validation of a national hydrological model. *Journal of Hydrology*, 541:800–815, 2016.
- H. McMILLAN, M. GUEGUEN, E. GRIMON, R. WOODS, CLARK et D. RUPP : Spatial variability of hydrological processes and model structure diagnostic in a 50 km² catchment. *Hydrological Processes*, 28:4896–4913, 2014.
- H. McMILLAN, D. TETZLAFF, M. CLARK et C. SOULSBY : Do time-variable tracers aid the evaluation of hydrological model structure? A multimodel approach. *Water Resources Research*, 48:W05501, 2012.
- H. McMILLAN, I. WESTERBERG et F. BRANGER : Five guidelines for selecting hydrological signatures. *Hydrological Processes*, 31(26):4757–4761, 2017.
- H.K. McMILLAN, M.P. CLARK, W.B. BOWDEN, M. DUNCAN et R.A. WOODS : Hydrological field data from a modeller's perspective : Part 1. Diagnostic tests for model structure. *Hydrological Processes*, 25:511–522, 2011.
- A. MONTANARI, G. YOUNG, H.H.G. SAVENIJE, D. HUGHES, T. WAGENER, L.L. REN, D. KOUTSOYIANNIS, C. CUDENNEC, E. TOTH, S. GRIMALDI, G. BLÖSCHL, M. SIVAPALAN, K. BEVEN, H. GUPTA, M. HIPSEY, B. SCHAEFLI, B. ARHEIMER, E. BOEGH, S.J. SCHYMANSKI, G. DI BALDASSARRE, B. YU, P. HUBERT, Y. HUANG, A. SCHUMANN, D.A. POST, V. SRINIVASAN, C. HARMAN, S. THOMPSON, M. ROGGER, A. VIGLIONE, H. McMILLAN, G. CHARACKLIS, Z. PANG et V. BELYAEV : "Panta Rhei-Everything Flows" : Change in hydrology and society-The IAHS Scientific Decade 2013-2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6):1256–1275, 2013.
- R. MOUSSA, N. CHAHINIAN et C. BOCQUILLON : Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment - Model construction and multi-site validation. *Journal of Hydrology*, 337(1-2):35–51, 2007.
- J.E. NASH et J.V. SUTCLIFFE : River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology*, 167(1-4):167–174, 1970.

- S. NEPAL : Impacts of climate change on the hydrological regime of the Koshi river basin in the Himalayan region. *Journal of Hydro-Environment Research*, 10:76–89, 2016.
- S. NEPAL, W.-A. FLÜGEL, P. KRAUSE, M. FINK et C. FISCHER : Assessment of spatial transferability of process-based hydrological model parameters in two neighbouring catchments in the Himalayan Region. *Hydrological Processes*, 31(16):2812–2826, 2017.
- S. NEPAL, P. KRAUSE, W.-A. FLÜGEL, M. FINK et C. FISCHER : Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model. *Hydrological Processes*, 28(3):1329–1344, 2014.
- G. NORD, B. BOUDEVILLAIN, A. BERNE, F. BRANGER, I. BRAUD, G. DRAMAS, S. GÉRARD, J. LE COZ, C. LEGOÛT, G. MOLINIÉ, J. VAN BAELEN, J.-P. VANDERVAERE, J. ANDRIEU, C. AUBERT, M. CALIANNO, G. DELRIEU, J. GRAZIOLI, S. HACHANI, I. HORNER, J. HUZA, R. LE BOURSICAUD, T.H. RAUPACH, A.J. TEULING, M. UBER, B. VINCENDON et A. WIJBRANS : A high space-time resolution dataset linking meteorological forcing and hydro-sedimentary response in a mesoscale Mediterranean catchment (Auzon) of the Ardèche region, France. *Earth System Science Data*, 9(1):221–249, 2017. cited By 6.
- OGC : WaterML 2.0, 2012. <https://www.opengeospatial.org/standards/waterml>.
- N. ORESKES, K. SHRADER-FRECHETTE et K. BELITZ : Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263:641–646, 1994.
- P. PERRAULT : *De l'origine des fontaines*. Pierre Le Petit, Imprimeur, Paris, 1674.
- P. POKHREL, H.V. GUPTA et T. WAGENER : A spatial regularization approach to parameter estimation for a distributed watershed model. *Water Resources Research*, 44(12), 2008.
- R. PUSHPALATHA, C. PERRIN, N. LE MOINE, T. MATHEVET et V. ANDRÉASSIAN : A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. *Journal of Hydrology*, 411(1-2):66–76, 2011.
- S. REED, V. KOREN, M. SMITH, Z. ZHANG, F. MOREDA et D.-J. SEO : Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, 298(1-4):27–60, 2004.
- J.C. REFSGAARD : Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198(1-4):69–97, 1997.
- J.C. REFSGAARD et H.J. HENRIKSEN : Modelling guidelines - terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27(1):71–82, 2004.
- J.C. REFSGAARD et J. KNUDSEN : Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7):2189–2202, 1996.
- R.S. REGAN, S.L. MARKSTROM, L.E. HAY, R.J. VIGER, P.A. NORTON, J.M. DRISCOLL et J.H. LAFONTAINE : Description of the National Hydrologic Model for use with the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS). Rapport technique, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap B9, 38 p., 2018.
- B. RENARD, D. KAVETSKI, G. KUCZERA, M. THYER et S.W. FRANKS : Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling : The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46(5):W055521, 2010.

- B. RENARD, D. KAVETSKI, E. LEBLOIS, M. THYER, G. KUCZERA et S.W. FRANKS : Toward a reliable decomposition of predictive uncertainty in hydrological modeling : Characterizing rainfall errors using conditional simulation. *Water Resources Research*, 47(11):W11516, 2011.
- B. RICHARD : *Couplage entre modélisation multi-agents et modélisation hydrologique distribuée pour évaluer l'impact des adaptations locales sur un hydrosystème*. Thèse de doctorat, AgroParisTech - Ecole doctorale ABIÉS, en cours.
- F. RODRIGUEZ, H. ANDRIEU et F. MORENA : A distributed hydrological model for urbanized areas - model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 351(3-4):268–287, 2008.
- A.E. ROSS, G. LIPEME KOUYI, T.D. FLETCHER, P. MOLLE, B. CHOCAT, M. CALLA, E. DALY et A. DELETIC : Hydraulic modeling of constructed reed-bed wetlands for stormwater treatment. *In 12th International Conference on URBAN DRAINAGE*, Porto Alegre/Brazil, 2011.
- J. SANZANA, P. and Gironás, I. BRAUD, J.-F. MUÑOZ, S. VICUÑA, S. REYES-PAECKE, F. de la BARRERA, F. BRANGER, F. RODRIGUEZ, X. VARGAS, N. HITSCHFELD et S. HORMAZÁBAL : Impact of urban growth and high residential irrigation on streamflow and groundwater levels in a peri-urban semiarid catchment. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, in press, 2019a.
- P. SANZANA : *Characterization and modeling of hydrological processes in periurban catchments located in the Piedmont of Santiago (Chile)*. Thèse de doctorat, Pontifica Universidad de Chile, 2018.
- P. SANZANA, J. GIRONÁS, I. BRAUD, F. BRANGER, F. RODRIGUEZ, X. VARGAS, N. HITSCHFELD, J.F. MUÑOZ, S. VICUÑA, A. MEJÍA et S. JANKOWFSKY : A GIS-based urban and peri-urban landscape representation toolbox for hydrological distributed modeling. *Environmental Modelling and Software*, 91:168–185, 2017.
- P. SANZANA, J. GIRONÁS, I. BRAUD, N. HITSCHFELD, F. BRANGER, F. RODRIGUEZ, M. FUAMBA, J. ROMERO, X. VARGAS, J.F. MUÑOZ, S. VICUÑA et A. MEJÍA : Decomposition of 2D polygons and its effect in hydrological models. *Journal of Hydroinformatics*, 21:104–122, 2019b.
- P. SANZANA, S. JANKOWFSKY, F. BRANGER, I. BRAUD, X. VARGAS, N. HITSCHFELD et J. GIRONAS : Computer-assisted mesh generation based on hydrological response units for distributed hydrological modeling. *Computers & Geosciences*, 57:32–43, 2013.
- B. SARRAZIN : *MNT et observations multi-locales du réseau hydrographique d'un petit bassin versant rural dans une perspective d'aide à la modélisation hydrologique spatialisée*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble - Spécialité Terre Univers Environnement, 2012.
- E. SAUQUET : *Projet R2D2 2050 : Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 ; rapport de fin de contrat*. Rapport technique, Programme Gestion et Impact du Changement Climatique du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie Convention de subvention 10-GCMOT-GICC-3-CVS-102., 2015.
- E. SAUQUET, Y. ARAMA, E. BLANC-COUTAGNE, H. BOUSCASSE, F. BRANGER, I. BRAUD, J.-F. BRUN, J. CHEREL, T. CIPRIANI, T. DATRY, A. DUCHARNE, F. HENDRICKX, B. HINGRAY, F. KROWICKI, I. LE GOFF, M. LE LAY, C. MAGAND, F. MALERBE, T. MATHEVET, A. MEZGHANI, C. MONTEIL, C. PERRIN, P. POULHE, A. ROSSI, R. SAMIE, P. STROSSER, G. THIREL,

