



**HAL**  
open science

## Modélisation de scénarios de gestion des eaux pluviales à la source face aux changements globaux

Jérémie Bonneau, Flora Branger, Hélène Castebrunet, Gislain Lipeme Kouyi

► **To cite this version:**

Jérémie Bonneau, Flora Branger, Hélène Castebrunet, Gislain Lipeme Kouyi. Modélisation de scénarios de gestion des eaux pluviales à la source face aux changements globaux. INRAE. 2022. hal-03993757

**HAL Id: hal-03993757**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03993757>**

Submitted on 17 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.

➤ **Modélisation de scénarios de gestion des eaux  
pluviales à la source face aux changements  
globaux**

*Application au bassin versant péri-urbain de l'Yzeron*

Livrable du projet Conseequans

Jérémie Bonneau, Flora Branger, Hélène Castebrunet, Gislain Lipeme Kouyi

## Résumé

Face à l'imperméabilisation croissante des centres urbains et au changement climatique, villes et gestionnaires des eaux pluviales promeuvent la mise en place des ouvrages de gestion à la source (« techniques alternatives », « solutions fondées sur la nature » : noues, parkings drainants, puits d'infiltration, chaussées à structure réservoir, tranchées, toitures végétalisées, etc.). L'objectif visé est de « désimperméabiliser les sols » ou « déconnecter les eaux pluviales » et de rétablir les flux hydrologiques naturels perdus suite à l'urbanisation (favoriser l'infiltration, l'évapotranspiration). Cette « désimperméabilisation » permet également de limiter la saturation des réseaux et les rejets au milieu. Cependant, l'impact de l'implémentation de ces techniques à l'échelle du bassin versant sur le long terme reste peu évalué.

Ce projet a pour objectif de quantifier la sensibilité et vulnérabilité d'un bassin versant urbanisé face à des scénarios d'urbanisation et de changement climatique (pluie, évapotranspiration), et d'évaluer l'impact de la mise en place des ouvrages de gestion à la source sur le régime d'écoulement du cours d'eau péri-urbain dans ce contexte.

Pour atteindre cet objectif principal, nous avons adapté un modèle hydrologique distribué à base physique (J2000P), sur le bassin du versant du Ratier, situé dans une région périurbaine de l'ouest lyonnais. Après avoir montré la bonne reproduction du régime d'écoulement actuel (Efficacité de Nash Sutcliffe 0.71 en journalier, 0.69 en horaire), nous avons intégré un modèle d'ouvrage de gestion à la source au modèle hydrologique. Nous avons ensuite élaboré des scénarios plausibles de changement d'occupation du sol (couverture imperméable), de changements climatiques (basés sur des projections climatiques à long terme et sur une analogie avec le sud de la France), et plusieurs scénarios de gestion des eaux pluviales incluant divers degrés de déconnexion des surfaces imperméables (du « tout tuyau » au « tout déconnecté »), puis nous avons réalisé des simulations en croisant tous ces scénarios.

Les résultats obtenus et leur exploitation montrent :

- Une sensibilité marquée du régime d'écoulement à l'imperméabilisation : des débits moyens qui diminuent avec la couverture imperméable (diminution de la recharge) sauf pour les mois d'été, pour lesquels l'augmentation des pics de ruissellement imperméable entraîne la hausse des débits moyens.
- Une très forte sensibilité du bassin versant et du régime d'écoulement au changement climatique : les débits hivernaux fluctuent autour de la situation actuelle en fonction des scénarios. Les débits de Juin et Septembre augmentent fortement en moyenne, du fait notamment des crues plus marquées. Juillet et Aout en revanche sont des mois plus secs où les étiages sont plus marqués. Les scénarios de changement climatique provoquent une variabilité très importante du régime d'écoulement, ce qui entraîne une forte variation (diminution ou augmentation) des indicateurs hydrologiques en fonction des scénarios.

- La déconnexion à l'aide des ouvrages de gestion à la source impacte principalement et fortement le ruissellement de surface sur les surfaces imperméables :
  - En réseau : la déconnexion progressive diminue puis élimine, dans les cas les plus ambitieux, les volumes et fréquences des rejets au milieu par les déversoirs d'orages. Une politique ambitieuse de déconnexion des surfaces imperméables semble pouvoir rendre le réseau d'assainissement résilient face aux changements globaux à venir (urbanisation et changement climatique). Il existe un niveau seuil de déconnexion (autour de 1/3 de la surface imperméable existante en fonction des scénarios) pour lequel les rejets restent à leur niveau actuel même dans les cas les plus drastiques avec une urbanisation très élevée et les scénarios de changement climatique les plus défavorables.
  - En rivière : les ouvrages de gestion à la source influent peu sur le régime d'écoulement du ruisseau, car la contribution relative du ruissellement des surfaces imperméables au régime d'écoulement en ruisseau et au bilan à l'échelle du bassin versant d'étude est faible. Les scénarios de déconnexion augmentent légèrement le débit d'étiage et permettent d'écarter quelques petits pics de ruissellement imperméable, ce qui influe peu sur le bilan total. La gestion à la source semble avoir peu d'influence sur les grosses crues qui proviennent de tout le bassin versant, zones forestières et rurales comprises. L'implémentation des ouvrages de gestion à la source peut réduire les volumes en réseau mais ne semble donc pas être une solution viable pour diminuer les crues à l'échelle du bassin versant périurbain étudié.

En conclusion, les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales sont à développer de façon ambitieuse et peuvent permettre de rendre résilients les réseaux d'assainissement face aux changements futurs globaux, urbanisation et changement climatique combinés. En effet, ces techniques permettent de limiter le ruissellement imperméable urbain et impactent ainsi surtout les réseaux d'assainissement et la part du ruissellement imperméable en rivière, qui est faible sur ce bassin versant péri-urbain. Les zones non urbaines contribuent de façon significative au débit total du ruisseau, et les composantes naturelles du débit contrôlent une large partie du régime d'écoulement (surtout l'hiver). Ainsi, la diminution du ruissellement imperméable urbain n'impacte que peu le régime d'écoulement du ruisseau. Sur ce bassin versant d'étude, on ne peut s'attendre à une protection du régime d'écoulement du ruisseau grâce aux seuls ouvrages de gestion à la source. Le ruisseau étant principalement dépendant des contributions des zones agricoles et forestières du bassin versant, la gestion à la source du ruissellement imperméable urbain a un impact moindre sur le bilan hydrologique du bassin versant par rapport au changement climatique, qui impacte fortement le bassin versant et le régime d'écoulement dans son intégralité.

# Table des matières

Résumé.....	2
Table des matières.....	4
Liste des Figures.....	6
<b>1. Contexte, état de l'art et objectifs.....</b>	<b>9</b>
1.1. Etat de l'art scientifique.....	9
1.2. Contexte institutionnel .....	11
<b>2. Méthodologie .....</b>	<b>12</b>
2.1. Description du bassin versant du Ratier .....	12
2.2. Données spatiales .....	12
2.3. Données hydro-climatiques .....	14
2.3.1. Climat .....	14
2.3.2. Débits .....	14
2.4. Description du modèle hydrologique J2000P .....	15
2.4.1. Description du modèle J2000P.....	15
2.4.2. Implémentation du modèle de BV du Ratier : délimitation des HRU et simplification des réseaux	18
2.4.3. Implémentation du module de techniques alternatives.....	20
2.5. Calage des paramètres du modèle et validation.....	24
2.5.1. Résultats du calage .....	26
2.5.2. Validation du modèle .....	28
2.6. Elaboration des scénarios .....	30
2.6.1. Scénarios d'imperméabilisation .....	30
2.6.2. Scénarios climatiques.....	34
2.6.3. Scénarios de gestion des eaux pluviales.....	43
2.7. Analyse des simulations .....	46
2.7.1. Définition des indicateurs.....	46
2.7.2. Présentation des indicateurs .....	48
2.7.3. Simulations réalisées.....	49
<b>3. Résultats.....</b>	<b>50</b>
3.1. Gestion et urbanisation.....	51
3.1.1. Composantes du bilan .....	52
3.1.2. Débits moyens mensuels.....	56
3.1.3. Moyenne interannuelle des débits journaliers.....	60
3.1.4. Indicateurs de débits élevés: débits maximums mensuels, quantiles Q1, Q5 et Q10 .....	61
3.1.5. Indicateurs en réseau: Fréquences de déversement et volumes déversés par l'ensemble des DO	65
3.1.6. Indicateurs d'étiage: QMNA5 et VCN15 .....	68
3.1.7. Illustration sur hydrographes .....	71
3.1.8. Evènements remarquables.....	73
3.1.9. Remarques et conclusions .....	74
3.2. Gestion et changement climatique .....	76
3.2.1. Composantes du bilan .....	77
3.2.2. Débits moyens mensuels.....	80
3.2.3. Moyenne interannuelle des débits journaliers.....	83
3.2.4. Indicateurs de débits élevés: débits maximums mensuels, quantiles Q1, Q5 et Q10 .....	84
3.2.5. Indicateurs en réseau: DOs volume et fréquence.....	89
3.2.6. Indicateurs d'étiages: QMNA5 et VCN15.....	91
3.2.7. Illustration sur hydrographes .....	92
3.2.8. Remarques et conclusions .....	94



3.3.	Impacts cumulés : gestion + climat + urbanisation .....	96
3.3.1.	Composantes du bilan .....	96
3.3.2.	Analyse en composantes principales des composantes du bilan .....	98
3.3.3.	Débits moyens mensuels.....	101
3.3.4.	Moyenne interannuelle des débits journaliers.....	102
3.3.5.	Indicateurs en réseau: DOs volume et fréquence.....	103
<b>4.</b>	<b>Conclusions opérationnelles .....</b>	<b>105</b>
4.1.	Analyse des processus.....	105
4.2.	Implications.....	106
<b>5.</b>	<b>Perceptives, discussion et futures recherches.....</b>	<b>109</b>
5.1.	Prise en compte du ruissellement de surface (imperméable).....	109
5.2.	Désagrégation temporelle des séries de pluie et impact sur les valeurs extrêmes .....	110
5.3.	Simplification du fonctionnement des ouvrages de gestion à la source et scénarios homogènes non spatialisée.....	110
5.4.	Complexité de l'hydrologie urbaine.....	111
5.5.	Changement climatique et changement de l'occupation du sol.....	111
<b>6.</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>112</b>
<b>7.</b>	<b>Références .....</b>	<b>113</b>
<b>8.</b>	<b>Annexe 1.....</b>	<b>116</b>
	Indicateurs hydrologiques en m <sup>3</sup> /s.....	116
8.1.	Gestion et urbanisation.....	116
8.1.1.	Débits moyens mensuels.....	116
8.1.2.	Indicateurs de débits élevés : débits maximums mensuels .....	117
8.1.3.	Indicateurs d'étiages: QMNA5 et VCN15.....	119
8.2.	Gestion et changements climatiques.....	121
8.2.1.	Débits moyens mensuels.....	121
8.2.2.	Indicateurs d'étiages: QMNA5 et VCN15.....	122
8.3.	Impact cumulés.....	123
8.3.1.	Débits moyens mensuels.....	123

## Liste des Figures

Figure 1 – occupation du sol : 3 classes J2000P (Source : cartes d’usage des sols du projet Avupur, (Braud et al., 2011)).....	12
Figure 2 – Carte pédologique : nature des sols (Source : programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) .....	13
Figure 3 – géologie du sous-sol représentée dans J2000P (Sources : BRGM et Gnouma (2006)) .....	13
Figure 4 – Surfaces imperméables et réseaux d’assainissement simplifiés pour J2000P. (Sources : OpenStreetMap, les bases de données du Grand Lyon, SIAVHY) .....	13
Figure 5 - Carte des stations pluviométriques et points de mesure des débits.....	14
Figure 6 – Carte des HRUs sur occupation du sol 2008.....	16
Figure 7 – Représentation conceptuelle du modèle hydrologique J2000P, à l’intérieur de chaque maille (HRU) (adapté de Labbas (2015)) .....	17
Figure 8 – Illustration de la correction manuelle des contours de HRUs : on voit les HRUs données par HRU-delin en A, manuellement délimitées pour mieux prendre en compte les surfaces imperméables dans les HRU urbaines.....	18
Figure 9 –Illustration de la simplification des réseaux : à gauche le ‘vrai’ réseau, complexe, à droite le réseau simplifié utilisé dans J2000P .....	19
Figure 10 - Illustration de la représentation du module de TA dans une maille du modèle: les carrés noirs représentent des surfaces imperméables (par exemple routes, toitures et parking), les carrés verts des ouvrages de déconnexion (par exemple toitures végétalisées, noues). La vignette de droite montre que dans le modèle les surfaces imperméables et les ouvrages de gestion à la source sont agrégées comme un seul et même ouvrage, ‘générique’ et équivalent aux ouvrages installés. ....	20
Figure 11 – Illustration du module d’ouvrage de gestion à la source avec flux et paramètres géométriques .....	21
Figure 12 – Intégration du module TA dans J2000P.....	23
Figure 13 – Chroniques de débits observés et simulés en mm/jour à la stations du Ratier (échelle racine carrée) .....	26
Figure 14 – Courbe des débits classés (échelles linéaires et log) Ratier .....	27
Figure 15 – Moyenne interannuelle du débit de base observé et simulé Ratier – les valeurs min et max sont tracées horizontalement .....	27
Figure 16 - Chroniques de débits observés et simulés en mm/jour à la stations du Mercier (échelle racine carrée) .....	28
Figure 17 - Courbe des débits classés Mercier (échelles linéaires et log).....	29
Figure 18 - Moyenne interannuelle du débit de base observé et simulé Mercier - les valeurs min et max sont tracées horizontalement .....	29
Figure 19 – Cartes d’urbanisation futures discrétisées en HRU pour les trois scénarios d’étalement urbain considérés (source : Dodane 2014, projet Avupur) .....	31
Figure 20 – Données de l’INSEE sur l’évolution de la population des communes du BV avec régressions linéaires jusqu’en 2030 et 2060 .....	32
Figure 21 – Scénarios d’imperméabilisation : coefficient d’imperméabilité et hectares imperméables construits.....	33
Figure 22 - Illustration transformation des chroniques de pluie horaire.....	35
Figure 23 - Illustration transformation des chroniques d’ETref horaire .....	35
Figure 24 - A. Température moyenne pour le BV, la ville d’Orange et le scénario RCP 8.5. B. Différence de températures mensuelles par rapport à la référence C. Facteurs de perturbations pour création des scénarios d’évapotranspiration futurs. ....	37

Figure 25 – A. Cumuls mensuels moyens pour le BV, la ville d’Orange et le scénario RCP 8.5. B. Différence de cumul mensuel par rapport à la référence C. Facteurs de perturbations pour création des scénarios de pluviométrie. ....	40
Figure 26 - Comparaison précipitations mensuelles et températures mensuelles Alger/Madrid.....	42
Figure 27 – Scénarios de gestion des eaux pluviales.....	43
Figure 28 - Carte du réseau d'assainissement simplifié et extensions futures pour HRUs urbanisées	45
Figure 29 - Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV.....	53
Figure 30 – Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV par rapport à la référence .....	53
Figure 31 - Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV et des scénarios de déconnexion. ....	55
Figure 32 - Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV et des scénarios de déconnexion par rapport à la situation de référence .....	55
Figure 33 – Evolution relative des débits moyens mensuels avec imperméabilisation.....	57
Figure 34 - Evolution relative des débits moyens mensuels et scénarios de gestion .....	59
Figure 35 - Evolution de la moyenne interannuelle des débits journaliers en fonction du coefficient d'imperméabilisation et des scénarios de gestion.....	60
Figure 36 - Evolution relative des débits maximums mensuels avec imperméabilisation .....	62
Figure 37 - Evolution des quantiles de haut débit 1%, 5%, 10 par rapport à la situation de référence	62
Figure 38 - Evolution relative des débits maximums mensuels et scénarios de gestion .....	64
Figure 39 - Evolution des quantiles de haut débit 1%, 5%, 10 par rapport à la situation de référence en fonction des différents scénario de gestion des eaux pluviales.....	64
Figure 40 – Evolution du volume déversé via les DOs et du nombre de jours de déversement par rapport à la situation de référence en fonction de l'imperméabilisation .....	65
Figure 41 – Evolution du volume déversé via les DOs par rapport à la situation de référence en fonction de l'imperméabilisation et des scénarios de déconnexion .....	67
Figure 42 - Evolution du nombre de jours avec déversement via les DOs par rapport à la situation de référence en fonction de l'imperméabilisation et des scénarios de déconnexion .....	67
Figure 43 – Evolution du QMNA5 et du VCN15 par rapport à la référence avec imperméabilisation .	68
Figure 44 - Impact des scénarios de gestion et de l'imperméabilisation sur le QMNA par rapport à la référence .....	70
Figure 45 - Impact des scénarios de gestion et de l'imperméabilisation sur le VCN15 par rapport à la référence .....	70
Figure 46 - Impact de l'imperméabilisation sur un hydrographe : exemple en Janvier (à gauche) et en Juin (à droite).....	72
Figure 47 - Impact de la déconnexion sur un hydrographe : exemple en Janvier (à gauche) et en Juin (à droite).....	72
Figure 48 – Impact de l'imperméabilisation et des scénarios de déconnexion sur la crue de Novembre 2008 (droite) et de l'été 2003 (gauche) .....	73
Figure 49 – Part (en %) de chaque membre du bilan hydrologique annuel (moyenné), en fonction des scénarios de gestion, et des scénarios de pluie (haut) et de réchauffement (bas) .....	78
Figure 50 – Evolution de la part de chaque composante du bilan hydrologique annuel (moyenné), par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion, et des scénarios de pluie (haut) et de réchauffement (bas).....	79
Figure 51 - Evolution relative des débits moyens mensuels, scénarios de gestion et changement climatique, par rapport à la simulation de référence .....	81



Figure 52 - Lien entre facteurs de perturbations mensuels (pluviométrie) et évolution du débit moyen mensuel coloriés par moyenne de réchauffement annuel .....	82
Figure 53 –Moyenne interannuelle des débits en référence (en rouge à gauche et noir à droite), colorié en fonction de l'évolution de pluviométrie annuelle (à gauche) et de l'augmentation de la température (à droite).....	83
Figure 54 - Evolution relative des débits maximums mensuels, scénarios de gestion et changement climatique, par rapport à la simulation de référence .....	85
Figure 55 - Lien entre facteurs de perturbations mensuels (pluviométrie), en abscisses, et évolution du débit max mensuel coloriés par moyenne de réchauffement annuel .....	86
Figure 56 - Pluviométrie, évapotranspiration, débits et composantes souterraines pour deux simulations : référence (en bleu) et extrême (en orange).....	88
Figure 57 - Evolution du volume déversé (à gauche) et du nombre de jours avec déversement via les DOs (à droite) par rapport à la situation de référence en fonction des scénarios de gestion (abscisses), de la pluviométrie (colorié, en haut) et du réchauffement moyen annuel (colorié, en bas) .....	90
Figure 58 - Evolution du QMNA5 (à gauche) et du VCN15 (à droite) en fonction du mode de gestion des eaux pluviales (en abscisses) et coloriés en fonction du changement des scénarios de pluie (en haut) et du réchauffement moyen annuel (en bas).....	91
Figure 59- Gestion des eaux pluviales et changement climatique - exemple d'un hydrographe en Juin .....	93
Figure 60 - Gestion des eaux pluviales et changement climatique - exemple d'un hydrographe en Janvier.....	93
Figure 61 - -Evolution du % de la part de chaque membre du bilan hydrologique annuel (moyenné), par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion, et des scénarios de pluie (haut) et de réchauffement (bas).....	97
Figure 62 – Cercle de corrélation : variables et axes de l'ACP (Dimensions 1 et 2) (gauche), et tableau d'autocorrélation entre les anciennes et nouvelles variables (droite) .....	98
Figure 63 - Simulations sur les axes de l'ACP coloriés en fonction des scénarios de déconnexion, de l'augmentation de température annuelle, du changement de pluviométrie annuelle, de l'urbanisation .....	100
Figure 64 - Evolution relative des débits moyens mensuels pour toutes les simulations par rapport à la simulation de référence, colorié en fonction di facteur multiplicatif mensuel appliqué à la pluie (en haut) et du réchauffement annuel (en bas).....	101
Figure 65 - Moyenne interannuelle des débits pour toutes les simulations, croisées entre scénario de gestion (vignettes horizontales), scénario d'urbanisation (vignettes verticales) et scénarios climatiques (coloriés en fonction de la pluie).....	102
Figure 66 - Evolution du volume et de la fréquence des rejets par les déversoirs d'orages par rapport à la simulation de référence en fonction de l'évolution de la pluviométrie annuelle (couleur), de la gestion des eaux pluviales (abscisses) et de l'urbanisation (vignettes) .....	104
Figure 67 - Explication conceptuelle (simplifiée) des impacts observés par l'urbanisation et la déconnexion sur les débits modélisés du ruisseau.....	105
Figure 68 - Illustration simplifié du bassin versant et des zones de contribution au débit: les zones urbaines, même futures, ne dominent pas l'occupation du sol.....	108



# 1. Contexte, état de l'art et objectifs

## 1.1. Etat de l'art scientifique

Les cours d'eau urbains souffrent de l'urbanisation galopante (Walsh, 2005) et du changement climatique (Hale et al., 2016). L'imperméabilisation bloque l'infiltration et la recharge des nappes phréatiques, diminue la couverture végétale et l'évapotranspiration et augmente le ruissellement de surface, le plus souvent géré par des réseaux d'assainissement qui déversent directement en rivière ou sont reliés aux rivières par des déversoirs d'orages (Burns et al., 2012). On observe donc, dans les bassins versants urbains et péri-urbains, une diminution des débits de base ainsi que des crues plus fréquentes et intenses par rapport à une situation de référence 'non-urbaine' (Braud et al., 2013). Le changement climatique (conséquence du réchauffement) entraîne de plus longues périodes sans pluie, des orages plus intenses et plus fréquents et une demande d'évapotranspiration plus élevée (Terray and Boé, 2013). L'urbanisation croissante et le changement climatique augmentent donc potentiellement le risque d'étiage sévère, le risque de crues dangereuses et le risque de saturation des réseaux et de pollutions graves associées. La combinaison de tous ces impacts entraîne une perte de la biodiversité en rivière (Nelson et al., 2009).

Pour préserver et restaurer la qualité des cours d'eau urbains, gérer les eaux pluviales à la source semble prometteur (Walsh et al., 2015) et permet de contrer les effets induits par l'imperméabilisation et le changement climatique en fournissant du stockage, de l'abattement de crue, de la recharge et du soutien à l'étiage et des diminutions des volumes en réseau (Bonneau et al., 2017; Fletcher et al., 2013; Fletcher et al., 2014). A l'échelle de la parcelle ou de l'ouvrage, il est prouvé que les ouvrages de gestion à la source sont capables de réduire fortement les débits en réseau (Davis, 2007) et d'améliorer la qualité de l'eau renvoyé en réseau ou en rivière. (Davis, 2008; Dietz and Clausen, 2008; Li et al., 2009).

A l'échelle d'un bassin versant, ces effets restent à démontrer. Des études de modélisation montrent que l'implémentation des ouvrages de gestion à la source permet d'écarter les réponses à des événements pluvieux modérés (Burns et al., 2014; Gagrani et al., 2014; Palla and Gnecco, 2015), ce qui semble se confirmer par de récentes études expérimentales (Bell et al., 2016; Loperfido et al., 2014; Shuster and Rhea, 2013). En revanche, à l'échelle du bassin versant, l'impact de la déconnexion sur l'ensemble du régime d'écoulement reste à démontrer et paraît difficile à prévoir (Bhaskar et al., 2015). Quelques tentatives semblent prometteuses, mais restent trop parcellaires pour aboutir à des conclusions robustes (Rio et al., 2021). Le dimensionnement actuel des ouvrages de gestion à la source ne permet pas de s'approcher d'un régime d'écoulement 'naturel', 'pré-urbain'. (Bonneau et al., 2020; DeBusk and Hunt, 2011). Les effets de la déconnexion peuvent être légers et difficiles à détecter, en réseau (Burns 2021, en relecture) et en rivière (Li et al., 2017), bien qu'on a pu observer une légère hausse des débits moyens en rivière suite à la mise en place de l'infiltration des eaux pluviales (Hopkins et al., 2020). Les résultats expérimentaux de l'implémentation des techniques alternatives à l'échelle de tout un bassin versant sont rares (expériences à Melbourne, Australie et Portland, Etats-Unis) et incertains, étant donné la difficulté de la tâche et l'ampleur des ressources nécessaires pour mettre en place de telles expériences.

Les ouvrages de gestion à la source ont également le potentiel d'accroître la résilience des bassins versants

urbains face au changement climatique (Brudler et al., 2016), en fournissant du stockage, en encourageant l'infiltration et donc fournissant de l'eau aux stocks souterrains pour contrer l'augmentation de la demande en évapotranspiration. La littérature scientifique montre une grande variabilité de la réponse des ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source au changement climatique (Hou et al., 2020; Pyke et al., 2011; Rosenberg et al., 2010). Les études démontrant l'adaptabilité des ouvrages de gestion à la source au changement climatique restent donc à développer.

La modélisation de l'impact de l'implémentation des modèles d'ouvrage à l'échelle des bassins versants – face à des scénarios climatiques et d'urbanisation – reste également une question peu traitée. De nombreuses études de modélisation se cantonnent à l'échelle de l'ouvrage ou de la parcelle (une rue, un petit quartier) mais rarement sur un bassin versant entier, ou se limitant à des tailles inférieures à celle de cette étude (Tikkanen (2013) : 2 km<sup>2</sup>, Kong et al. (2017): 838 ha). L'approche par modélisation est justifiée, notamment au regard des éléments suivants:

- La rareté des résultats expérimentaux à l'échelle d'un bassin versant
- Le besoin de produire des connaissances pour alimenter la gestion opérationnelle
- L'évaluation des effets des scénarios futurs

**Quantifier l'impact des ouvrages de gestion à la source à l'échelle du bassin versant reste donc “une science qui émerge” (Golden and Hoghooghi, 2018). La gestion à la source peut-elle limiter voire compenser les effets hydrologiques induits par l'imperméabilisation et le changement climatique? Dans quelle mesure ? Quel niveau d'effort est requis ?**

**Ce projet a pour objectif de modéliser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant péri-urbain et de quantifier la vulnérabilité et la sensibilité du régime d'écoulement face à l'imperméabilisation dans un contexte de changement climatique, et en fonction de l'implémentation croissante des ouvrages de gestion à la source.**

## 1.2. Contexte institutionnel

Le projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) et s'intègre dans les thèmes de rattachement suivants :

- *'Incidences et adaptations au changement climatique'* (Incidences du changement climatique sur l'évolution du bassin ? Préconisations pour la politique de gestion de l'eau pour s'adapter au changement climatique ?),
- *'Pollutions urbaines, toxiques'* (Gestion quantitative et qualitative des eaux pluviales urbaines ? Méthode pour établir un diagnostic sur les cas de pollution toxique ?) et
- *'Enjeux de santé-environnement'* (Quels impacts des substances sur l'écosystème et l'état écologique du Rhône ? Quels sont les enjeux de santé-environnement ?).

Le projet s'inscrit dans l'accord cadre AERMC – ZABR (Zone Atelier Bassin du Rhône) est rattaché aux thèmes *'Flux Polluants, Ecotoxicologie, Ecosystèmes'* et *'Changement climatique et ressources'*

Le bassin versant d'étude choisi est celui du Ratier, sous bassin versant de l'Yzeron, monitoré et instrumenté par l'INRAE dans le cadre de l'Observatoire de Terrain d'Hydrologie Urbaine (OTHU), rattaché à la ZABR et à l'IR OZCAR.

### *Vocabulaire*

Il est à noter que dans ce rapport nous utiliserons « techniques alternatives », « ouvrages de gestion à la source », « solutions basées sur la nature », « déconnexion » de façon interchangeable ce qui peut être considéré comme un abus de langage. Les objets modélisés dans le cadre de cette étude sont des ouvrages de déconnexion (type jardins de pluie, noues, relativement décentralisés).

## 2. Méthodologie

### 2.1. Description du bassin versant du Ratier

Le bassin versant étudié est celui du ruisseau *Ratier*, sous bassin versant de l'Yzeron, dans l'ouest lyonnais. Le bassin fait partie de l'OTHU, et à ce titre est instrumenté et monitoré depuis 1997. Le bassin versant a une aire de 19 km<sup>2</sup>, avec une occupation du sol mixte (Figure 1) : de l'amont vers l'aval, des forêts, puis des zones agricoles en transition péri-urbaines (communes de Pollionay et Sainte-Consorce), et des zones urbaines plus denses (communes de Grézieu, Craponne, Saint Genis les Ollières). Le bassin versant est en pleine transformation avec un changement rapide de l'occupation du sol : densification de l'urbain existant et nouvelles habitations sur les zones agricoles (<https://www.insee.fr/>, Dodane et al. (2014)). Les sols sont peu profonds (1-4 m de profondeur), de nature sablo-limoneuse, avec des sols de types alluvions autour des cours d'eau (Figure 2). Le socle géologique est composé de roches métamorphiques (Figure 3). L'altitude du BV va de 720 m à 260 m. La précipitation annuelle moyenne est de 740 mm et l'évapotranspiration de référence annuelle moyenne de 770 mm (estimation à partir du modèle de Penman-Monteith). Les eaux pluviales des surfaces imperméables, environ 11% du bassin versant, sont collectées via un réseau unitaire (Figure 4), drainé en dehors du bassin versant jusqu'à la station d'épuration de Pierre Bénite. Sur le bassin versant étudié, on dénombre 4 déversoirs d'orage : 3 à Pollionnay et 1 situé vers la station de mesure du Ratier, à l'exutoire du bassin versant.

### 2.2. Données spatiales

Les cartes (Figures 1-4) illustrent, respectivement, l'occupation du sol (source : BD Ortho de l'IGN), les sols (source : programme IGCS), la géologie (source : BRGM), l'imperméabilisation du bassin versant (les toitures) et les réseaux d'assainissement du BV (source : OpenStreet Map, données du Grand Lyon et du SIAVHY), données qui ont servi à la mise en place du modèle hydrologique.

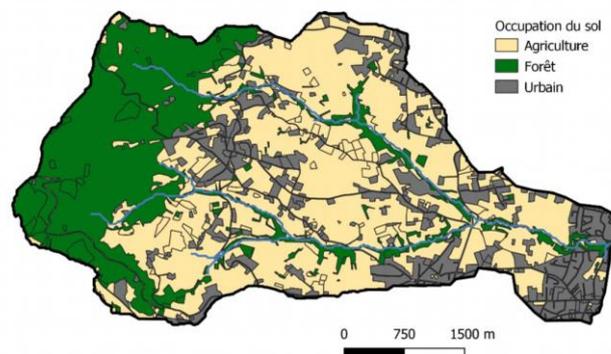


Figure 1 – occupation du sol : 3 classes J2000P (Source : cartes d'usage des sols du projet Avupur, (Braud et al., 2011)).

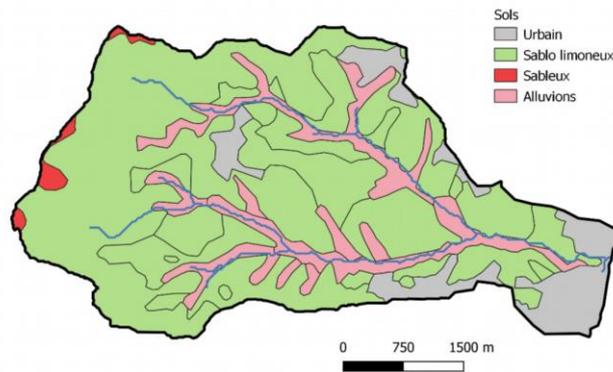


Figure 2 – Carte pédologique : nature des sols (Source : programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols)

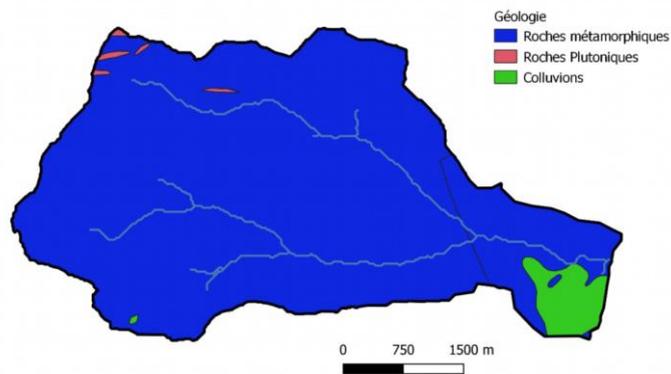


Figure 3 – géologie du sous-sol représentée dans J2000P (Sources : BRGM et Gnouma (2006))

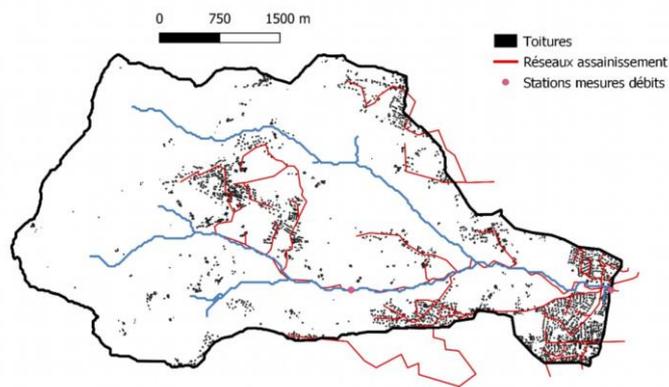


Figure 4 – Surfaces imperméables et réseaux d'assainissement simplifiés pour J2000P. (Sources : OpenStreetMap, les bases de données du Grand Lyon, SIAVHY)



## 2.3. Données hydro-climatiques

Le bassin versant du Ratier est instrumenté par INRAE dans le cadre de l'OTHU. Des données jugées fiables de débitmétrie et pluviométrie sont disponibles au pas de temps horaire depuis 1997 (<https://bdoh.irstea.fr/YZERON/>) (OTHU - Grand Lyon, 2021).

### 2.3.1. Climat

Les précipitations sont disponibles via la base de données BDOH (Lagouy et al., 2015) et via la base de données publiques du Grand Lyon (Grand Lyon ([data.grandlyon.com](http://data.grandlyon.com)), 2021). Huit stations de mesures ont été considérées (Figure 5) avec des données disponibles de 1997 à 2019. L'évapotranspiration de référence est calculée avec la formule de Penman-Monteith, grâce aux données issues de la ré-analyse SAFRAN (Vidal et al., 2010).

### 2.3.2. Débits

Des données de débits sont disponibles de 2012 à 2018 pour le Ratier et de 1997 à 2018 pour le Mercier, sous bassin versant du Ratier. Les données sont accessibles via la base de données BDOH (Lagouy et al., 2015)

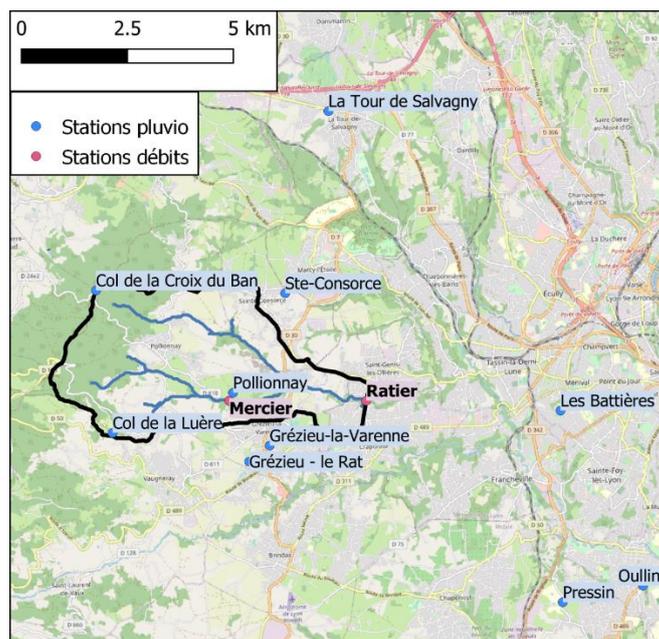


Figure 5 - Carte des stations pluviométriques et points de mesure des débits

## 2.4. Description du modèle hydrologique J2000P

### 2.4.1. Description du modèle J2000P

J2000 est un modèle hydrologique fonctionnant sur la plateforme de modélisation open-source JAMS (Krause et al., 2006). C'est un modèle distribué à base physique, intégrant différents modules (module interception, sol, nappes phréatiques, etc), qui permet la représentation des principaux processus hydrologiques sur tout un bassin versant. Plusieurs versions de ce modèle existent, dont la version J2000P, développée par Labbas (2015) pour prendre en compte le cas des bassins versants péri-urbains également drainés par des réseaux d'assainissement munis ou non de déversoirs d'orage. C'est cette version qui a été utilisée ici pour représenter le BV du Ratier.

Le bassin versant est discrétisé en un maillage irrégulier composé de HRU (*Hydrological Response Unit* ou Unité de Réponse Hydrologique) par l'outil HRU-*delin*. HRU *delin* produit un maillage du bassin versant en quatre étapes clés comme suit:

- 1/ exploitation des données topographiques pour décrire le réseau de drainage (linéaire, pente),
- 2/ association des points de mesure de débits aux brins de rivière calculés à la première étape,
- 3/ identification des zones homogènes en HRUs en croisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT, source : BD TOPO de l'IGN, résolution 50 m), la carte pédologique, la carte géologique et la carte d'occupation du sol
- 4/ connexion des HRUs entre elles et aux brins de réseau en utilisant la topographie.

Les processus hydrologiques sont calculés à l'intérieur de chaque HRUs, puis les flux sortants sont orientés vers d'autres HRU en fonction de la topologie, jusqu'aux brins de rivière. Les HRU 'urbaines' sont connectées au réseau d'assainissement, qui conduit le ruissellement de surface en dehors du bassin versant (jusqu'à la station d'épuration). Réseau et rivière peuvent être connectés via des déversoirs d'orage. Chaque HRU est supposée être homogène hydrologiquement (mêmes géologie, sols, occupation du sol).

Les processus physiques considérés sont les suivants, dans « l'ordre » (hydro)logique :

- Interception de la pluie par la canopée ; une partie de cette quantité d'eau intercepté est consommée par le flux d'évaporation tandis que l'autre partie est restituée vers le bassin versant.
- Ruissellement sur surface imperméable, ou bien ruissellement de surface hortonien ; c'est un flux de sortie appelé RD1, dont une partie ruisselle vers le réseau et l'autre ruisselle sur la HRU aval puis jusqu'au brin de rivière.
- Infiltration dans le sol, modélisé comme deux réservoirs : un réservoir à forte porosité (LPS : Large pore storage) et un réservoir à faible porosité (MPS : Medium pore storage). Le réservoir à porosité plus faible se remplit par diffusion depuis le réservoir à forte porosité, et se vide exclusivement par évapotranspiration. Le réservoir à forte porosité se vide par gravité et produit un flux sortant latéral (« interflow », flux de sortie noté RD2, connecté à la HRU aval puis jusqu'au brin de rivière, et un flux de percolation qui recharge le réservoir de nappe
- Recharge de nappe, modélisé par un réservoir linéaire qui se vide par un flux sortant (débit de base, ou « baseflow », flux de sortie appelé RG1).

Ces flux de sortie sont générés dans chaque HRU puis sont transférés d'une HRU à une autre jusqu'aux branches de rivière ou bien jusqu'aux tronçons de réseau d'assainissement. Le débit en rivière est donc composé de 3 composantes : une composante de surface RD1, interflow RD2, baseflow RG1.

Sur le modèle péri-urbain appliqué au bassin versant du Ratier, le modèle tourne au pas de temps horaire, plus compatible avec les dynamiques hydrologiques urbaines rapides. Les forçages météorologiques nécessaires sont :

- Pluviométrie horaire sur le bassin versant
- Evapotranspiration de référence, calculé à partir de données climatiques SAFRAN à l'aide de la formule de Penman-Monteith.