- F. TILMANT et J.-P. VIDAL : Water allocation and uses in the Durance River basin in the 2050s : Towards new management rules for the main reservoirs ? [Le partage de la ressource en Eau sur la Durance en 2050 : vers une évolution du mode de gestion des grands ouvrages duranciens ?]. *Houille Blanche*, 2016-October(5):25–31, 2016.
- B. SCHAEFLI : Snow hydrology signatures for model identification within a limits-of-acceptability approach. *Hydrological Processes*, 30(22):4019–4035, 2016.
- B. SCHAEFLI et H.V. GUPTA : Do Nash values have value ? *Hydrological Processes*, 21(15):2075–2080, 2007.
- C. SCHWARTZE : Deriving hydrological response units (hrus) using a web processing service implementation based on grass gis. In *Proceedings on the Workshop Geoinformatics FCE CTU 2008*, 2008.
- J. SEIBERT et J.J. MCDONNELL : On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology : Use of soft data for multicriteria model calibration. *Water Resources Research*, 38(11):231–2314, 2002. cited By 342.
- M. SHAFII, N. BASU, J.R. CRAIG, S.L. SCHIFF et P. VAN CAPPELLEN : A diagnostic approach to constraining flow partitioning in hydrologic models using a multiobjective optimization framework. *Water Resources Research*, 53(4):3279–3301, 2017.
- M. SHAFII et B.A. TOLSON : Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives. *Water Resources Research*, 51(5):3796–3814, 2015.
- A.E. SIKORSKA et B. RENARD : Calibrating a hydrological model in stage space to account for rating curve uncertainties : general framework and key challenges. *Advances in Water Resources*, 105:51–66, 2017. cited By 8.
- M. SIVAPALAN : Prediction on ungauged basin : a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological Processes*, 17:3163–3170, 2003a.
- M. SIVAPALAN : Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale : is there a connection ? *Hydrological Processes*, 17:1037–1041, 2003b.
- M. SIVAPALAN, G. BLÖSCHL, L. ZHANG et R. A. VERTESSY : Downward approach to hydrological prediction. *Hydrological Processes*, 17:2101–2111, 2003.
- M. SIVAPALAN, H.H.G. SAVENIJE et G. BLÖSCHL : Socio-hydrology : A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8):1270–1276, 2012.
- M. SMITH, V. KOREN, Z. ZHANG, F. MOREDA, Z. CUI, Cosgrove ; B., N. MIZUKAMI, D. KITZMILLER, F. DING, S. REED, E. ANDERSON, J. SCHAAKE, Y. ZHANG, V. ANDRÉASSIAN, C. PERRIN, L. CORON, A. VALÉRY, B. KHAKBAZ, S. SOROOSHIAN, A. BEHRANGI, B. IMAM, K.-L. HSU, E. TODINI, G. COCCIA, C. MAZZETTI, E. ORTIZ ANDRES, F. FRANCÉS, I. OROZCO, R. HARTMAN, A. HENKEL, P. FICKENSCHER et S. STAGGS : The distributed model intercomparison project – Phase 2 : Experiment design and summary results of the western basin experiments. *Journal of Hydrology*, 507(0):300 – 329, 2013.
- M.B. SMITH, V. KOREN, Z. ZHANG, Y. ZHANG, S.M. REED, Z. CUI, F. MOREDA, B.A. COSGROVE, N. MIZUKAMI et E.A. ANDERSON : Results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. *Journal of Hydrology*, 418-419:17–48, 2012.

- M.B. SMITH, D.-J. SEO, V.I. KOREN, S.M. REED, Z. ZHANG, Q. DUAN, F. MOREDA et S. CONG : The distributed model intercomparison project (DMIP) : Motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 298(1-4):4–26, 2004.
- T. STEUDEL, R. BUGAN, H. KIPKA, B. PFENNIG, M. FINK, W. DE CLERCQ, W.-A. FLÜGEL et J. HELMSCHROT : Implementing contour bank farming practices into the J2000 model to improve hydrological and erosion modelling in semi-arid Western Cape Province of South Africa. *Hydrology Research*, 46(2):192–211, 2015.
- S. SUN, S. BARRAUD, F. BRANGER, I. BRAUD et H. CASTEBRUNET : Urban hydrologic trend analysis based on rainfall and runoff data analysis and conceptual model calibration. *Hydrological Processes*, 31(6):1349–1359, 2017.
- E. TODINI : Rainfall-runoff modeling - Past, present and future. *Journal of Hydrology*, 100(1-3):341–352, 1988.
- S. UHLENBROOK et A. SIEBER : On the value of experimental data to reduce the prediction uncertainty of a process-oriented catchment model. *Environmental Modelling & Software*, 20:19–32, 2005.
- O. VANNIER : *Apport de la modélisation hydrologique régionale à la compréhension des processus de crue en zone méditerranéenne*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- O. VANNIER, S. ANQUETIN et I. BRAUD : Investigating the role of geology in the hydrological response of Mediterranean catchments prone to flash-floods : Regional modelling study and process understanding. *Journal of Hydrology*, 541:158–172, 2016.
- J.-P. VIDAL, B. HINGRAY, C. MAGAND, E. SAUQUET et A. DUCHARNE : Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9):3651–3672, 2016.
- T. WAGENER : Evaluation of catchment models. *Hydrological Processes*, 17:3375–3378, 2003.
- M. WITT, S. STALL, R. DUERR, R. PLANTE, M. FENNER, R. DASLER, P. CRUSE, S. HOU, R. ULRICH et D. KINKADE : Connecting Researchers to Data Repositories in the Earth, Space, and Environmental Sciences. *Communications in Computer and Information Science*, 988:86–96, 2019.
- H. YAN, G. LIPEME KOUYI, C. GONZALEZ-MERCHAN, C. BECOUZE-LAREURE, C. SEBASTIAN, S. BARRAUD et J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI : Computational fluid dynamics modelling of flow and particulate contaminants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8):5347–5356, 2014.
- K. YILMAZ, H. GUPTA et T. WAGENER : A process-based diagnostic approach to model evaluation : Application to the nws distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, 44:W09417, 2008.
- A. ZEROUAL, M. MEDDI et A.A. ASSANI : Artificial neural network rainfall-discharge model assessment under rating curve uncertainty and monthly discharge volume predictions. *Water Resources Management*, 30(9):3191–3205, 2016.