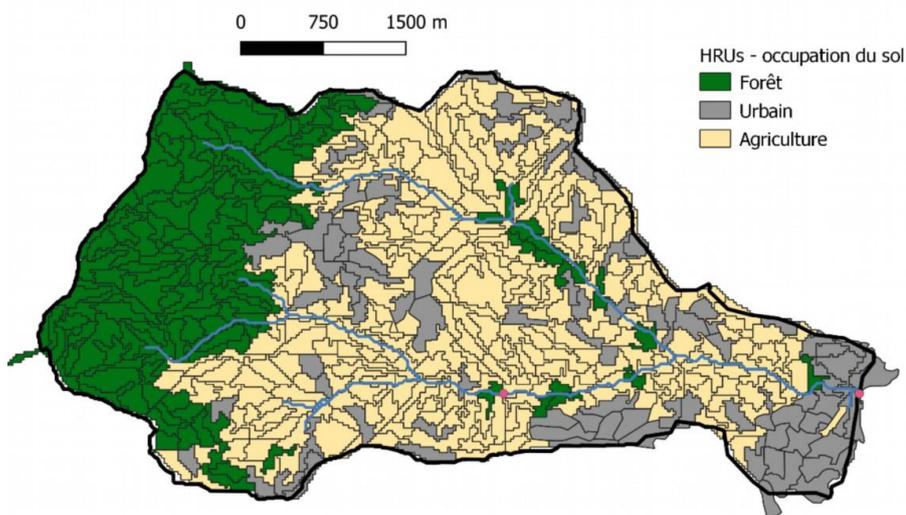


Figure 6 – Carte des HRUs sur occupation du sol 2008

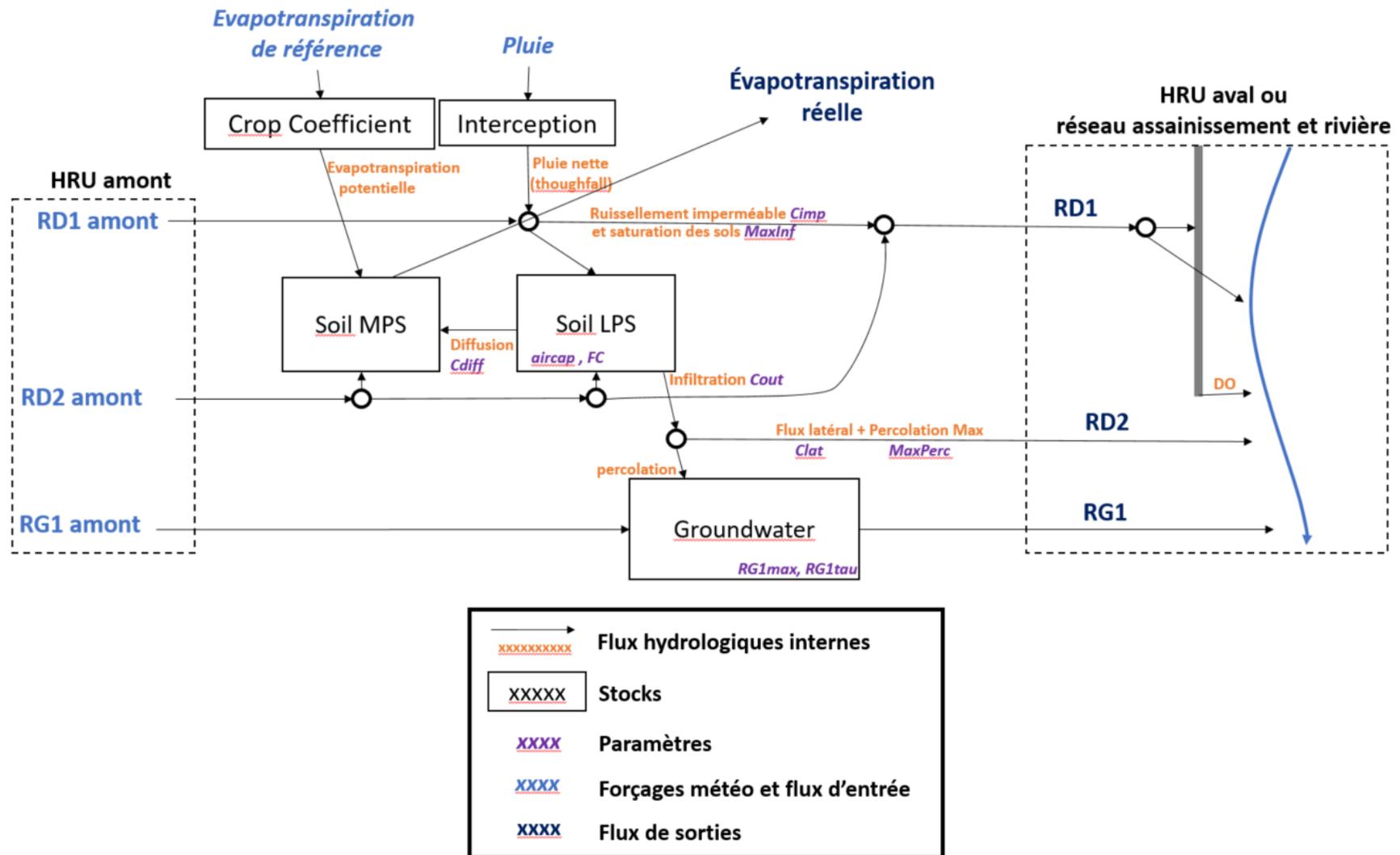
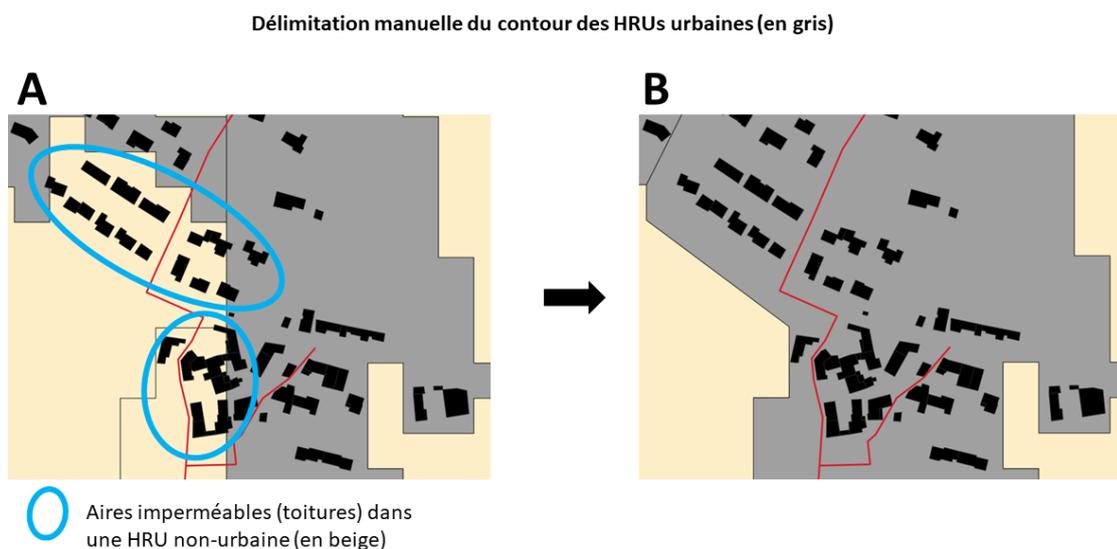


Figure 7 – Représentation conceptuelle du modèle hydrologique J2000P, à l'intérieur de chaque maille (HRU) (adapté de Labbas (2015))

## 2.4.2. Implémentation du modèle de BV du Ratier : délimitation des HRU et simplification des réseaux

L'algorithme de maillage du bassin versant décrit ci-dessous donne un total de 490 HRUs, avec une surface moyenne de 30000 m<sup>2</sup> par HRU selon un découpage d'hydrologie 'naturelle', sans prise en compte des aspects urbains (imperméabilité, réseaux) dans le calcul des mailles du modèle. Le coefficient d'imperméabilité de chaque HRU a été calculé à partir des données du Grand Lyon si disponibles ou des données OpenStreetMap, en multipliant les surfaces de toitures, parkings et linéaire des routes par la largeur de route estimée à partir d'observations (sur le terrain ou avec Google StreetView). Les coefficients d'imperméabilité obtenus furent réajustés pour être équivalents à ceux de Labbas (2015). Suivant la méthode décrite par Jankowsky et al. (2014) et Labbas (2015), les HRUs urbaines ont été redimensionnées pour mieux prendre en compte les réseaux et les surfaces imperméables. Effectivement, dans certains cas, il se peut que certaines surfaces imperméables soient drainées par le réseau d'assainissement du BV mais n'appartiennent pas au bassin versant topographique. Il faut donc 'étendre' le BV pris en compte dans J200P. De même, les délimitations en HRU par l'outil HRU-delin ne prennent pas en compte les surfaces imperméables (c'est un outil d'hydrologie 'naturelle' qui prend en compte la géologie, la nature des sols, l'occupation du sol et topographie). Pour gagner en précision, il est donc nécessaire de modifier les contours de certaines HRUs urbaines pour mieux inclure les surfaces imperméables (Figure 8). Il a été nécessaire de modifier (manuellement) la surface des HRUs pour prendre en compte réseaux et surfaces imperméables (Figure 8). Par exemple, on observe sur la Figure 8, en A, les HRUs comme calculés par HRU-delin et en B, la même zone après redéfinition manuelle des contours de HRU pour mieux prendre en compte les surfaces imperméables.



**Figure 8 – Illustration de la correction manuelle des contours de HRUs : on voit les HRUs données par HRU-delin en A, manuellement délimitées pour mieux prendre en compte les surfaces imperméables dans les HRU urbaines.**

Les cartes de réseaux d'assainissement ont été obtenues via la base de données du Grand Lyon et le Syndicat Intercommunal d'Assainissement de la Haute Vallée de l'Yzeron (SIAHVY). Le réseau a été simplifié de sorte que le réseau modélisé ne contienne que 69 brins (l'important étant que chaque HRU urbaine soit connectée à un brin de réseau, pas nécessairement unique). Le niveau de détail à l'intérieur d'une HRU urbaine n'impacte pas les résultats du modèle (Figure 9).

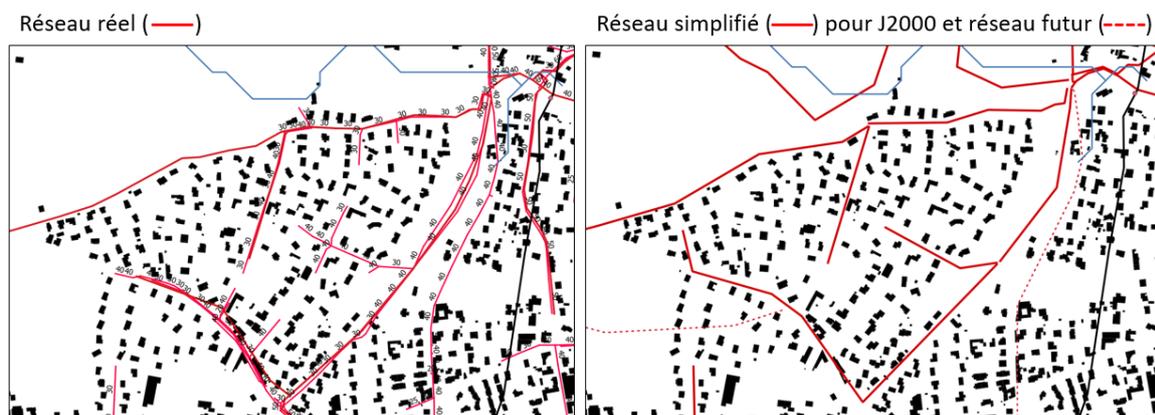
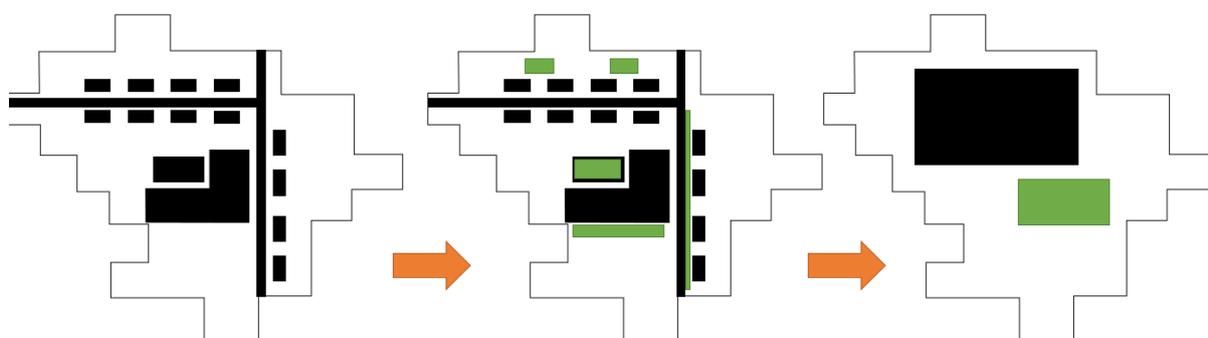


Figure 9 –Illustration de la simplification des réseaux : à gauche le 'vrai' réseau, complexe, à droite le réseau simplifié utilisé dans J2000P

### 2.4.3. Implémentation du module de techniques alternatives

Dans le cadre de cette étude, un module d'ouvrage de gestion des eaux pluviales à la source (*Green infrastructure* en anglais, d'où « GI » dans certaines images) a été développé dans J2000P. Si en réalité un programme de déconnexion s'appuie sur l'implémentation de plusieurs types d'ouvrage (par exemple une combinaison de toitures végétalisées, parkings poreux, noues, jardins de pluie, etc.), à l'échelle de modélisation présentée ici, il est impossible d'entrer dans ce détail des ouvrages (Figure 10). Les ouvrages de gestion à la source sont donc représentés comme un seul et unique ouvrage de gestion à la source, 'équivalent' à tous les ouvrages installés réellement (Figure 10). Il en est de même avec l'imperméabilité, défini comme un seul coefficient par HRU : toutes les surfaces imperméables se comportent donc de la même manière, hydrologiquement, dans le modèle.



**Figure 10 - Illustration de la représentation du module de TA dans une maille du modèle: les carrés noirs représentent des surfaces imperméables (par exemple routes, toitures et parking), les carrés verts des ouvrages de déconnexion (par exemple toitures végétalisées, noues). La vignette de droite montre que dans le modèle les surfaces imperméables et les ouvrages de gestion à la source sont agrégées comme un seul et même ouvrage, 'générique' et équivalent aux ouvrages installés.**

Dans chaque HRU urbaine, une fraction du ruissellement urbain (RD1) est dirigée vers une TA (la fraction dépend du scénario de gestion, voir § Elaboration des scénarios). La TA stocke de l'eau et ce stock peut se vider soit par infiltration (en fonction de la conductivité hydraulique du sol sous la TA) alimentant ainsi les stocks de sols LPS et MPS, soit par évapotranspiration (en fonction de la teneur en eau de la TA) ; en cas de saturation, le trop-plein de la TA réintègre le ruissellement RD1 de la HRU (Figure 11). Le module TA a été ainsi construit et validé en utilisant les données collectées sur bassin de bio-rétention, type jardin de pluie (Bonneau et al., 2021). Validé sur 22 événements pluvieux, le modèle réplique les bilans de manière satisfaisante à un pas de temps 6 min.

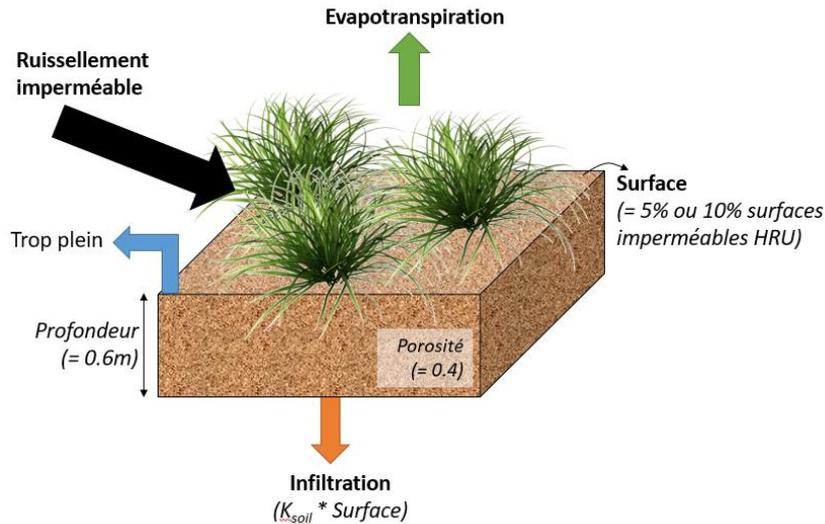


Figure 11 – Illustration du module d’ouvrage de gestion à la source avec flux et paramètres géométriques

A l’intérieur de chaque HRU, le ruissellement RD1 est généré (surfaces imperméables + hortonien + saturation, etc.). Une fraction de ce ruissellement  $fracGI$ , définie en fonction des scénarios, intervient dans le calcul du débit entrant  $Q_{in}$  dans chaque TA à chaque pas de temps comme suit :

$$Q_{in} = fracGI * RD1 + rain * areaGI \text{ (en litres)}$$

Avec  $areaGI$  l’aire de la TA (calculée à partir de la surface imperméable déconnectée de chaque HRU et définie comme un % de chaque HRU).

On regarde si la TA peut accueillir autant d’eau :

$$V_{act} = V_{act} + Q_{in}$$

Avec  $V_{act}$  le volume d’eau stockée dans la TA.

Si la TA est pleine, le trop plein correspond à la différence entre le volume stocké (supérieur au volume maximum) et le volume maximum. Le processus de calcul se déroule comme suit :

$$SI (V_{act} > V_{max}) : \\ Q_{ovf} = V_{act} - V_{max} \text{ et } V_{act} = V_{max}$$

Avec  $V_{max}$  le volume max pouvant être stocké dans la TA, défini par son aire \* sa profondeur \* sa porosité, ces deux derniers paramètres étant définis dans un fichier de définition des TA, et  $Q_{ovf}$  le flux de trop plein.

A partir du volume d’eau stocké à l’intérieur de la TA, on calcule les deux flux de sortie. D’abord l’évapotranspiration, en regardant au préalable si la TA est végétalisée ou non. Si non, le flux évaporatif est fixé à 0.

$$SI \text{ végétalisée} = FALSE$$

$$Q_{etr} = 0$$

Si oui, le flux évapotranspiré est fixé à l’évapotranspiration potentielle, sauf si la teneur en eau relative de la TA est inférieure à la capacité au champ FC fixée à 20%, valeur moyenne pour un sable (dans ce cas modulation linéaire

de l'ET potentielle par la teneur en eau), ou inférieur au point de flétrissement WP fixé à 10%, valeur moyenne pour un sable

$$SI \text{ végétalisée} = TRUE$$

$$Q_{etr} = \min(Q_{etp}, V_{act}) \text{ si } \frac{V_{act}}{V_{max}} > FC$$

$$Q_{etr} = \min\left(Q_{etp} * \frac{\frac{V_{act}}{V_{max}} - FC}{\frac{V_{act}}{V_{max}} - WP}, V_{act}\right) \text{ si } WP < \frac{V_{act}}{V_{max}} < FC$$

$$Q_{etr} = 0 \text{ si } \frac{V_{act}}{V_{max}} < WP$$

A noter que toutes les TA modélisées sont considérées comme végétalisées, c'est à dire avec transpiration. Or, pour certains ouvrages (par exemple les parkings poreux ou chaussées à structures réservoirs), il y a présence d'un flux d'évaporation mais pas de transpiration. Ceci n'est pour l'instant pas pris en compte dans le modèle.

On calcule également le flux d'infiltration sortant de la TA (pour les TAs infiltrantes). Le processus de calcul se déroule comme suit :

$$SI \text{ imperméabilisée} = TRUE$$

$$Q_{inf} = 0$$

Sinon, le flux d'infiltration est calculé comme la surface de la TAs \* la conductivité hydraulique du sol sous la TA, renseignées en Tableau 2.

$$SI \text{ imperméabilisée} = FALSE$$

$$Q_{inf} = \min(K_s * area_{GI}, V_{act})$$

Dans le cas où il n'y pas assez d'eau dans la TA pour satisfaire la demande en infiltration et en ET, les deux flux sont calculés comme proportionnel à leur demande respective (respectivement  $Q_{etr} = V_{act} \frac{Q_{etr}}{Q_{etr} + Q_{inf}}$  et  $Q_{inf} = V_{act} \frac{Q_{inf}}{Q_{etr} + Q_{inf}}$ )

Enfin, le volume est réactualisé comme suit :

$$V_{act} = \max(V_{max} - Q_{inf} * \Delta T - Q_{etr} * \Delta T, 0)$$

Les ouvrages sont considérés comme génériques, d'une profondeur de 0.6 m, porosité de 0.4, avec une aire proportionnelle à la surface imperméable dans la HRU (5% ou 10%, voir §Elaboration des scénarios).

Intégration du module d'ouvrage de gestion à la source dans J2000P (Figure 12):

- Le flux d'évapotranspiration est ajouté à l'évaporation de chaque HRU
- Le flux d'infiltration est ajouté au flux d'infiltration qui se distribue dans les deux réservoirs de sol, au pas de temps suivant. On considère donc, au pas de temps horaire, que le volume infiltré



Tableau 1 - paramètres du module d'ouvrage de gestion à la source

Paramètre	Unité	A spécifier dans :
Taille de la TA	% de la HRU	hru.par
Végétalisée ?	1 ou 0	Gl.par
Infiltrante ?	1 ou 0	Gl.par
Profondeur	m	Gl.par
Porosity	-	Gl.par
Point de flétrissement et capacité au champ	-	Fixés mais pourrait être définis dans Gl.pat
Conductivité hydraulique à saturation du sol sous la TA	m/s	soils.par

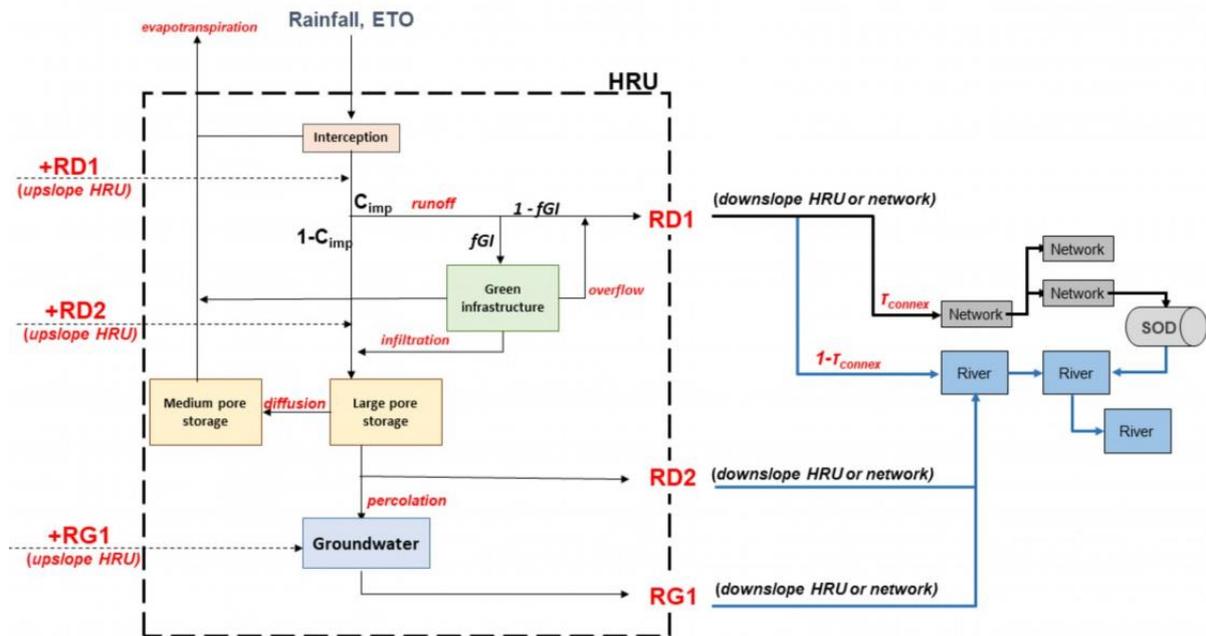


Figure 12 – Intégration du module TA dans J2000P

Tableau 2 - Conductivité hydrauliques des différentes classes de sol

ID Sol	100	102	702	704	1031	7021	7041	7042
Ks (m/s)	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$

## 2.5. Calage des paramètres du modèle et validation

Le calage du modèle s'est effectué sur la période 1997-2019, en enlevant les deux premières années de l'étude (période d'initialisation du modèle).

Le Tableau 3 présente les paramètres du modèle qui ont été calés en comparant les sorties du modèle avec les données observées sur la station du Ratier de 2012 à 2018 (Lagouy et al., 2015). Une fois calé, le modèle est validé par comparaison avec données observées sur la station du Mercier de 2014 à 2020 (Figure 5).

Tableau 3 – paramètres calés du modèle – voir Figure 7 et Figure 12

<b>Paramètres globaux</b>	<b>MaxInf</b>		60 mm /j			
	<b>Cdiff</b>		5			
	<b>Cout</b>		3			
	<b>Clat</b>		2			
	<b>MaxPerc</b>		5 mm/h			
<b>Paramètre distribués (par HRU)</b>	<b>Géologie</b>	<b>ID</b>	<b>2, 10</b>		<b>3</b>	
		<b>RG1max</b>	120 mm		30 mm	
		<b>RG1tau</b>	100 h		25h	
	<b>Sols</b>	<b>ID Sol</b>	<b>100</b>	<b>102</b>	<b>704</b>	<b>1031</b>
		<b>Aircap = FC</b>	88 mm	88 mm	108 mm	94 mm
		<b>ID Sol</b>	<b>7021</b>	<b>7041</b>	<b>702</b>	<b>7042</b>
		<b>Aircap = FC</b>	122 mm	203 mm	61 mm	162 mm
	<b>Surface</b>	<b>FracSewer / FracPoly</b>	0.65 / 0.35			

Pour « obtenir les bons résultats pour les bonnes raisons » (Horner et al., 2020) plusieurs indicateurs hydrologiques furent considérés et optimisés (Horner et al., 2020), de sorte à balayer tous les aspects du régime d'écoulement et à s'assurer que le modèle puisse reproduire non seulement des chroniques de débits mais soit également cohérent au niveau des processus physiques.

- L'efficacité de Nash Sutcliffe (pas de temps horaire)  $NSE_h$  (Eq1)
- L'efficacité de Nash Sutcliffe, données log-transformées (pas de temps horaire)  $NSE_{h,\log}$  (Eq 1)
- L'efficacité de Nash Sutcliffe (pas de temps journalier)  $NSE_d$  (Eq 1)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - \overline{X_i^{obs}})^2}$$

Avec:  $X_i^{obs}$  la valeur observée,  $\overline{X_i^{obs}}$  la moyenne des valeurs observées,  $X_i^{sim}$  la valeur simulée,  $N$  la longueur de la chronique.

- Coefficient de ruissellement  $S_{RC}$  (rapport valeur simulée/observée) mensuel

$$S_{RC} = \frac{\sum Q}{\sum P} \text{ avec } Q \text{ les débits à l'exutoire du BV et } P \text{ les précipitations}$$

- La pente entre les quantiles 0.33 et 0.66 de la courbe des débits classés à l'exutoire du BV:  $S_{FDCslope}$  (rapport valeur simulée/observée)

$$S_{FDCslope} = \frac{\log(Q_{p_{low}}) - \log(Q_{p_{high}})}{p_{high} - p_{low}}$$

- Les quantiles 0.1; 0.33; 0.66; 0.9 de la courbe des débits classés (rapport valeur simulée/observée))

$$Q_{0.1} Q_{0.33} Q_{0.66} Q_{0.9}$$

- L'indice de débit de base (Baseflow index  $BFI$ ). Le filtre de Gustard (1992), qui permet de filtrer le débit de base d'une chronique de débits, a été appliqué aux valeurs journalières (simulées et observées):

$$BFI = \frac{\sum Q_{BF}}{\sum Q} \text{ avec } Q_{BF} \text{ le baseflow journalier}$$

- L'efficacité de Nash Sutcliffe du régime annuel de baseflow, défini comme la moyenne interannuelle (par exemple la moyenne de tous les 3 janvier) du baseflow pour chaque jour de l'année,  $NSE_{BFR}$

## 2.5.1. Résultats du calage

Le Tableau 4 présente les valeurs des différents indicateurs hydrologiques pour le modèle une fois calé. On observe de bons NSEs, tant pour les données horaires et journalières (0.66 et 0.71) que pour les données log-transformées horaire et journalières (0.65 et 0.71 respectivement).

Tableau 4 – indicateurs hydrologiques du modèle calé

NSE horaire	0.66
NSE horaire – log	0.65
NSE journalier	0.71
NSE journalier - log	0.71
Ratio coefficients de ruissellement	1.03
Ratio pentes débits classés	0.92
Ratio Quantiles 0.33/0.66/0.1/0.99	1.00; 1.10; 1.06; 1.00
Ratio BFI	1.1
NSE baseflow regime	0.69

La Figure 13 présente les chroniques de débits journaliers observés (bleu) et simulés (rouge), en échelle racine pour mieux apprécier l'ensemble du régime d'écoulement, sur la station de mesure située à l'exutoire du BV du Ratier.

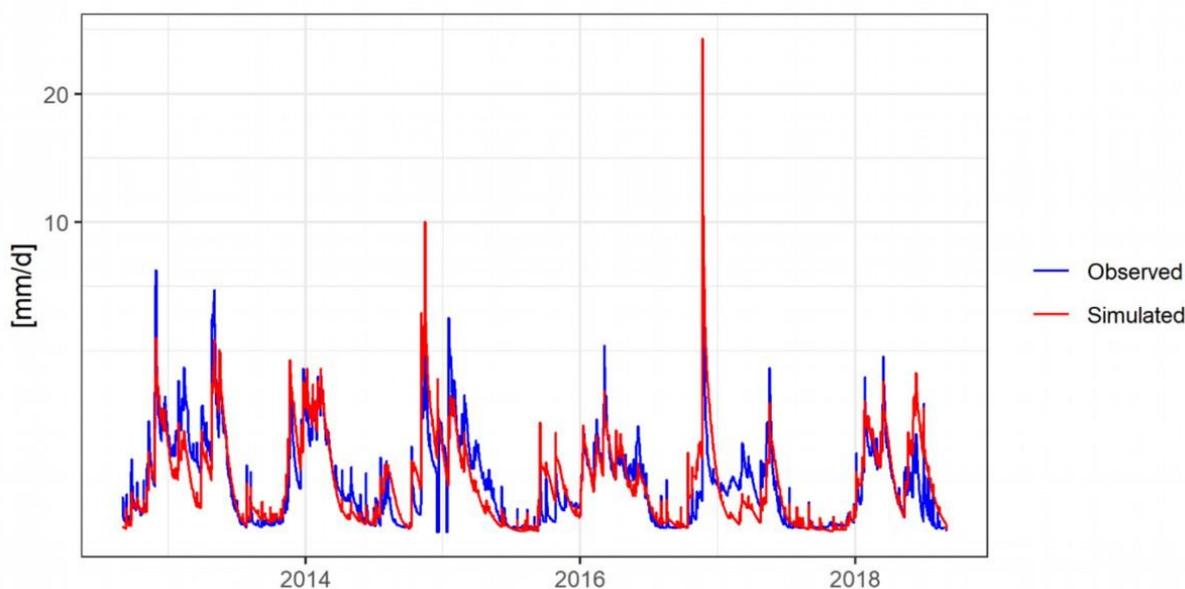


Figure 13 – Chroniques de débits observés et simulés en mm/jour à la stations du Ratier (échelle racine carrée)

La Figure 14 présente la courbe des débits horaires classés, simulés et observés, en échelle linéaire et échelle log. On observe une bonne reproduction du régime d'écoulement, ce qui donne une confiance relative en la capacité du modèle de représenter l'évolution du régime d'écoulement sous scénarios de changement d'occupation

du sol et de climat.

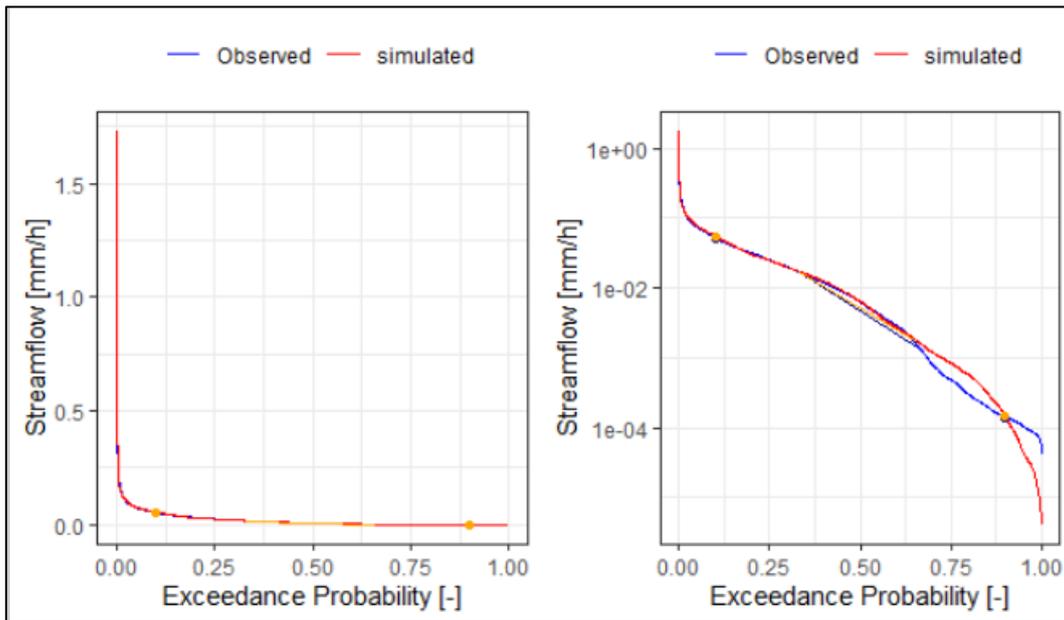


Figure 14 – Courbe des débits classés (échelles linéaires et log) Ratier

La Figure 15 présente la moyenne interannuelle du débit de base pour chaque jour de l'année (simulée et observée). On observe une bonne reproduction de la quantité annuelle de débit de base, avec une dynamique annuelle cohérente (Figure 15)

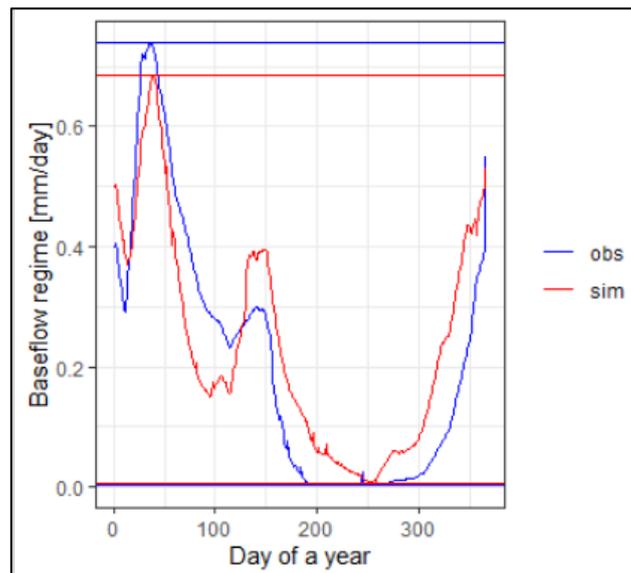


Figure 15 – Moyenne interannuelle du débit de base observé et simulé Ratier – les valeurs min et max sont tracées horizontalement

## 2.5.2. Validation du modèle

Les mêmes indicateurs sont calculés, pour validation, sur les données de débits du Mercier post-2014, un changement de station ayant eu lieu en 2014 créant une discontinuité dans les données, interrogeant sur la qualité des données précédentes. Les indicateurs sont bons (Tableau 5) avec une reproduction assez fidèle du régime d'écoulement.

Tableau 5 - Indicateurs de validation du calage du modèle sur la station du Mercier

NSE horaire	0.68
NSE horaire – log	0.54
NSE journalier	0.71
NSE journalier – log	0.53
Ratio coefficients de ruissellement	0.98
Ratio pentes débits classés	0.80
Ratio Quantiles 0.33/0.66/0.1/0.99	0.78; 1.30; 1.99;-Inf
Ratio BFI	0.81
NSE baseflow regime	0.21

Les indicateurs sont légèrement inférieurs à ceux du Ratier, notamment les indicateurs liés aux faibles débits (données log-transformées, baseflow régime). Ceci peut s'expliquer par le fait que les débits sont plus faibles dans le Mercier, qui est même intermittent. Les Figure 16, Figure 17, Figure 18 présentent les mêmes indicateurs hydrologiques que pour le Ratier.

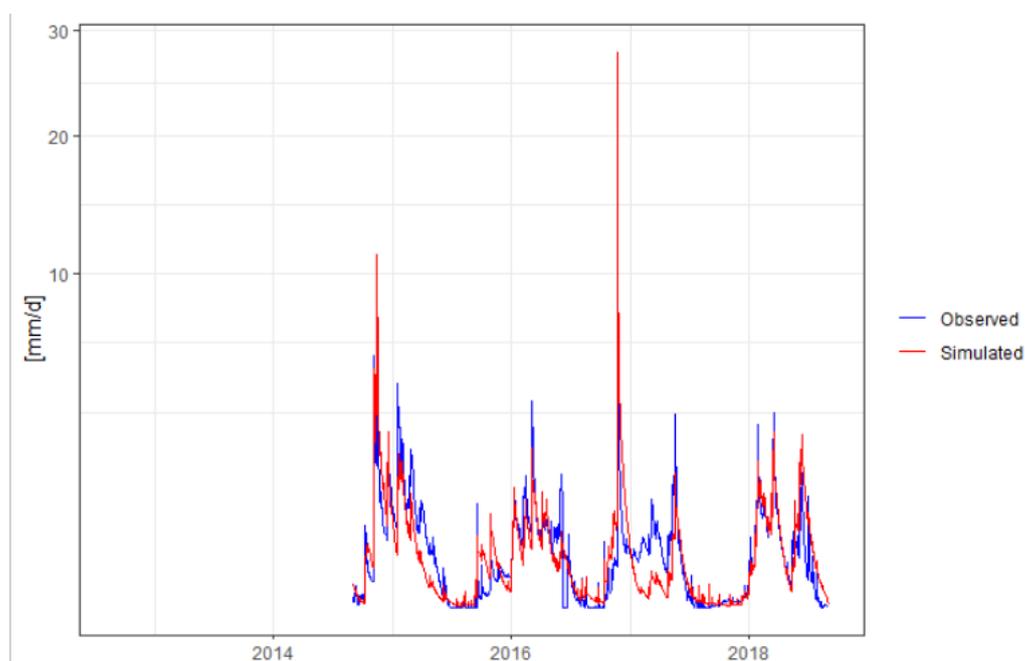


Figure 16 - Chroniques de débits observés et simulés en mm/jour à la stations du Mercier (échelle racine carrée)

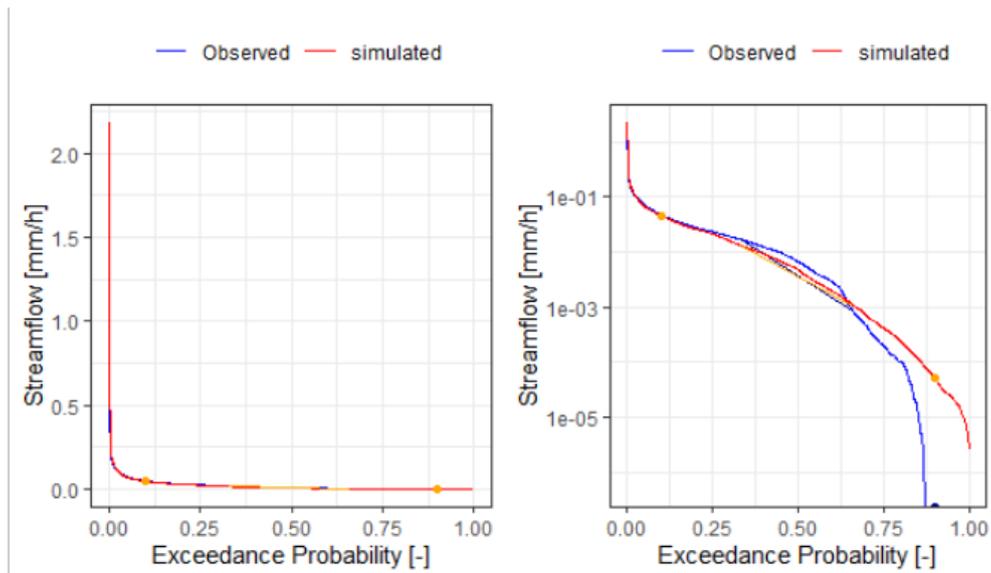


Figure 17 - Courbe des débits classés Mercier (échelles linéaires et log)

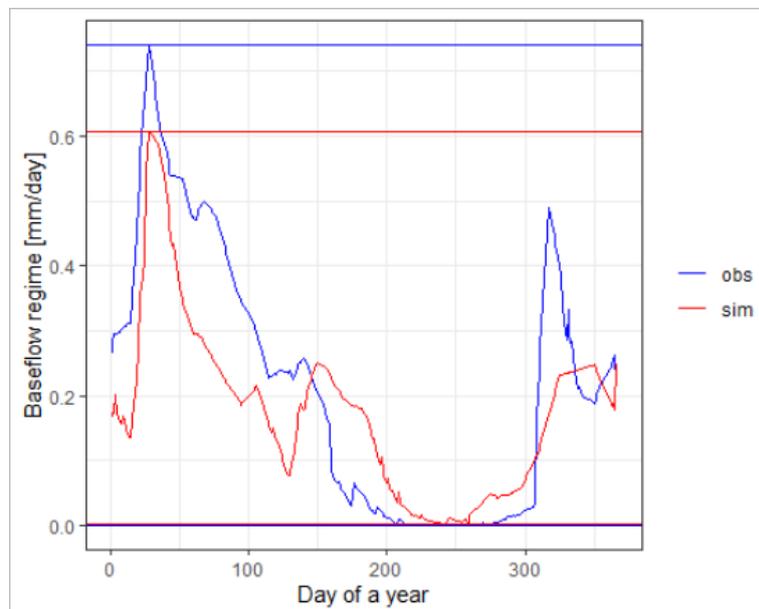


Figure 18 - Moyenne interannuelle du débit de base observé et simulé Mercier - les valeurs min et max sont tracées horizontalement

On obtient donc un modèle capable de représenter les dynamiques horaires et journalières du Ratier de manière satisfaisante, sur l'ensemble des composantes du bassin versant. A partir de ce modèle correctement paramétré, on peut donc construire des scénarios pour tester l'évolution et la sensibilité du régime d'écoulement futur du Ratier.



## 2.6. Elaboration des scénarios

### 2.6.1. Scénarios d'imperméabilisation

Pour modéliser des scénarios plausibles d'urbanisation et d'imperméabilisation du bassin versant, une approche 'par perturbation' a été choisie. Plutôt que de choisir un ou deux scénarios fixes d'urbanisation, un ensemble de scénarios d'urbanisation croissante a été testé pour évaluer la sensibilité et la vulnérabilité du bassin versant à des changements d'occupation du sol. Deux paramètres sont modifiés : la carte de l'urbanisation (plus ou moins d'étalement urbain) et le coefficient d'imperméabilisation de chaque HRU (urbanisation plus ou moins dense).

### Cartes d'urbanisation

Les cartes d'urbanisation du bassin (Figure 19) utilisées proviennent du projet AvuPur (Braud et al., 2010; Dodane et al., 2014). En se basant sur un panel d'experts, sur des projections démographiques et sur des anticipations d'évolution des réglementations, plusieurs cartes d'occupation du sol à horizon 2030 ont été créées. Nous en avons sélectionné trois :

- Occupation du sol 2008 : notre référence (pas d'étalement urbain).
- Occupation du sol 2030 S1A : étalement urbain
- Occupation du sol 2030 S1B : étalement urbain amplifié

Pour les scénarios 2030 S1A et 2030 S1B, plusieurs HRUs non urbaines (principalement agricoles), sont transformées en HRU urbaines. Pour chacune de ces trois cartes d'urbanisation, quatre scénarios d'imperméabilisation sont considérés (Tableau 6):

- Pop 1 : pas de changement pour les HRUs déjà urbaines, et la valeur du coefficient d'imperméabilisation des nouvelles HRUs urbaines est fixée comme la moyenne de toutes les HRU urbaines ( $\pm$  une moitié d'écart type)
- Pop 2 (densification du neuf) : pas de changement pour les HRUs déjà urbaines, et la valeur du coefficient d'imperméabilisation des nouvelles HRUs urbaines est fixée comme la moyenne de toutes les HRU urbaines ( $\pm$  une moitié d'écart type) MOINS 3.5%
- Pop 3 (augmentation modérée des surfaces imperméables) : la valeur du coefficient d'imperméabilisation de toutes les HRUs urbaines est fixée à la moyenne de toutes les HRU urbaines ( $\pm$  une moitié d'écart type) PLUS 3.5%
- Pop 4 (augmentation forte des surfaces imperméables) : la valeur du coefficient d'imperméabilisation de toutes les HRUs urbaines est fixée à la moyenne de toutes les HRU urbaines ( $\pm$  une moitié d'écart type) PLUS 7%



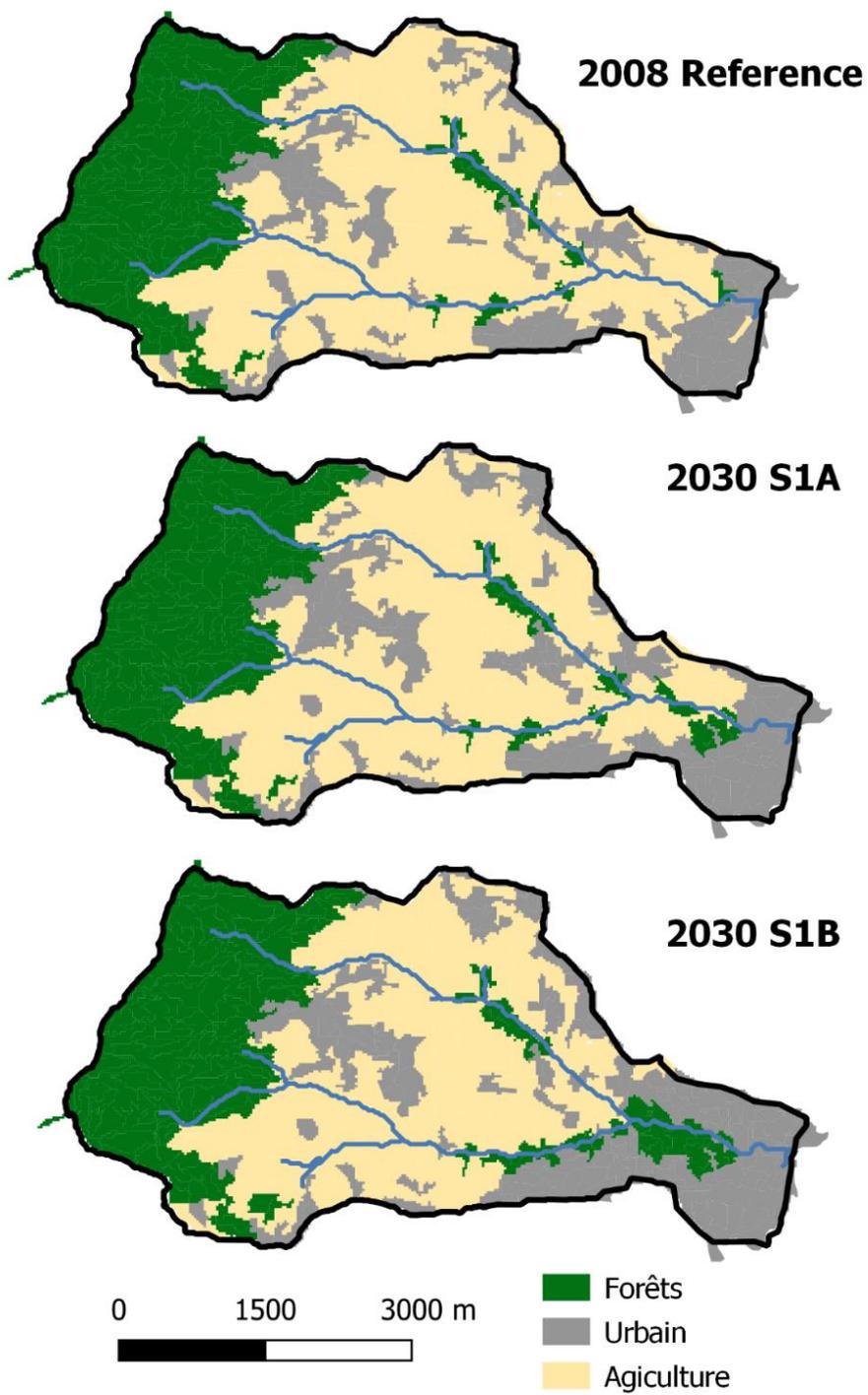


Figure 19 – Cartes d'urbanisation futures discrétisées en HRU pour les trois scénarios d'étalement urbain considérés (source : Dodane 2014, projet Avupur)

Tableau 6 – résumé scénarios imperméabilisation

Occupation du sol →	2008	2030 S1A		2030 S1B	
↓Imperméabilisation	-	HRU déjà urbaine	Nouvelle HRU urbaine	HRU déjà urbaine	Nouvelle HRU urbaine
<b>Pop 1</b>	Reference	Pas de changement	Moyenne	Pas de changement	Moyenne
<b>Pop 2</b>	-	Pas de changement	Moyenne – 3.5%	Pas de changement	Moyenne – 3.5%
<b>Pop 3</b>	Moyenne + 3.5%	Moyenne + 3.5%		Moyenne + 3.5%	
<b>Pop 4</b>	Moyenne + 7%	Moyenne + 7%		Moyenne + 7%	

## Les scénarios sont-ils 'réalistes' ?

En partant des données d'évolution de la population des communes du bassin versant fournies par l'INSEE à horizon 2030-2050 (Figure 20), nous avons tenté d'évaluer la pertinence des scénarios proposés. En faisant l'hypothèse d'une augmentation homogène sur le bassin versant de la population, on peut s'attendre pour 2030-2050 à une augmentation de la population de 3000-5000 habitants.

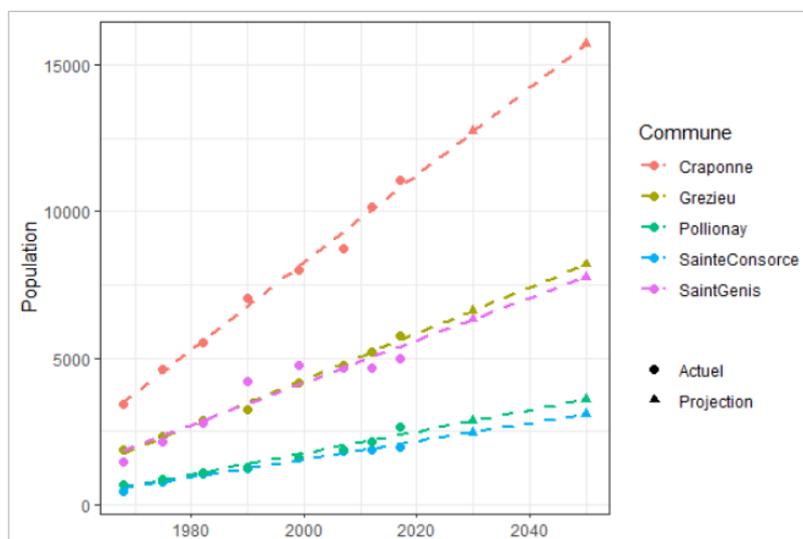


Figure 20 – Données de l'INSEE sur l'évolution de la population des communes du BV avec régressions linéaires jusqu'en 2030 et 2060

L'INSEE donne un taux d'occupation moyen de 2.5 habitants/logement sur le bassin versant. Les habitations sont actuellement réparties à 85% de maisons individuelles et 15% d'appartements (insee.fr). En gardant ces données et en faisant l'hypothèse de toitures de maisons variant de 100 à 150 m<sup>2</sup>, et des appartements de 65 à 100 m<sup>2</sup>; pour des immeubles dépassant rarement 3 étages, on obtient 13 à 22 ha de surfaces imperméables liés aux habitations, auxquelles il faut ajouter routes et équipements collectifs.

Les scénarios créés permettent de balayer une plage d'augmentation des surfaces imperméables allant de 5 ha à 67 ha (Figure 21). Cette large gamme recouvre bien les valeurs estimées précédemment, et permet de quantifier la vulnérabilité du bassin versant face à l'accroissement de son imperméabilisation et l'impact cette dernière sur le régime d'écoulement du Ratier. Compte tenu de l'incertitude sur l'évolution de la population et des constructions à venir, les scénarios permettent d'envisager des perspectives d'évolution de l'occupation du sol sur le bassin versant. La Figure 21 présente l'évolution du coefficient d'imperméabilisation et des nouvelles surfaces imperméables en fonction des différents scénarios.

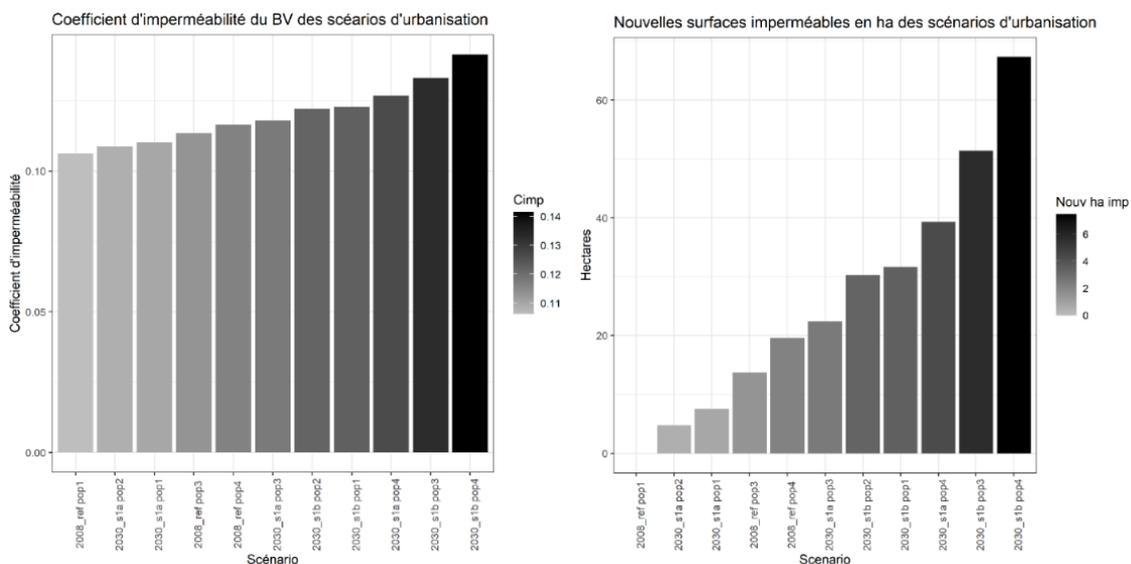


Figure 21 – Scénarios d'imperméabilisation : coefficient d'imperméabilité et hectares imperméables construits



## 2.6.2. Scénarios climatiques

Les modèles climatiques régionaux permettent d'obtenir des projections des variables climatiques (température, pression atmosphérique, précipitation) à horizon 2030-2100. Cependant, les sorties de ces modèles se font au pas de temps mensuel ou au mieux, journalier. La désagrégation à des échelles plus fines (typiquement, horaire dans notre cas) est très incertaine, surtout à des échelles spatiales aussi fines que celle du bassin versant étudié (20 km<sup>2</sup>). Ainsi, nous avons choisi d'étudier la vulnérabilité du bassin versant et du régime d'écoulement face aux changements climatiques avec une approche 'par perturbation' (approche 'bottom-up', Sauquet et al. (2019)), ce qui permet de se focaliser sur la réponse du BV à des variations climatiques.

L'idée est donc de créer des chroniques horaires futures au pas de temps horaire à partir des chroniques horaires observées sur le bassin versant (1997-2018), en leur appliquant une perturbation construite à partir des chroniques journalières futures (Oudin et al., 2005; Sauquet et al., 2019), pour l'évapotranspiration (Eq 1), et sur les précipitations (Eq 2) (Figure 22, Figure 23).

$$ETP^*_h = ETP_{hourly} + \frac{Ra_h \Delta T_m}{28.5 \cdot 100} \quad (Eq 1)$$

$$P^*_h = P_h * \frac{\overline{PM}_i + \Delta P_m}{\overline{PM}_i} \quad (Eq 2)$$

avec  $\Delta T_m$  le changement de température mensuel par rapport à la référence,  $ETP^*_h$  la chronique d'évapotranspiration horaire transformée (future),  $ETP_h$  l'évapotranspiration horaire actuelle,  $R_a$  la radiation du bassin versant (W/m<sup>2</sup>),  $P_h^*$  la précipitation horaire future, transformée,  $P_h$  la précipitation horaire actuelle,  $\overline{PM}$  la précipitation mensuelle moyenne de référence et  $\Delta P_m$  le changement de précipitation mensuel par rapport à la référence.

Pour définir ces facteurs de perturbation  $\Delta T_m$  et  $\Delta P_m$  et construire les scénarios futurs, nous utilisons les chroniques journalières suivantes :

- Température et précipitation issues de la simulation Jouzel 2014 (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/180>), données produites par le CNRM (<https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article122>), obtenues via le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>), pour la période 2030-2060, et pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre (Representative Concentrations Pathways RCP) du GIEC 8.5 (*business as usual*, augmentation des émissions), pour la cellule de la grille SAFRAN correspondante (Vidal et al., 2010).
- Celles de précipitations et de température de la ville d'Orange entre 1990-2020 (choisie car trajectoire 'possible' du climat lyonnais et disponibilité et qualité des données).



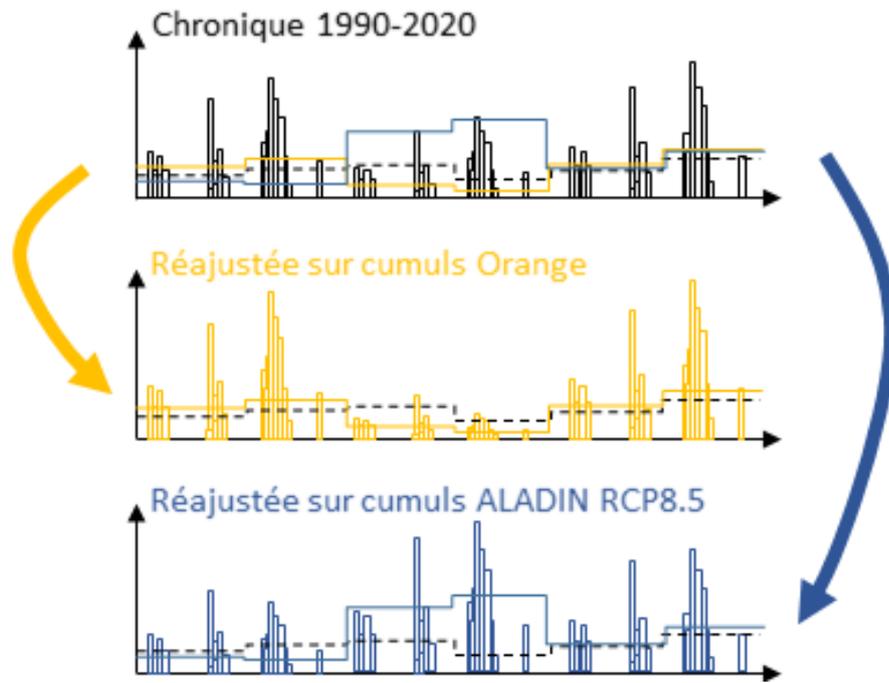
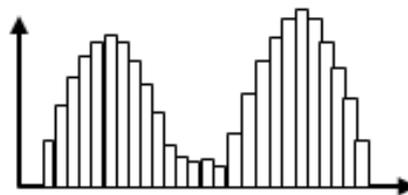


Figure 22 - Illustration transformation des chroniques de pluie horaire

Evapotranspiration de référence 1990-2020



Evapotranspiration future

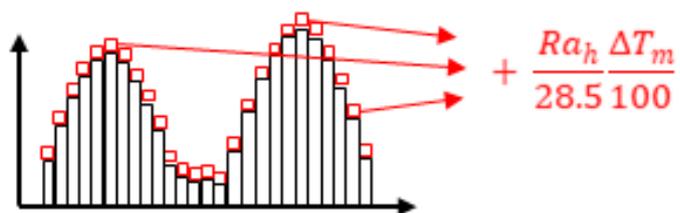


Figure 23 - Illustration transformation des chroniques d'ETref horaire

## Calcul de $\Delta T$

Pour calculer les facteurs de perturbations qui serviront à transformer la chronique d'évapotranspiration actuelle, on applique la méthode suivante, inspirée de Devers and Sauquet (2016) :

- Calcul des moyennes mensuelles (Figure 24.A) pour la chronique RCP8.5 et celle de la ville d'Orange, et la chronique de référence (température 1990-2020 pour la grille SAFRAN correspondant au bassin versant du Ratier).
- Calcul de la différence entre les températures mensuelles (Figure 24 B). On obtient donc deux 'formes' de perturbations. Les variabilités saisonnières sont différentes, plus prononcées pour le scénario RCP8.5, avec une température moyenne allant jusqu'à +5°C par rapport à aujourd'hui en Aout.
- On remarque donc que les différences entre les scénarios ne sont pas linéairement espacées. Or, il est idéal de pouvoir tester une large gamme d'augmentations de la température (et d'augmentation de l'évapotranspiration de référence associée). Nous avons gardé la « forme » de la perturbation, que nous avons répliqué avec réajustement de la moyenne annuelle des réchauffements à +2°C, +3.5 °C et +5°C., respectivement (Figure 24 C.). L'idée n'est pas de construire des scénarios de réchauffement le plus exact possible, mais de tester la réponse et la vulnérabilité du bassin versant à une gamme de scénarios

On obtient donc 6 scénarios de réchauffement climatique possibles, chacun des scénarios équivalant à une chronique d'évapotranspiration horaire (Tableau 7) future grâce à la formule d'Oudin (Eq1) :

$$ETP^*_{hourly} = ETP_{hourly} + \frac{Ra_{hourly}}{28.5} \frac{\Delta T_{monthly}}{100}$$

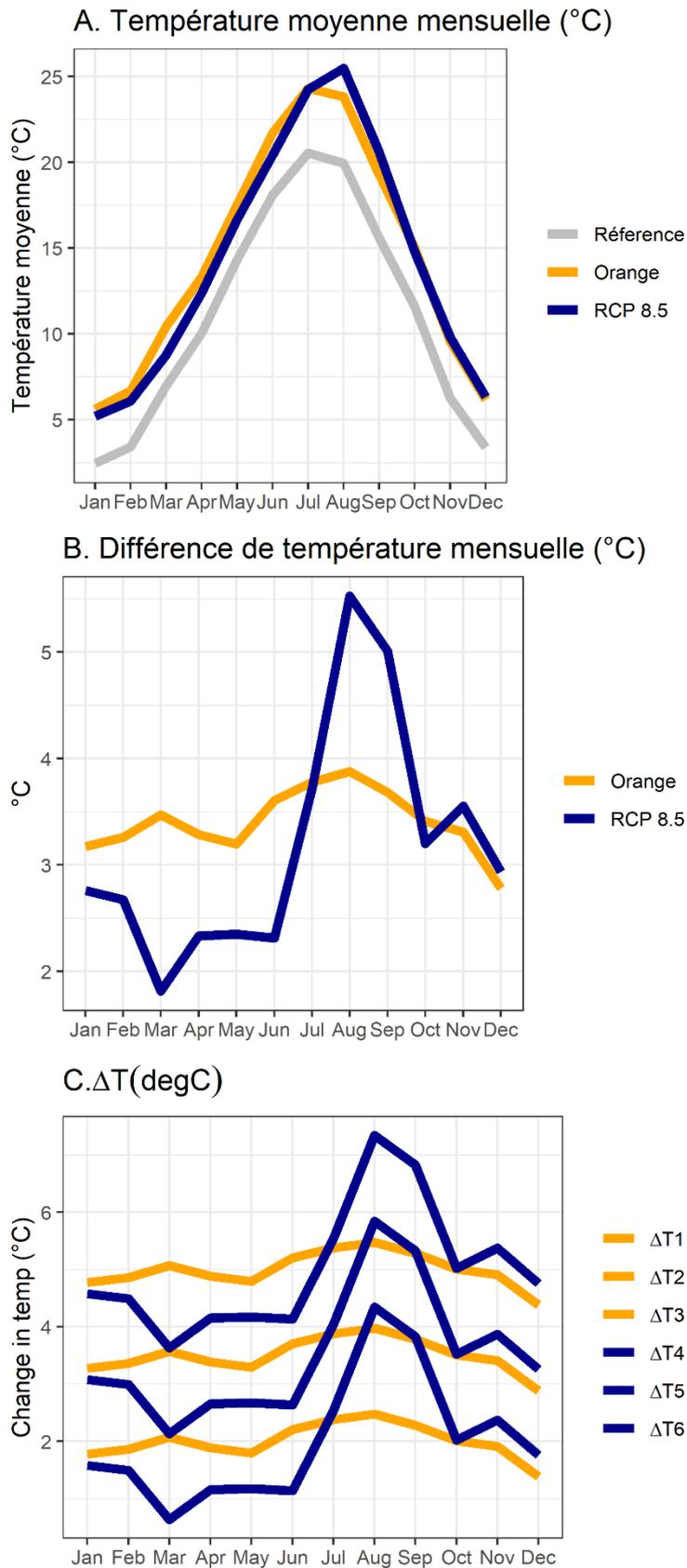


Figure 24 - A. Température moyenne pour le BV, la ville d'Orange et le scénario RCP 8.5. B. Différence de températures mensuelles par rapport à la référence C. Facteurs de perturbations pour création des scénarios d'évapotranspiration futurs.



Tableau 7 – Evapotranspiration de référence moyenne et annuelle pour les scénarios et les chroniques utilisées

Scénario	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total annuel
<b>Actuel</b>	20.5	26.0	50.1	67.1	91.1	106.6	122.6	108.4	68.3	41.2	23.7	19.4	745
<b>ET 1</b>	26.0	31.1	56.3	72.8	97.2	114.4	131.5	117.8	76.2	48.2	29.8	23.6	825
<b>ET 2</b>	30.5	35.2	60.8	77.4	102.4	119.7	137.1	123.4	81.4	53.5	34.5	28.3	885.3
<b>ET 3</b>	35.1	39.3	65.3	82.0	107.5	124.9	142.7	129.1	86.6	58.8	39.3	32.9	943.6
<b>ET 4</b>	25.4	30.1	52.0	70.6	95.1	110.6	132.1	124.8	81.6	48.3	31.2	24.8	826.6
<b>ET 5</b>	30.0	34.2	56.5	75.2	100.2	115.9	137.7	130.5	86.8	53.5	36.0	29.5	885.9
<b>ET 6</b>	34.5	38.3	61.0	79.8	105.4	121.2	143.3	136.1	92.0	58.8	40.7	34.1	945.3

## Calcul de $\Delta P$

Les 2 chroniques considérées (Orange et les projections issues de la simulation du CNRM 2014 sur le RCP 8.5) ont pour hauteur moyenne précipitée annuelle respectives 725 mm et 836 mm, contre 726 mm pour la référence (le bassin versant). Elles indiquent donc stagnation ou augmentation de la pluviométrie annuelle future, avec cependant une distribution mensuelle différente (Figure 25 A.).

De la même manière que pour l'évapotranspiration, nous avons construit des scénarios de pluie à l'échelle horaire en s'appuyant sur les données journalières issues de la simulation du CNRM 2014 correspondant au scénario RCP 8.5 et de la ville d'Orange, qui permettront de balayer un champ de possibilités de changements de précipitation.

Pour les deux chroniques :

- Nous calculons la moyenne mensuelle des précipitations (Figure 25 A). On observe des différences notables, notamment en Juin : la projection du CNRM 2014 prédit plus de pluie (+40 mm sur un mois), quand Orange a -30 mm en Juin.
- On calcule la différence avec la référence (Figure 25 B).
- On réplique la différence en multipliant par un coefficient 1/3 et 2/3 (Figure 25 C), pour obtenir au final 6 scénarios de pluies futures (Tableau 8), en appliquant l'équation ci-dessous à la chronique actuelle horaire.

$$P^*_{hourly} = P_{hourly} * \frac{\overline{PM}_i + \Delta P_{monthly,i}}{\overline{PM}_i}$$

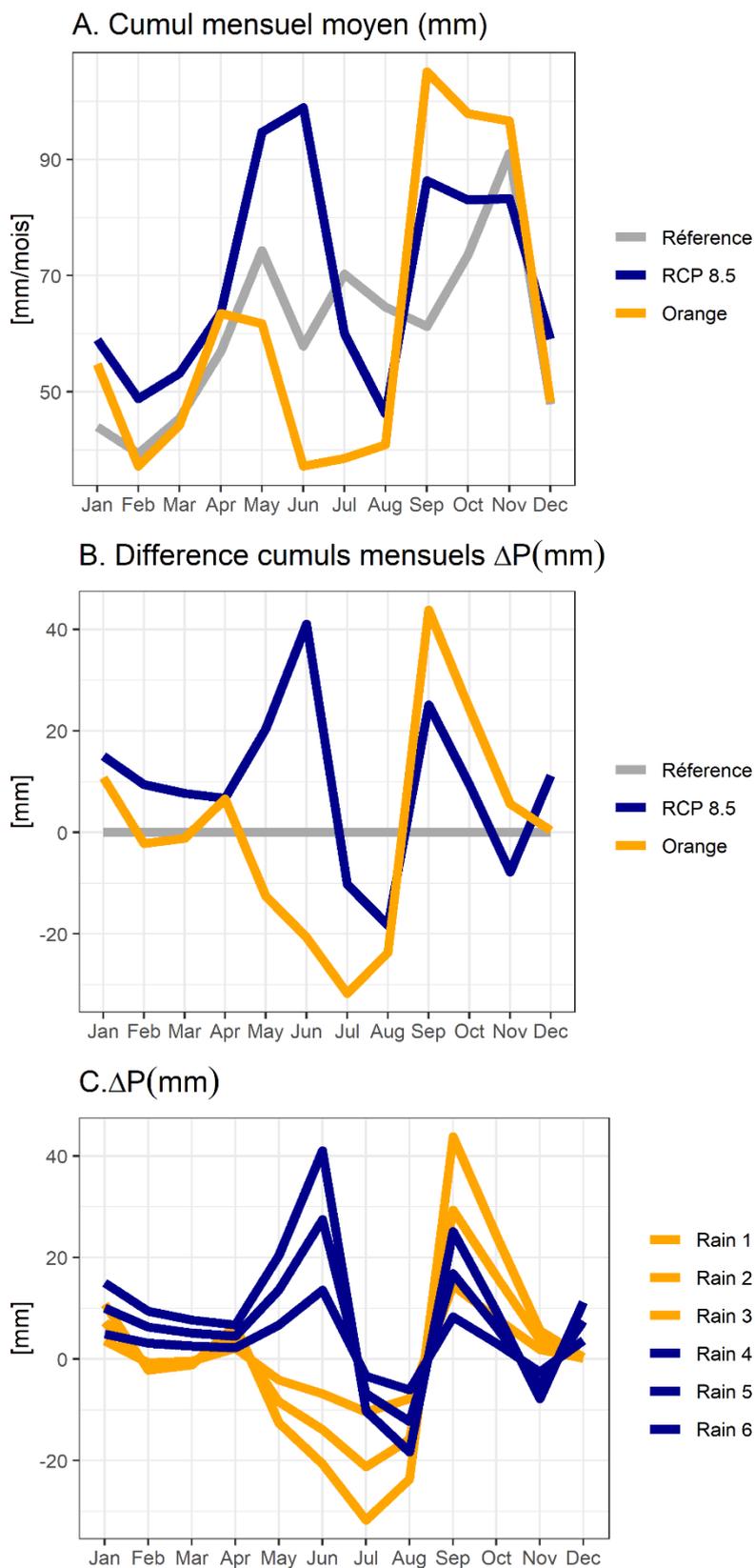


Figure 25 – A. Cumuls mensuels moyens pour le BV, la ville d’Orange et le scénario RCP 8.5. B. Différence de cumul mensuel par rapport à la référence C. Facteurs de perturbations pour création des scénarios de pluviométrie.

Tableau 8 – cumuls de précipitation moyens mensuels et annuels

Scénario	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septem bre	Octobre	Novem bre	Décemb re	Cumul annuel
Actuel	44.0	39.4	45.4	56.9	74.3	57.9	70.3	64.6	61.3	73.6	91.0	47.9	<b>726.4</b>
Pluie1	47.5	38.6	45.1	59.1	70.2	51.1	59.8	56.7	75.7	81.6	92.9	48.0	<b>726.3</b>
Pluie2	51.2	37.9	44.7	61.3	65.9	44.0	49.0	48.7	90.6	89.9	94.8	48.1	<b>726.1</b>
Pluie3e	54.8	37.2	44.3	63.5	61.7	37.2	38.5	40.9	105.1	97.9	96.6	48.2	<b>725.9</b>
Pluie4	48.9	42.5	48.0	59.2	81.0	71.4	66.9	58.5	69.6	76.7	88.5	51.6	<b>762.6</b>
Pluie5	54.0	45.7	50.6	61.4	88.0	85.4	63.4	52.3	78.1	79.9	85.8	55.4	<b>799.9</b>
Pluie6	59.0	48.8	53.1	63.6	94.7	98.9	60.0	46.2	86.4	83.0	83.3	59.1	<b>836</b>
Orange	54.8	37.1	44.3	63.5	61.7	37.2	38.5	40.9	105.1	97.9	96.6	48.2	<b>725.9</b>
<b>CNRM 2014 RCP8.5</b>	59	48.8	53.1	63.6	94.7	98.9	60	46.2	86.4	83	83.3	59	<b>836.0</b>

## Les scénarios sont-ils 'réalistes'?

Le plan Climat de la Métropole prédit « *le climat de Madrid en 2050 et Alger en 2100* » à Lyon. On peut ainsi comparer les perturbations de température avec les moyennes mensuelles de températures et de précipitation à Madrid et Alger (Figure 26).

Bien que le plan climat soit évidemment un élément de communication dont la réalité physique n'est pas avérée, on constate en effet que les cumuls de précipitations sont bien différents (bien plus faibles en été, quasi nuls) et les températures équivalentes sont à celles de Madrid mais bien en dessous de celles d'Alger, quasiment à 10°C en moyenne au-dessus du climat lyonnais

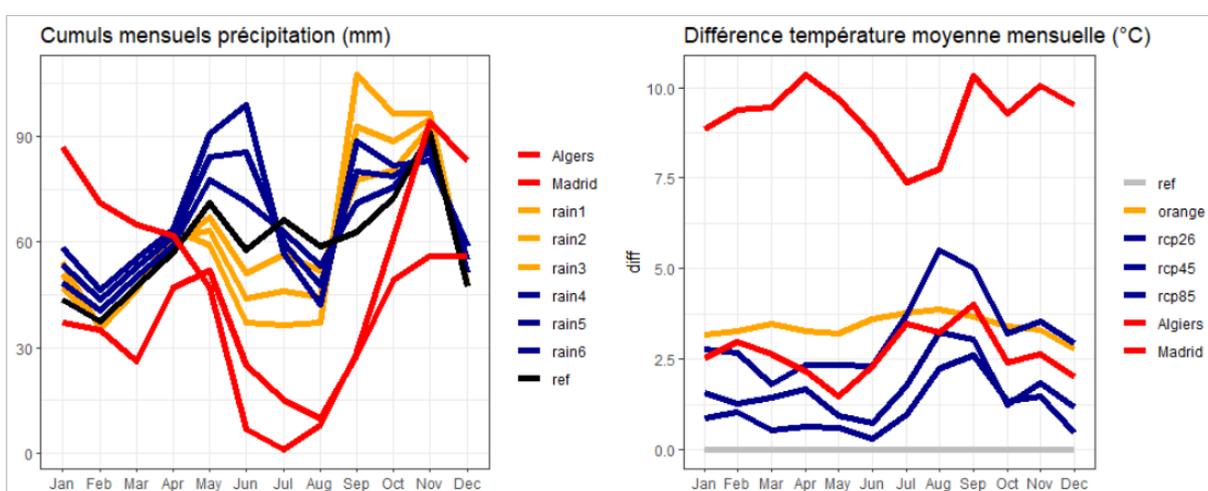


Figure 26 - Comparaison précipitations mensuelles et températures mensuelles Alger/Madrid.

En revanche, on sait également que les extrêmes climatiques (pluie, température), varieront de manière plus intenses à des échelles fines (horaires, 10 min) qu'à l'échelle journalière ou mensuelle (Martel et al., 2020; Wood and Ludwig, 2020), ce qui n'est pas pris en compte dans cette étude. La désagrégation des scénarios à échelles temporelles plus fines pourra faire l'objet d'études plus approfondies.

## 2.6.3. Scénarios de gestion des eaux pluviales

Avec la même logique que pour l'imperméabilisation et le climat, l'approche choisie pour les scénarios de gestion des eaux pluviales vise à mesurer l'impact de l'implémentation croissante des techniques alternatives sur le régime d'écoulement.

Ainsi, 9 scénarios de gestion des eaux pluviales sont mis en place (Figure 27, Tableau 9), avec pour objectif de balayer le champ des possibles entre un 'scénario tout-tuyau' et un scénario idéalisé 'tout déconnecté'.

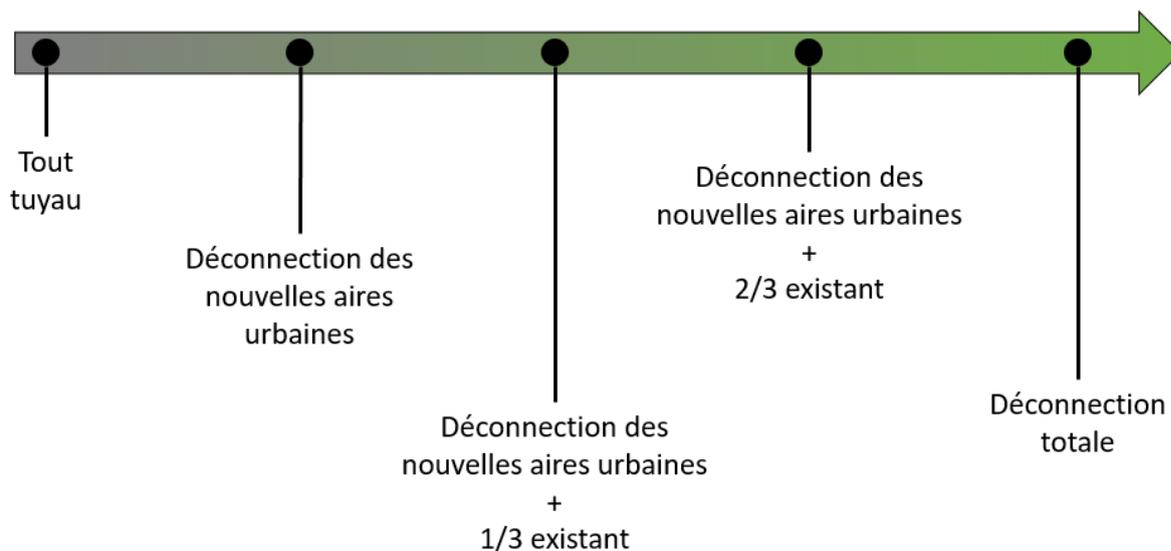


Figure 27 – Scénarios de gestion des eaux pluviales

Tableau 9 – Scénarios de déconnexion

Scénario de gestion	HRU déjà urbanisée	HRU nouvellement urbanisée	Taille des TAs
g1	Tout tuyau	Tout tuyau	-
g2	Tout tuyau	Déconnexion	5% des surfaces imperméables de la HRU (un test avec 10% pour)
g3	1/3 surfaces imperméables gérées à la source		
g4	2/3 surfaces imperméables gérées à la source		
g5	Surfaces imperméables gérées à la source		

- Scénario g1 - tout tuyau :

Les surfaces imperméables sont gérées par un agrandissement du réseau conventionnel (Figure 28). Ce scénario correspond à une référence, le « pire scénario possible ».

- Scénario g2 – déconnexion des HRU nouvellement urbaines:

Ce scénario correspond à la réglementation actuelle du Grand Lyon, dans lequel toutes les surfaces imperméables des HRUs (les mailles du modèle) nouvellement urbaines sont gérées par des techniques alternatives. Ce scénario comporte deux sous-scénarios : 1 scénario pour lequel la taille des HRUs fait 5% de la surface imperméable et 1 pour lequel elle fait 10%

- Scénario g3 – déconnexion des HRU nouvellement urbaines + déconnexion 1/3 des HRU déjà urbaines:

Toutes les surfaces imperméables des HRUs (les mailles du modèle) nouvellement urbaines sont gérées par des techniques alternatives, et 1/3 du ruissellement des surfaces imperméables est envoyé en TAs. Ce scénario comporte deux sous-scénarios : 1 scénario pour lequel la taille des HRUs fait 5% de la surface imperméable déconnectée (donc 1/3 de la surface imperméable de chaque HRU) et 1 pour lequel elle fait 10% de cette même surface.

- Scénario g4 – déconnexion des HRU nouvellement urbaines + déconnexion 2/3 des HRU déjà urbaines:

Toutes les surfaces imperméables des HRUs (les mailles du modèle) nouvellement urbaines sont gérées par des techniques alternatives, et 2/3 du ruissellement des surfaces imperméables est envoyé en TAs. Ce scénario comporte deux sous-scénarios : 1 scénario pour lequel la taille des HRUs fait 5% de la surface imperméable déconnectée (donc 2/3 de la surface imperméable de chaque HRU) et 1 pour lequel elle fait 10% de cette même surface.

- Scénario g5 – déconnexion des HRU nouvellement urbaines + déconnexion totale des HRU déjà urbaines:

Ce scénario correspond à un scénario utopique, idéalisé, dans lequel toutes les surfaces imperméables du bassin versant sont déconnectées du ruisseau et du réseau.

On a donc un total de 9 scénarios (tout tuyau + 3 degrés de déconnexion partielle avec chacun 2 sous scénarios correspondants à des tailles de TA différentes + déconnexion totale) : Tableau 10.