Annexe A

Curriculum Vitae

Flora BRANGER
née le 05 Nov. 1978

Irstea Lyon-Villeurbanne

UR RiverLy

<https://orcid.org/0000-0003-4273-8938>

5 rue de la Doua CS 20244, 69625
Villeurbanne Cedex, France

e-mail:

Tel: +33 (0)4 72 20 89 24
Fax : +33 (0)4 78 47 78 75



[Institut national de recherche
en sciences et technologies
pour l'environnement et
l'agriculture](#)

Poste actuel et thèmes de recherche

Chercheur en modélisation hydrologique spatialisée à Irstea (depuis le 01/12/2006)

- Compréhension des processus hydrologiques dans les bassins versants
- Modélisation hydrologique spatialisée multi-échelles à travers le développement et l'utilisation de plate-formes de modélisation intégrée
- Quantification de l'influence du changement global et de l'anthropisation sur le comportement des bassins versants et la ressource en eau
- Lien entre données, expertise hydrologique et modèles
- Observation de terrain et gestion des données
- Incertitudes sur les séries hydrologiques

Interruptions de 6 mois d'octobre 2012 à mars 2013 et de mars à septembre 2017 pour congés maternité

Formation et expériences professionnelles

- 2015-2016 séjour scientifique d'un an au NIWA en Nouvelle-Zélande, sujet de recherche : « Evaluation multi-échelle de modèles hydrologiques distribués en utilisant des signatures hydrologiques ».
- 2003-2007 Thèse de doctorat en Hydrologie à l'Université de Grenoble, préparée à Irstea: *Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagements hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides.*
- 2001-2003 DEA en Hydrologie Hydrogéologie Géostatistique et Géochimie (Université Paris VI)
- 2001-2003 ENGREF (Ecole Nationale du Génie Rural Eaux et Forêts)
- 1998-2001 Ecole polytechnique

Langues

Anglais: courant (niveau C2 du cadre européen de référence pour les langues)

Allemand: niveau B2 (utilisateur indépendant)

Russe: niveau A2 (utilisateur élémentaire)

Activités d'encadrement et d'animation

- Encadrement de 4 doctorants, 2 CDD-Ingénieurs et 18 étudiants de Master ou fin d'école d'ingénieurs

- Coordination du développement et administration de la base de données des observatoires hydrologiques d'Irstea (BDOH)¹
- Co-présidente de l'**Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU²)** depuis le 01/01/2019
- Responsable scientifique du bassin versant expérimental de l'Yzeron, dans le cadre de l'OTHU et de l'infrastructure de recherche OZCAR : supervision du réseau d'observation de long terme (pluie, débit), estimation des incertitudes, bancarisation gestion et mise à disposition des données
- Relecteur de ~20 articles de recherche dans des revues internationales: Journal of Hydrology, Soil Use Management, Environmental Modeling & Software, BASE, HESS,...
- Membre du comité scientifique de l'**Open Source Geospatial Research and Education Symposium (OGRS)** depuis 2012.

Principaux projets de recherche

AVuPUR (ANR, 2009-2011): Assessing the vulnerability of peri-urban rivers (Coord. I. Braud)

HYDROMOD (Région Rhône-Alpes, 2012-2013): Modélisation hydrologique avec la plate-forme de modélisation JAMS (échanges scientifiques avec l'Université de Jena, Allemagne) (coordination).

Floodscale (ANR, 2012-2015) Multi-scale observation and modelling for understanding and simulating flash floods, coordination I. Braud

Rosenhy (EC2CO, 2012-2013) : Rôle de l'occupation du sol vis à vis de la modélisation des flux hydriques et énergétiques sur les sites urbains et périurbains, coordination K. Chancibault (Ifsttar, Nantes)

R2D2 2050 (MEDDE GICC, 2011-2013) : Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050, coordination E. Sauquet

MDR (AE RMC, CNR, FEDER, 2013-2016) : Modélisation des Ressources et Gestion de l'Eau dans le bassin du Rhône, co-coordination avec E. Sauquet

HydroSign (Irstea 2015-2016) « Evaluation multi-échelle de modèles hydrologiques distribués en utilisant des signatures hydrologiques », Mobilité longue d'un an au NIWA en Nouvelle-Zélande (dépôt d'un IF Marie Curie Action H2020 en 2014, score 80.60%)

PHC Dumont D'Urville (bilatéral France-Nouvelle-Zélande, 2015-2016) Impact de l'incertitude des séries temporelles de débit en rivières instables sur la modélisation des ressources en eau, co-coordination avec J. Le Coz

PHC ECOS-Sud (bilatéral France-Chili, 2015-2017) : évaluation et modélisation des impacts hydrologiques et morphologiques du développement urbain dans les bassins versants périurbains, coordination I. Braud

Thrybu (EC2CO, 2016-2017) : Tendances Rétrospective de l'HYdrologie des Bassins versants Urbanisés - Comparaison des configurations urbaines européennes et nord-américaines , coordination L. Oudin (UMR Metis, Paris)

OSR (AE RMC, FEDER, Régions Rhône Alpes, Languedoc Roussillon et PACA, 2015-) : Observatoire des Sédiments du Rhône, coordination H. Piégay, UMR EVS (Lyon)

MDR Eaux Souterraines (AE RMC 2018-), co-coordination avec I. Braud

Contribution au développement d'outils et logiciels

PESTDRAIN: modèle hydrologique de transfert de pesticide à l'échelle d'une parcelle drainée

LIQUID: plate-forme de modélisation hydrologique, modèle hydrologique **PUMMA**

JAMS: plate-forme de modélisation hydrologique développée à l'Université de Jena, Allemagne³,

¹<https://bdoh.irstea.fr/>

²<http://www.graie.org/othu/>

³ <http://jams.uni-jena.de/>

modèles hydrologiques **J2000P**, **Simpleflood**, **J2000 Ardèche**, **J2000 Durance**, **J2000 Rhône**
GeoPUMMA, **HRU-delin**: logiciels de délimitation des maillages des modèles hydrologiques
BaRatin: approche Bayésienne pour la détermination des courbes de tarage et des incertitudes associées; diffusé gratuitement sous licence Irstea.
BDOH: base de données pour les observatoires en hydrologie (coordination).

Sélection de publications

Branger, F. ; McMillan, H., 2019. Deriving hydrological signatures from soil moisture data. Hydrological Processes, submitted.