Puisqu'à l'échelle de la HRU il est impossible de modéliser de manière fine le type de techniques alternatives implémentées, les TAs dans le modèle sont considérées comme des TAs génériques, moyennes de toutes les TAs existantes avec les caractéristiques géométriques suivantes : profondeur = 0.6 m et porosité = 0.4.

Tableau 10 - Surfaces déconnectées et surface des TAs installées par scénario de gestion

Scénario de gestion	% total surfaces imperméables urbaines déconnectées	Surface (volume) techniques alternatives installées
g1	0 %	0 m <sup>2</sup> (0 m <sup>3</sup> )
g2 – 5%	20-22 %	~25000 m <sup>2</sup> (6000 m <sup>3</sup> )
g2- 10%	20-22 %	~50000 m <sup>2</sup> (12000 m <sup>3</sup> )
g3– 5%	47-48 %	~50000 m <sup>2</sup> (12000 m <sup>3</sup> )
g3– 10%	47-48 %	~100000 m <sup>2</sup> (24000 m <sup>3</sup> )
g4– 5%	73 – 74 %	~75000 m <sup>2</sup> (18000 m <sup>3</sup> )
g4– 10%	73 – 74 %	~15000 m <sup>2</sup> (36000 m <sup>3</sup> )
g5– 5%	100 %	~100000 m <sup>2</sup> (24000 m <sup>3</sup> )
g5– 10%	100 %	~200000 m <sup>2</sup> (48000 m <sup>3</sup> )

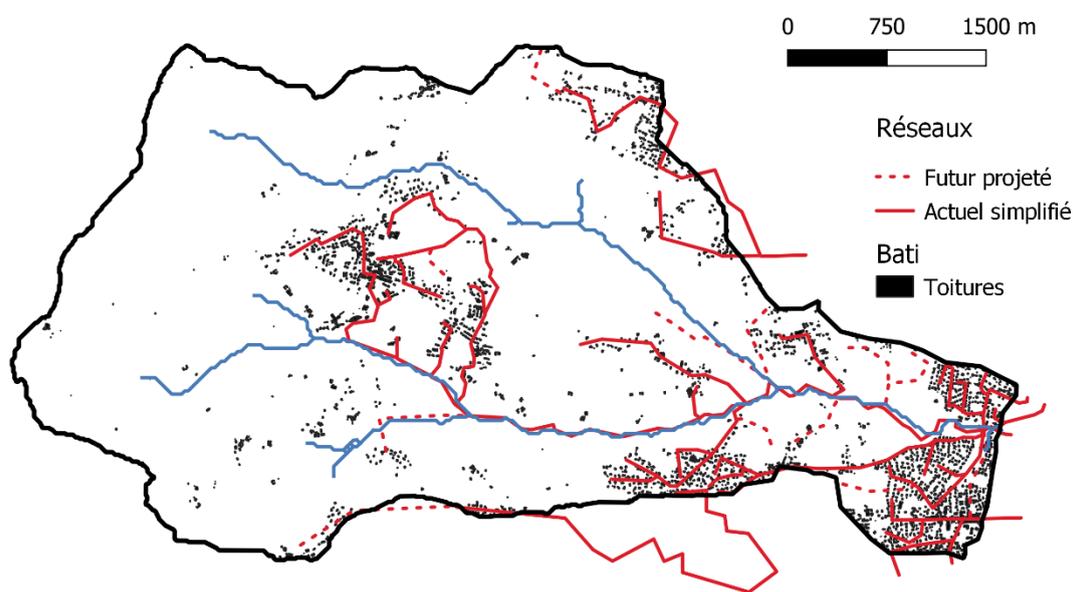


Figure 28 - Carte du réseau d'assainissement simplifié et extensions futures pour HRUs urbanisées

## 2.7. Analyse des simulations

### 2.7.1. Définition des indicateurs

Pour chaque simulation les indicateurs hydrologiques suivants sont calculés avec pour objectif de représenter différents aspects du régime d'écoulement (comme pour la période de calage, les 2 premières années de simulations sont enlevées de l'analyse, étant la période d'initialisation du modèle) Le Tableau 11 récapitule les indicateurs hydrologiques calculés pour chaque simulation, chaque indicateur étant défini ci-dessous.

**Tableau 11 - Liste des indicateurs hydrologiques calculés pour chaque simulation**

	<b>Indicateurs</b>
Bilan	Part relative des composantes du bilan hydrologique annuel
Saisonnalité	Débit moyens mensuels interannuels Débits maximum mensuels interannuels Moyenne interannuelle des débits journaliers
En réseau	Nombre de jours avec déversements au niveau des DO Volume total déversé par l'ensemble des DO
Débits élevés	Quantiles de haut débits 1%, 5%, 10%
Etiages	QMNA5 VCN15
Evènements	2 évènements pluvieux 2 évènements remarquables

#### **Indicateurs de bilan**

- La moyenne des parts relatives des composantes hydrologiques dans le bilan annuel.

On décompose le bilan annuel hydrologique comme suit :

$$P = Q + S + ET \text{ avec } Q = RD1 + RD2 + RG1$$

Avec P la précipitation annuelle, ET l'évapotranspiration, Q le débit en rivière, S le débit en réseau, et RD1 le ruissellement de surface et RD2 et RG1 composantes souterraines. Pour chacun des composantes, on calcule sa part relative pour chaque année puis on moyenne, par exemple :

$$\%ET_{moyen} = \sum_{i=1}^N \frac{ET_i}{P_i} \cdot \frac{1}{N}$$

Avec N le nombre d'années simulées.

### Indicateurs de saisonnalité

- Débits moyens mensuels interannuels

$$Q_{moyen,1:12} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{moyen1:12,i}}{N}$$

Avec N le nombre d'années simulées,

- Moyenne interannuelle des débits journaliers (par exemple, moyenne de tous les 1 janvier, de tous les 25 décembre, etc.).

$$Q_{j,1:365} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{j1:365,i}}{N}$$

Avec N le nombre d'années simulées

- Moyenne des débits maximums mensuels interannuels

$$Q_{max,1:12} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{max1:12,i}}{N}$$

Avec N le nombre d'années simulées, pour 12 mois de l'année.

### Indicateurs de réseau

- Nombre de jours avec déversements au niveau des DO
- Volume déversé par l'ensemble des DO

### Indicateurs de débits élevés

- Les quantiles de haut débits comme indicateurs de haut débits sur les débits journaliers  $Q_1, Q_5, Q_{10}$  c'est à dire les débits journaliers avec une probabilité respective d'être dépassés de 1%, 5%, 10%, pour chaque année, moyennés sur les années simulées.

### Indicateurs d'étiages

- QMNA5 : le débit minimum mensuel ayant, chaque année, une probabilité de ne pas être dépassé de 20%. Il faut donc, pour chaque année, calculer les débits moyens mensuels, sélectionner le minimum annuel, et faire une analyse statistique pour garder celui avec une période de retour de 5 ans.
- VCN15 : le débit moyen minimum sur une fenêtre mobile de 15 jours consécutifs, calculé pour chaque année simulée et moyenné.

### Illustration sur des événements

En plus des indicateurs hydrologiques à l'échelle du bassin versant, sont présentés, pour illustration et meilleure compréhension des mécanismes:

- Deux hydrographes pour deux événements pluvieux non remarquables, choisis au hasard :
  - 1 événement hivernal (01/01/14 – 13/01/14, cumul 18.5 mm),
  - 1 événement estival (05/06/09 – 13/06/09, cumul 35.7 mm).
- Deux événements extrêmes :
  - la crue de Novembre 2008 (26/10/08 – 17/11/08, cumul 126.4 mm),
  - l'étiage de l'été 2003 (01/06/03 – 01/08/03, cumul 74 mm, mais seulement 116 mm de Janvier 03 à Juin 03),

## 2.7.2. Présentation des indicateurs

L'accent est mis sur les changements par rapport à la simulation de référence (situation actuelle) selon le calcul suivant :

$$\text{Changement} = \frac{\text{Simulée} - \text{Référence}}{\text{Référence}}$$

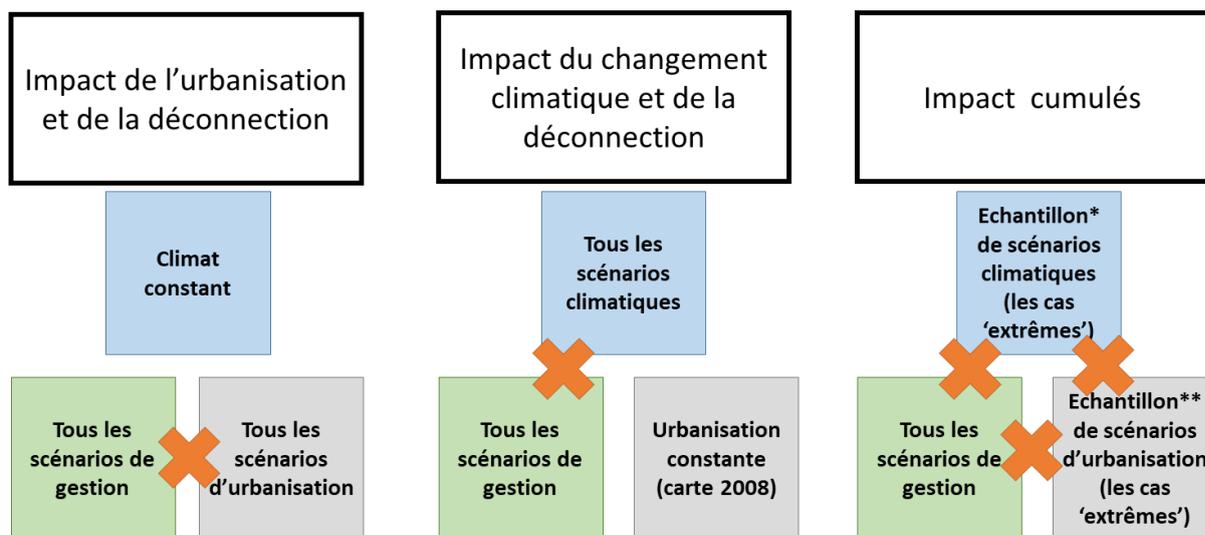
Des résultats en valeur absolue (m<sup>3</sup>/s, etc..) sont présentés en Annexe 1

## 2.7.3. Simulations réalisées

Au total **640 simulations** furent lancées (Tableau 12), avec des combinaisons diverses des différents scénarios présentés dans les paragraphes précédents :

- **Impact de l'urbanisation et de la déconnection** : Sur climat actuel, constant, tous les scénarios d'urbanisation possibles, c'est-à-dire les trois cartes d'étalement urbain (2008, 2030 s1a, 2030 s1b) couplés aux quatre scénarios d'imperméabilisation (pop 1-2-3-4). Couplés à chaque fois à tous les scénarios de gestion.
- **Impact du changement climatique et de la déconnection** : Sur occupation du sol actuelle (carte 2008), scénarios de pluie extrêmes 3 et 6 couplés à tous les scénarios d'ET + scénarios d'ET extrêmes 3 et 6 couplés à tous les scénarios de pluie. Couplés à chaque fois à tous les scénarios de gestion.
- **Impact cumulés** : Les pluies extrêmes 3 et 6 et l'ET extrême 3 et 6 couplé aux trois cartes d'urbanisation pour deux scénarios de densification pop 1 et pop 4. Couplés à chaque fois à tous les scénarios de gestion.

Tableau 12 - Récapitulatif des simulations réalisées



\*Echantillon de scénarios climatiques: tous les scénarios d'évapotranspiration couplés aux scénarios pluie 3 et pluie 6, tous les scénarios de pluie couplés aux scénarios ET 3 et ET 6

\*\*Echantillon de scénarios d'urbanisation: pour chacune des trois cartes d'urbanisation (2008, 2030 S1A, 2030 S1B), deux scénarios de densification (pop1 densité moyenne et pop4 densité max)

### 3. Résultats

Les résultats sont présentés de la manière suivante :

- **Scénarios de gestion et d'urbanisation** (Section 3.1 Gestion et urbanisation)
- **Scénarios de gestion et changement climatique** (Section 3.2 Gestion et changement climatique)
- **Scénarios couplés (urbanisation + climat + gestion) échantillonnés** (Section 3.3 Impacts cumulés : gestion + climat + urbanisation)

Note sur le vocabulaire : dans la présentation des résultats et l'analyse qui suit, le mot « ruissellement » sera utilisé de manière récurrente. Ce mot est à entendre ici dans son sens physique, c'est-à-dire que nous désignons par ce mot le ruissellement de surface, générés par les surfaces imperméables ou les sols saturés. Ruissellement ici signifie donc les flux d'eau qui s'écoulent à sa surface du sol (le flux RD1 dans le modèle), et ensuite dans le réseau d'assainissement via les entrées du réseau ou la rivière via un cheminement en surface. Ruissellement ne signifie pas la totalité du débit en rivière.

### 3.1. Gestion et urbanisation

Ce paragraphe présente l'impact des scénarios d'urbanisation et de gestion des eaux pluviales sur différents indicateurs hydrologiques, en considérant le climat actuel comme situation de référence (Précipitation et température sur la période 1999-2018).

Chaque indicateur est présenté d'abord en situation tout tuyau ; sans aucune politique de déconnexion ce qui nous permet d'isoler l'impact de l'imperméabilisation sur le régime d'écoulement, puis en fonction des différents scénarios de déconnexion, en reprenant le code couleur présenté ci-dessous :

Bleu clair, bleu foncé et noir pour les trois cartes d'étalement urbain, et dégradé du gris au vert pour l'implémentation croissante de la déconnexion :

En tout tuyau (scénario g1):

-  Occupation du sol 2008
-  Occupation du sol 2030 S1A
-  Occupation du sol 2030 S1B

Déconnexion: (scénarios g1 g2 g3 g4 g5):

-  Scénario g1
-  Scénario g2
-  Scénario g3
-  Scénario g4
-  Scénario g5

### 3.1.1. Composantes du bilan

#### Tout tuyau (scénario g1)

Les Figure 29 et Figure 30 présentent la part de chaque composante du bilan annuel à l'échelle du bassin versant (évapotranspiration, composantes de débits : ruissellement de surface, interflow, baseflow, ruissellement de surface vers le réseau), moyennée sur toutes les années de simulation, en fonction de l'imperméabilisation croissante du bassin versant, respectivement en % du bilan annuel (Figure 29) et en évolution par rapport à la référence (Figure 30), si les eaux pluviales sont gérées en tout tuyau. L'axe des abscisses représente le coefficient d'imperméabilisation des 11 scénarios d'urbanisation. Les couleurs représentent les trois cartes d'urbanisation (bleu = pas d'étalement urbain (carte 2008), bleu foncé = étalement urbain (carte 2030 S1A), noir = étalement urbain encore plus prononcé (carte 2030 S1B), voir Tableau 6). Les lignes sont des régressions linéaires tracées pour une meilleure lisibilité.

On observe un impact relativement faible de l'imperméabilisation sur le bilan total, avec des variations de quelques % seulement. Ceci s'explique par le fait que l'imperméabilisation impacte d'abord le ruissellement de surface qui contribue peu au bilan total. La part de l'évapotranspiration et des composantes souterraines à l'échelle du bassin versant diminuent suite à l'imperméabilisation, alors que les parts du ruissellement de surface en rivière ou en réseau augmentent. L'imperméabilisation diminue les composantes souterraines du débit, cette même part contribuant fortement au ruissellement de surface vers la rivière ou le réseau. En revanche, en variation relative par rapport à la simulation de référence, la part du ruissellement imperméable dans la rivière (jusqu'à +100%) ou dans le réseau (jusqu'à +50%) augmente très fortement avec l'imperméabilisation: imperméabiliser revient à augmenter très fortement le ruissellement imperméable, de manière relative. Le ruissellement imperméable est donc un terme minoritaire du bilan total mais est logiquement le plus sensible à l'imperméabilisation future.

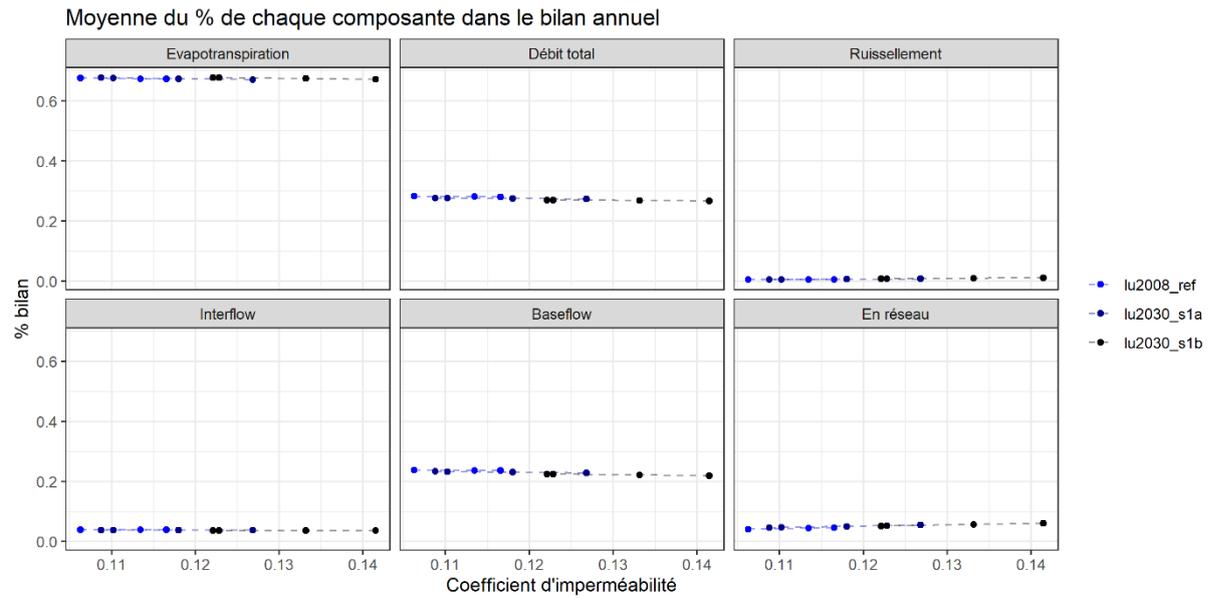


Figure 29 - Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV

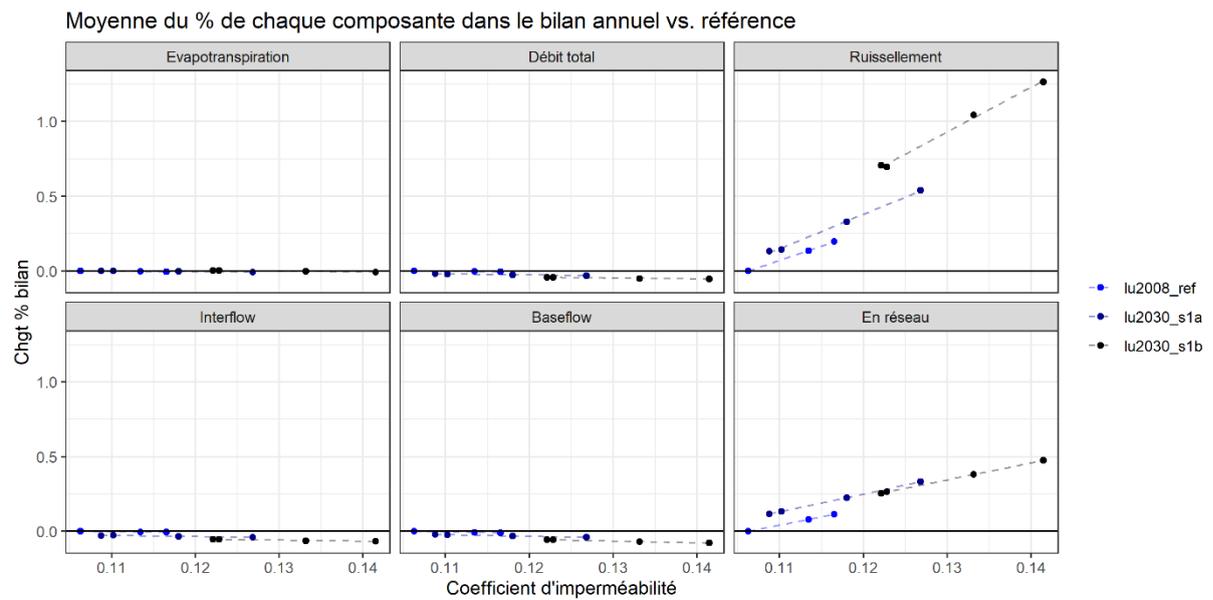


Figure 30 – Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV par rapport à la référence

## Scénarios de déconnexion des surfaces imperméables (scénarios g2-g3-g4-g5)

Les Figure 31 et Figure 32 présentent, comme précédemment, la part de chaque composante du bilan annuel à l'échelle du bassin versant (évapotranspiration, composantes de débits : ruissellement de surface, interflow, baseflow, ruissellement de surface en réseau) en fonction de l'imperméabilisation croissante du bassin versant, respectivement en % du bilan annuel (Figure 31) et par rapport à la simulation de référence (Figure 32), avec différents scénarios de gestion des eaux pluviales (déconnexion croissante du gris au vert). L'axe des abscisses représente le coefficient d'imperméabilisation des 11 scénarios d'imperméabilisation. Les lignes sont des régressions linéaires tracées pour une meilleure lisibilité.

On observe que les variations restent faibles en valeur absolue, avec des changements de quelques % du bilan total. Quelques tendances :

- La part de l'évapotranspiration dans le bilan total augmente avec implémentation croissante des ouvrages de gestion à la source. Cette augmentation est due à l'évapotranspiration directe depuis les ouvrages mais également à l'eau infiltrée par les ouvrages dans le sol, prélevée par évapotranspiration pendant son parcours souterrain. (69% à 71% du bilan en moyenne annuelle).
- La part du débit total dans le bilan augmente également avec la mise en place de la déconnexion, et est causée par une augmentation des composantes souterraines. A l'inverse, les volumes ruisselés, en rivière ou en réseau, s'écroulent avec mise en place des ouvrages de gestion à la source (de ~5% du bilan total à presque 0% pour une déconnexion totale).

En résumé : l'implémentation croissante des ouvrages de gestion à la source redistribue le volume de ruissellement imperméable en réseau en évapotranspiration et composantes souterraines. On '*renaturalise*' le bilan hydrologique via cette implémentation sur le bassin versant.

Il est intéressant de remarquer que l'implémentation croissante des TAs renverse ou limite la tendance causée par l'imperméabilisation : si l'ET diminue au fur et à mesure qu'on urbanise pour un scénario tout tuyau, elle augmente quand on urbanise pour les scénarios privilégiant une forte déconnexion (taille croissante des TAs, fonction de la surface imperméable totale). Le ruissellement de surface et les composantes souterraines ont toujours tendance, respectivement, à augmenter et diminuer avec l'imperméabilisation mais les tendances sont moins prononcées dans les scénarios déconnectés.

Le ruissellement imperméable, terme minoritaire du bilan total, est le plus sensible à l'implémentation de la gestion à la source : une implémentation ambitieuse le diminue fortement.

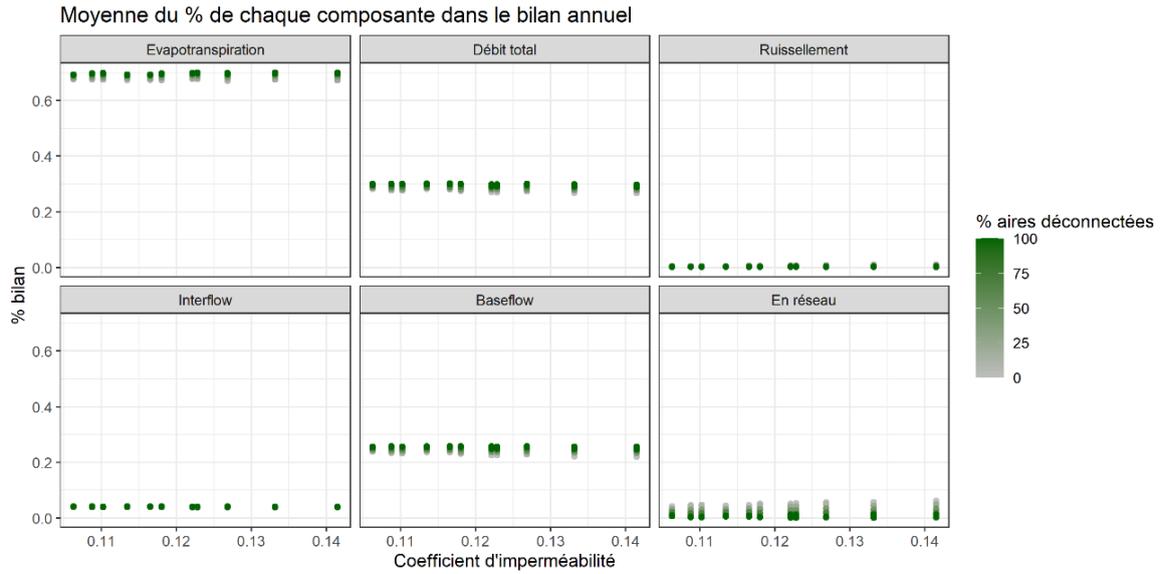


Figure 31 - Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV et des scénarios de déconnexion.

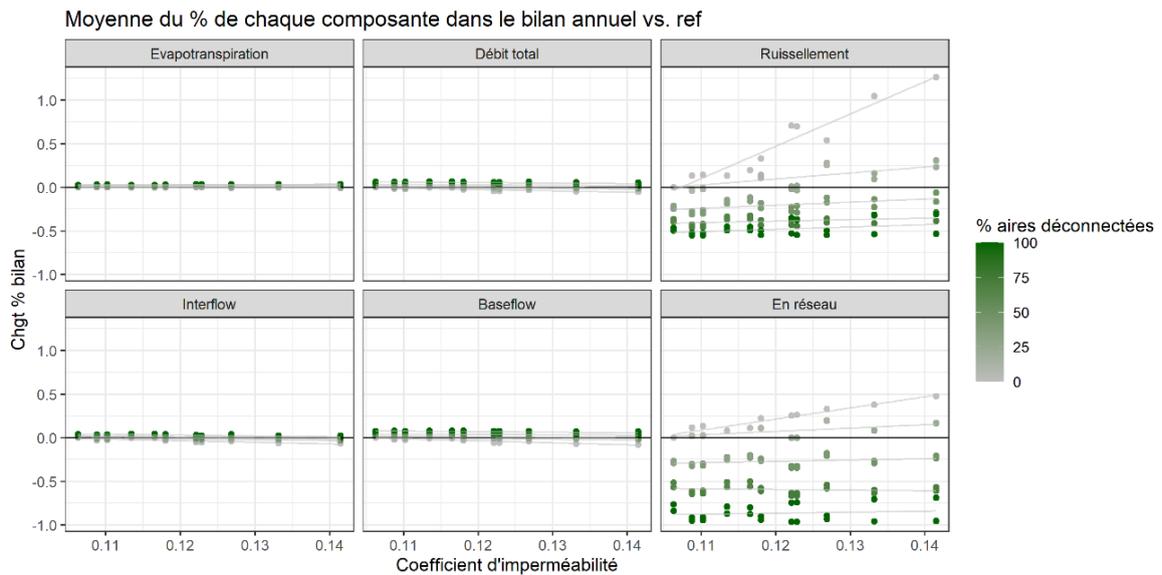


Figure 32 - Evolution de la part relative des composantes du bilan hydrologique en fonction de l'imperméabilisation croissante du BV et des scénarios de déconnexion par rapport à la situation de référence

### 3.1.2. Débits moyens mensuels

#### Tout tuyau

Figure 33 présente l'évolution des débits moyens mensuels avec l'imperméabilisation croissante du bassin versant en changement par rapport à la simulation de référence (la situation actuelle), pour chaque mois (1 = Janvier, 2 = Février, etc.), si les eaux pluviales sont gérées en tout tuyau (le même graphe en m<sup>3</sup>/s est en Annexe). L'axe des abscisses représente le coefficient d'imperméabilisation des 11 scénarios d'urbanisation. L'axe des ordonnées représente l'évolution par rapport à la simulation de référence. Les couleurs représentent les trois cartes d'urbanisation (bleu = pas d'étalement urbain, bleu foncé = étalement urbain, noir = étalement urbain encore plus prononcé). Les lignes sont des régressions linéaires tracées pour une meilleure lisibilité.

On observe une tendance à la baisse des débits moyens pour tous les mois de l'année sauf en Juillet – Août – Septembre pour quelques scénarios. Les changements en valeurs absolues sont de l'ordre de quelques L/s en moyenne, équivalent à une diminution variant de -2% jusqu'à -8% pour les scénarios les plus urbains. La variabilité des débits moyens mensuels induits par l'imperméabilisation du bassin versant reste plus faible que la variabilité mensuelle. Les débits moyens mensuels du mois de Novembre sont très élevés, en lien avec les forts débits de la crue de Novembre 2008 qui tirent la moyenne de Novembre vers le haut.

D'un point de vue des mécanismes, imperméabiliser le bassin versant entraîne sans surprise la diminution de l'infiltration et de la recharge, et donc des composantes souterraines (interflow, baseflow). Le débit des mois de Novembre à Mai étant dominé par les composantes souterraines, une baisse de ces composantes entraîne mécaniquement une baisse des débits moyens pour ces mois ici. En été, les débits sont faibles et l'importance relative du ruissellement de surface est plus grande. Une augmentation de l'imperméabilisation, entraîne une augmentation des petits pics de ruissellement imperméable et donc des plus hauts débits qui tirent la moyenne à la hausse. Il y a donc, en été, une 'compétition' entre diminution des composantes souterraines et augmentation des hauts débits qui impactent la moyenne (qui reste faible en été).

En résumé:

- L'imperméabilisation entraîne la diminution des débits moyens (*1% de débit perdu par % de surface imperméabilisée*), sauf en été.
- Le type d'urbanisation influence les débits : à imperméabilisation égale, les scénarios avec le plus d'étalement urbain montrent une baisse des débits plus marquée.

Evolution des débits moyens mensuels vs. situation actuelle

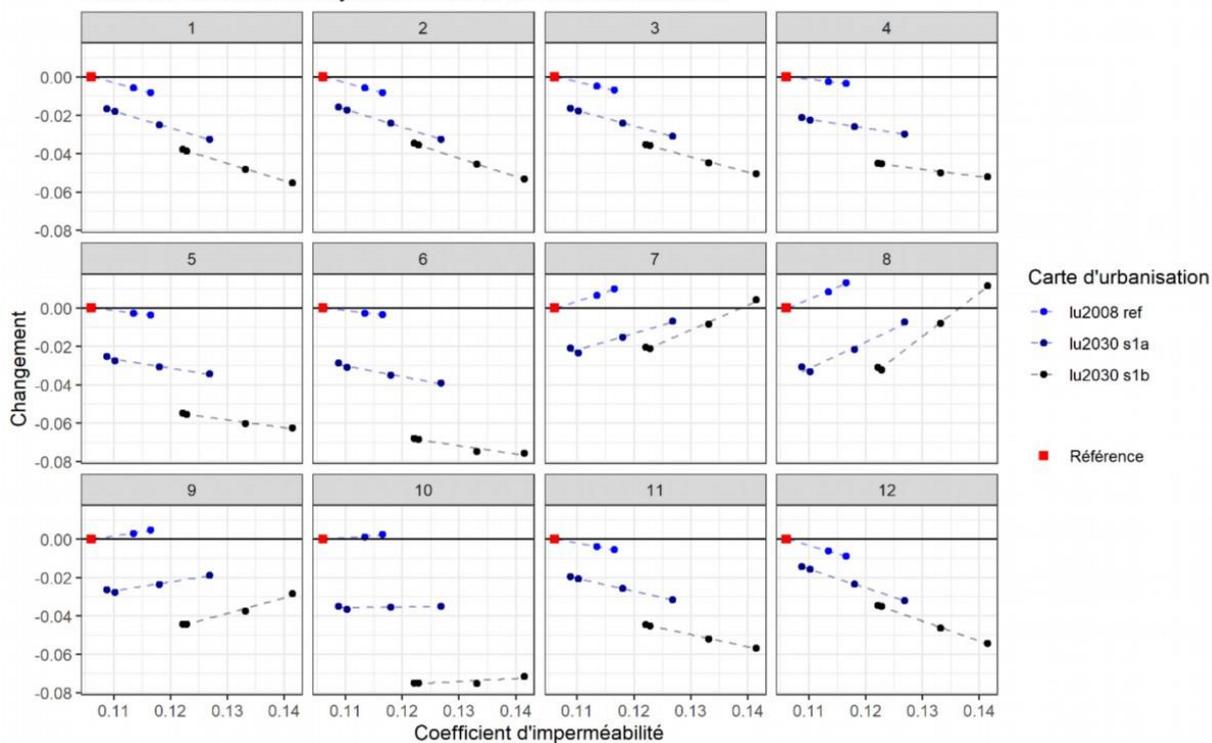


Figure 33 – Evolution relative des débits moyens mensuels avec imperméabilisation

## Scénarios de déconnexion des surfaces imperméables

La Figure 34 présente, comme précédemment, l'évolution des débits moyens mensuels en fonction de l'imperméabilisation croissante du bassin versant, en changement par rapport à la simulation de référence (la situation actuelle), pour chaque mois, en prenant également en compte les scénarios de déconnexion. La palette de couleur du gris au vert correspond à une implémentation croissante des techniques alternatives (gris = scénario tout tuyau, vert foncé = scénario idéal où toutes les surfaces imperméables sont gérées à la source avec des TAs). Le graphe en m<sup>3</sup>/s est présenté en Annexe.

(Les points gris clair correspondent au scénario g1 : gestion en tout tuyau, et sont les mêmes points qui présentés précédemment en Figure 33).

Pour chaque scénario de gestion, on observe une légère tendance à la baisse des débits moyens avec l'imperméabilisation du bassin versant. Toutefois, on remarque que même dans les cas les plus urbains, les politiques de gestion par déconnexion permettent d'obtenir des débits moyens égaux ou supérieurs à la simulation de référence. L'implémentation des techniques alternatives permet donc bien de compenser les impacts de l'urbanisation sur les débits moyens.

D'Octobre à Juin, quand les débits sont dominés par les composantes souterraines, il y a compétition entre diminution des débits moyens due à l'imperméabilisation du bassin versant et augmentation des débits moyens due à la recharge via l'implémentation des techniques alternatives.

En été, les débits sont faibles et le ruissellement de surface (réponse rapide des surfaces imperméables aux évènements pluvieux) impacte les moyennes, il y a donc compétition entre augmentation du ruissellement due à l'imperméabilisation du bassin versant et diminution du ruissellement de surface grâce aux TAs : les pics de ruissellement sont écrêtés et ne tirent plus les moyennes vers le haut, mais le débit d'étiage augmente, d'où l'absence de tendance claire en été.

Synthèse des résultats en fonction du scénario considéré :

- Scénario g1 (tout tuyau) :

On observe une diminution des débits moyens avec l'imperméabilisation en gestion en tout tuyau (voir le paragraphe 'Tout tuyau' ci-dessus).

- Scénario g2 (gestion induisant la déconnexion des nouvelles surfaces imperméables):

D'Octobre à Juin la baisse des débits moyens est plus faible que celle du scénario tout tuyau mais toujours prononcée. Les débits baissent en fonction de l'imperméabilisation, jusqu'à -3% dans les cas les plus urbains. En été pas de tendance claire.

- Scénario g3 (gestion induisant la déconnexion des nouvelles surfaces imperméables + 1/3 des surfaces existantes):

Quand on commence à déconnecter l'existant, pour des scénarios d'urbanisation moins prononcés on infiltre assez pour augmenter les débits moyens. Quand l'imperméabilisation augmente, en fonction des mois, les débits moyens sont quasi les mêmes que ceux de la simulation de référence (ou légères diminutions ou

augmentations). C'est la preuve qu'à l'aide d'une politique de déconnexion, on peut restaurer les débits moyens malgré l'urbanisation. En été pas de tendance claire.

- Scénario g4 (gestion induisant la déconnexion des nouvelles surfaces imperméables + 2/3 des surfaces existant):

Dans ce scénario très ambitieux, les débits moyens sont tous plus élevés (0 ; +5%) que ceux de la simulation de référence, quel que soit le niveau d'imperméabilisation, exception faite pour Septembre et Octobre, où les débits baissent de quelques % pour les scénarios les plus urbains. Juillet et Août ne montrent pas de tendance claire.

- Scénario g5 (gestion induisant la déconnexion de toutes les surfaces imperméables):

Dans ce scénario idéalisé et utopique, pour tous les mois de l'année, pour tous les scénarios urbains, on observe une augmentation des débits moyens, variant de +5% à +10%, même l'été. On a donc 'renaturalisé' le régime d'écoulement de l'été, avec un débit contrôlé par les composantes souterraines, comme l'hiver.

En résumé :

- Une implémentation croissante des TAs permet de limiter la baisse des débits moyens ou bien même de compenser les impacts de l'urbanisation.
- Il existe un seuil à partir duquel les débits m sont égaux ou proches des niveaux de référence quel que soit le degré d'urbanisation : il semblerait que ce seuil soit proche du scénario de gestion des eaux pluviales g3 (déconnexion du neuf + 1/3 de l'existant),
- Déconnecter l'existant, en plus du neuf, permet de contrer les effets liés à l'urbanisation.

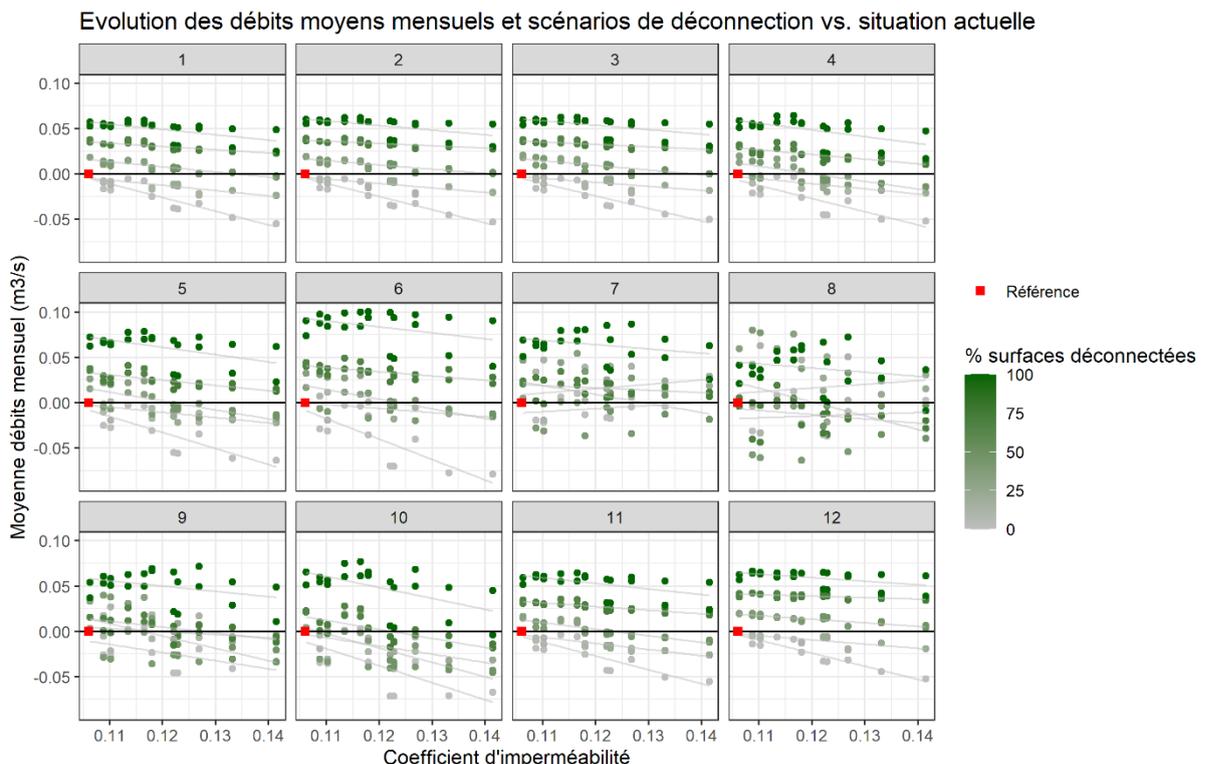
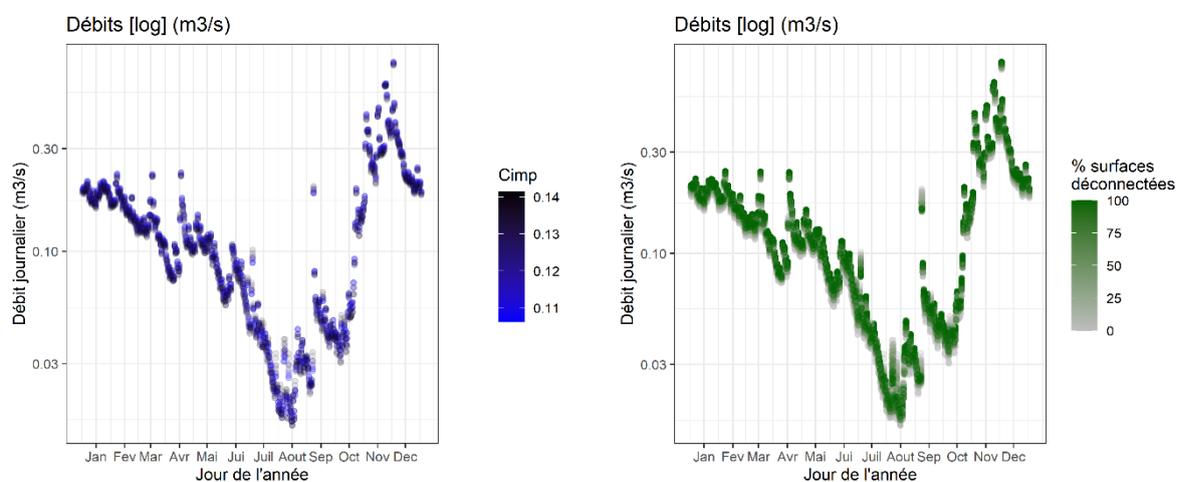


Figure 34 - Evolution relative des débits moyens mensuels et scénarios de gestion

### 3.1.3. Moyenne interannuelle des débits journaliers

La Figure 35 présente les débits moyens journaliers interannuels (la moyenne de tous les 6 janvier, par exemple), en  $m^3/s$ , en échelle linéaire, à droite pour les scénarios g1 (tout tuyau) et à gauche en fonction du % de surfaces déconnectées.

Figure 35 permet de confirmer les observations précédentes : peu de variations créée par l'imperméabilisation. Prendre la moyenne des débits journaliers « écrase » en quelque sorte les différences observées, et on retrouve les tendances observées ci-dessus : l'imperméabilisation diminue les débits hivernaux, augmente les débits estivaux, la moyenne des jours d'été étant tirée par les pics de ruissellement imperméable. La gestion à la source permet d'écarter ces pics de ruissellement de surface estivaux et d'augmenter les débits hivernaux.



**Figure 35 - Evolution de la moyenne interannuelle des débits journaliers en fonction du coefficient d'imperméabilisation et des scénarios de gestion**

### 3.1.4. Indicateurs de débits élevés: débits maximums mensuels, quantiles Q<sub>1</sub>, Q<sub>5</sub> et Q<sub>10</sub>

#### Tout tuyau

La Figure 36 présente l'évolution des débits maximums mensuels avec l'imperméabilisation croissante du bassin versant (changement par rapport à la simulation de référence correspondant à la situation actuelle), pour chaque mois (1 = Janvier, 2 = Février, etc.), si les eaux pluviales sont gérées en tout tuyau. La Figure 37 présente l'évolution des quantiles de hauts débits journaliers (1%, 5%, 10). L'axe des abscisses représente le coefficient d'imperméabilisation des 11 scénarios d'urbanisation. L'axe des ordonnées représente l'évolution par rapport à la simulation de référence. Les couleurs représentent les trois cartes d'urbanisation (bleu = pas d'étalement urbain, bleu foncé = étalement urbain, noir = étalement urbain encore plus prononcé). Les lignes sont des régressions linéaires tracées pour une meilleure lisibilité. Le graphe en m<sup>3</sup>/s est en Annexe.

On observe une tendance à la hausse très marquée d'Avril à Octobre et une stagnation l'hiver.

En été, pour les scénarios les plus urbains, l'augmentation des débits maximums mensuels monte jusqu'à +40% en Mai, Juin, Juillet et jusqu'à +80%, +120%, en fonction des scénarios, en Aout. L'augmentation des surfaces imperméables, gérés en tout tuyau, conduit à plus de ruissellement de surface et génère une réponse plus intense aux événements pluvieux estivaux, ce qui conduit à des réponses aux événements pluvieux plus fortes en rivière.

De Novembre à Février, l'imperméabilisation a un faible impact sur les débits maximums mensuels, avec des augmentations nulles ou faibles (jusqu'à +5%). Ceci s'explique par le fait que les débits maximums de ces mois sont contrôlés par ses composantes souterraines du débit, alors que l'imperméabilisation impacte le ruissellement imperméable.

Les quantiles de haut-débits journaliers (Figure 37) diminuent avec l'urbanisation : cela peut apparaître surprenant, quand il est bien prouvé dans la littérature que l'urbanisation augmente les débits maximums. Cela s'explique par le fait que dans le modèle, en moyenne, les pics de ruissellement de surface estivaux restent inférieurs aux débits d'étiages hivernaux, et les débits maximums sont donc des débits d'hiver, composés principalement des composantes souterraines, qui diminuent avec l'urbanisation (voir analyse autour de la Figure 67). Il à noter qu'en terme d'ordre de grandeur, les diminutions restent faibles (quelques l/s).

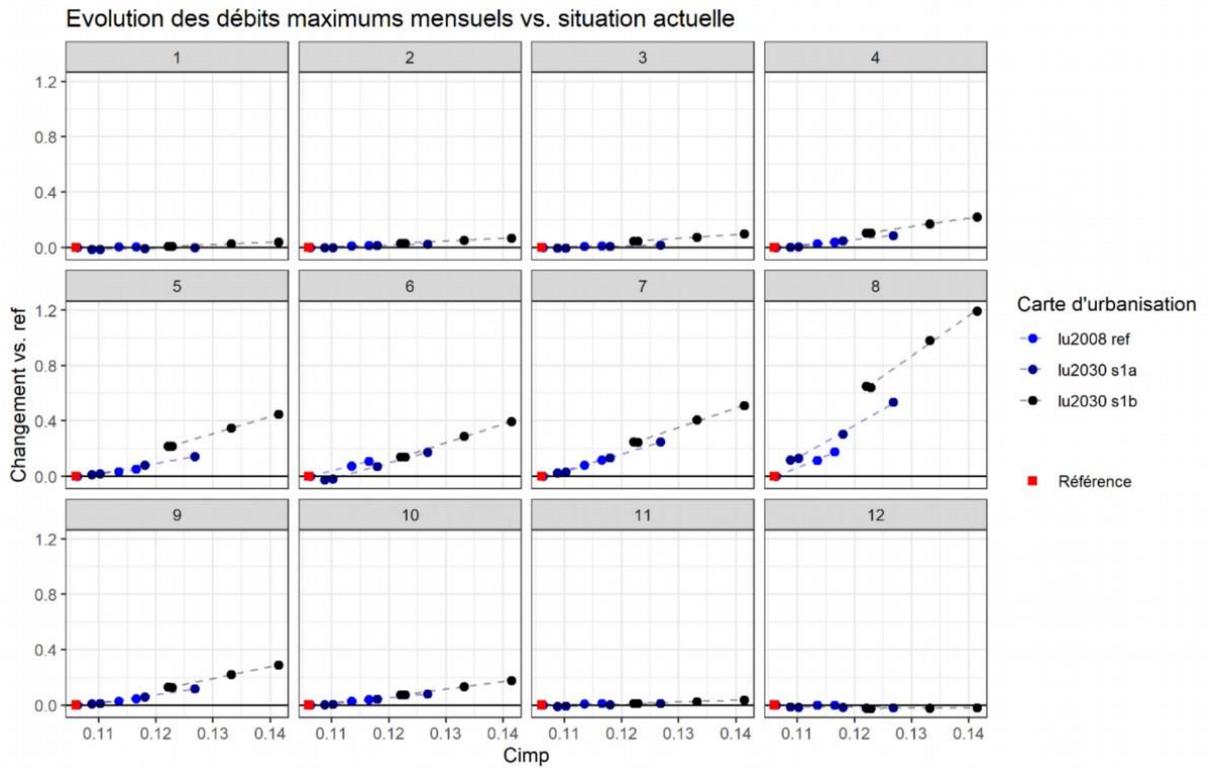


Figure 36 - Evolution relative des débits maximums mensuels avec imperméabilisation

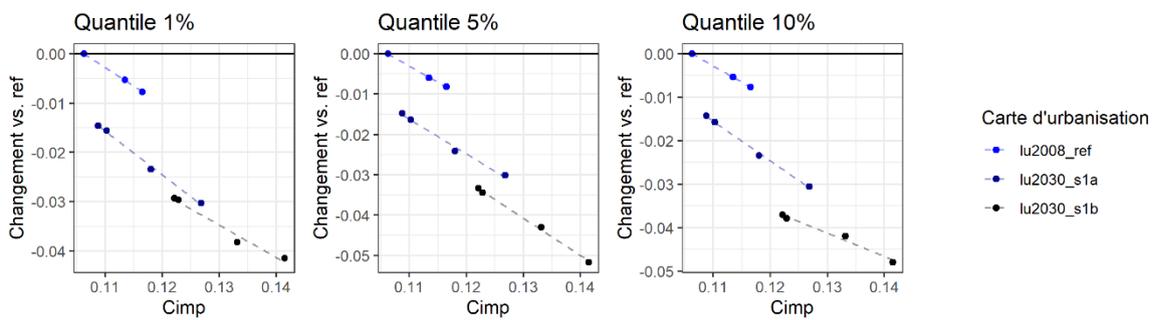


Figure 37 - Evolution des quantiles de haut débit 1%, 5%, 10 par rapport à la situation de référence

## Scénarios de déconnexion des surfaces imperméables

Figure 38 présente, comme précédemment, l'évolution des débits maximums mensuels en fonction de l'imperméabilisation croissante du bassin versant, en changement par rapport à la simulation de référence (la situation actuelle), pour chaque mois, en prenant également en compte les scénarios de déconnexion. La Figure 39 présente l'évolution des quantiles de hauts débits journaliers (1%, 5%, 10). La palette de couleur du gris au vert correspond à une implémentation croissante des techniques alternatives (gris = scénario tout tuyau, vert foncé = scénario idéal où toutes les surfaces imperméables sont gérées à la source avec des TAs).

On remarque un comportement saisonnier très marqué.

D'Avril à Octobre, les débits maximums diminuent fortement avec l'augmentation de l'implémentation des ouvrages de gestion à la source. On arrive (scénario g3) à des débits max inférieurs à la simulation de référence, indiquant que l'implémentation croissante des ouvrages de gestion à la source est capable de limiter et même de diminuer les débits max mensuels. Pendant cette période, les débits maximums mensuels sont contrôlés par les composantes de surface (ruissellement imperméable, déversements), fortement diminuées par la déconnexion des surfaces urbaines.

De Novembre à Février, la mise en place des TAs n'a qu'un faible impact sur les débits maximums mensuels, avec des augmentations nulles ou faibles (jusqu'à +5%). Ceci s'explique par le fait que les débits pendant ces mois sont contrôlés par les composantes souterraines, qui augmentent légèrement avec la mise en place de la déconnexion (infiltration des eaux de ruissellement urbain).

Les quantiles de haut-débits journaliers (Figure 39) augmentent, de façon relative par rapport à la simulation de référence, avec l'implémentation croissante des techniques alternatives. Encore une fois ce résultat peut paraître surprenant. Les débits les plus élevés de la chronique arrivent pour la plupart en hiver, et étant soutenus par les composante souterraines du débit, l'implémentation des TAs entraîne une augmentation de ces composantes, et donc, mécaniquement, une augmentation des quantiles de débits élevés (voir analyse autour de la Figure 67). On observe, parallèlement, diminution des pics de ruissellement imperméable avec la déconnexion (donc diminution des débits maximums en été) et augmentation des composantes souterraines du débit et des débits d'hiver qui sont les plus élevés de l'année (donc augmentation des quantiles de débit élevés). Il est important de noter que l'augmentation est très faible en valeur absolue : quelques L/s. L'augmentation des quantiles de débits élevés ne signifie pas que l'implémentation de la déconnexion risque d'augmenter les risques de crues sévères en hiver (au contraire les TAs écrêtent les pics qui proviennent du ruissellement imperméable).

Evolution des débits maximums mensuels et scénarios de déconnexion vs. situation actuelle

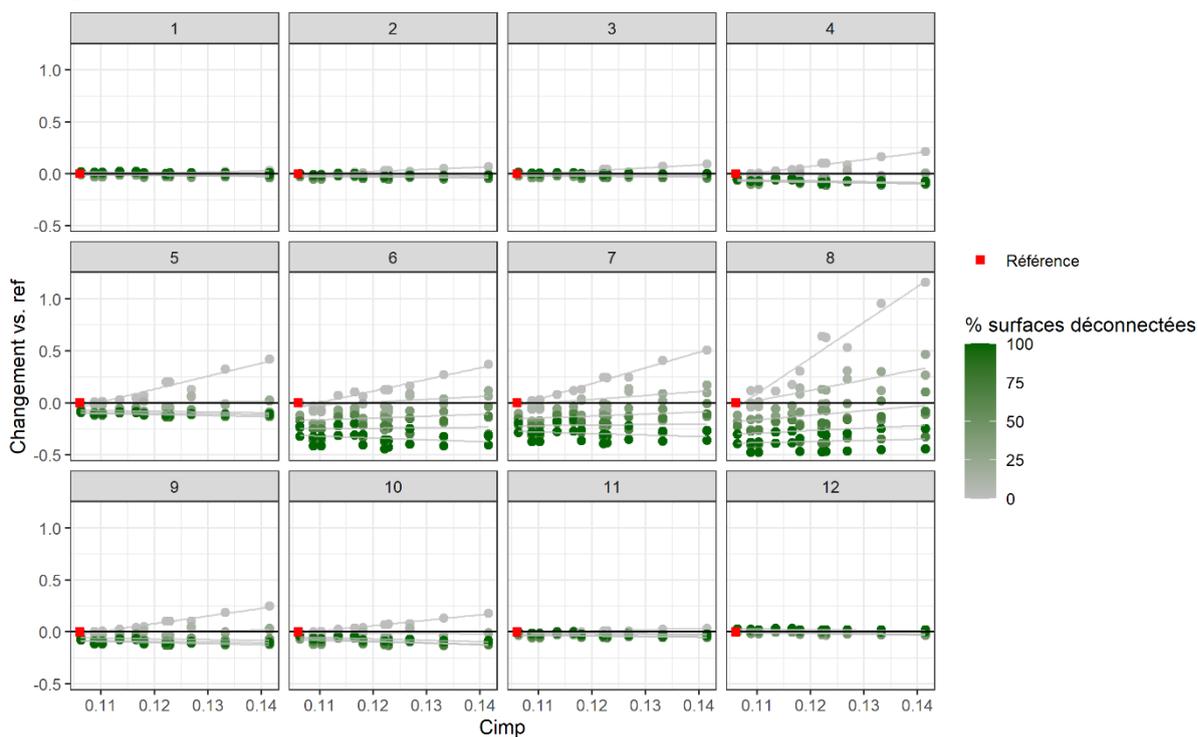


Figure 38 - Evolution relative des débits maximums mensuels et scénarios de gestion

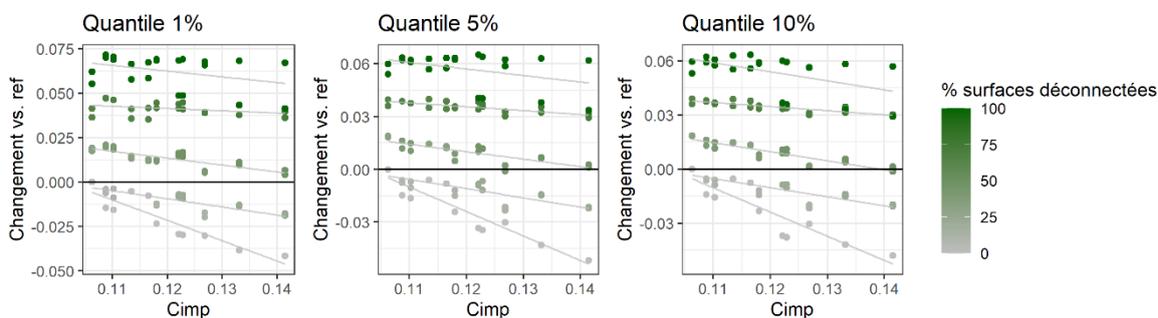


Figure 39 - Evolution des quantiles de haut débit 1%, 5%, 10 par rapport à la situation de référence en fonction des différents scénario de gestion des eaux pluviales

### 3.1.5. Indicateurs en réseau: Fréquences de déversement et volumes déversés par l'ensemble des DO

#### Tout tuyau

La Figure 40 présente l'évolution du volume déversé au niveau des DO et du nombre de jours avec déversements en fonction l'imperméabilisation croissante du bassin versant, si les eaux pluviales sont gérées en tout tuyau. Comme précédemment, les indicateurs ne sont pas présentés en m<sup>3</sup> ou en jours, mais en changement par rapport à la simulation de référence (situation actuelle). Ainsi, une valeur de 2 sur l'axe des ordonnées correspond à une augmentation de 200%. L'axe des abscisses représente le coefficient d'imperméabilisation des 11 scénarios d'urbanisation. Les couleurs représentent les trois cartes d'urbanisation (bleu = pas d'étalement urbain, bleu foncé = étalement urbain, noir = étalement urbain encore plus prononcé). Les lignes sont des régressions linéaires tracées pour une meilleure lisibilité.

On observe une augmentation très forte des deux indicateurs : dans les cas les plus urbains, l'augmentation des volumes en DO dépasse 100%, 200%, 300% ! L'augmentation du nombre de jours avec déversement augmente également de manière très significative (+100%, +200%). Les indicateurs de réseaux montrent l'impact le plus fort de l'imperméabilisation. Rappelons que dans la simulation de référence (modèle calé), 70% du ruissellement imperméable est redirigé vers le réseau, il est donc logique qu'une augmentation de ce ruissellement imperméable soit clairement observable sur ces indicateurs. On constate encore qu'à l'imperméabilisation égale, les scénarios proposant un étalement urbain plus prononcé sont 'les pires' : par exemple, si on compare le point bleu foncé (carte S1A) avec  $C_{imp}$  vers 0.126 et les deux points noirs (carte S1B) avec  $C_{imp}$  vers 0.122, on remarque que les volumes et la fréquence des déversements est plus élevée pour les points noirs (carte S1B), alors même que l'imperméabilisation totale est plus faible.

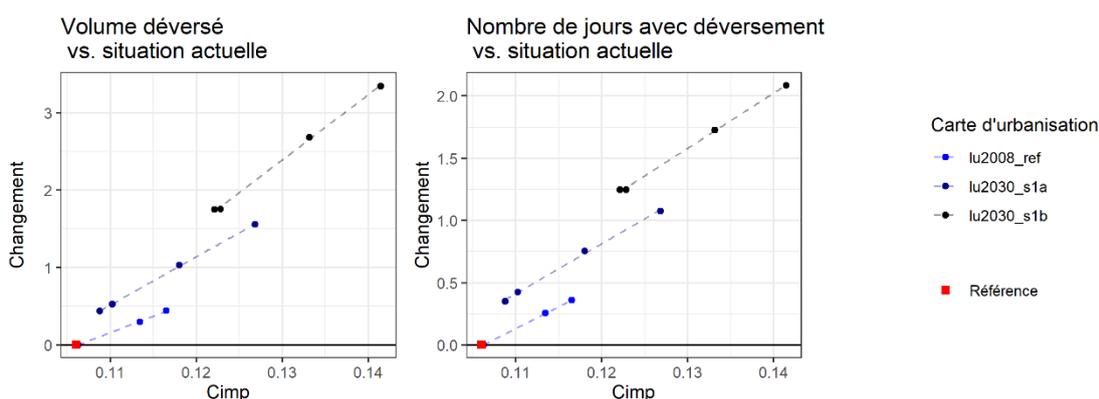


Figure 40 – Evolution du volume déversé via les DOs et du nombre de jours de déversement par rapport à la situation de référence en fonction de l'imperméabilisation

## Scénarios de déconnexion des surfaces imperméables

Les Figure 41 et Figure 42 présentent l'évolution du volume déversé par l'ensemble des DO et du nombre de jours de déversement en fonction de l'imperméabilisation croissante du bassin versant, et en fonction des scénarios de gestion. Chaque vignette et la palette de couleur du gris au vert correspondent à une implémentation croissante des techniques alternatives (gris = scénario tout tuyau, vert foncé = scénario idéal où toutes les surfaces imperméables sont gérées à la source avec des TAs).

On observe un impact très fort de l'implémentation des ouvrages de gestion à la source sur les deux indicateurs en réseau. On retrouve les augmentations très fortes décrites précédemment pour les deux indicateurs dans le cas d'une gestion 'tout tuyau' (vignette g1). Les augmentations sont moindres en déconnectant le neuf (scénarios scénario g2), mais reste très élevées, atteignant +50-+100% pour les volumes déversés (Figure 41) et le nombre de jours avec déversement (Figure 42). Quand on commence à agir sur l'existant (g3-g4-g5), les deux indicateurs ont des valeurs inférieures à celles de la simulation de référence : en déconnectant l'existant en plus du neuf, on diminue les volumes déversés et la fréquence de déversement (en moyenne -50% pour g3, -75% pour g4, -100% pour g5), peu importe le niveau d'imperméabilisation testé.

En résumé :

- Volume déversé et fréquence des déversements par les déversoirs d'orages sont très sensibles à l'imperméabilisation, avec des augmentations significatives.
- Une politique ambitieuse de déconnexion des eaux pluviales permet de diminuer l'impact des déversoirs d'orages, même en cas d'imperméabilisation du bassin versant.
- Outre les zones nouvellement imperméabilisées, il faut déconnecter les zones imperméables existantes pour faire diminuer les volumes déversés et les fréquences des déversements. On peut retenir l'objectif d'1/3 de l'existant déconnecté.

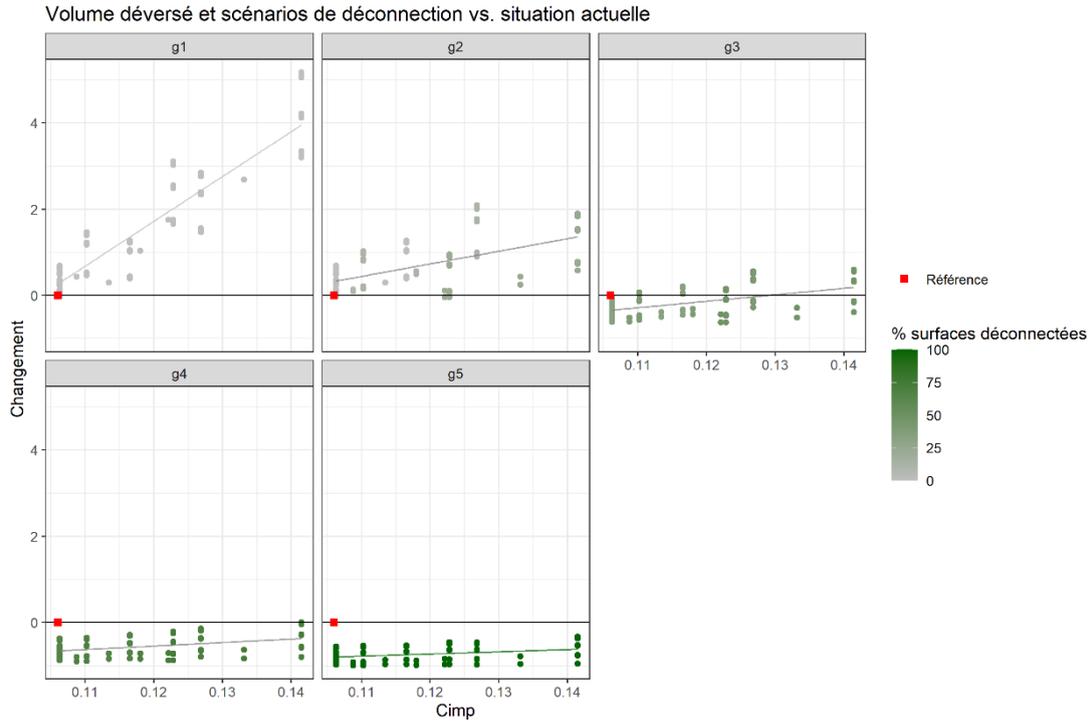


Figure 41 – Evolution du volume déversé via les DOs par rapport à la situation de référence en fonction de l'imperméabilisation et des scénarios de déconnexion

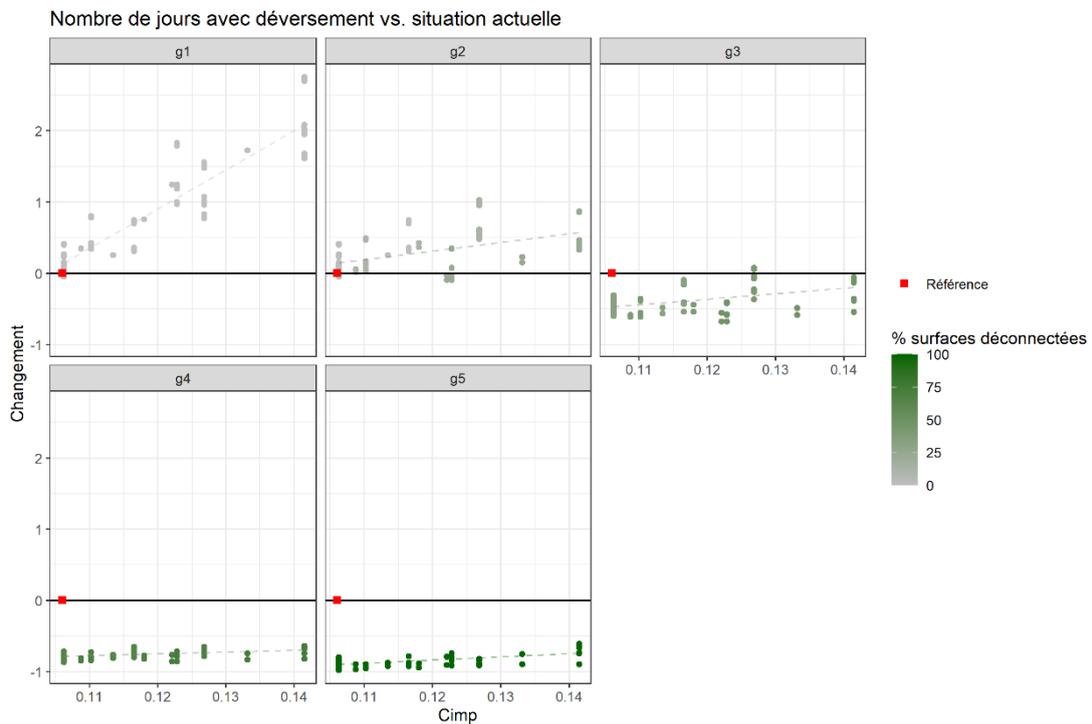


Figure 42 - Evolution du nombre de jours avec déversement via les DOs par rapport à la situation de référence en fonction de l'imperméabilisation et des scénarios de déconnexion

### 3.1.6. Indicateurs d'étiage: QMNA5 et VCN15

#### Tout tuyau (scénario g1)

La Figure 43 présente l'évolution des indicateurs d'étiage (QMNA5 et VCN15), en fonction de l'imperméabilisation du bassin versant, si les eaux pluviales sont gérées en tout tuyau. La définition de ces indicateurs est la suivante :

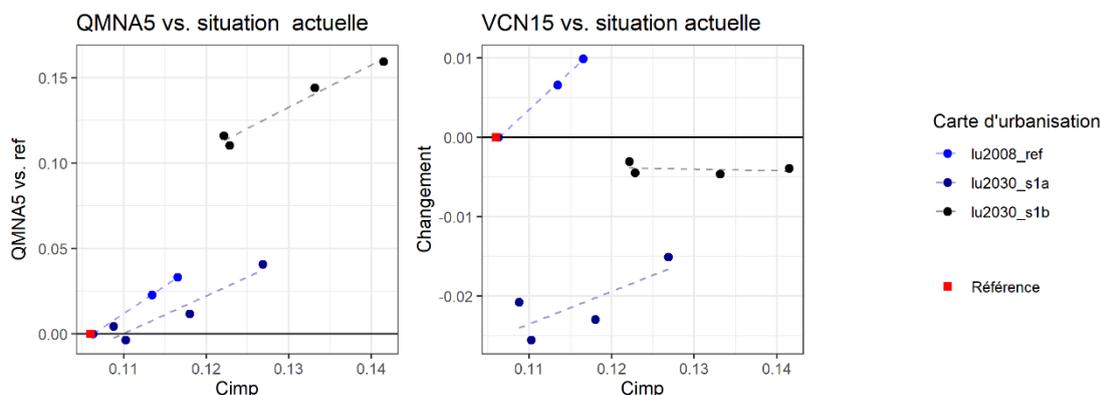
- QMNA5 : le minimum annuel des débits moyens mensuels avec une période de retour de 5 ans
- VCN15 : le débit moyen minimal sur une période de 15 jours

L'axe des abscisses représente le coefficient d'imperméabilisation des 11 scénarios d'urbanisation. L'axe des ordonnées représente l'évolution par rapport à la simulation de référence. Les couleurs représentent les trois cartes d'urbanisation (bleu = pas d'étalement urbain, bleu foncé = étalement urbain, noir = étalement urbain encore plus prononcé). Les lignes sont des régressions linéaires tracées pour une meilleure lisibilité. On remarque de façon peut être surprenante que l'imperméabilisation croissante augmente le QMNA5 et n'a pas d'impact évident sur le VCN15.

Dans le cas du Ratier, les débits minimums sont observés en été. L'imperméabilisation a donc tendance à faire augmenter, via le ruissellement imperméable urbain, les débits estivaux, contrairement à ce à quoi on pourrait s'attendre, mais pas assez pour que les débits estivaux deviennent, en moyenne, supérieurs aux débits des autres mois.

Pour une carte d'urbanisation donnée, la densité du bâti tend à faire augmenter le VCN15, mais les cartes les plus étalées n'ont pas nécessairement de VCN15 plus élevés que la référence : l'imperméabilisation, en diminuant les débits de base mais en augmentant le ruissellement imperméable, modifie les moyennes mobiles, et donc la valeur la plus basse de ces moyennes mobiles n'est pas forcément tout le temps la même quinzaine ce qui rend la comparaison difficile.

Il est également à noter que si les tendances sont bien présentes et les changements relatifs importants (+50% pour le QMNA5 dans la situation la plus imperméable), les changements restent très faibles en ordres de grandeur avec des débits très faible (< 1 l/s).



## Scénarios de déconnexion des surfaces imperméables (scénarios g2-g3-g4-g5)

Les Figure 44 et Figure 45 présentent l'évolution des deux indicateurs d'étiage (QMNA5 et VCN15, respectivement) en fonction du scénario de gestion des eaux pluviales. La palette de couleur du gris au vert foncé correspond à une implémentation croissante des techniques alternatives (gris = scénario tout tuyau, vert foncé = scénario idéal où toutes les surfaces imperméables sont déconnectées avec des ouvrages de gestion à la source). L'aire des techniques alternatives (5% ou 10% de la surface imperméable de chaque HRU) semble avoir un impact important sur les bas débits, et donc la taille des ouvrages est cette fois représentée par une forme de point différentes (rond = pas d'ouvrages, triangle = 5% des surfaces imperméables, carré = 10% des surfaces imperméables). Les résultats sont présentés en évolution par rapport à la situation de référence. Les observations suivantes peuvent être faites :

- Pour g2, QMNA5 et VCN15 plus élevés. Une déconnexion plus importante entraîne des indicateurs d'étiages plus faibles, ce qui reflète l'importance du ruissellement de surface dans le QMNA5 et le VCN15. A imperméabilisation égale, une gestion fondée sur une déconnexion importante entraîne une interception et une infiltration plus importante du ruissellement imperméable et les moyennes des indicateurs d'étiage débits lors des mois d'étiages diminuent (ou augmentent faiblement), mécaniquement.
- Pour g3, les indicateurs d'étiage augmentent fortement (+100% dans certains cas). On observe cependant des tendances contraires : les indicateurs augmentent fortement avec des TAs dimensionnées à 5% de la surface imperméable mais diminuent avec l'imperméabilisation. Pour des TAs dimensionnées à 10% de la surface imperméable, les indicateurs augmentent faiblement, l'imperméabilisation accentue légèrement cette augmentation.
- Pour g4 et g5 les indicateurs d'étiage sont proches des niveaux de référence (légèrement au-dessus pour des TAs dimensionnées à 5% de la surface imperméable, légèrement en dessous pour des TAs dimensionnées à 10% de la surface imperméable). Les tendances ne sont pas significatives. Il est difficile d'établir une « règle » car en été, à partir d'un certain niveau d'implémentation des ouvrages de gestion à la source, on retrouve une compétition entre hausse des composantes souterraines (grâce à l'infiltration) et baisse des pics de ruissellement de surface (impact écrêtement grâce à la gestion à la source), qui fait évoluer les moyennes dans des sens difficiles à anticiper.

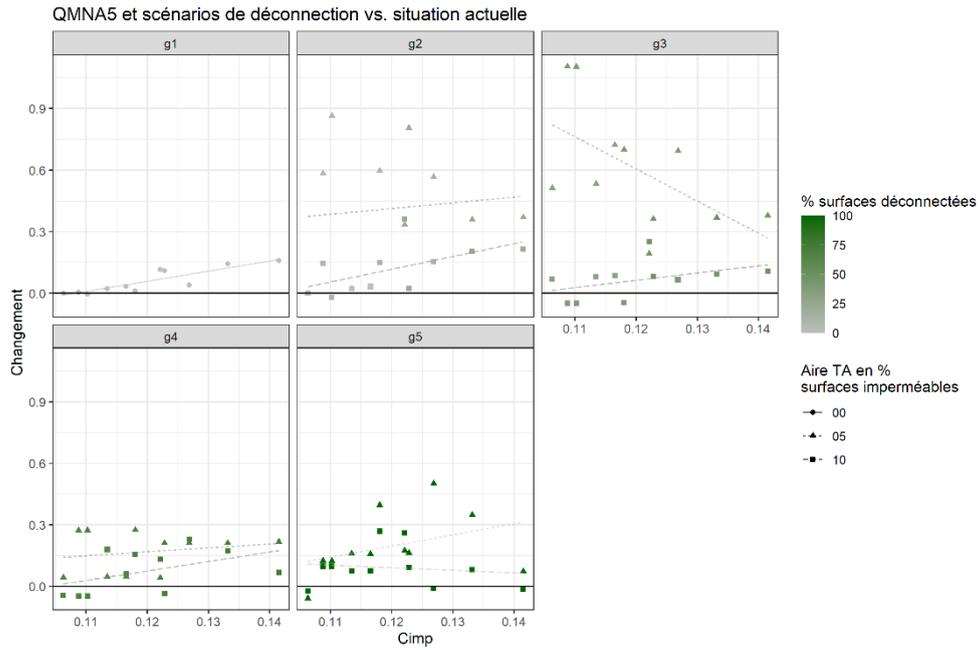


Figure 44 - Impact des scénarios de gestion et de l'imperméabilisation sur le QMNA par rapport à la référence

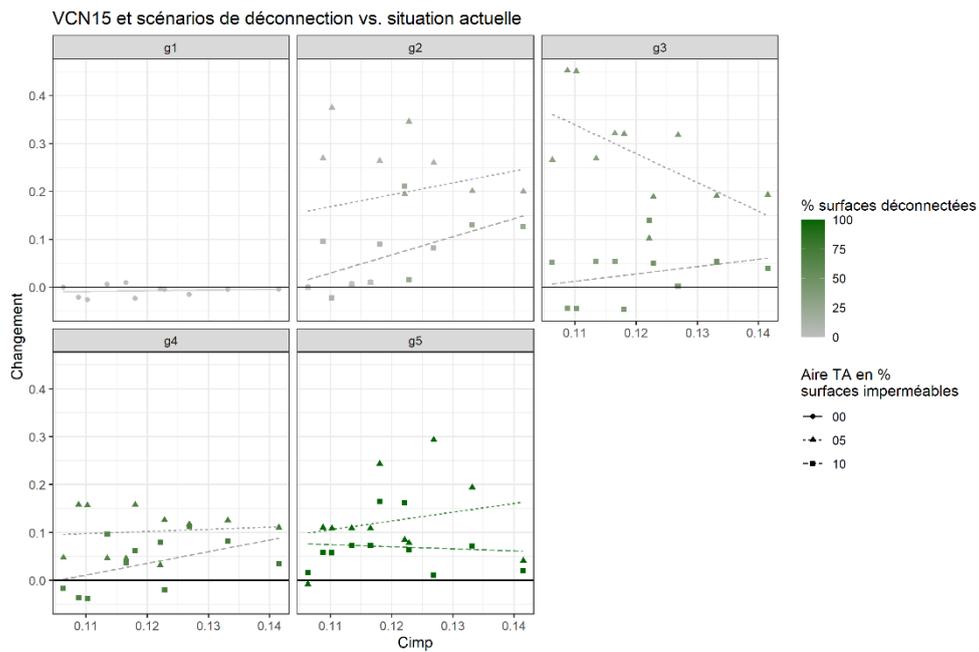


Figure 45 - Impact des scénarios de gestion et de l'imperméabilisation sur le VCN15 par rapport à la référence

### 3.1.7. Illustration sur hydrographes

Pour illustrer les remarques et conclusions précédentes, nous présentons deux hydrographes:

- Un hydrographe d'hiver (01/01/14 – 13/01/14), avec un cumul de 18.5 mm en 3 jours, pour les scénarios d'urbanisation en tout tuyau (Figure 46) et compensé par une gestion à la source en déconnectant les eaux pluviales (Figure 47), en échelle linéaires et en échelle log.
- Un hydrographe d'été (05/06/09 – 13/06/09), avec cumul de 35.7 mm, sous la forme de deux orages avec un pic à 5.2 mm/h puis 20 mm en 5 h, d'abord pour les scénarios d'urbanisation en tout tuyau (Figure 46), puis en considérant une déconnexion des eaux pluviales à la source de scénarios de gestion (Figure 47), en échelle linéaires et en échelle log.

On peut réitérer les conclusions précédentes, illustrées sur deux évènements pluvieux :

- En Janvier le débit de base diminue avec l'imperméabilisation, conséquence de la diminution de l'infiltration et de la recharge de nappe. La réponse à l'évènement pluvieux est rapide mais contrôlée par les composantes souterraines du modèle, et les scénarios les plus imperméables ont donc une crue relativement plus faible par rapport au scénario de référence. Les changements restent cependant faibles en magnitude.
- En Juin le débit de base est également légèrement plus faible pour les scénarios d'urbanisation les plus imperméables. En revanche la réponse à l'évènement pluvieux, plus intense (cumul 35 mm), est liée à l'augmentation du ruissellement imperméable urbain, et on observe donc des débits max plus élevés pour les scénarios les plus urbains, comme attendu.

L'impact des scénarios de déconnexion est présenté en Figure 47, pour tous les scénario d'urbanisation groupés sur la Figure. On remarque :

- En Janvier (Figure 47) le débit de base et la réponse hydrologique à l'évènement pluvieux augmentent avec le degré de déconnexion scénarisé: l'infiltration du ruissellement imperméable augmente les contributions souterraines qui soutiennent entièrement le débit à cette époque de l'année. Cependant les augmentations sont faibles en magnitude et restent peu significative.
- En Juin le degré de déconnexion atténue fortement le débit max en réponse à l'évènement pluvieux (pics à 0.1 m<sup>3</sup>/s pour le scénario tout déconnecté contre 0.5 m<sup>3</sup>/s pour la référence): le ruissellement imperméable est intercepté par les ouvrages de gestion à la source. L'impact sur le débit de base, en revanche, n'est pas linéaire: il semble que les premiers scénarios d'implémentation des ouvrages de gestion à la source (g2 g3) augmentent fortement le débit de base tandis que les scénarios encore plus déconnectés (g4 g5) induisent des débits à des niveaux juste au-dessus de la référence.