Fuamba, M.; Branger, F.; Braud, I.; Sanzana Cuevas, P.; Sarrazin, B.; Jankowfsky, S.; Batchabani, E., 2019. Value of distributed water level and soil moisture data in the evaluation of a distributed hydrological model: Application to the PUMMA model in the Mercier catchment (6.6 km²) in France, vol. 569, p. 753-770

Horner, I.; Renard, B.; Le Coz, J.; Branger, F.; McMillan, H. K., Pierrefeu, G., 2018. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. Water Resources Research, vol. 54, p. 1952-1976

McMillan, H.; Westerberg, I., Branger, F., 2017. Five guidelines for selecting hydrological signatures. Hydrological Processes, vol. 31, n° 26, p. 4757-4761

Sanzana, P ; Gironás, J. ; Braud, I. ; Branger, F. ; Rodriguez, F. ; Vargas, X. ; Hitschfeld, N. ; Muñoz, J.F. ; Vicuña, S. ; Mejía, A. ; Jankowfsky, S., 2017. A GIS-based urban and peri-urban landscape representation toolbox for hydrological distributed modeling, Environmental Modelling & Software, vol. 91, p.168-185

Adamovic, M.; Branger, F.; Braud, I., Kralisch, S., 2016. Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. Journal of Hydrology, vol. 541, n° Part A, p. 173-189

Adamovic, M.; Braud, I.; Branger, F., Kirchner, J., 2015. Assessing the simple dynamical systems approach in a Mediterranean context: application to the Ardèche catchment (France). Hydrology and Earth System Sciences, vol. 19, n° 5, p. 2427-2449

Labbas, M.; Branger, F., Braud, I., 2015. Développement et évaluation d'un modèle hydrologique distribué périurbain prenant en compte différents modes de gestion des eaux pluviales. Application au Bassin de l'Yzeron (150 km²). Houille Blanche-Revue Internationale de l'eau, n° 5, p. 84-91

Le Coz, J.; Renard, B.; Bonnifait, L.; Branger, F., Le Boursicaud, R., 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach. Journal of Hydrology, vol. 509, p. 573-587

Jankowfsky, S.; Branger, F.; Braud, I.; Rodriguez, F.; Debionne, S., Viallet, P., 2014. Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models. Journal of Hydrology, vol. 517, p. 1056-1071

Jankowfsky, S.; Branger, F.; Braud, I.; Gironás, J., Rodriguez, F., 2013. Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments. Application to the Chaudanne catchment, France. Hydrological Processes, vol. 27, n° 25, p. 3747-3761

Branger, F.; Kermadi, S.; Jacqueminet, C.; Michel, K.; Labbas, M.; Krause, P.; Kralisch, S., Braud, I., 2013. Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach. Journal of Hydrology, vol. 505, p. 312-325

Branger, F.; Jankowsky, S.; Vannier, O.; Viallet, P.; Debionne, S. & Braud, I., 2012. Use of open-source GIS for the pre-processing of distributed hydrological models, *in* E. Bocher & M. Neteler, Eds. 'Geospatial free and open source software in the 21st century', Springer, pp. 35-48

Branger, F.; Braud, I.; Debionne, S.; Viallet, P.; Dehotin, J.; Henine, H.; Nedelec, Y., Anquetin, S., 2010. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID® framework. Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling and Software*, 2010 , 25 , 1672-1681

Branger, F.; Tournebize, J.; Carlier, N.; Kao, C.; Braud, I., Vauclin, M., 2009. A simplified modelling approach for pesticide transport in a tile-drained field: The PESTDRAIN model. *Agricultural Water Management*, 2009 , 96 , 415-428.

Annexe B

Extrait du dossier d'autorisation d'inscription à la HDR (juillet 2018)

3 Présentation des activités de recherche (5 pages max)

3.1 Résumé des travaux de recherche

Mon objectif de recherche principal est la compréhension des processus hydrologiques dans les bassins versants, et la quantification de l'impact de l'activité humaine en général (changement climatique, occupation des sols, usages de l'eau) sur ces processus. Je m'appuie pour cela sur le suivi hydrologique de terrain, et sur le développement et l'utilisation d'outils de simulation, les modèles hydrologiques spatialisés, dans une démarche multi-échelles.

Mon site de terrain principal est le bassin versant périurbain de l'Yzeron (150 km²) situé dans l'Ouest lyonnais, qui fait partie de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU) au sein de la ZABR, ainsi que du réseau de bassins expérimentaux et de l'infrastructure de recherche RBV / OZCAR. Il a pour objet de mieux comprendre et quantifier les effets de l'urbanisation sur l'hydrologie des cours d'eau. Les mesures y sont réalisées depuis 1997 et étaient initialement localisées sur deux petits sous-bassins d'occupations du sol contrastées. L'ensemble du bassin de l'Yzeron est maintenant suivi par un réseau de stations pluie-débit distribuées selon une stratégie de bassins versants emboîtés, de façon à pouvoir étudier les effets d'échelle et les propagations amont-aval. Plus récemment, le dispositif d'observation a été complété par des mesures d'humidité du sol, ainsi que par des suivis préliminaires de qualité de l'eau, visant à la fois à compléter la connaissance des polluants présents sur le bassin, mais aussi à tracer les origines de l'eau et les contributions des différents compartiments hydrologiques.

Mon activité de modélisation s'appuie essentiellement sur des plate-formes de modélisation hydrologiques, qui sont des supports de travail bien adaptés car elles permettent de construire des modèles à la carte en puisant dans des bibliothèques de modules réutilisables. Je m'efforce de construire des approches de modélisation spatialisée adaptées aux échelles et questions abordées, d'une complexité maîtrisée, et conservant une représentation explicite des processus et le sens physique des paramètres. L'idée est que les modèles « donnent les bonnes réponses pour les bonnes raisons » (Kirchner, 2006)⁴. J'ai d'abord contribué au développement de la plate-forme de modélisation LIQUID, dont est issu le modèle détaillé PUMMA adapté aux petits bassins périurbains (quelques kilomètres carrés). Depuis 2010 je m'investis dans la plate-forme de modélisation JAMS en collaboration avec l'Université FSU Jena en Allemagne. J'y ai développé des modèles de la famille « J2000 », en abordant des bassins de plus en plus grands avec des représentations à chaque fois adaptées (Yzeron, 150 km² ; Ardèche, 2000 km² ; Durance, 10000 km² ; Rhône, 100000 km²), et des modélisations plus complexes prenant en compte les ouvrages de gestion des eaux pluviales (thèse Mériem Labbas), les usages de l'eau (barrages, irrigation, eau potable, projet MDR), ou en couplage avec la modélisation hydraulique (thèse Marko Adamovic). L'utilisation des modèles ainsi développés a pu apporter des premières réponses quantitatives à des questions d'aménagement et d'adaptation, ce qui est une des finalités de mon activité de recherche (thèse Mériem Labbas : impact des techniques de gestion des eaux pluviales dans un contexte de croissance de l'urbanisation ; projet MDR : scénarios prospectifs d'adaptation des usages de l'eau sous changement climatique).

Suivant le paradigme de l'utilisation de modèles comme outils de test de connaissances, je travaille aussi à la formalisation du lien entre données d'observation, expertise hydrologique et modèles, et développe ainsi des méthodologies d'évaluation des modèles orientées sur la compréhension des processus, en m'appuyant sur des métriques se voulant plus pertinentes que les classiques critères de performance, les signatures hydrologiques. J'ai commencé à développer ce thème pendant mon séjour scientifique en Nouvelle-Zélande. Les signatures hydrologiques sont des indicateurs quantitatifs dérivés de l'analyse des données de terrain, ciblant des processus hydrologiques

⁴ Kirchner, J. W. (2006), 'Getting the right answers for the right reasons: link measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology', *Water Resources Research* **42**, W03S04.

particuliers et dont l'utilisation doit permettre un meilleur diagnostic sur les corrections à apporter aux modèles. J'aborde plusieurs questions de recherche, comme celle des pratiques de sélection des signatures (McMillan et al., 2017), l'exploitation de données alternatives aux séries de débit (humidité du sol, Branger et al., en préparation⁵), ou l'utilisation de signatures pour l'évaluation de modèles hydrologiques distribués (Fuamba et al., 2018, thèse I. Horner, en cours).