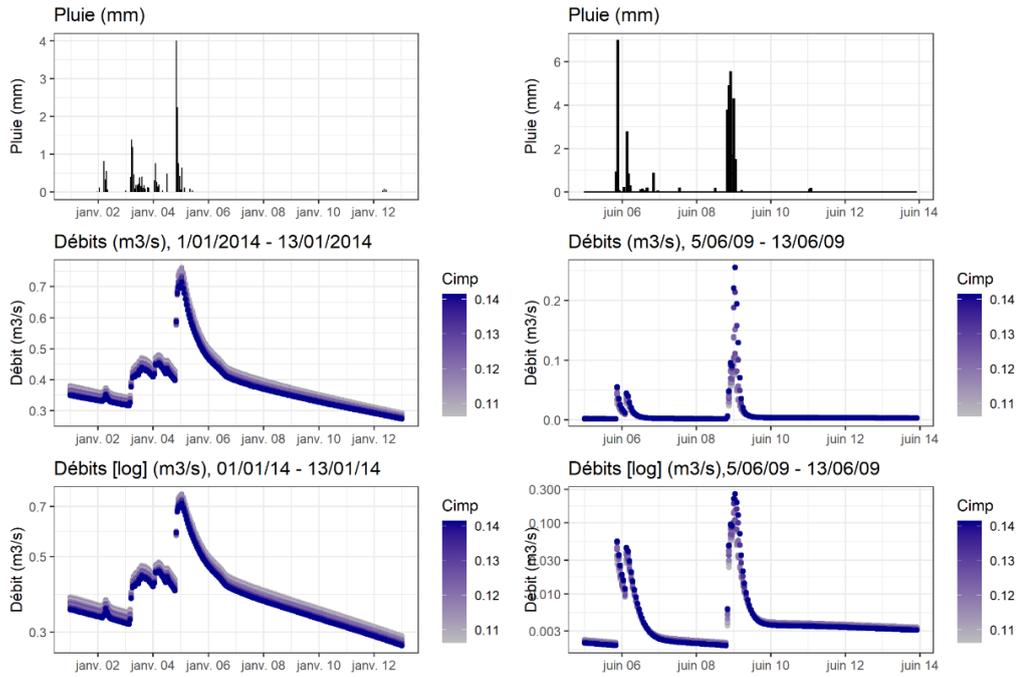


Figure 46 - Impact de l'imperméabilisation sur un hydrographe : exemple en Janvier (à gauche) et en Juin (à droite)

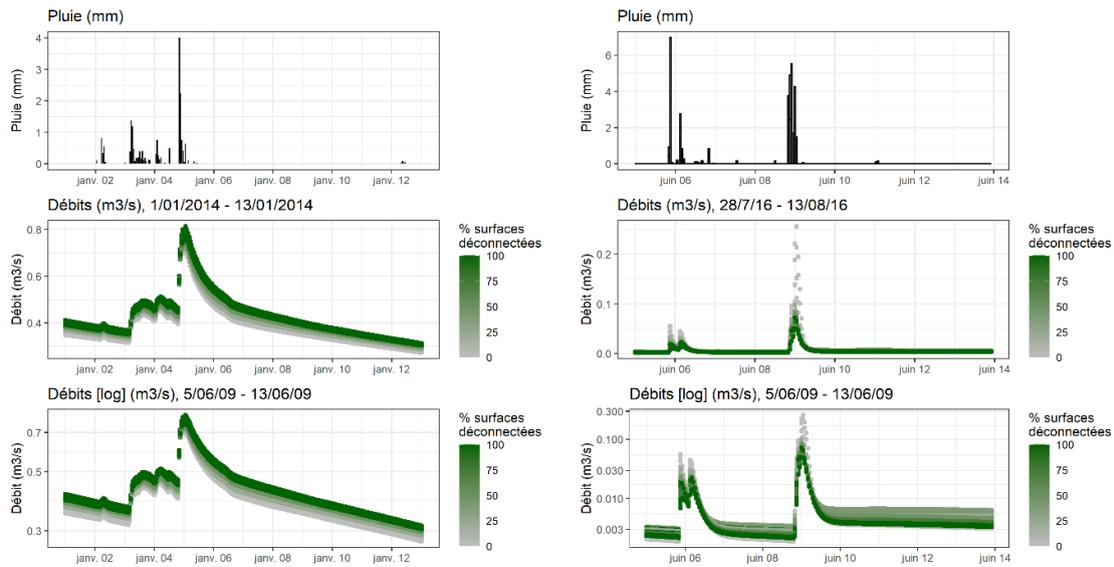


Figure 47 - Impact de la déconnexion sur un hydrographe : exemple en Janvier (à gauche) et en Juin (à droite)

### 3.1.8. Evènements remarquables

Les conséquences hydrologiques de l'imperméabilisation et des modes de gestion des eaux pluviales sont également appréciables en analysant l'impact de l'imperméabilisation sur des évènements historiques :

- La crue de Novembre 2008 (Figure 48, à gauche)
- L'étiage de l'été 2003 (Figure 48, à droite)

On remarque que l'urbanisation et les modes de gestion des eaux pluviales ne semblent avoir que peu d'impact sur la crue de Novembre 2008. Ceci est dû au fait que la crue provient des contributions de tout le bassin versant et pas seulement les zones urbaines. La capacité du modèle à reproduire les évènements extrêmes est également questionnable (voir Discussion en fin de rapport). Il est toutefois logique que la crue soit peu sensible à l'urbanisation : tout le bassin versant contribue aux débits élevés lors des crues extrêmes et pas seulement les zones urbaines. L'implémentation de la gestion à la source semble diminuer le pic de crue de manière négligeable et ne peut donc pas diminuer le risque de crue.

Les ouvrages de gestion à la source, en revanche, influent de façon significative sur l'étiage de l'été 2003 dans des sens parfois contradictoires : l'infiltration du ruissellement imperméable permet d'augmenter l'étiage, jusqu'à une valeur seuil à partir de laquelle les étiages diminuent de nouveau, peut être via l'évapotranspiration dans les TAs qui prélèvent tout le ruissellement imperméable intercepté, l'empêchant ainsi de ruisseler vers la HRU aval et de contribuer aux composantes souterraines du débit.

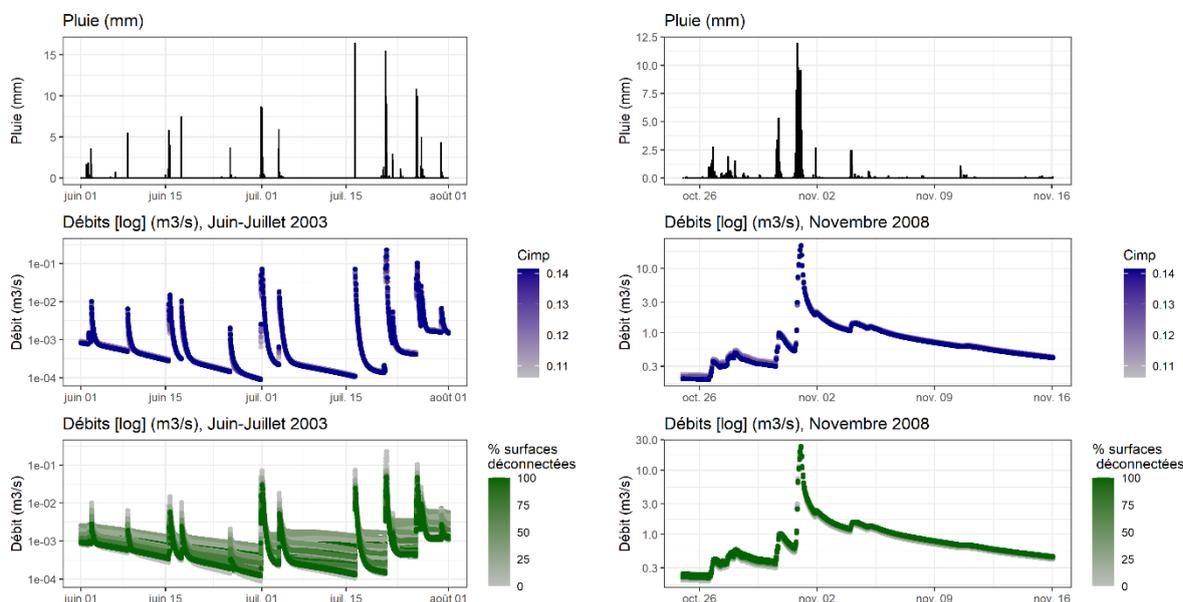


Figure 48 – Impact de l'imperméabilisation et des scénarios de déconnexion sur la crue de Novembre 2008 (droite) et de l'été 2003 (gauche)

### 3.1.9. Remarques et conclusions

Dans des scénarios d'urbanisation future avec un mode de gestion traditionnel en 'tout tuyau', on constate :

- Une augmentation du ruissellement de surface vers les cours d'eau (avec probable dégradation de la qualité de l'eau liée au lessivage des surfaces urbaines), et mécaniquement une diminution des composantes souterraines en rivière (avec probable dégradation de la qualité de l'eau).
- Une augmentation forte des volumes en réseau (+50% dans le scénario le plus urbain), et donc des volumes déversés au milieu par les déversoirs d'orages +200% d'augmentation des fréquences de déversement et +300% d'augmentation des volumes déversés.
- Une diminution des débits moyens mensuels de l'ordre de 5-10% causée par l'imperméabilisation, sauf pour les mois d'été où l'on observe une compétition entre diminution du débit d'étiage, déjà faibles en été, et une augmentation des pics de ruissellement de surface qui tire la moyenne à la hausse.
- Une augmentation des débits de pointe (débits maximums mensuels et quantiles 99), moins marquée d'Octobre à Mars (-2% - + 10%), mais très forte en été (jusqu'à +40%, +50% et +120% en Juin Juillet Aout respectivement). Ces augmentations relatives restent faibles en magnitude.
- Des tendances contradictoires sur les périodes d'étiage : pour chaque carte d'urbanisation, les VCN augmentent en fonction du coefficient d'imperméabilisation, mais varient autour de la simulation de référence ( $\pm 3\%$ )

En déconnectant progressivement les surfaces imperméables (d'abord les nouvelles constructions puis l'existant), on obtient :

- Une augmentation de l'évapotranspiration à l'échelle du bassin corrélée aux surfaces déconnectées.
- Une diminution progressive, quasi linéaire, du ruissellement de surface avec la déconnexion supplémentaire de l'existant : jusqu'à -50% dans un scénario de 'déconnexion complète' des eaux pluviales.
- Une augmentation des composantes souterraines (jusqu'à +5%) en fonction du degré de déconnexion, avec tout de même une tendance à la baisse quand l'urbanisation augmente.
- Une augmentation des débits moyens mensuels, tous les mois, en fonction de du degré de déconnexion (jusqu'à +5%), avec également une tendance à la baisse quand l'urbanisation augmente. Il est à noter que déconnecter les surfaces existantes renverse les tendances en été, où les débits moyens augmentent par rapport à la référence mais baissent avec le coefficient d'imperméabilisation (en d'autres termes, l'implémentation des TAs rend le BV plus 'naturel' l'été).
- L'implémentation des TAs transforme le comportement des débits élevés (moyenne des débits max mensuels). Pour les scénarios les plus urbains, l'implémentations des TAs permet la diminution des

débites max pour tous les mois de l'année, mais augmente les débits max pour les scénarios les moins urbanisés en hiver, car la déconnexion augmente les composantes souterraines du débit. Ces variations restent faibles, non significatives.

- L'impact est moins clair sur les étiages, peut être dus à la nature des indicateurs : les débits estivaux restent les plus faibles de l'année, mais sont les plus impactés par le ruissellement imperméable et donc augmentent avec la couverture imperméable et diminuent avec la déconnexion
- L'implémentation des TAs réduit drastiquement les volumes déversés et fréquences de déversement en réseau : déconnecter les nouvelles surfaces imperméables permet de limiter les augmentations des fréquences de déversement et volumes déversés à 50%, et déconnecter toutes les surfaces imperméables (nouvelles et existantes) permet une diminution continue des fréquences de déversement et volumes déversés (-50% avec 33% de déconnexion, et quasi suppression -100%, en déconnexion complète).
- Au vu des scénarios de déconnexion testés, il semblerait que le seuil de déconnexion d'1/3 des surfaces imperméables existantes (en plus de la déconnexion des nouvelles constructions), semble être un objectif ambitieux et réaliste qui permet de limiter voire compenser l'impact de l'imperméabilisation sur la plupart des indicateurs hydrologiques.

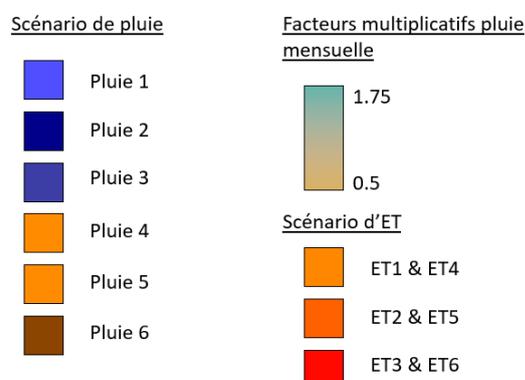
## 3.2. Gestion et changement climatique

Cette section présente les résultats des simulations de changement climatique et de gestion des eaux pluviales, avec l'occupation du sol 2008, sans nouvelle imperméabilisation. Ce paragraphe permet donc « d'isoler » les effets du changement climatique et de quantifier la vulnérabilité du ruisseau face à ce dernier. Pour rappel, les scénarios climatiques sont construits de la façon suivante :

- *Pluie3 (Rain3)* : intensités horaires réajustées sur les cumuls mensuels de la ville d'Orange (*Pluie 1 et 2 (Rain1-2)* sont des scénarios intermédiaires avec des cumuls mensuels compris entre les cumuls présents et ceux d'Orange) : ces scénarios voient une forte diminution des pluies en Juin-Juillet en une augmentation de la pluviométrie en Septembre. Les cumuls annuels restent quasi inchangés.
- *Pluie6 (Rain6)* : intensités horaire réajustées sur les cumuls mensuels des projections climatiques des simulations du CNRM 2014 ([http://www.drias-climat.fr/document/Doc\\_DRIAS\\_database\\_CNRM2014-ARPEGE\\_ALADIN52.pdf](http://www.drias-climat.fr/document/Doc_DRIAS_database_CNRM2014-ARPEGE_ALADIN52.pdf)) à partir du scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP 8.5 (*Pluie 4 et 5 (Rain4-5)* sont des scénarios intermédiaires). Ces scénarios proposent une forte augmentation des intensités en Juin et (moindre) en Septembre. Les cumuls annuels sont plus élevés.
- 6 scénarios de réchauffement (et donc d'évapotranspiration), avec des réchauffements annuels moyens de +2°C (*ET1 et ET4*), +3.5°C (*ET2 et ET5*), +5°C (*ET3 et ET6*)

(Pour rappel, les scénarios de gestion des eaux pluviales g1-g5 correspondent à une déconnexion progressive des surfaces imperméables. Il y a donc équivalence entre un scénario et un pourcentage de surfaces imperméables déconnectées (Tableau 10) : g1 et g2 (0% déconnectées), g3 (~50% déconnectées), g4 (~75% déconnectées), g5 (100% déconnectées).)

Les indicateurs annuels sont présentés en fonction du scénario de pluie et du scénario d'ET, coloriés comme présenté ci-dessous, et les indicateurs mensuels en fonction du facteur de perturbation appliqué à la pluie horaire, comme présenté ci-dessous :



### 3.2.1. Composantes du bilan

Les Figure 49 et Figure 50 présentent l'évolution des différentes composantes du bilan hydrologique annuel, en % du bilan annuel (Figure 49) et en évolution par rapport à la référence (Figure 50). Chaque Figure comporte 2 graphes, qui représentent les mêmes points, coloriés de façon différente : en fonction des scénarios de pluie pour les graphes du haut, et en fonction du réchauffement moyen annuel pour les graphes du bas.

Les observations suivantes peuvent être faites :

- La part de l'évapotranspiration dans le bilan total varie de 60% à 80%, principalement contrôlée par la température. Il y a compétition entre les scénarios d'augmentation de la pluviométrie annuelle qui font baisser la part de l'ET dans le bilan total (de 65% à 60%), et les scénarios de réchauffement qui poussent la part de l'ET à la hausse, jusqu'à 80% du bilan annuel pour les scénarios de réchauffement les plus extrêmes (scénarios ET3, ET6)
- Logiquement, la part du débit en rivière dans le bilan annuel évolue inversement : augmentation avec l'augmentation de la pluviométrie annuelle (jusqu'à 35% du bilan pour le scénario le plus pluvieux), et diminution avec le réchauffement (20% pour le réchauffement extrême).
- Par rapport à la simulation de référence (en relatif), tous les scénarios de réchauffement extrêmes voient une baisse de la part du débit (-20%, -30%). Cette baisse se fait principalement via une baisse du débit de base. Le ruissellement de surface augmente jusqu'à +50% avec les scénarios les plus pluvieux, mais le ruissellement de surface n'étant pas un flux majeur en rivière, son augmentation prononcée n'impacte que peu le bilan total.
- Les scénarios de gestion influencent peu la répartition ET/Débit total. Cela s'explique par le fait que les TAs influent sur le ruissellement imperméable qui ne contribue pas de façon significative au bilan total. Les scénarios de gestion contribuent en revanche fortement à la diminution de la part du ruissellement imperméable ou de surface dans le ruisseau et du volume en réseau, et ce quel que soit le scénario climatique testé : -25% (scénario g3), -50% (scénario g4), -75% (scénario g5) par rapport à la simulation de référence avec implémentation croissante des TAs.

Il semblerait donc qu'une politique de déconnexion ambitieuse permette de diminuer fortement les volumes de ruissellement urbain transportés par le réseau et le ruissellement de surface vers la rivière même avec des scénarios de changement de pluviométrie extrêmes. En revanche, ils ne peuvent influencer, à l'échelle du bassin versant, sur les parts relatives ET/débits, leur impact étant dominé par le climat.

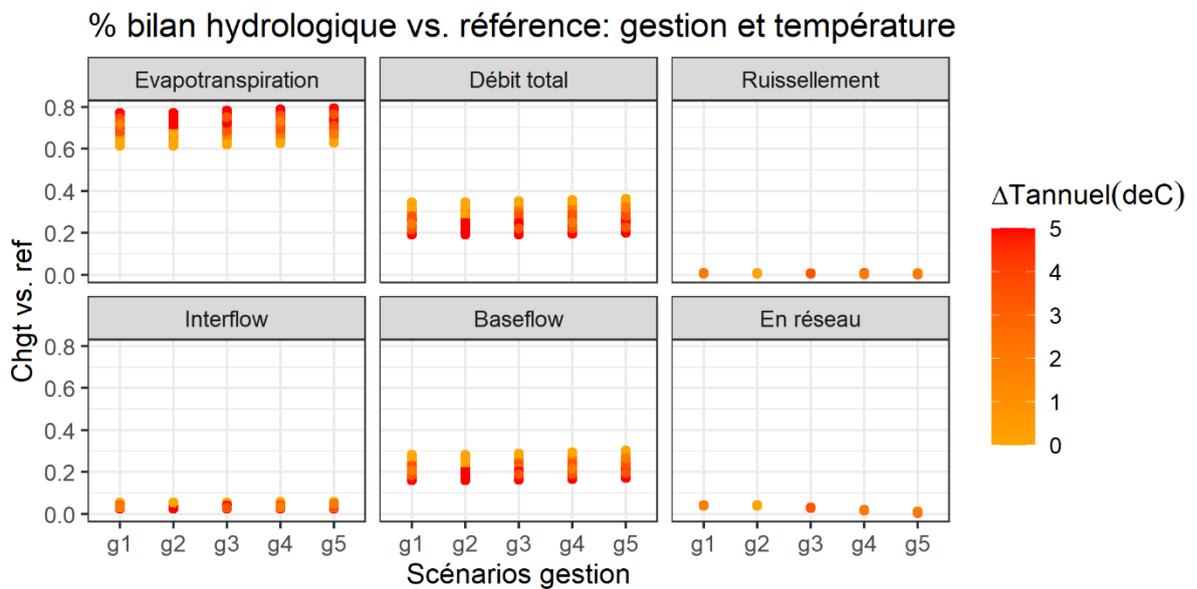
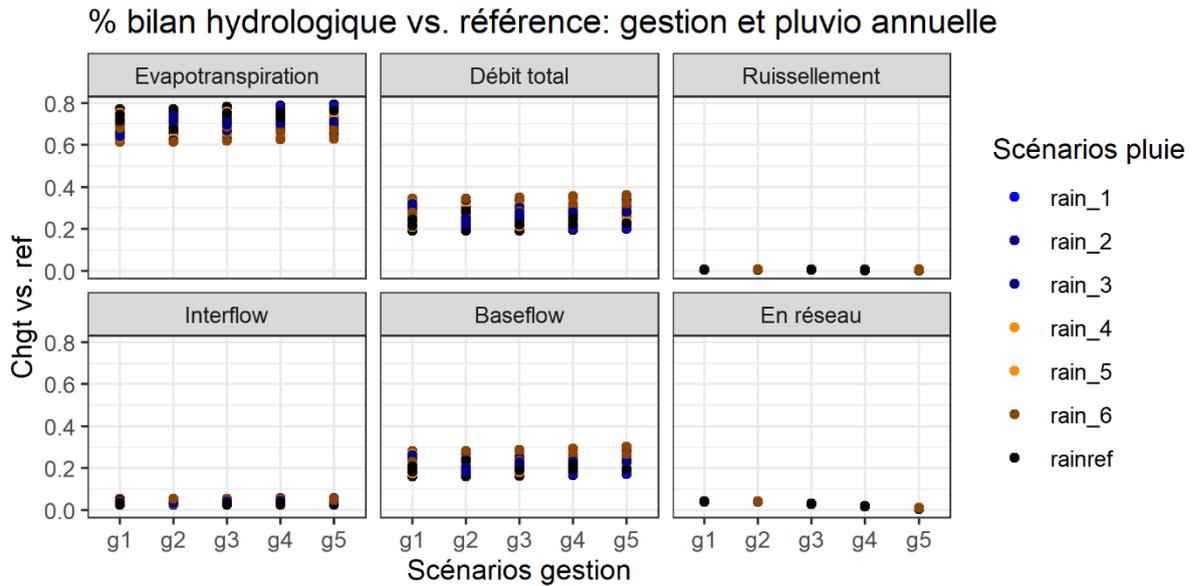


Figure 49 – Part (en %) de chaque membre du bilan hydrologique annuel (moyenné), en fonction des scénarios de gestion, et des scénarios de pluie (haut) et de réchauffement (bas)

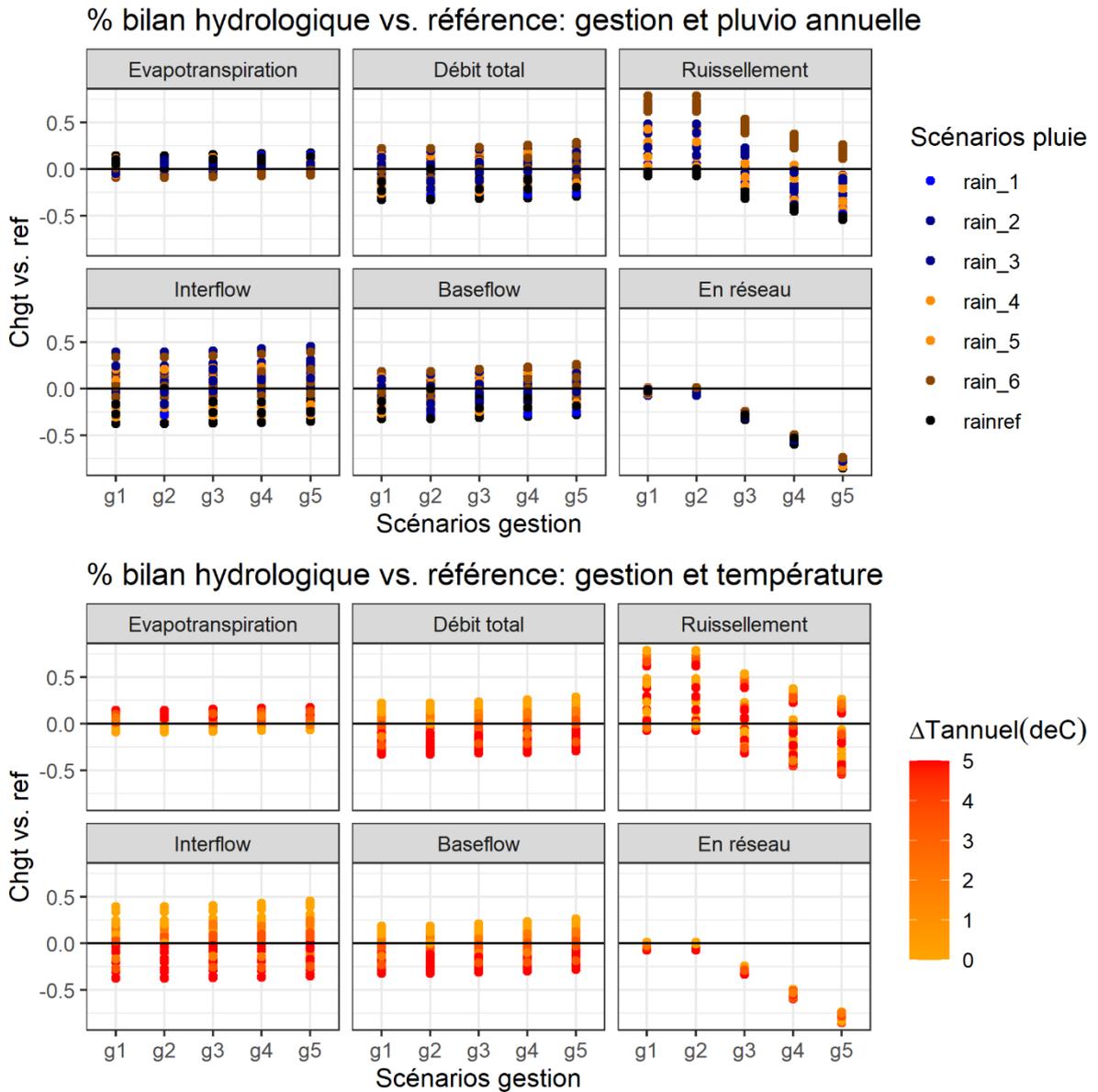


Figure 50 –Evolution de la part de chaque composante du bilan hydrologique annuel (moyenné), par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion, et des scénarios de pluie (haut) et de réchauffement (bas)

### 3.2.2. Débits moyens mensuels

La Figure 51 présente l'évolution des débits mensuels moyens, par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion (axe des abscisses), et coloriés en fonction du facteur multiplicatif mensuel appliqué à la pluie horaire, et des scénarios de réchauffement. Les deux graphes présentent les mêmes points mais coloriés de façon différente, pour pouvoir apprécier l'impact relatif de la pluviométrie (en haut) et du réchauffement (en bas). La Figure en  $m^3/s$  est en Annexe.

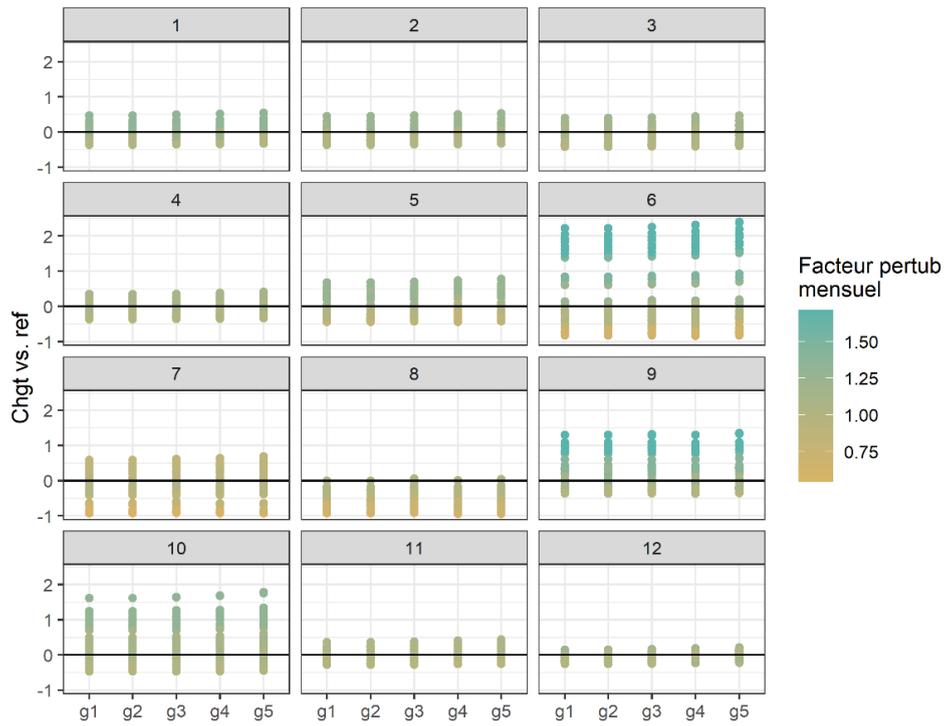
La Figure 52 présente l'évolution des débits moyens par rapport à la simulation de référence en fonction des coefficients multiplicateurs mensuels pour la pluviométrie, ce qui permet d'observer d'éventuels 'effets seuils'.

On observe que :

- En hiver et au printemps (de Novembre à Mai), les débits moyens fluctuent autour de la situation actuelle, avec en moyenne de légères diminutions de 5%, mais variant pour les cas les plus extrêmes entre -50% et +50% par rapport à la référence. Les débits moyens augmentent pour des scénarios d'augmentation de la pluviométrie avec un réchauffement peu prononcé ( $0^{\circ}C$ ,  $+2^{\circ}C$ ). En revanche, les débits moyens baissent pour des scénarios de réchauffement plus prononcé ( $+3.5^{\circ}C$ ,  $+5^{\circ}C$ ) : l'augmentation de l'évapotranspiration n'est pas compensée par l'augmentation de la pluviométrie dans ces cas.
- De Juin à Octobre, les variations sont plus prononcées, avec notamment :
  - Une forte augmentation des débits moyens en Juin, Septembre et Octobre (en moyenne +18%, +26%, +28% mais jusqu'à +100% ou +200% pour les scénarios les plus extrêmes. Pour un scénario de pluie donné, la variabilité est due au réchauffement, la demande en évapotranspiration ralentit l'augmentation des débits moyens.
  - Une diminution très forte des débits en Juillet-Aout de -20%, -50% en moyenne mais pouvant aller jusqu'à -80% ou -90% pour les scénarios basés sur Orange couplés aux scénarios de réchauffement extrêmes
- Peu d'impact sur les débits moyens des scénarios de gestion : leur effet sur le ruissellement de surface paraît presque négligeable par rapport aux variations induites par les changements climatiques.

On peut s'étonner de l'amplitude de certains changements prévus, surtout en Juin et Novembre : il est à noter que ces changements sont relatifs à la simulation de référence. Les valeurs en  $m^3/s$  données en Annexe montrent que les débits de Juin, bien que supérieurs à leurs valeurs de référence, restent inférieurs aux débits moyens d'hiver/printemps. Les valeurs moyennes de Juin et Novembre sont également tirées à la hausse par des journées aux débits extrêmes.

### Evolution débits moyens mensuels (pluvio et gestion)



### Evolution débits moyens mensuels (température et gestion)

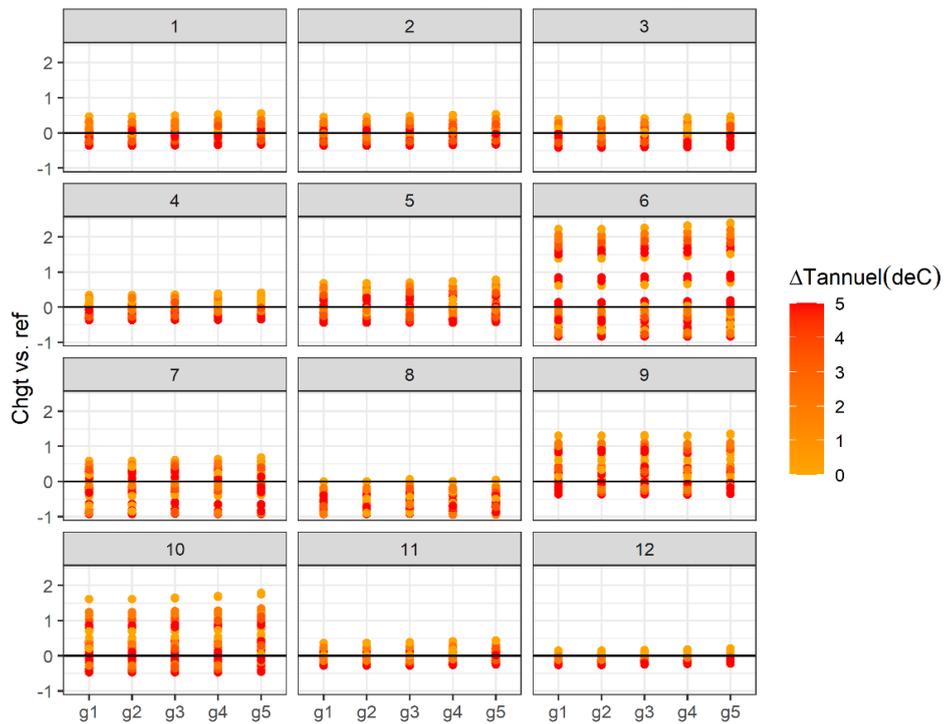


Figure 51 - Evolution relative des débits moyens mensuels, scénarios de gestion et changement climatique, par rapport à la simulation de référence

La Figure 52 permet d'observer que :

- Des effets seuils sur les débits moyens : pour des facteurs multiplicatifs mensuels compris entre 0.5 et 1.7, les débits moyens varient entre -90% et +240%.
  - Notamment, pour le facteur multiplicatif le plus élevé (1.7, soit une augmentation de 70% de la pluviométrie mensuelle, pour le mois de Juin du scénario pluie 6, voir les points en haut à droite de la Figure), les variations de débits moyens vont de +150% (+5°C) à +240% (+0°C)
  - A l'inverse, les points tout en bas à gauche correspondent à un facteur multiplicatif de 0.6 (donc une perte de 40% de la pluviométrie mensuelle), mais à une baisse des débits moyens à -80% ; -90%.
- L'impact fort du réchauffement, et donc de l'évapotranspiration sur les débits moyens : à scénario équivalent, les débits moyens peuvent varier de quelques % jusqu'à 100% en fonction de l'augmentation de température moyenne. Le régime d'écoulement est donc ultra-sensible à la température et la gestion à la source ne peut compenser ces changements.

### Evolution débits moyens mensuels vs. facteur pertubation mensuel et réchauffement

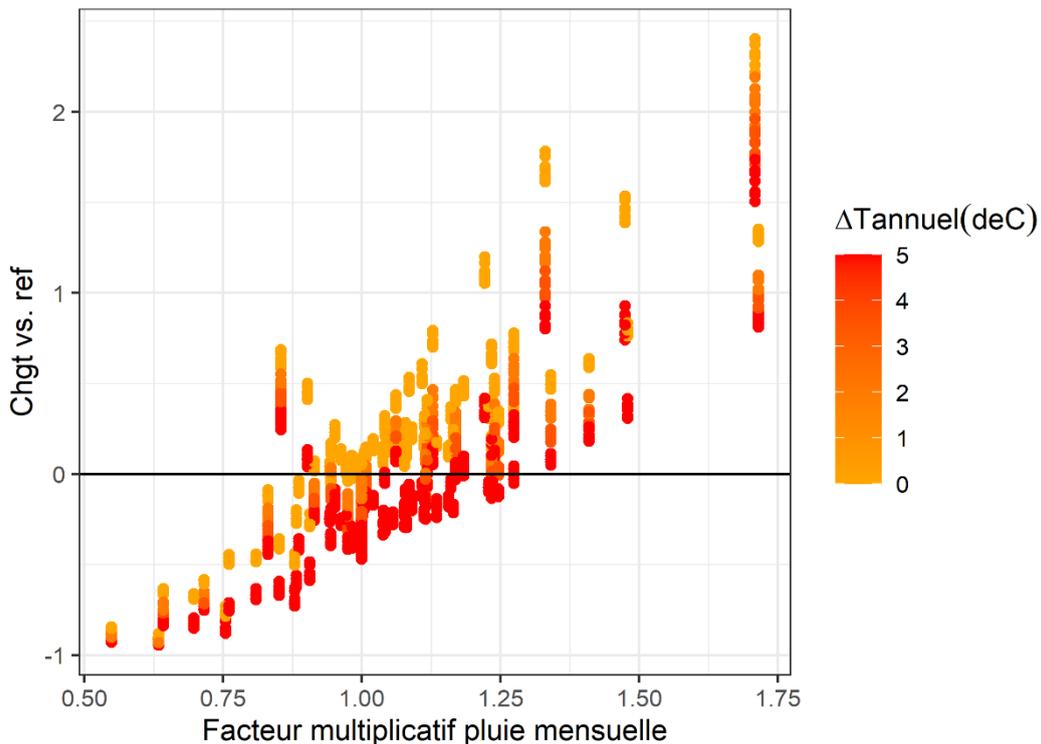


Figure 52 - Lien entre facteurs de perturbations mensuels (pluviométrie) et évolution du débit moyen mensuel coloriés par moyenne de réchauffement annuel

### 3.2.3. Moyenne interannuelle des débits journaliers

La Figure 53 présente la moyenne interannuelle des débits (la moyenne de tous les 6 janvier, par exemple), en m<sup>3</sup>/s, en échelle linéaire, colorié en fonction des scénarios de pluie et des scénario de réchauffement (les deux graphes présentent les mêmes points coloriés de façon différente). .

Cet indicateur nous permet de confirmer les observations faites sur les débits moyens mensuels :

- En Juillet Aout, tous les scénarios prévoient une diminution des débits.
- En Juin les scénarios basés sur la ville d'Orange anticipent une baisse des débits alors que les scénarios basés sur les projections de la simulation Jouzel 2014 du CNRM, sur le scénario RCP8.5 anticipent une hausse, portée par l'augmentation de la pluviométrie que l'augmentation de la demande en évapotranspiration ne compense pas.
- De Décembre à Avril/Mai on retrouve des fluctuations autour de la situation actuelle, même si on note que tous les scénarios de réchauffement à +3.5°C ou +5°C prévoient une baisse des débits moyens indépendamment des changements de pluviométrie.
- On remarque également que certains jours voient leur valeur de débit augmentée de manière nette, tirée par une valeur extrême, peut être mal gérée par le modèle (début Septembre, mi-Juin).

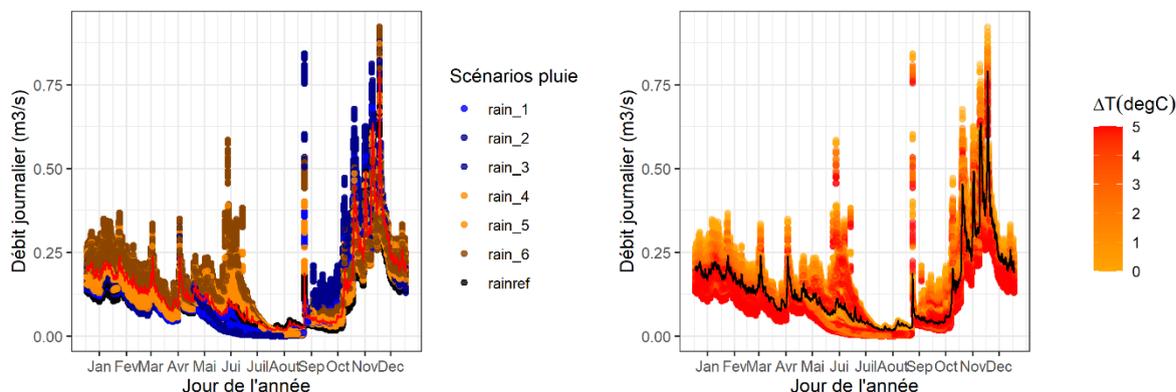


Figure 53 –Moyenne interannuelle des débits en référence (en rouge à gauche et noir à droite), colorié en fonction de l'évolution de pluviométrie annuelle (à gauche) et de l'augmentation de la température (à droite)

### 3.2.4. Indicateurs de débits élevés: débits maximums mensuels, quantiles Q<sub>1</sub>, Q<sub>5</sub> et Q<sub>10</sub>

Figure 54 présente l'évolution des débits maximums mensuels, par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion (axe des abscisses), des scénarios de pluviométrie (en haut) et des scénarios de réchauffement (en bas). Figure 55 présente l'évolution des débits maximums par rapport à la référence en fonction des coefficients multiplicateurs mensuels pour la pluviométrie.

On observe :

- En hiver et au printemps (de Novembre à Mai), les débits maximums évoluent peu en moyenne, avec des fluctuations autour de -5%, +5%, mais pour certains scénarios les fluctuations peuvent aller jusqu'à -40%, -30% ou +30%, +50%. Le sens de variations est directement lié au facteur de perturbation mensuel appliqué à la chronique de pluie : diminution des débits max avec un coefficient < 1, et augmentation quand > 1.
- De Juin à Octobre, les variations sont plus prononcées, avec notamment :
  - Une augmentation très forte des débits max, +67%, +150% en moyenne pour Septembre et Juin, mais jusqu'à des valeurs extrêmes pour certains scénarios. Ces valeurs extrêmes sont à considérer avec prudence, et appelle à s'interroger sur la capacité du modèle à reproduire cette partie du régime d'écoulement. Ces valeurs extrêmes, peut-être étonnantes, sont dues aux transformations de pluviométrie en Juin et Septembre, qui transforment des faibles débits en débits comparables à ceux des mois de printemps, avec donc une augmentation relative très élevée. Le modèle/régime d'écoulement apparaît ainsi très sensible à des perturbations de la pluviométrie. Le modèle s'avère peut-être peu fiable sur les très hautes valeurs de débits : ainsi certains évènements tirent les moyennes à la hausse, ou bien peu robuste dans un contexte climatique différent que le climat présent. Les scénarios de pluie avec un facteur de multiplication > 1.5 (scénarios pluie 5 et pluie 6 en Juin, et scénario pluie 3 en Septembre), donnent des valeurs extrêmes à considérer avec précaution. On observe l'activation d'un effet seuil, qui peut venir soit d'un manque de robustesse du modèle face à des perturbations climatiques (il faudrait une chronique de débits plus longue pour juger de la robustesse du modèle dans un contexte climatique autre), ou bien d'une non linéarité du fonctionnement du bassin versant : le peu de stockage du bassin versant conduit à des réponses fortes en cas d'augmentation de la pluviométrie. Ces résultats montrent que les débits maximums mensuels et leur modélisation sont *très sensibles* aux variations fortes de pluviométrie.
  - Une diminution des débits maximums en Juillet-Aout, de -50% en moyenne et jusqu'à -80, -90% pour les scénarios les plus extrêmes, basés sur Orange et couplés aux scénarios de réchauffement extrêmes.