En parallèle de mes axes de recherche principaux, j'aborde aussi la thématique des incertitudes des données hydrologiques. Au titre de mon activité d'observation, je contribue au développement de la méthode bayésienne et du logiciel BaRatin, qui vise à proposer une approche respectueuse de la physique, prenant en compte et propageant les incertitudes dans l'estimation des lois de transformation hauteur-débit (courbes de tarage), des séries temporelles de débit et des indicateurs hydrologiques dérivés. Je m'intéresse aussi aux problématiques de stockage et de mise à disposition des données hydrologiques issues d'observations, à travers le développement de la base de données et de l'application BDOH dont j'assure la coordination pour Irstea. Enfin, je travaille aussi sur la question de la segmentation spatiale des modèles hydrologiques distribués et le développement de méthodes et logiciels de génération du maillage pour ces modèles.

J'ai développé des collaborations au niveau régional (laboratoires INSA DEEP à Lyon, IGE à Grenoble), national (IFSTTAR à Nantes, UMR METIS et UMR LEESU à Paris, UMR HydroSciences à Montpellier), ainsi qu'au niveau international, notamment avec l'université FSU Jena (Allemagne), avec le NIWA (Nouvelle-Zélande), ainsi qu'avec la San Diego State University (USA). La modélisation hydrologique spatialisée pouvant servir d'ossature pour des travaux multidisciplinaires, j'ai aussi développé des collaborations avec d'autres disciplines : hydraulique, géographie (utilisation de cartes d'occupation des sols produites par télédétection ou simulations prospectives), économie (modèle économétrique de consommation d'eau potable) ou encore écologie (couplage hydrologie/habitat).

3.2 Animation de la recherche

3.2.1 Encadrement de doctorants

Sonja Jankowsky (2008-2011) : « Modélisation hydrologique spatialisée de petits bassins versants péri-urbains. Application aux sous-bassins de la Chaudanne et du Mercier (Yzeron) », co-direction avec Isabelle Braud (Cemagref, HHLY).

Marko Adamovic (2011-2014) : « Development of a data-driven distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. Application to the Ardèche catchment, France », co-direction avec Isabelle Braud (Cemagref, HHLY).

Mériem Labbas (2011-2015) : « Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales », en co-direction avec Isabelle Braud (Cemagref, HHLY).

Direction en cours de la thèse d'**Ivan Horner** (2017-2019) : « Evaluation-diagnostic de modèles distribués à l'aide de signatures hydrologiques: construction d'une méthodologie multi-échelles incorporant les incertitudes de mesure ».

Contribution à l'encadrement de **Pedro Sanzana** (2015-2018) : Sanzana, P. 2018. Characterization and modeling of hydrological processes in periurban catchments located in the Piedmont of Santiago (Chile), PhD Thesis, Pontifica Universidad de Chile, Escuela de Ingenieria, soutenance le 24/04/2018.

⁵ Branger, F. and McMillan, H., Deriving hydrological signatures from soil moisture data, to be submitted to Hydrological Processes.

3.2.2 Visiteurs scientifiques et CDD ingénieurs :

Musandji Fuamba (2014-2015) : Evaluation du modèle hydrologique distribué PUMMA à l'aide de mesures distribuées semi-quantitatives.

François Tilmant 2013-2016, projet MDR : développement du modèle distribué du Rhône.

Christine Barachet 2015-2016, projet MDR : automatisation de la création du maillage du modèle hydrologique distribué J2000.

3.2.3 Encadrement d'étudiants de Master :

Encadrement de 20 étudiants de Master ou équivalent, sur la période 2005-2018.

3.2.4 Projets de recherche⁶

AVuPUR (ANR, 2009-2011): Assessing the vulnerability of peri-urban rivers (Coord. I. Braud)

HYDROMOD (Région Rhône-Alpes, 2012-2013): Modélisation hydrologique avec la plate-forme de modélisation JAMS (échanges scientifiques avec l'Université de Jena, Allemagne) (coordination).

Floodscale (ANR, 2012-2015) Multi-scale observation and modelling for understanding and simulating flash floods, coordination I. Braud

Rosenhy (EC2CO, 2012-2013) : Rôle de l'occupation du sol vis à vis de la modélisation des flux hydriques et énergétiques sur les sites urbains et périurbains, coordination K. Chancibault (Ifsttar, Nantes)

R2D2 2050 (MEDDE GICC, 2011-2013) : Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050, coordination E. Sauquet

MDR (AE RMC, CNR, FEDER, 2013-2016) : Modélisation des Ressources et Gestion de l'Eau dans le bassin du Rhône, co-coordination avec E. Sauquet

HydroSign (Irstea 2015-2016) « Evaluation multi-échelle de modèles hydrologiques distribués en utilisant des signatures hydrologiques », Mobilité longue d'un an au NIWA en Nouvelle-Zélande (dépôt d'un IF Marie Curie Action H2020 en 2014, score 80.60%)

PHC Dumont D'Urville (bilatéral France-Nouvelle-Zélande, 2015-2016) Impact de l'incertitude des séries temporelles de débit en rivières instables sur la modélisation des ressources en eau, co-coordination avec J. Le Coz

PHC ECOS-Sud (bilatéral France-Chili, 2015-2017) : évaluation et modélisation des impacts hydrologiques et morphologiques du développement urbain dans les bassins versants périurbains, coordination I. Braud

Thrybu (EC2CO, 2016-2017) : Tendances Rétrospectives de l'Hydrologie des Bassins versants Urbanisés - Comparaison des configurations urbaines européennes et nord-américaines, coordination L. Oudin (UMR Metis, Paris)

OSR (AE RMC, FEDER, Régions Roussillon et PACA, 2015-) : Observatoire des Sédiments du Rhône, coordination H. Piégay, UMR EVS (Lyon)

MDR Eaux Souterraines (AE RMC 2018-), co-coordination avec I. Braud

3.2.5 Gestion de la recherche et animation interne

Base de données et application BDOH pour la bancarisation, la gestion et la mise à disposition des données issues des observatoires hydrologiques de long terme. Il s'agit d'un projet au niveau de l'établissement Irstea qui regroupe une dizaine d'observatoires gérés par des équipes sur différents

⁶ En souligné : projets dont j'ai assuré ou co-assuré la coordination

sites (Antony, Grenoble, Aix, Lyon). Je coordonne et harmonise les demandes de l'ensemble des équipes et m'occupe de l'administration générale de la base de données. Le développement est fait en interne par le pôle Informatique Scientifique (faisant partie de la direction des systèmes d'information d'Irstea), épaulé par des CDD. Je suis en relation directe avec les développeurs (maîtrise d'ouvrage) pour le suivi des développements, les tests, la correction de bugs etc. Les données de la recherche sont ainsi mises à disposition de l'ensemble de la communauté. L'application BDOH est également open-source et librement diffusable.

Animation scientifique et gestion du bassin versant expérimental de l'Yzeron :

- interfaçage avec les infrastructures de recherche qui le supportent : OTHU/ZABR et RBV/OZCAR
- définition et suivi du dispositif expérimental en lien avec l'équipe métrologie
- diffusion et valorisation des données via l'application BDOH

Animation du groupe de travail « J2000 » regroupant l'ensemble des personnes (permanents, CDD, doctorants, stagiaires) travaillant autour du modèle hydrologique spatialisé J2000

Gestion du projet « Hydrotools » sur la forge logicielle Irstea : dépôt et suivi de version des codes développés par l'ensemble des membres de l'équipe hydrologie pour des applications diverses (traitement de données, pré-processing de simulations etc) et dans des langages de programmation divers. L'objectif est de capitaliser le travail réalisé et pouvoir réutiliser facilement les codes développés notamment par les non-permanents (doctorants, stagiaires).

3.3 Rayonnement national et international

Participation à 6 **comités de suivi de thèse** : Marie-Françoise Fabre (2008-2010, thèse interrompue), Hocine Hénine (soutenance 2010), K. Djabelkhir (soutenance 2015), B. Salavati (soutenance 2015), A. Ficchi (soutenance 2017), B. Richard (en cours).

Comité scientifique de la conférence OGRS (Open Source Geospatial Research and Education Symposium) depuis 2012.

Séminaires invités :

- Branger, F., Jankowsky ; S., Braud, I., Labbas, M, 2012. Modélisation hydrologique multi-échelles en bassin versant péri-urbain, quelques résultats issus du projet AVuPUR, Séminaires du LEESU, Paris.
- Branger, F., Gouttevin, I., Montginoul, M., Sauquet, E., Braud, I. - 2017. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône, Séminaire Matheo, 07/09/2016, Montpellier.

22 **revues d'articles** pour des revues scientifiques internationales (Journal of Hydrology, HESS, Environmental Modelling & Software...)

3.4 Valorisation des travaux de recherche

Transfert de connaissances à destination des opérationnels (Grand Lyon, Agence de l'Eau) :

- Journées techniques de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU) depuis 2010
- Journée « Connaissance et Fleuve Rhône » 2014, séminaire « Café Théma » 2017, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

Logiciel BaRatin : approche Bayésienne pour la détermination des courbes de tarage et des incertitudes associées; diffusé gratuitement sous licence Irstea auprès de la communauté scientifique et opérationnelle (services hydrométriques DREAL, SPC, CNR...).

LIQUID : plate-forme de modélisation hydrologique, modèle hydrologique péri-urbain **PUMMA**

JAMS : contribution à la plate-forme de modélisation hydrologique développée à l'université de Jena, Allemagne / diffusion gratuite sous licence open-source

Diffusion des modèles hydrologiques distribués (série **J2000**) développés dans JAMS pour des cas d'application divers : modèle **J2000P** (périurbain issu de la thèse de M. Labbas) ; modèles **Simpleflood** et J2000 Ardèche (thèse M. Adamovic) ; modèle J2000 Durance (projet R2D2) ; modèle **J2000 Rhône** incorporant les principaux usages de l'eau (barrages, irrigation, eau potable) (projet MDR). Diffusion gratuite sous licence open-source ; transfert du modèle hydrologique du Rhône J2000 Rhône suite au projet MDR ; prise en main en cours par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR ; stage commun Y. Akouba, 2018).

Logiciel HRU-delin : délimitation de maillages irréguliers en HRUs pour les modèles hydrologiques distribués, diffusion gratuite sous licence open-source

Logiciel Geo-PUMMA (thèses S. Jankowfsky et P. Sanzana) : délimitation de maillages irréguliers prenant en compte l'urbanisation pour les modèles hydrologiques distribués détaillés, diffusion gratuite sous licence open-source

Base de données BDOH : base de données pour les observatoires en hydrologie hébergeant les données des principaux observatoires d'Irstea et ses partenaires scientifiques et opérationnels. Bancarisation, traitements et mise à disposition de données via une application web. Mise à disposition gratuite des données, diffusion gratuite du logiciel sous licence open-source

Observatoire Yzeron : bassin versant expérimental émergeant aux infrastructures de recherche OTHU/ZABR et OZCAR. Observations hydrologiques (pluie, débit, humidité du sol), qualité, microbiologie etc. Coordination et animation scientifique. Mise à disposition des données dans la base BDOH

4 Liste des publications

4.1 Articles scientifiques en anglais dans des revues à comité de lecture

Fuamba, M.*; Branger, F.; Braud, I.; Sanzana Cuevas, P.*; Sarrazin, B.; Jankowfsky, S.*; Batchabani, E., 2018. Value of distributed water level and soil moisture data in the evaluation of a distributed hydrological model: Application to the PUMMA model in the Mercier catchment (6.6 km²) in France, in revision.

Horner, I.*; Renard, B.; Le Coz, J.; Branger, F.; McMillan, H. K., Pierrefeu, G., 2018. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*, vol. 54, p. 1952-1976

Sanzana, P.*; Gironás, J.; Braud, I.; Branger, F.; Rodriguez, F.; Vargas, X.; Hitschfeld, N.; Muñoz, J.; Vicuña, S.; Mejía, A. & Jankowfsky, S.* , 2017. A GIS-based urban and peri-urban landscape representation toolbox for hydrological distributed modeling. *Environmental Modelling and Software*, 91, 168-185.

McMillan, H.; Westerberg, I. & Branger, F., 2017. Five guidelines for selecting hydrological signatures. *Hydrological Processes*, 31, 4757-4761.

Sun, S.; Barraud, S.; Branger, F.; Braud, I. & Castebrunet, H., 2017. Urban hydrologic trend analysis based on rainfall and runoff data analysis and conceptual model calibration. *Hydrological Processes*, 31, 1349-1359.

Nord, G.; Boudevillain, B.; Berne, A.; Branger, F.; Braud, I.; Dramais, G.; Gérard, S.; Le Coz, J.; Legoût, C.; Molinié, G.; Van Baelen, J.; Vandervaere, J.-P.; Andrieu, J.; Aubert, C.; Calianno, M.; Delrieu, G.; Grazioli, J.; Hachani, S.; Horner, I.; Huza, J.; Le Boursicaud, R.; Raupach, T.; Teuling, A.; Uber, M.; Vincendon, B. & Wijbrans, A., 2017. A high space-time resolution dataset linking meteorological forcing and hydro-sedimentary response in a mesoscale Mediterranean catchment (Auzon) of the Ardèche region, France. *Earth System Science Data*, 9 , 221-249.

Adamovic, M.*; Branger, F.; Braud, I. & Kralisch, S., 2016. Development of a data-driven semi-distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. *Journal of Hydrology*, 541 , 173-189.

Adamovic, M.*; Braud, I.; Branger, F. & Kirchner, J., 2015. Assessing the simple dynamical systems approach in a Mediterranean context: Application to the Ardèche catchment (France). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19 , 2427-2449.

Le Coz, J.; Renard, B.; Bonnifait, L.; Branger, F. & Le Boursicaud, R., 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509 , 573-587.

Braud, I.; Ayrat, P.-A.; Bouvier, C.; Branger, F.; Delrieu, G.; Le Coz, J.; Nord, G.; Vandervaere, J.-P.; Anquetin, S.; Adamovic, M.*; Andrieu, J.; Batiot, C.; Boudevillain, B.; Brunet, P.; Carreau, J.; Confoland, A.; Didon-Lescot, J.-F.; Domergue, J.-M.; Douvinet, J.; Dramais, G.; Freyrier, R.; Gérard, S.; Huza, J.; Leblois, E.; Le Bourgeois, O.; Le Boursicaud, R.; Marchand, P.; Martin, P.; Nottale, L.; Patris, N.; Renard, B.; Seidel, J.-L.; Taupin, J.-D.; Vannier, O.; Vincendon, B. & Wijbrans, A., 2014. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 , 3733-3761.

Jankowfsky, S.*; Branger, F.; Braud, I.; Rodriguez, F.; Debionne, S. & Viallet, P., 2014. Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: Development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models. *Journal of Hydrology*, 517 , 1056-1071.