- Peu d'impact des scénarios de gestion sur les débits maximums. Les débits max arrivent quand tout le bassin versant est saturé, la gestion des eaux en zones urbaines impacte donc peu ces débits.

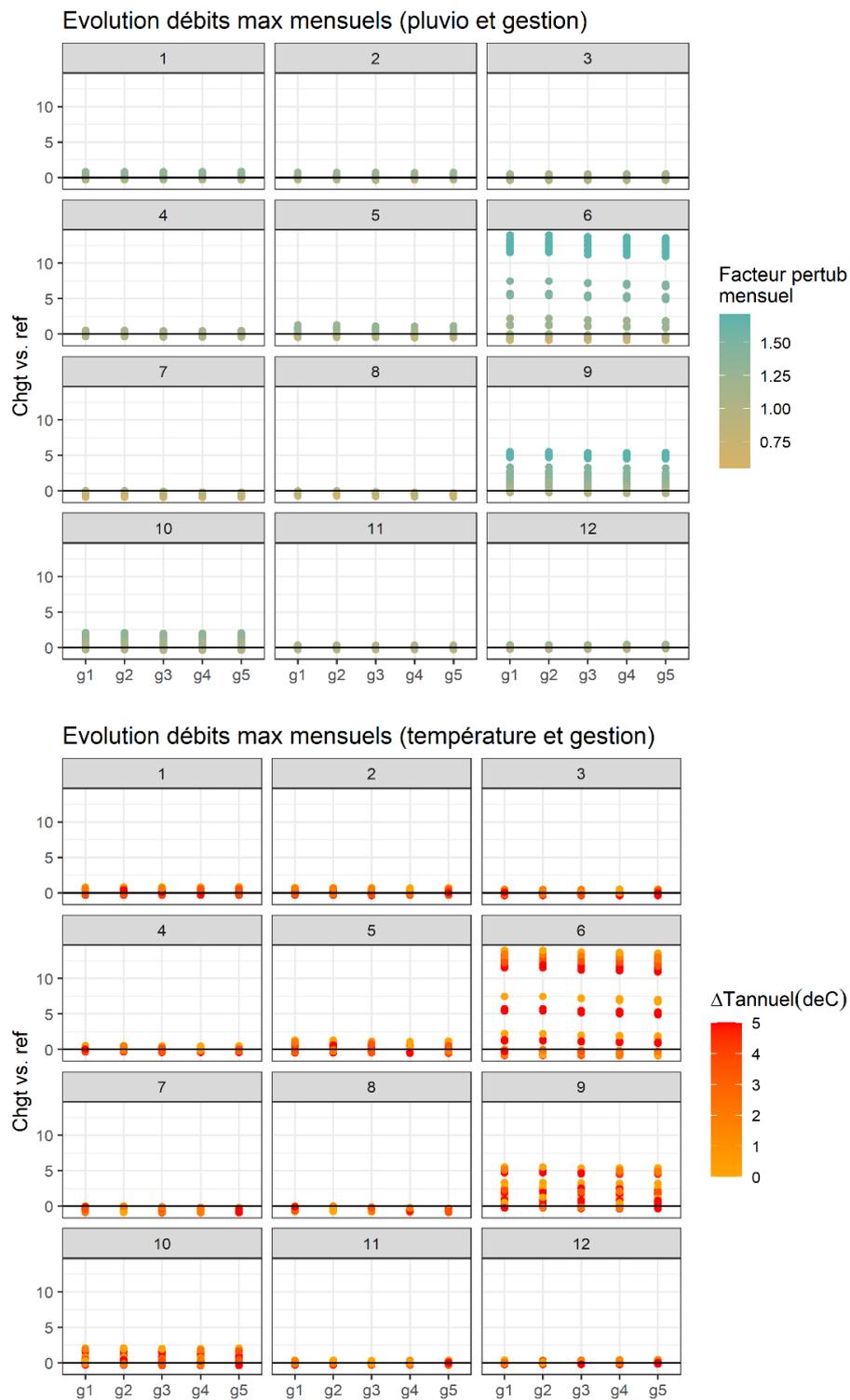
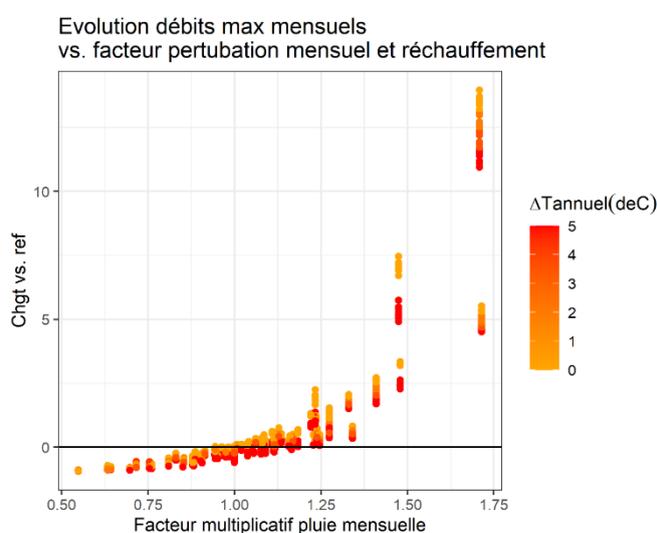


Figure 54 - Evolution relative des débits maximums mensuels, scénarios de gestion et changement climatique, par rapport à la simulation de référence

La Figure 55 présente l'évolution des débits maximums mensuels par rapport à la simulation de référence en fonction du facteur de multiplication appliqué à la pluie (en abscisse), colorié par réchauffement annuel, pour tous les mois de toutes les années simulées. On remarque que pour des perturbations de la pluie entre -25% et +20%, les débits max suivent des variations élevés mais crédibles. En revanche, on note un fort effet seuil pour des multiplications de la pluviométrie mensuelle supérieures à 1.25, ce qui correspond à un changement climatique dans sa forme la plus extrême : les moyenne des débits maximums augmente drastiquement. Les augmentations de pluie saturent les sols et conduisent à des débits max très élevés. La valeur de ces changements peut apparaître comme peu réaliste, ce qui interroge sur 1/ les scénarios climatiques créés et leur capacité à prédire les évènements extrêmes futurs 2/ la robustesse du modèle dans un contexte climatique très différent de l'actuel et 3/ la performance du modèle sur les hauts débits ou 4/ une forte non linéarité de la réponse du bassin versant. Un élément de réponse peut venir de la comparaison avec des extrêmes historiques. On peut donc conclure de l'analyse des débits maximums dans un contexte de changement climatique que le bassin versant modélisé semble peu résilient à des augmentations fortes de la pluviométrie mensuelle, sature rapidement et produit des débits élevés, dont une estimation numérique précise reste à développer. Les pages suivantes tentent d'illustrer le comportement du modèle sur ces scénarios de pluie extrêmes.



**Figure 55 - Lien entre facteurs de perturbations mensuels (pluviométrie), en abscisses, et évolution du débit max mensuel coloriés par moyenne de réchauffement annuel**

## Illustration sur un mois de Juin

Pour illustrer le comportement du modèle et comprendre les augmentations des débits moyens et maximums très marquées en Juin, analysons les hydrographes de deux simulations (référence et scénarios extrêmes : pluie 6 et ET6), pour un mois de Juin choisi au hasard (Juin 2018). (Figure 56 et Tableau 13). Le facteur multiplicatif appliqué à la pluie pour ce mois de Juin est de 1.5 : la pluviométrie passe de 79 mm à 136 mm sur le mois. L'augmentation d'évapotranspiration de référence est de 15% (réchauffement de 5°C en moyenne sur l'année).

La différence de volume en rivière sur la période est de +130%, c'est-à-dire supérieure à l'augmentation de pluviométrie. Le débit en rivière est porté par des composantes souterraines élevées dû aux conditions antérieures à ce mois de Juin. Plus spectaculaire, le débit max est très élevé : 5.3 m<sup>3</sup>/s contre 0.6 m<sup>3</sup>/s, soit un ratio de 8.8). Le bassin versant est amené proche de la saturation par l'augmentation de la pluie de 50%, des conditions antérieures plus humides également, l'augmentation en évapotranspiration ne suffit pas à sécher les sols, et un évènement pluvieux de 41 mm en 6h suffit à provoquer une crue marquée.

Bien que les valeurs absolues, en m<sup>3</sup>/s, des débits obtenues dans ces scénarios de projections soient à prendre avec prudence (calage, performance du modèle sur les hauts débits, etc.), les mécanismes sont intéressants à retenir. Dans le cas d'une augmentation nette de la pluviométrie future en Juin et Septembre, ce petit bassin versant à la capacité de stockage limitée atteindra des niveaux de quasi-saturation du sol plus rapidement, ce qui entraînera des réponses à des évènements pluvieux (même non remarquables) rapides et fortes. Ce phénomène semble être indépendant de l'urbanisation et du mode de gestion des eaux pluviales. La gestion à la source permet de contrôler principalement le fonctionnement des réseaux d'assainissement, mais ne semblent pas en mesure de compenser une saturation (ou à l'inverse un assèchement, l'été) de tout le bassin versant.

**Tableau 13 - Pluviométrie mensuelle, ET, Débit max et volume mensuel pour deux simulations pour le même mois de Juin**

<b>Juin</b>	<b>Scénario de référence (Pluie Ref + ET Ref)</b>	<b>Scénario extrême (Pluie 6 + ET6)</b>	<b>Ratio</b>
<b>Pluie (mm)</b>	79 mm	136 mm	1.5
<b>ETO (mm)</b>	93 mm	108 mm	1.15
<b>Débit max (m<sup>3</sup>/s)</b>	0.6 m <sup>3</sup> /s	5.3 m <sup>3</sup> /s	8.8
<b>Volume total écoulé en ruisseau (m<sup>3</sup>)</b>	216 m <sup>3</sup>	492 m <sup>3</sup>	2.3
<b>Conditions initiales (cumul pluie de pluie 1/ de la semaine précédente 2/ des trois mois précédents)</b>	26 mm 221.4 mm	33 mm 321 mm	1.26 1.45

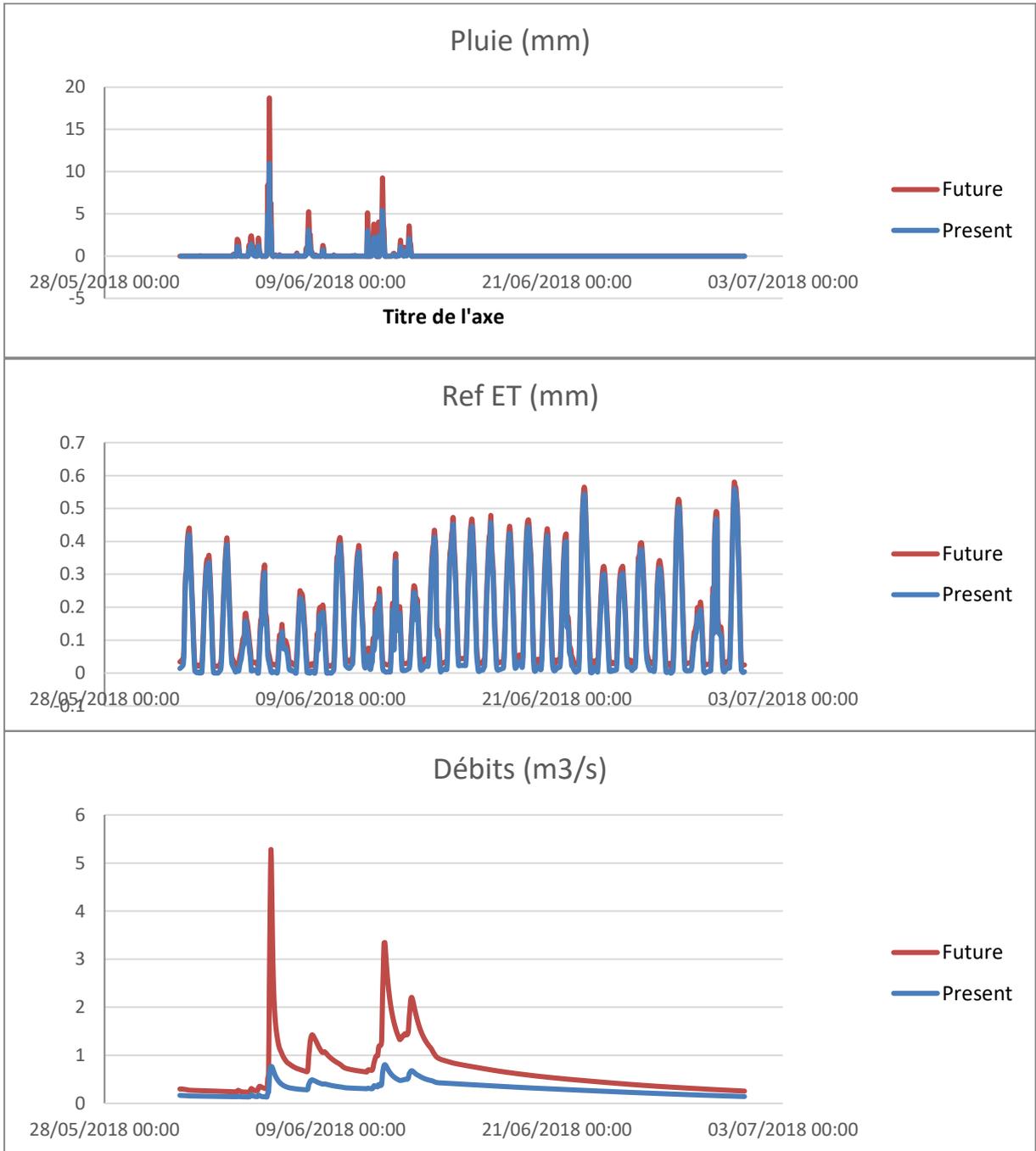


Figure 56 - Pluviométrie, évapotranspiration, débits et composantes souterraines pour deux simulations : référence (en bleu) et extrême (en orange).

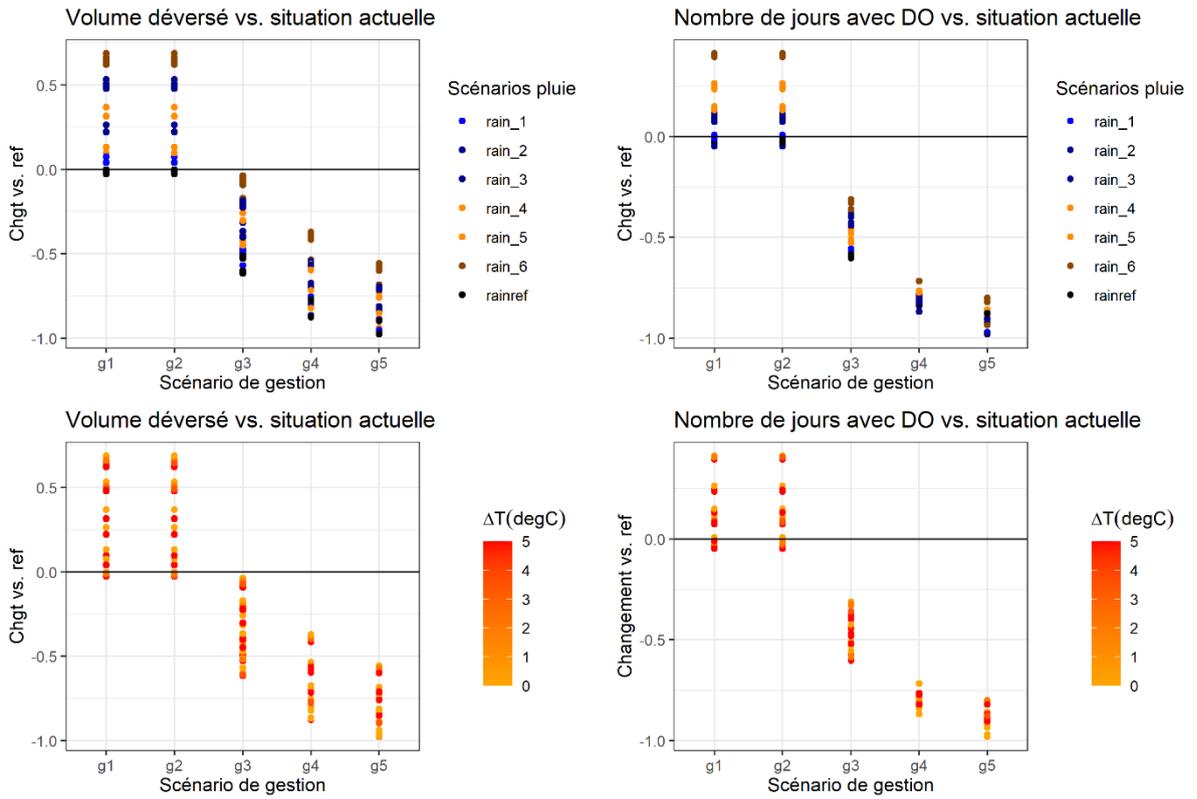
### 3.2.5. Indicateurs en réseau: DOs volume et fréquence

La Figure 57 présente l'évolution du volume déversé (à gauche) et du nombre de jours avec déversement (à droite) en fonction des scénarios de gestion (en abscisses), et des scénarios de pluies futures (en haut) et de réchauffement annuel (en bas). Figure 57 présente également l'évolution du volume déversé et du nombre de jours avec déversement en fonction des scénarios de gestion, en fonction des scénarios de pluies, coloriés selon le numéro du scénario ce qui permet d'observer l'impact de la saisonnalité des scénarios et pas seulement le changement de pluviométrie annuel. Pour chaque scénario, tous les points verticaux correspondent aux simulations croisées entre les scénarios de pluie et les scénarios d'ET. Tous les points correspondent donc aux « champs des possibles » climatique.

On observe un fort impact des ouvrages de gestion à la source ce le comportement en réseau :

- Sans gestion à la source (g1, g), les scénarios le plus pluvieux, les volumes en DO et la fréquence des déversements augmentent fortement : +30% et +13% en moyenne, respectivement, avec des maximums jusqu'à +70% et +40%, respectivement. Les plus forts changements pour les volumes sont pour les scénarios pluie3 et pluie6 qui correspondent aux facteurs de perturbations les plus élevés : il est donc probable que ces augmentations en volumes soient causés par quelques événements pluvieux, en Juin ou en Septembre. Les plus fortes augmentations en fréquence sont causées par les scénarios pluie4, pluie5, pluie6, basés sur la ville d'Orange : les nouveaux déversements ont donc lieu en Septembre et Octobre.
- La mise en place progressive des techniques alternatives permet d'abord de limiter ces augmentations puis de les diminuer, en fonctions des possibilités climatiques. Les scénarios g3 (1/3 de l'existant déconnecté), g4 (2/3 de l'existant déconnecté), g5 (3/3 de l'existant déconnecté) permettent de réduire les volumes et la fréquence de déversement entre des fourchettes de :
  - G3 : baisse de 35 % en moyenne, variant entre 0% et - 60% pour les volumes, et -50% en moyenne, entre -30% et -60% pour la fréquence.
  - G4 : baisse de 64 % en moyenne, variant entre -40% et - 90% pour les volumes, et --80% en moyenne, entre -70% et -85% pour la fréquence.
  - G5 : baisse de 35 % en moyenne, variant entre -80% et - 100% pour les volumes, et -90% en moyenne, entre -90% et -100% pour la fréquence.
  - Pour chacune des fourchettes ci-dessus, les réductions les plus faibles correspondent aux scénarios de pluie avec forts changements en Juin et Septembre (Pluie 3 et Pluie 6), et peu de réchauffement. Les réductions les plus fortes correspondent aux scénarios de pluie modérés et de réchauffement extrême.

On arrive donc à compenser l'effet du changement climatique, en réseau, dans tous les cas testés ici. On montre ainsi que déconnecter 1/3 de l'existant est suffisant, sur une carte d'urbanisation actuelle, pour maintenir le fonctionnement des déversoirs d'orage à leur niveau actuel et même diminuer leurs rejets, pour tous les scénarios climatiques testés.



**Figure 57 - Evolution du volume déversé (à gauche) et du nombre de jours avec déversement via les DOs (à droite) par rapport à la situation de référence en fonction des scénarios de gestion (abscisses), de la pluviométrie (colorié, en haut) et du réchauffement moyen annuel (colorié, en bas)**

### 3.2.6. Indicateurs d'étiages: QMNA5 et VCN15

Figure 58 présente l'évolution du QMNA5 et du VCN15, par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion (axe des abscisses), et coloriés en fonction des scénarios de pluviométrie (en haut) et des scénarios de réchauffement (en bas). Les Figures en m<sup>3</sup>/s sont en Annexe.

On observe un fort impact des scénarios climatiques, et un impact bien moindre des scénarios de gestion : par rapport à la simulation de référence, le QMNA5 et le VCN15 varient entre des augmentations de respectives de +40% et +10% (scénarios de pluie avec forte augmentations des intensités en Juin et Septembre) et des diminutions de -50% et -90% (scénarios de pluies modérées réchauffement de +5°C). Les scénarios de pluie basés sur les projections climatiques du CRNM prédisent des étiages plus sévères, quand les scénarios de pluie basés sur la ville d'Orange ont des indicateurs d'étiages qui varient autour de la situation actuelle, en fonction du réchauffement annuel.

Les scénarios de gestion semblent avoir peu d'impact sur l'évolution des indicateurs d'étiages par rapport aux variables climatiques.

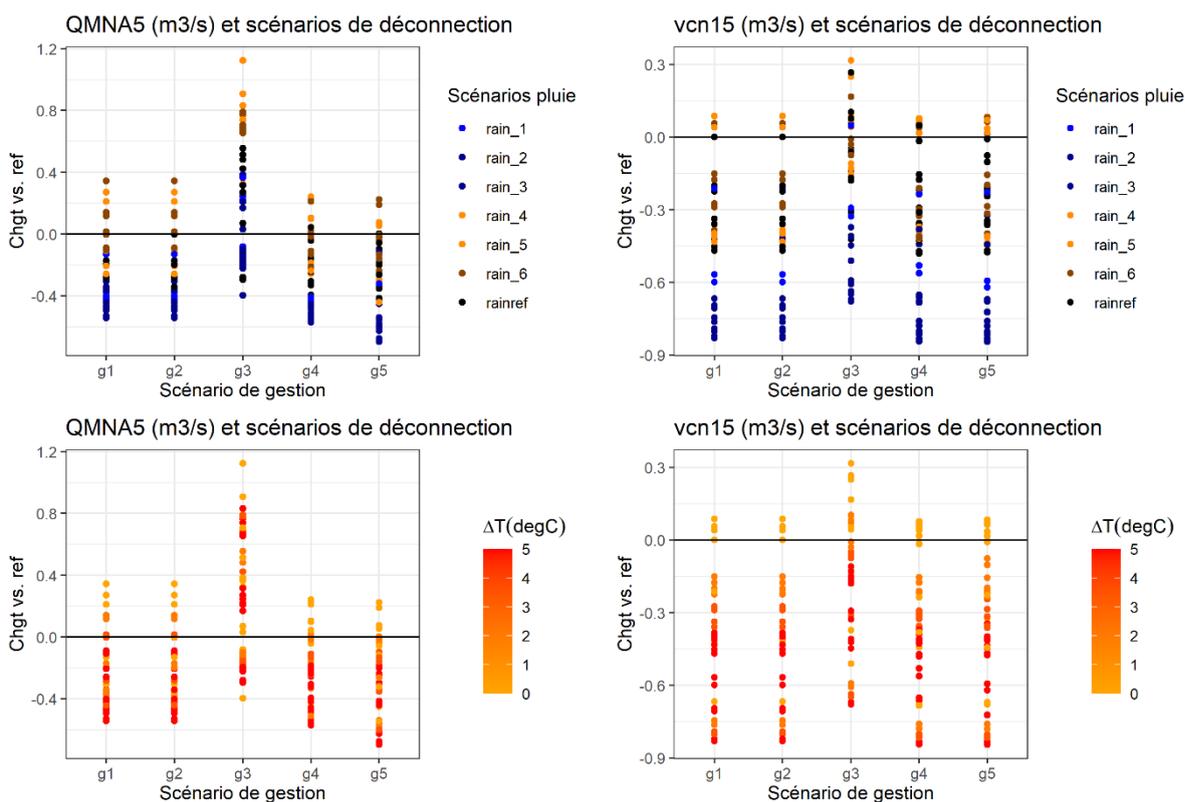


Figure 58 - Evolution du QMNA5 (à gauche) et du VCN15 (à droite) en fonction du mode de gestion des eaux pluviales (en abscisses) et coloriés en fonction du changement des scénarios de pluie (en haut) et du réchauffement moyen annuel (en bas)

### 3.2.7. Illustration sur hydrographes

Pour illustrer les remarques et conclusions précédentes, nous présentons deux hydrographes:

- Un hydrographe d'été, pour les scénarios d'urbanisation en tout tuyau (Figure 59)
- Un hydrographe d'hiver, pour les scénarios d'urbanisation en tout tuyau (Figure 60)

Ces Figures permettent de retrouver les conclusions précédentes, illustrées sur deux évènements pluvieux : En été (Figure 59) on observe une forte variabilité du débit en fonction des scénarios climatiques, avec des étiages qui varient d'un facteur 10 entre 2 scénarios (1 l/s pour les scénarios les plus secs, 10 l/s pour les scénarios les plus humides). La réponse à l'évènement pluvieux est également très variable en fonction des scénarios (en tout tuyau, le pic varie de 100 l/s à > 300 l/s). On observe un écrêtement croissant de la réponse à l'évènement pluvieux en rivière avec l'implémentation de la gestion à la source. En revanche les scénarios de gestion ne semblent pas jouer de façon significative sur le débit de base en cette saison, en effet la variabilité des bas-débits observées entre toutes les simulations étant due au climat et non à la gestion des eaux pluviales. Il y a trop peu de ruissellement imperméable infiltré pour impacter le débit de base à l'échelle du bassin versant.

En hiver (Figure 60) le débit est contrôlé par les composantes souterraines du débit, et ces dernières varient avec la pluviométrie : ainsi la réponse à l'évènement et le débit de base varient ensemble : augmentation pour les scénarios les plus humides, diminution pour les scénarios les plus secs. La gestion des eaux pluviales a un impact très limité voire nul sur les débits : la variabilité des débits observées s'explique par les scénarios climatiques et non la gestion. La déconnexion agit principalement sur le ruissellement imperméable, il y a trop peu en rivière pendant cet évènement, et le ruissellement imperméable infiltré ne se reflète pas sur les débits.

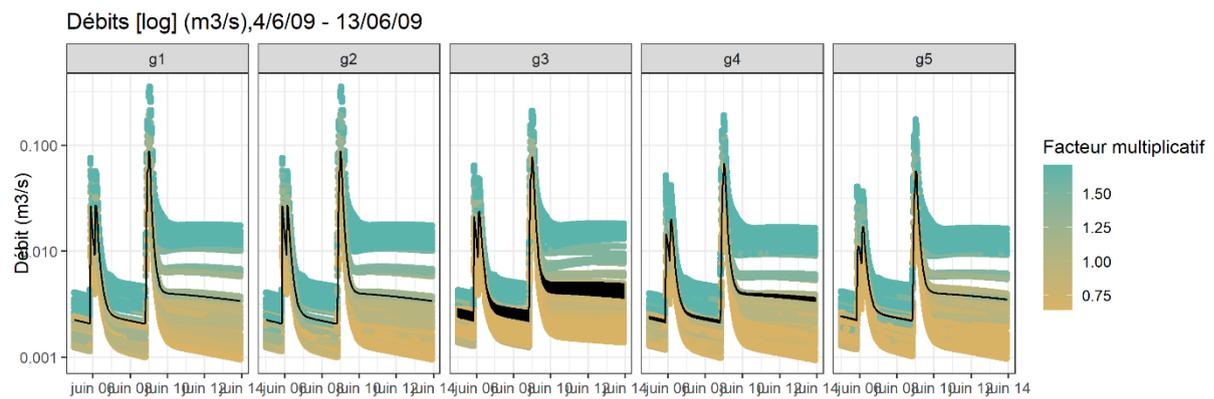
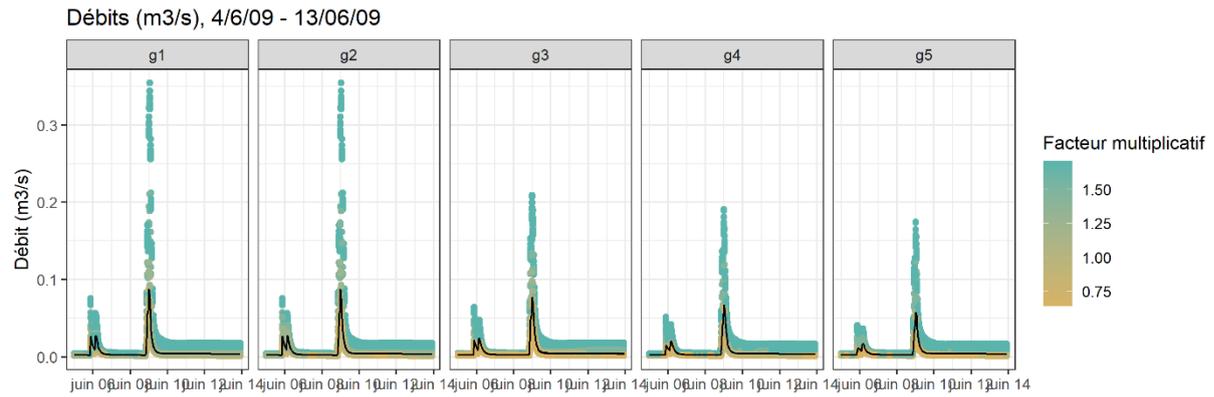


Figure 59 - Gestion des eaux pluviales et changement climatique - exemple d'un hydrographe en Juin

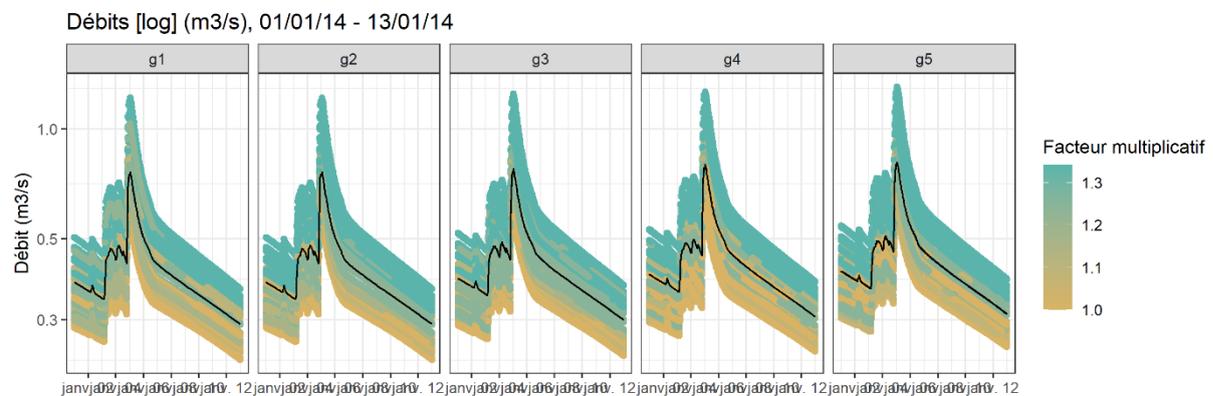
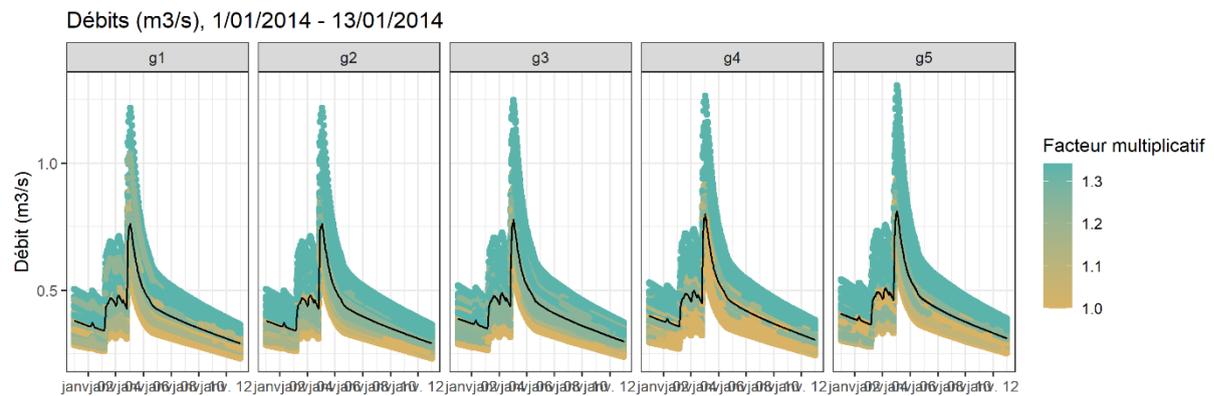


Figure 60 - Gestion des eaux pluviales et changement climatique - exemple d'un hydrographe en Janvier

### 3.2.8. Remarques et conclusions

On observe une sensibilité forte du régime d'écoulement à des perturbations climatiques, avec des variations saisonnières fortes. Globalement, le réchauffement climatique et l'augmentation de la demande en évapotranspiration augmente la part de cette dernière dans le bilan total du bassin versant (jusqu'à +80% pour le cas le plus extrême). En conséquence, la part du débit dans le bilan total diminue de façon inverse. La part du ruissellement imperméable, faible dans le bilan total, varie peu en valeur absolue mais est néanmoins celle qui varie le plus, de façon relative : de 0% à 60% dans le scénario le plus extrême. Il y a compétition entre augmentation de la pluviométrie et augmentation de l'évapotranspiration qui rend difficile d'anticiper des tendances annuelles, mais les variations mensuelles sont claires, comme résumées ci-dessous.

Pour des scénarios avec gestion en tout tuyau :

- D'Octobre à Mai, les simulations sur climat futurs anticipent des légères fluctuations des débits autour des valeurs actuelles, avec des augmentations pour un réchauffement faible et des scénarios de pluie qui anticipent une augmentation de la pluviométrie annuelle, ou de légères diminutions pour les scénarios de réchauffement plus forts. L'augmentation de l'évapotranspiration peut donc compenser de légères augmentations de la pluviométrie mensuelle à l'échelle du bassin versant. Les variations sont relativement faibles, autour de 0, -5% en moyenne sur tous les scénarios climatiques, mais peuvent aller jusqu'à  $\pm 50\%$  pour les cas les plus extrêmes.
- En Juin et Septembre, les débits varient fortement, portés par la pluviométrie : les scénarios anticipent des augmentations de pluviométrie fortes (\*1.25, \*1.5), sauf les scénarios du mois de Juin basés sur la ville d'Orange. En conséquence les débits moyens augmentent de +20%, +25% en moyenne, mais certains scénarios voient une augmentation plus forte des débits moyens (ces variations sont importantes en changement relatif, mais les valeurs en m<sup>3</sup>/s restent modérées et sous les valeurs d'hiver/printemps).
  - L'augmentation de la pluviométrie pour ces mois amènent le bassin versant dans des conditions quasi saturées : ainsi le bassin réagit vite et fortement à des épisodes pour tant non remarquables, et le modèle anticipent une très forte augmentation des crues de Juin et Septembre. Les débits maximums augmentent très fortement, nous pouvons retenir une sensibilité certaine des indicateurs de débit élevés au changement climatique et un impact quasi nul de la gestion à la source sur ces crues.
- En Juillet et Aout, la grande majorité des scénarios de changement climatiques prévoient une baisse des débits de l'ordre de -20%, -50%. Plus le réchauffement est prononcé, plus la baisse l'est aussi.
- En réseau d'assainissement tous les scénarios de changement climatique montrent une augmentation significative du volume et de la fréquence des rejets au milieu (+30% et +13% en moyenne, respectivement).

L'implémentation des techniques alternatives impacte les indicateurs de rejet des réseaux en milieu plus que les indicateurs en rivière. Le bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant et les débits moyens ne sont que peu impactés par les politiques de gestion des eaux pluviales ce qui s'explique par la faible contribution du ruissellement de surface au bilan total. De manière relative, en revanche, l'implémentation des techniques alternatives diminue très fortement la part relative du ruissellement imperméable dans le ruisseau.

En réseau, en effet, l'implémentation des techniques alternatives diminuent significativement les rejets en rivière à partir d'un certain seuil de déconnexion (autour d' $1/3$ ), pour tous les scénarios climatiques testés. Ceci signifie que la gestion à la source, implémentée de façon ambitieuse sur l'existant, a le potentiel pour rendre les réseaux résilients face au changement climatique futur, et une déconnexion très ambitieuse peut même diminuer les rejets, même dans des conditions climatiques extrêmes. En revanche, la gestion à la source ne peut compenser les effets hydrologiques du changement climatique qui agit sur tout le bassin versant et pas seulement sur les zones urbaines du bassin versant.

En conclusion, la déconnexion peut permettre de réduire volumes en réseau et rejets au milieu de manière significative dans un contexte de changement climatique mais n'agit que peu sur le régime d'écoulement du Ratier.

### 3.3. Impacts cumulés : gestion + climat + urbanisation

Le paragraphe suivant présente certains des mêmes indicateurs hydrologiques en cumulant des scénarios climatiques et des scénarios d'urbanisation. Tous les indicateurs ne sont pas présentés pour éviter des répétitions avec les paragraphes précédents. Il paraît plus pertinent de s'intéresser aux contributions relatives de l'imperméabilisation/du changement climatique/du mode de gestion des eaux pluviales sur l'hydrologie du bassin versant et les indicateurs en réseau.

#### 3.3.1. Composantes du bilan

Figure 61 présente l'évolution des différents membres du bilan hydrologique annuel en évolution par rapport à la référence. La Figure comporte 2 graphes, qui représentent les mêmes points, coloriés de façon différente : en fonction des scénarios de pluviométrie pour les graphes du haut, et en fonction du réchauffement moyen annuel pour les graphes du bas.

On observe que, comme dans les paragraphes précédents, que :

- La variabilité de chaque composante est due aux variables climatiques plus qu'à l'urbanisation et qu'aux modes de gestion des eaux pluviales.
- En valeur relative (changement par rapport à la référence), ce sont les termes de ruissellement de surface (en rivière et en réseau) qui varient le plus : portés par les modes de gestion et l'urbanisation. Le ruissellement imperméable n'est pas le composant majeur du bilan total mais il en est le plus sensible à la gestion des eaux pluviales.
- Les proportions de chaque composante restent dans le même ordre de grandeur que précédemment : les scénarios les plus urbains favorisant l'évapotranspiration et le ruissellement imperméable au détriment des composantes de débit souterrains : ceci s'explique par le fait que la couverture imperméable bloque la recharge et transforme ce qui aurait été un débit souterrain en ruissellement. Mécaniquement, la part de l'ET dans le bilan total s'en voit grandir.
- Les scénarios de gestion influent principalement sur le débit en réseau plus que sur les composantes du bilan à l'échelle du bassin versant.