Sanzana, P.*; Jankowsky, S.*; Branger, F.; Braud, I.; Vargas, X.; Hitschfeld, N. & Gironás, J., 2013. Computer-assisted mesh generation based on hydrological response units for distributed hydrological modeling. *Computers and Geosciences*, 57, 32-43.

Branger, F.; Kermadi, S.; Jacqueminet, C.; Michel, K.; Labbas, M.*; Krause, P.; Kralisch, S. & Braud, I., 2013. Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach. *Journal of Hydrology*, 505, 312-325.

Jacqueminet, C.; Kermadi, S.; Michel, K.; Béal, D.; Gagnage, M.; Branger, F.; Jankowsky, S.* & Braud, I., 2013. Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: Application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *Journal of Hydrology*, 485, 68-83.

Braud, I.; Breil, P.; Thollet, F.; Lagouy, M.; Branger, F.; Jacqueminet, C.; Kermadi, S. & Michel, K., 2013. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France, *Journal of Hydrology*, 485, 5-23.

Jankowsky, S.*; Branger, F.; Braud, I.; Gironás, J. & Rodriguez, F., 2013. Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments: Application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes*, 27, 3747-3761.

Gonzalez-Sosa, E.; Braud, I.; Dehotin, J.; Lassabatère, L.; Angulo-Jaramillo, R.; Lagouy, M.; Branger, F.; Jacqueminet, C.; Kermadi, S. & Michel, K., 2010. Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment. *Hydrological Processes*, 24, 2382-2399.

Branger, F.; Braud, I.; Debionne, S.; Viallet, P.; Dehotin, J.; Henine, H.; Nedelec, Y. & Anquetin, S., 2010. Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID® framework. Overview of the concepts and first application examples. *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25, 1672-1681

Branger, F.; Tournebize, J.; Carluier, N.; Kao, C.; Braud, I. & Vauclin, M., 2009. A simplified modelling approach for pesticide transport in a tile-drained field: The PESTDRAIN model. *Agricultural Water Management*, 2009, 96, 415-428.

4.2 Articles scientifiques et techniques en français

Horner, I.*; Le Coz, J.; Renard, B. & Branger, F., 2018. The impact of control sensitivity on hydrometric uncertainties [Impact de la sensibilité des contrôles hydrauliques sur les incertitudes hydrométriques]. *La Houille Blanche*, 2018-February, 27-35.

Sauquet, E.; Arama, Y.; Blanc-Coutagne, E.; Bouscasse, H.; Branger, F.; Braud, I.; Brun, J.-F.; Chernel, J.; Cipriani, T.; Datry, T.; Ducharne, A.; Hendrickx, F.; Hingray, B.; Krowicki, F.; Le Goff, I.; Le Lay, M.; Magand, C.; Malerbe, F.; Mathevet, T.; Mezghani, A.; Monteil, C.; Perrin, C.; Poulhe, P.; Rossi, A.; Samie, R.; Strosser, P.; Thirel, G.; Tilmant, F.* & Vidal, J.-P., 2016. Water allocation and uses in the Durance River basin in the 2050s: Towards new management rules for the main reservoirs? [Le partage de la ressource en Eau sur la Durance en 2050: vers une évolution du mode de gestion des grands ouvrages duranciens ?]. *La Houille Blanche*, 2016-October, 25-31.

Labbas, M.*; Branger, F. & Braud, I., 2015. Development and evaluation of a periurban distributed hydrological model - Application to the Yzeron catchment (150 km²) [Développement et évaluation d'un modèle hydrologique distribué pour des bassins périurbains - Application au bassin de l'Yzeron (150 km²)]. *La Houille Blanche*, 84-91.

Branger, F.; Thollet, F.; Crochemore, M.; Poisbeau, M.; Raidelet, N.; Farissier, P.; Lagouy, M.; Dramais, G.; Le Coz, J.; Guérin, A.; Tallec, G.; Peschard, J.; Mathys, N.; Klotz, S. & Tolsa, M., 2014. Database for hydrological observatories: A tool for storage, management and access of data produced by the long-term hydrological observatories of Irstea [Le projet base de données pour les

observatoires en hydrologie: Un outil pour la bancarisation, la gestion et la mise à disposition des données issues des observatoires hydrologiques de long terme à Irstea], La Houille Blanche, 33-38.

Le Coz, J.; Chaléon, C.; Bonnifait, L.; Le Boursicaud, R.; Renard, B.; Branger, F.; Diribarne, J. & Valente, M., 2013. Bayesian analysis of rating curves and their uncertainties: The BaRatin method [Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes: la méthode BaRatin]. La Houille Blanche, 31-41.

4.3 Actes de conférences internationales à comité de lecture

Braud, I.; Ayrat, P.-A.; Bouvier, C.; Branger, F.; Delrieu, G.; Dramais, G.; Le Coz, J.; Leblois, E.; Nord, G. & Vandervaere, J.-P., 2016. Advances in flash floods understanding and modelling derived from the FloodScale project in South-East France, E3S Web of Conferences, 7

Cipriani, T.; Tilmant, F.*; Branger, F.; Sauquet, E. & Datry, T., 2014. Impact of climate change on aquatic ecosystems along the Asse River network, IAHS-AISH Proceedings and Reports, 363, 463-468.

Branger, F.; Kermadi, S.; Krause, P.; Labbas, M.; Jacqueminet, C.; Michel, K.; Braud, I. & Kralisch, S., 2012. Investigating the impact of two decades of urbanization on the water balance of the Yzeron peri-urban catchment, France. iEMSs 2012 - Managing Resources of a Limited Planet: Proceedings of the 6th Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, 2012, 390-397

Branger, F.; Debionne, S.; Viallet, P.; Braud, I.; Jankowsky, S.*; Vannier, O.; Rodriguez, F. & Anquetin, S., 2010. Advances in integrated hydrological modelling with the LIQUID® framework

Modelling for Environment's Sake: Proceedings of the 5th Biennial Conference of the International Environmental Modelling and Software Society, iEMSs 2010, 2, 1003-1010.

Jankowsky, S.*; Branger, F.; Braud, I.; Viallet, P.; Debionne, S. & Rodriguez, F., 2010. Development of a suburban catchment model within the LIQUID framework. Modelling for Environment's Sake: Proceedings of the 5th Biennial Conference of the International Environmental Modelling and Software Society, iEMSs 2010, 2, 1058-1065.

Muma, M.; Rousseau, A.; Paniconi, C.; Van Bochove, É.; Nolin, M.; Yang, W. & Branger, F., 2010.

Hydrologic modelling of an agricultural drained micro-watershed: Performance analysis of coupled surface water/groundwater models. ASABE - 9th International Drainage Symposium 2010, Held Jointly with CIGR and CSBE/SCGAB, 652-662.

Branger, F.; Braud, I.; Viallet, P. & Debionne, S. (2008), Modélisation de l'influence des aménagements hydro-agricoles sur l'hydrologie d'un petit bassin versant rural, in '8th International Conference on HydroSciences and Engineering, 08/09/2008-12/09/2008, Nagoya, JPN / Proceedings of the 8th International Conference on HydroSciences and Engineering', pp. 586-594.

Branger, F.; Thollet, F.; Crochemore, M.; Poisbeau, M.; Raidelet, N.; Farissier, P.; Lagouy, M.; Dramais, G.; Le Coz, J.; Guérin, A.; Tallec, G.; Peschard, J.; Mathys, N.; Klotz, S. & Tolsa, M. (2012), A database for hydrological observatories: a tool for storage, management and access to the data produced by Irstea's hydrological observatories, in 'Journées Scientifiques du GFHN, 22/11/2012-23/11/2012, Paris, FRA', pp. 6.

4.4 Chapitres d'ouvrages

Sanzana, P.*; Villaroel, S.; Braud, I.; Hitschfeld, N.; Gironas, J.; Branger, F.; Rodriguez, F.; Vargas, X. & Gomez, T. (2018), Representation of the Drainage Network in Urban and Peri-urban Areas Using a 2D Polygonal Mesh Composed of Pseudo-convex Elements'QGIS and Applications in Water and Risks', John Wiley & Sons, Inc., pp. 145--184.

Branger, F.; Jankowfsky, S.*; Vannier, O.; Viallet, P.; Debionne, S. & Braud, I., 2012. Use of open-source GIS for the pre-processing of distributed hydrological models. In Bocher, E. & Neteler, M. (Eds.), Geospatial free and open source software in the 21st century, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 2012, 35-48.

4.5 Rapports techniques et scientifiques

Branger, F.; Gouttevin, I.; Tilmant, F.; Cipriani, T.; Barachet, C.; Montginoul, M.; Le Gros, C.; Sauquet, E.; Braud, I. & Leblois, E. (2016), 'Distributed hydrological modelling of the Rhône river basin', 116.

Branger, F.; Le Coz, J.; Renard, B. & Bonnifait, L. (2012), 'A method for estimating the uncertainty of rating curves'(CHHLY.35516), Fiche technique, 4.

Braud, I.; Andrieu, J.; Ayrat, P. A.; Bouvier, C.; Branger, F.; Carreau, J.; Delrieu, G.; Douvinet, J.; Freydier, R.; Leblois, E.; Le Coz, J.; Martin, P.; Nord, G.; Patris, N.; Perez, S.; Renard, B.; Seidel, J. L. & Vandervaere, J. P. (2016), 'FloodScale : Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash floods understanding and simulation, Final scientific project of the ANR Project ANR-2011 BS56 027 01', 149.

Braud, I.; Jankowfsky, S. & Branger, F. (2011), 'Delineation of periurban catchments boundaries and their associated drainage network '(CHHLY.32208), Fiche technique, 4.

Sauquet, E.; Arama, Y.; Blanc Coutagne, E.; Bouscasse, H.; Branger, F.; Braud, I.; Brun, J. F.; Cherel, J.; Cipriani, T.; Datry, T.; Ducharme, A.; Hendrickx, F.; Hingray, B.; Krowicki, F.; Le Goff, I.; Le Lay, M.; Magand, C.; Malerbe, F.; Mathevet, T.; Monteil, C.; Perrin, C.; Poulhe, P.; Rossi, A.; Samie, R.; Strosser, P.; Thirel, G.; Tilmant, F. & Vidal, J. P. (2015), 'Project R²D² 2050: Risk, water resources and sustainable development within the Durance river basin in 2050 ', 245.

4.6 Rapports d'étudiants de Master (20)

de Sesmaisons, Donatien, 2005. Validation d'un modèle simplifié de transferts de produits phytosanitaires en parcelle drainée, Mémoire de fin d'études, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, France, 71pp.

Spatola, Caroline, 2005. Préparation des données nécessaires au fonctionnement du modèle hydrologique POWER : élaboration d'un système d'informations géographiques sur le bassin versant de la Fontaine du Theil, Master « SIG et Gestion de l'Espace », Université Jean-Monnet, Saint-Etienne, France, 90pp.

Diribarne, Julien, 2008. Dimensionnement d'une station de mesure débitmétrique sur le bassin versant de l'Yzeron. Site du Ratier, Mémoire de projet de fin d'études, ENTPE, Vaulx en Velin, France, 68pp.

Michel, Charlotte, 2009. Exploitation des données de deux sous-bassins versants de l'Yzeron : la Chaudanne et le Mercier. Analyse des données 1997-2008. Master 1 Sciences de l'eau dans l'environnement continental, Université Montpellier 2, Août 2009, 53 pp.

Bertrand, Mélanie, 2009. Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l'Arc en Maurienne. Mise en place d'un Système d'Information Géographique, analyse spatiale et segmentation de l'espace, Master « SIG et Gestion de l'Espace », Université Jean-Monnet, Saint-Etienne, France, 120pp.

Guyomard, Marine, 2009. Amélioration d'un modèle de transfert de pesticides sur bassins versants agricoles drainés : le modèle PESTDRAIN, Master 2 « Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Parcours Hydrologie-Hydrogéologie », Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 50pp.

Jandot, Alex, 2010. Développement et évaluation d'une modélisation hydrologique simplifiée sur le bassin versant de l'Yzeron dans le cadre du projet AVuPUR. Stage de fin d'études Génie des Procédés, option Génie de l'Environnement, ENSIACET, INP Toulouse, 53 pp.

Paillé, Yvan, 2010. Automatisation du pré-traitement des données spatiales pour la modélisation hydrologique distribuée en zone périurbaine, Master « Cartographie et gestion des espaces à fortes contraintes », Université de Nantes.

Brossard, Florent, 2011. Automatisation du prétraitement des données spatiales pour la modélisation hydrologique distribuée en zone périurbaine, Stage Ingénieur 2^{ème} année, EPMI Cergy.

Sanzana, Pedro, 2011. Automatic preprocessing for a distributed hydrological model using the HRU (Hydrological Response Units) concept with GRASSGIS, Master in Environment and Hydraulics Resources, University of Chile.

Labbas, Mériem, 2011. Impacts de la caractérisation de l'occupation des sols par différentes sources sur la simulation des processus hydrologiques. Application au bassin versant de l'Yzeron. Mémoire de fin d'études Master ENGREF « Gestion de l'eau », 51 pp.

Fougerit, Valentin, 2011. Caractérisation des processus hydro-sédimentaires sur le bassin versant de l'Arvan (Savoie) et modélisation. Master's thesis, Ecole Centrale Paris.

Riou, Fabien, 2012. 'Dimensionnement d'une station de mesure débitmétrique sur le bassin versant de l'Yzeron - site du Mercier', Master's thesis, Enseiht Hydraulique - 2ème année.

Huza, Jessica, 2013. 'Assessment of the hydrological functioning of the Ardèche catchment using a distributed modelling approach', Master's thesis, University of Wageningen, Netherlands.

Gudefin, Lionel, 2013. 'Modélisation hydrologique spatialisée du bassin versant péri-urbain de la Chézine avec le modèle J2000', Master's thesis, Ecole des Mines d'Alès, option Management des Risques et Environnement - Risques Majeurs.

Noël, Jean-François, 2014. 'Naturalisation de débits observés sur le bassin versant de l'Ardèche - Impact sur les indicateurs hydrologiques', Master's thesis, ENTPE.

Horner, Ivan, 2014. 'Quantification des incertitudes hydrométriques et bilans hydrologiques sur le bassin versant de l'Yzeron (ouest lyonnais)', Master's thesis, AgroCampus Ouest.

Coussot, Charly, 2015. 'Assessing and modelling hydrological behaviours of Mediterranean catchments using discharge recession analysis', Master's thesis, Msc Management of Hydrometeorological Hazards - University of Grenoble - University of Volos.

Guichonnet, Nans, 2018. Altération d'habitat hydraulique liée à la gestion des débits, des prélèvements et du changement climatique dans le bassin du Rhône, Master's thesis, ENGEES.

Akouba, Yacine, 2018. Étude des étiages du bassin versant du Rhône., Master's thesis, Master HHGE, Sorbonne Université, Paris.