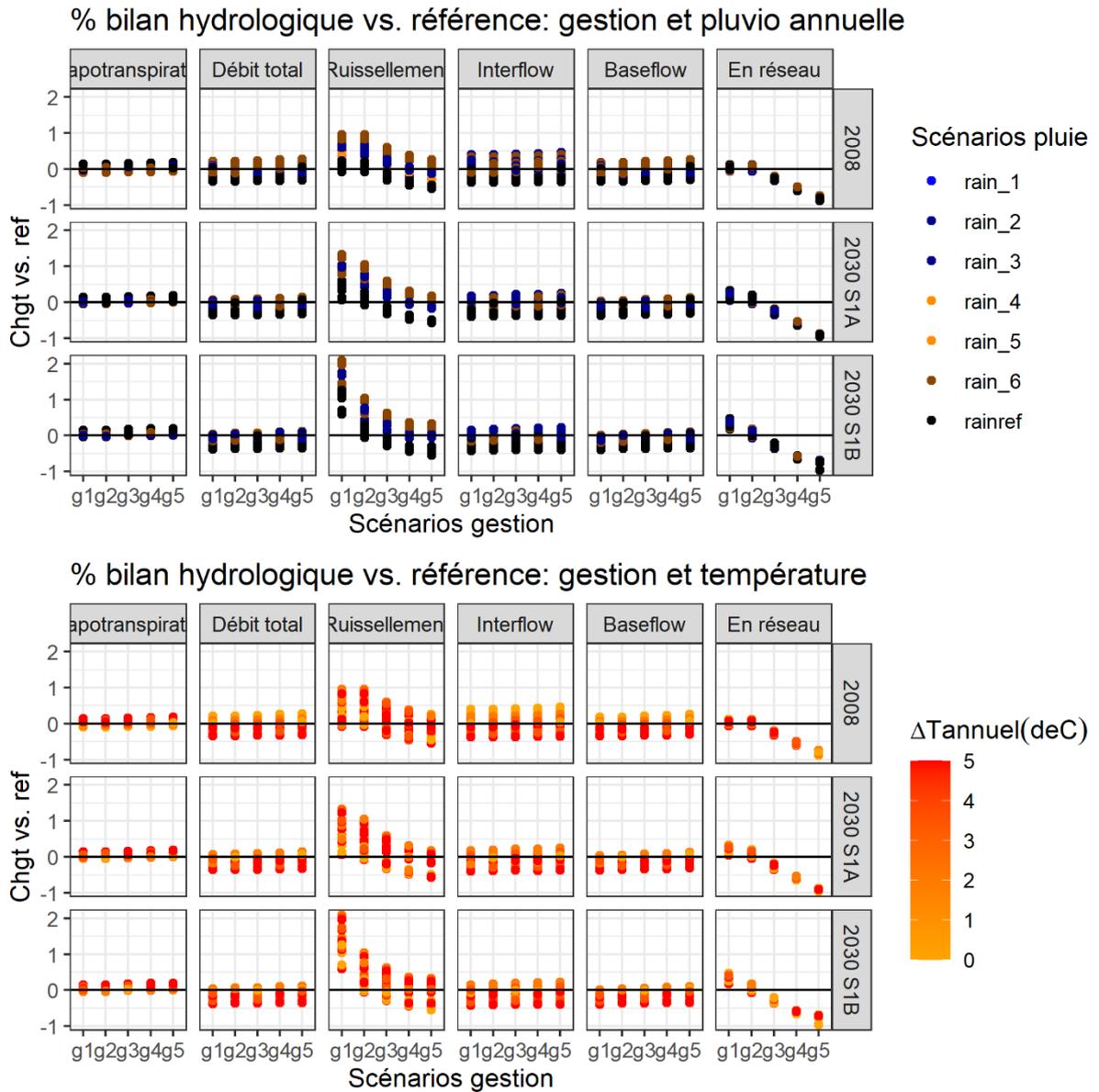


Figure 61 - Evolution du % de la part de chaque membre du bilan hydrologique annuel (moyenné), par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion, et des scénarios de pluie (haut) et de réchauffement (bas)

### 3.3.2. Analyse en composantes principales des composantes du bilan

Nous avons effectué une analyse en composantes principales sur les composantes du bilan sur toutes les simulations réalisées (ET, RD1, RD2, RG1, Réseau), de sorte à quantifier la contribution relative des différents scénarios au bilan hydrologique.

Rappelons qu'une analyse en composantes principales est une méthode qui permet de transformer des variables corrélées en nouvelles variables décorrélées (les composantes principales). En appliquant la méthode sur les composantes du bilan (5 composantes : ET, RD1, RD2, RG1, Réseau), on obtient 5 nouvelles dimensions, dont seulement 2 semblent pertinentes (Figure 62).

- Dimension 1, à laquelle sont corrélées l'évapotranspiration (ET) et les composantes souterraines du débits (RD2 et RG1). Cette dimension correspond à un axe d'hydrologie 'naturelle', sur laquelle se situe le ratio ET/Débit en rivière : une augmentation de l'ET entraîne immédiatement une diminution du débit et vice-versa.
- Dimension 2, à laquelle sont corrélés le ruissellement de surface en rivière (*rd1*) et le débit en réseau (*sewers*). Cet axe correspond donc à un axe 'urbain' ou tout du moins un axe de ruissellement. A noter que le sens des flèches de *rd1* et *sewers* sont les mêmes : une augmentation de l'une correspond à une augmentation de l'autre.

Ces 2 dimensions suffisent à expliquer le bilan hydrologique du bassin versant (94%). Les nouvelles dimensions 3,4,5 ne sont pas utiles pour expliquer les variations des composantes du bilan. (6%).

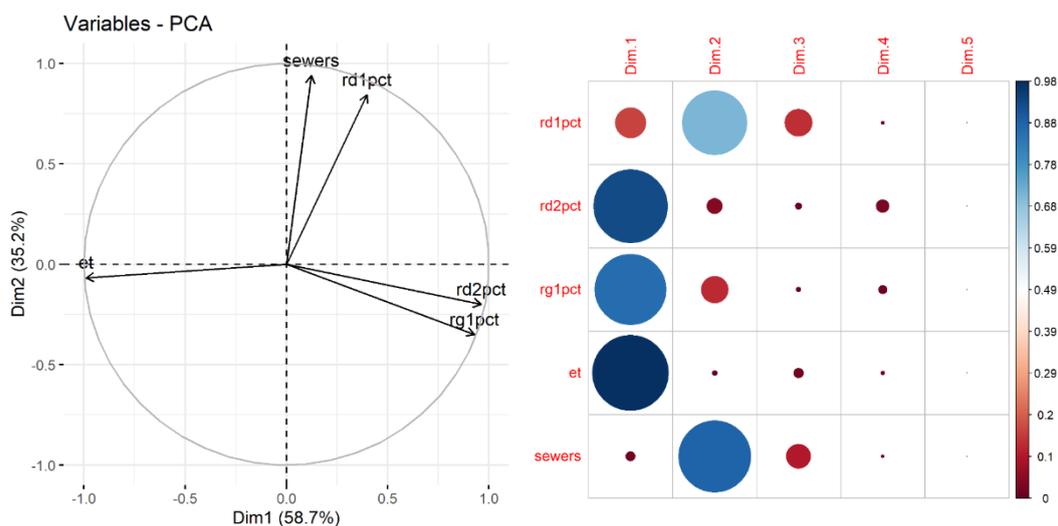


Figure 62 – Cercle de corrélation : variables et axes de l'ACP (Dimensions 1 et 2) (gauche), et tableau d'autocorrélation entre les anciennes et nouvelles variables (droite)

Figure 63 présente les individus de l'ACP (c'est-à-dire toutes les simulations) en fonction des deux nouveaux axes présentés ci-dessus. On note :

- Graphe en haut à gauche : Les scénarios de déconnexion influencent principalement sur la dimension 2, l'axe du ruissellement de surface: plus on déconnecte, moins on a de ruissellement de surface en rivière et en réseau, et ceci pour toutes les scénarios climatiques et d'urbanisation (pour chaque scénario les points sont bien répartis horizontalement, sur la dimension 1. Les modes de gestion des eaux pluviales n'influent quasi pas sur la dimension 1, c'est-à-dire sur le bilan hydrologique 'naturel' : même en infiltrant tout le ruissellement imperméable urbain généré.
- Graphe en haut à droite : La moyenne de réchauffement annuel, et l'augmentation de l'évapotranspiration associée influe sur la dimension 1, mais n'influent pas sur l'axe 2 (ruissellement) : plus on réchauffe, plus le bilan global du bassin versant est favorable à l'évapotranspiration, et ce indépendamment des scénarios de gestion des eaux pluviales.
- Graphe en bas à gauche : Les scénarios de pluie influent également sur l'axe 2. Il est cependant difficile d'obtenir une tendance globale relative aux scénarios de pluie.
- Graphe en bas à droite : les scénarios d'urbanisation varient surtout sur l'axe 1, mais on remarque que les points les plus haut sur l'axe de la dimension 2 sont verts ou rouges et toujours plus hauts que les points bleus : plus le scénario est urbain, plus le ruissellement imperméable est important. On observe aussi des ensembles de simulations, verticaux, à l'intérieur desquels on observe les points bleus plus à droite, les points verts au milieu et les points rouges à gauche : on retrouve ici le fait que pour des conditions climatiques données, les scénarios les plus urbains favorisent l'évapotranspiration sur l'axe ET/Débit naturel. En promouvant le ruissellement imperméable et en bloquant l'infiltration au détriment des composantes naturelles du débit, l'imperméabilisation réduit bien, indirectement, la part 'naturelle' du débit en rivière.

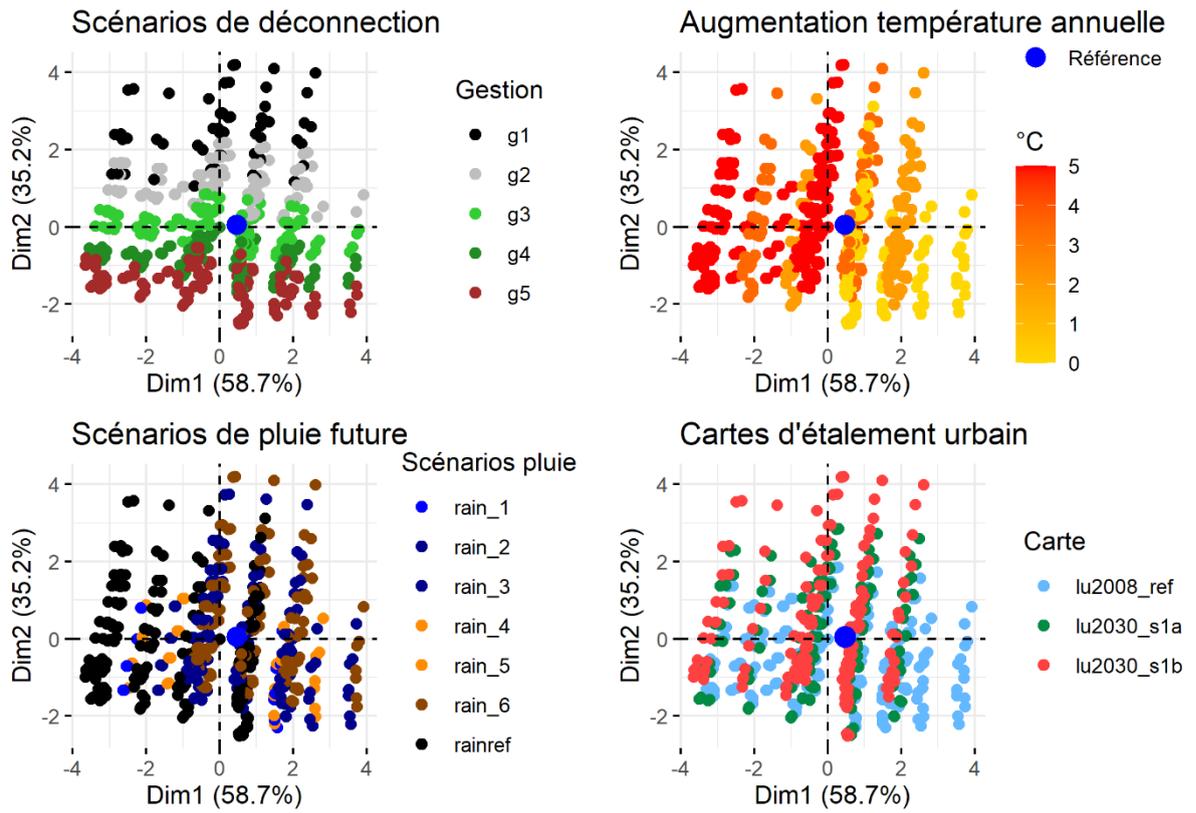


Figure 63 - Simulations sur les axes de l'ACP coloriés en fonction des scénarios de déconnexion, de l'augmentation de température annuelle, du changement de pluviométrie annuelle, de l'urbanisation

### 3.3.3. Débits moyens mensuels

Figure 64 présente l'évolution des débits moyens mensuels, par rapport à la simulation de référence, en fonction des scénarios de gestion (axe des abscisses), des scénarios de pluviométrie (couleur), du mois (vignettes horizontales) et des scénarios d'urbanisation (vignettes verticales). La Figure en  $m^3/s$  est en Annexe.

On retrouve les conclusions précédentes, à savoir que la variabilité des débits moyens mensuels est due au climat bien plus qu'au scénario de gestion ou à l'urbanisation. Pour chaque mois, les débits moyens varient plus en fonction des scénarios climatiques que des scénarios de gestion. De même, les variations entre scénarios d'urbanisation sont minimes par rapport aux différences entre scénarios climatiques. Ceci s'explique encore une fois par le fait que le débit en rivière est dominé par les composantes souterraines du débit, qui proviennent de tout le bassin versant (forêts amonts et zones agricoles) et pas seulement des zones urbaines. Ces composantes sont sensibles au climat, alors qu'imperméabilisation et gestion des eaux pluviales influent principalement le ruissellement.

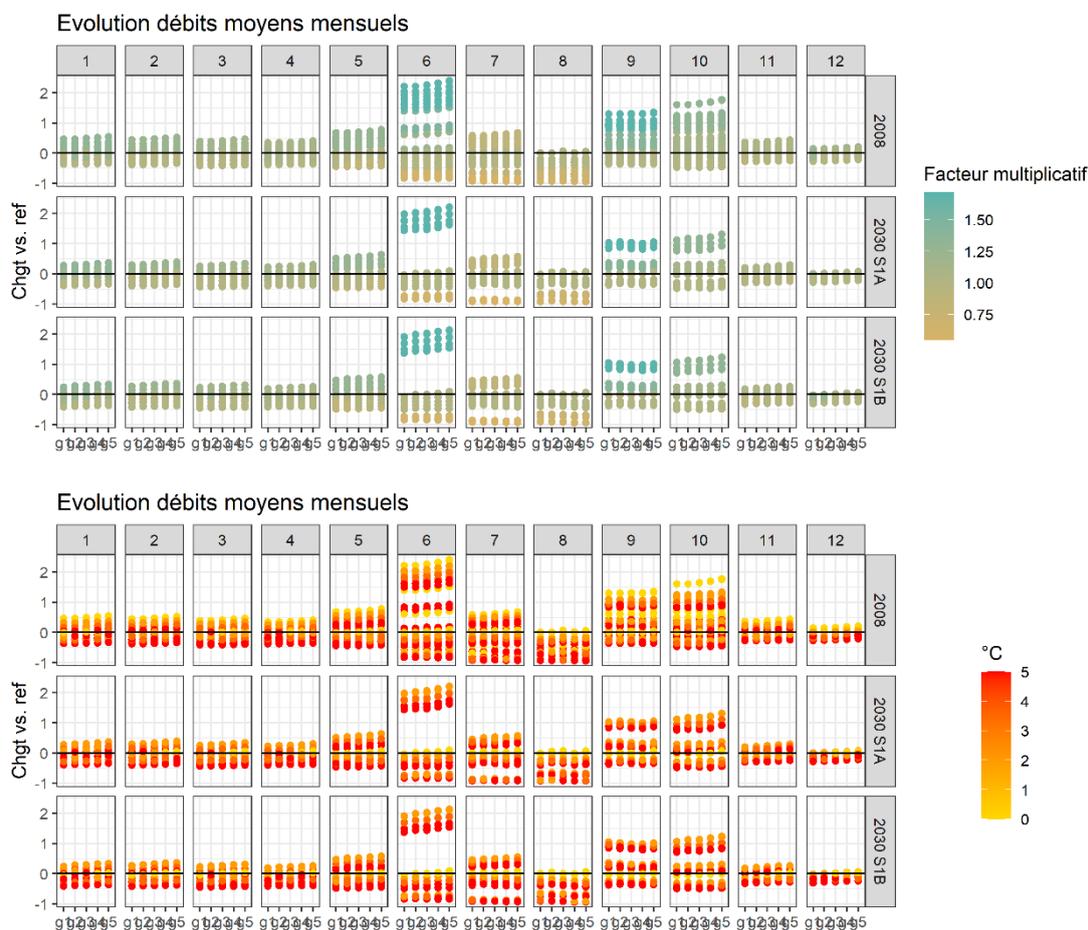


Figure 64 - Evolution relative des débits moyens mensuels pour toutes les simulations par rapport à la simulation de référence, colorié en fonction di facteur multiplicatif mensuel appliqué à la pluie (en haut) et du réchauffement annuel (en bas)

### 3.3.4. Moyenne interannuelle des débits journaliers

Figure 65 présente la moyenne interannuelle des débits (la moyenne de tous les 6 janvier, par exemple), en  $m^3/s$ , en échelle linéaire en fonction des scénarios de pluie (couleur), du mois de l'année (abscisses) du scénario de gestion (vignettes horizontales) et de la carte d'urbanisation (vignettes verticales).

Comme précédemment, on observe que la variabilité des débits journaliers est principalement due aux scénarios de pluie (les différences se font entre les couleurs et non entre les vignettes) bien plus qu'aux scénarios d'urbanisation et de gestion comme expliqué précédemment.

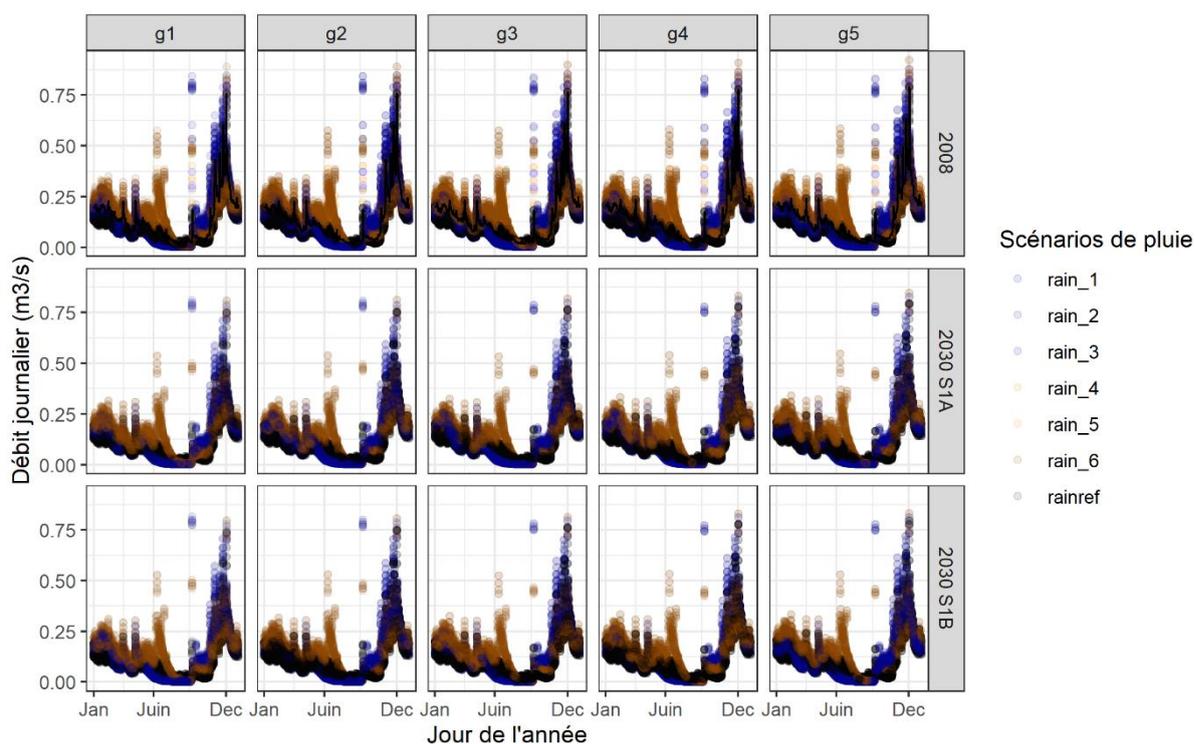


Figure 65 - Moyenne interannuelle des débits pour toutes les simulations, croisées entre scénario de gestion (vignettes horizontales), scénario d'urbanisation (vignettes verticales) et scénarios climatiques (coloriés en fonction de la pluie)

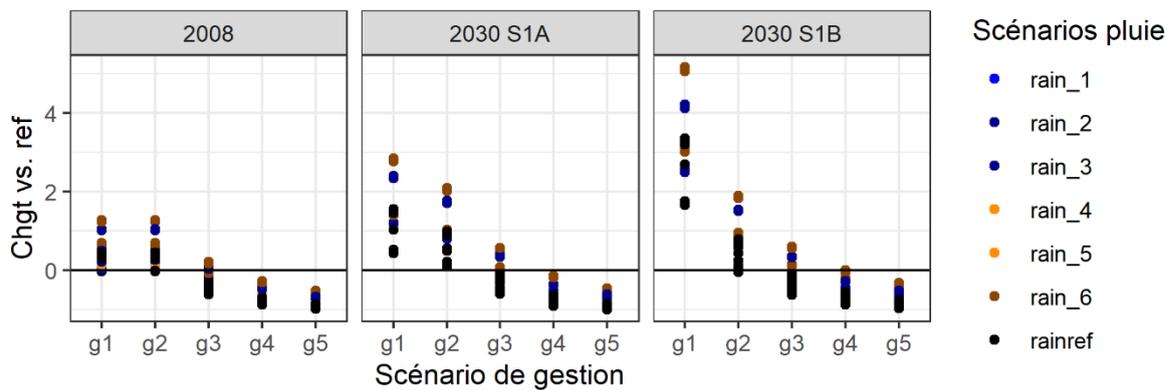
### 3.3.5. Indicateurs en réseau: DOs volume et fréquence

Figure 66 présente l'évolution du volume et de la fréquence des déversements en DO par rapport à la simulation de référence en fonction du mode de gestion des eaux pluviales (en abscisses), des scénarios d'urbanisation (en vignette) et des scénarios de pluie (couleur).

On observe, que pour un scénario de gestion donné, et une carte d'urbanisation tous les points sur une même ligne verticale correspondent à 'toutes les situations possibles climatiquement', ou bien au champ des possibles climatiques. On retrouve l'augmentation des rejets en fonction de l'urbanisation (en comparant g1 g2 g3 g4 g5 entre eux des trois vignettes). On retrouve également l'augmentation des rejets avec les scénarios de changement climatiques (les points coloriés de la première vignette en g1 sont tous supérieurs à zéro). Plus important, on observe que dans chaque vignette, au fur et à mesure qu'on déconnecte, les rejets diminuent et finissent par passer sous leurs niveaux actuels, et ce pour tous les scénarios climatiques et tous les scénarios d'urbanisation. Par exemple, pour le scénario le plus urbain (lu2030\_s1b), et pour le scénario g4 (déconnexion du neuf et de 2/3 de l'existant), tous les points sont sous zéro, c'est-à-dire que pour tous les scénarios climatiques testés, la déconnexion a compensé l'impact du climat et de l'urbanisation.

**Cela veut dire qu'il existe, pour tous les scénarios climatiques testés et pour tous les scénarios d'urbanisation testés, un niveau de déconnexion à partir duquel les rejets du réseau au milieu retrouvent leurs niveaux actuels, et à partir duquel ils diminuent.** En fonction de la sévérité du changement climatique et de l'urbanisation, ce niveau seuil semble être situé à déconnexion du neuf et entre 1/3 et 2/3 de l'existant (ce qui correspond à une politique assez ambitieuse).

### Volume déversé vs. situation actuelle



### Nombre de jours avec DO vs. situation actuelle

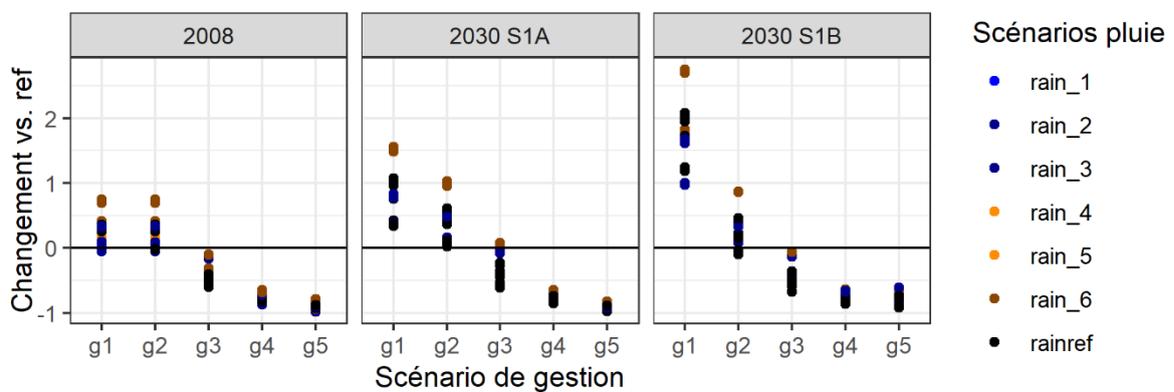


Figure 66 - Evolution du volume et de la fréquence des rejets par les déversoirs d'orages par rapport à la simulation de référence en fonction de l'évolution de la pluviométrie annuelle (couleur), de la gestion des eaux pluviales (abscisses) et de l'urbanisation (vignettes)

## 4. Conclusions opérationnelles

### 4.1. Analyse des processus

Le modèle simule le ruisseau avec une saisonnalité marquée : débits assez élevés de Novembre à Avril, dominés par les composantes souterraines, puis plus faibles le reste de l'année, à cause d'une augmentation de l'évapotranspiration, avec des pics de débits causés par le ruissellement imperméable toute l'année, mais plus visibles en été (le Ratier étant à des niveaux faibles, une réponse imperméable rapide se verra plus, voire illustration conceptuelle Figure 67).

L'imperméabilisation augmente les pics de ruissellement imperméable, et diminue les composantes naturelles via une baisse de la recharge : on a donc une tendance à la baisse des débits moyens en hiver et une augmentation des débits moyens et max en été causées par l'imperméabilisation gérée en tout tuyau. La mise en place de la gestion à la source écrête, voire même fait disparaître ces petits pics causés par le ruissellement imperméable (diminution des pics bleus foncés sur la Figure 67). Ce volume alimente les stocks de sol et augmenter les flux souterrains : on a donc une augmentation des débits moyens l'hiver avec l'augmentation des composantes souterraines, et une compétition entre augmentation du débit de base l'été et diminution des pics qui donne des tendances non évidentes sur les débits moyens l'été avec la déconnexion. Les débits max en été, ainsi que la fréquence et les volumes déversés en réseau et en DO sont clairement à la baisse avec l'implémentation croissante des techniques alternatives, jusqu'à disparition des déversements en rivière dans le cas le plus ambitieux.

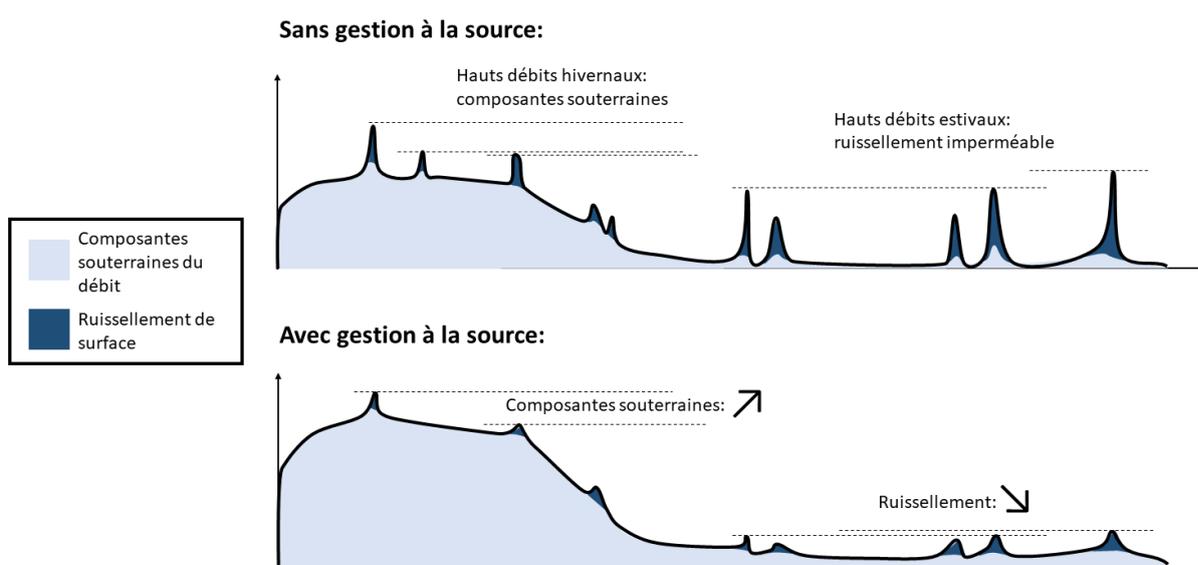


Figure 67 - Explication conceptuelle (simplifiée) des impacts observés par l'urbanisation et la déconnexion sur les débits modélisés du ruisseau

Le changement climatique impacte tout le bassin versant (pas seulement les zones urbaines) et surtout les composantes principales du cycle hydrologiques : évapotranspiration et débit de base. On a donc une évolution très forte des débits en rivière en fonction des scénarios climatiques (qui impactent les zones bleues claires sur la Figure 67): plutôt à la hausse l'hiver, avec des crues fortes en Juin, Septembre, Novembre et à la baisse en Juillet Août. La gestion à la source, qui impacte le ruissellement imperméable, a donc peu d'effet sur le régime d'écoulement du ruisseau, mais peut permettre de diminuer les volumes en réseau d'assainissement, même confrontés aux changements climatiques.

## 4.2. Implications

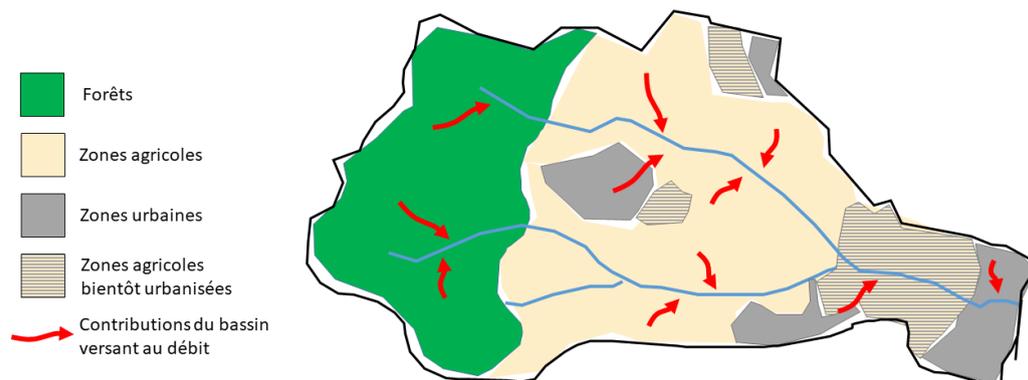
La modélisation de l'impact des ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source face à des scénarios plausibles d'imperméabilisation et de changement climatique montre que :

- L'implémentation des techniques alternatives permet de compenser les effets hydrologiques d'une imperméabilisation future, tout du moins dans un climat stable :
  - Compensation de la baisse des débits moyens (modélisée à -5%; -10%) en infiltrant les eaux de ruissellement imperméable (retour à des niveaux actuels pour le scénario g3, augmentation des débits moyens pour les scénarios g4 et g5).
  - Diminution des rejets au milieu sous les valeurs actuelles à partir d'un seuil de déconnexion d'1/3 de l'existant.
  - Impact sur les étiages variable et peu prédictible.
- Face au changement climatique : le régime d'écoulement apparaît vulnérable et sensible. Le bassin versant d'étude est dominé par une utilisation du sol forêt/agriculture (Figure 68) et son régime d'écoulement modélisé est dominé par des aspects 'naturels', hydrologiquement. Cette prépondérance des aspects naturels du régime d'écoulement du Ratier le rend plus sensible à des perturbations climatiques, car c'est tout le bassin versant qui est impacté par le changement climatique.
  - En fonction des scénarios climatiques, fluctuations fortes autour de la moyenne de Novembre à Mai ( $\pm 50\%$  en fonction des scénarios), augmentations des débits en Juin, Septembre et Octobre (+ 20%, +50 %, > + 100%)et diminution des débits en Juillet Août. (- 20%, -30 %, - 80%).
  - Cette vulnérabilité est exacerbée par la faible capacité de stockage du bassin versant. Une légère augmentation de la pluviométrie (prévue par les projections climatiques) amène le bassin versant proche de la saturation et augmente considérablement les volumes écoulés en ruisseau. Cela rend le bassin versant vulnérable à des événements pluvieux intenses, même non exceptionnels en intensité ou fréquence.

- Les zones urbaines, même après urbanisation future, restent minoritaires sur le bassin versant, si bien que la gestion des eaux pluviales a un impact moindre sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du ruisseau. On pourrait ironiser et dire que le bassin versant du Ratier n'est 'pas assez urbain' pour que les techniques alternatives influent fortement sur les débits en rivières.
- Les politiques de déconnexion peuvent permettre de rendre résilients les réseaux d'assainissement dans un contexte de changement climatique et d'urbanisation cumulés. Il existe un seuil à partir duquel les rejets au milieu sont inférieurs au niveau actuels dans tous les scénarios (urbanisation et changement climatiques) testés. Au vu des nombreuses incertitudes des toutes hypothèses faites dans chacun des scénarios, il est difficile de quantifier précisément ce seuil. Le seuil **d'1/3 de surfaces imperméables existantes déconnectées** paraît à la fois ambitieux mais réalisable et permet d'obtenir des résultats hydrologiques satisfaisants, en réseau et en ruisseau.

Ainsi, les résultats de simulations du projet Conscequans montre le potentiel et les limites des ouvrages de gestion à la source :

- Potentiel pour gérer les eaux urbaines et éviter les travaux constants sur les réseaux, diminuer voire éliminer les déversement d'orages même dans le pire des scénarios climatiques et d'urbanisation.
- Limites car la majorité du bassin versant étant non urbain, la part du ruissellement imperméable en rivière est assez faible (tout du moins dans le modèle): ainsi, le débit en rivière (étiages, débits élevés) est principalement contrôlé par les composantes « naturelles » du cycle hydrologique (évapotranspiration et flux souterrains) : La mise en place des techniques alternative, mêmes ambitieuse, ne peut donc compenser les effets du changement climatiques sur le débit en rivière. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de Bell et al. (2016), qui analyse expérimentalement 16 bassins versants péri-urbains de 0.15 à 30 km<sup>2</sup> en Caroline du Nord, et qui montre que les modes de gestion des eaux pluviales sont un contrôle secondaire ou tertiaire de la réponse des ruisseaux aux évènement pluvieux.



**Figure 68 - Illustration simplifiée du bassin versant et des zones de contribution au débit: les zones urbaines, même futures, ne dominent pas l'occupation du sol**

En conclusion : les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales sont à développer le plus possible et permettront de rendre résilients les réseaux d'assainissement face aux changements futurs globaux, urbanisation et changement climatique cumulés, en réduisant volumes en réseau et rejets au milieu de manière significative. Si la déconnexion a le potentiel pour protéger le ruisseau contre certains effets de l'urbanisation, on ne peut, en revanche, pas s'attendre à ce qu'elle atténue ou protège le régime d'écoulement de la rivière sur un bassin versant péri-urbain face au changement climatique. Le ruisseau est trop dépendant des écoulements des zones agricoles et forestières du bassin versant, qui eux sont significativement marquées par le changement climatique et non impactés par la gestion à la source.

## 5. Perceptives, discussion et futures recherches

Ce travail de modélisation soulève plusieurs questions et pistes de recherche futures :

### 5.1. Prise en compte du ruissellement de surface (imperméable)

Les résultats, qui montrent un faible impact de la mise en place des techniques alternatives sur les débits en rivières, s'expliquent par la décomposition des composantes d'écoulement (le débit en rivière dans le modèle étant la somme de trois composantes : ruissellement imperméable + débit souterrain peu profond + débit souterrain de base). Le ruissellement imperméable en rivière est une petite partie du débit total par rapport aux composantes souterraines. Ainsi, diminuer, voire supprimer, cette composante avec de la gestion à la source ne modifie pas significativement le débit total. Il aurait été possible d'augmenter la part relative du ruissellement de surface en rivière, ce qui aurait donné un impact plus évident de la gestion à la source en rivière, mais au détriment des indicateurs de calage, ce qui correspondrait à faire anticiper les résultats au modèle. La part du ruissellement de surface en rivière est la partie la plus difficile à valider. Idéalement, des données d'observation de déversoir d'orages seraient utiles pour mieux caler cet aspect du modèle. Le projet IDESOC, piloté par la ZABR et l'AERMC, ainsi que le projet ANR CHYPSTER, permettront de mieux comprendre les composantes en rivière et les chemins d'écoulement via des expériences de traçage: ainsi il sera possible de savoir si le ruissellement imperméable en rivière a été sous-estimé et dans quelles proportions.

Les résultats semblent tout de même cohérents avec l'étude récente de Kuhlemann et al. (2021) : à partir d'un échantillonnage en isotope stable de l'eau dans un ruisseau péri urbain (urbain à 20%), la part du ruissellement de surface est considéré comme faible (<10%) et la source du débit de rivière provient principalement des écoulements souterrains et d'une station d'épuration (il n'y en a pas dans le bassin versant du Ratier).

## 5.2. Désagrégation temporelle des séries de pluie et impact sur les valeurs extrêmes

Dans ce projet nous avons construit des chroniques de pluies et d'évapotranspiration futures en transformant les chroniques présentes avec des perturbations construites sur les projections climatiques des données issues de la simulation du CNRM Jouzel 2014 et en comparant avec la ville d'Orange. Ainsi, les structures horaires de l'ETP et des hyétographes n'ont pas été modifiées, seule l'intensité change pour adapter aux cumuls mensuels.

Or, il est clair que les variations climatiques attendues dans le futur sont plus intenses à des échelles fines (10-min, horaire) que mensuelles ou journalières (Martel et al., 2020; Wood and Ludwig, 2020). Il est donc probable que les températures les plus extrêmes ou les pluies les plus intenses aient été sous estimées dans cette étude. Ce travail n'est donc pas un travail prédictif sur les extrêmes climatiques. Cette étude n'est pas non plus un travail de modélisation hydraulique et d'impact en terme d'inondations possibles. Par exemple, la saturation possible des réseaux d'assainissement n'est pas prise en compte dans ce modèle. Des travaux sur la désagrégation temporelle de séries de pluies existent (Willems and Olsson, 2012). On peut également citer les travaux du projet norvégien Klima2050 (Centre for Research-based Innovation) en lien avec l'INSA Lyon, ou encore les travaux du laboratoire DEEP de l'INSA Lyon avec Véolia. Envisager d'autres méthodes de désagrégation temporelle des chroniques futures paraît intéressant pour des projets futurs. A noter que Météo France fournit des projections climatiques à l'échelle horaire depuis l'été 2021 sur le portail DRIAS.

## 5.3. Simplification du fonctionnement des ouvrages de gestion à la source et scénarios homogènes non spatialisée

Ce modèle fait l'hypothèse d'un fonctionnement parfait des techniques alternatives. On sait qu'en réalité la performance de ces ouvrages évolue dans le temps et nécessite une maintenance régulière.

De plus, les scénarios sont homogènes dans l'espace : on considère que toutes les surfaces imperméables, dans toutes les zones urbaines, sont déconnectées avec des ouvrages de gestion à la source similaires. Une prochaine étape peut être un raffinement des scénarios de gestion à la source avec une meilleure prise en compte de la diversité des ouvrages et des spécificités de chaque zone urbaine. Le seuil de 5% des surfaces imperméables comme aire de dimensionnement des TAs est aussi un paramètre qui pourrait être varié dans le futur, en envisageant par exemple, un dimensionnement basé sur un volume (et donc une période de retour, etc.).

## 5.4. Complexité de l'hydrologie urbaine

La connexion entre surfaces imperméables et réseau est idéalisée dans les modèles et souvent plus compliquée dans la réalité. On peut citer, comme illustration, l'étude en cours de relecture de Burns 2021, qui compare deux rues adjacentes : une équipée avec des ouvrages de gestion à la source et l'autre en gestion tout tuyau : les auteurs mesurent plus d'eau en réseau dans la rue équipée, pour une surface imperméable équivalente !

De plus, l'impact des infrastructures souterraines (réseaux, bâtiments, etc.) sur les chemins d'écoulement de l'eau infiltrée est inconnu mais peut potentiellement avoir un impact sur la recharge et le débit de base (Pophillat et al., 2021). Ceci rajoute de l'incertitude sur le véritable impact des techniques alternatives à l'échelle d'un bassin versant.

On peut également citer l'étude de Fillo et al. (2021) qui montre que l'irrigation des pelouses résidentielles de Denver contribuent, avec les fuites d'eau, au débit de base urbain qui empêche ruisseaux urbains de s'assécher alors que des ruisseaux 'naturels' voisins sont secs dans la même période, bien que l'applicabilité de ces résultats au contexte local lyonnais est très discutable.

## 5.5. Changement climatique et changement de l'occupation du sol

Le changement climatique, surtout dans ses formes potentielles les plus intenses, risque de provoquer des changements prononcés d'occupation du sol : par exemple, une forte mortalité de la végétation lors de canicules très intenses, une modification des espèces d'arbres en forêts et donc des patterns d'évapotranspiration réelle, une modification des surfaces cultivées et du régime d'irrigation. Tous ces paramètres sont extrêmement difficiles à prévoir et impacteront le régime d'écoulement du ruisseau. Il serait pertinent d'envisager une prise en compte de ces facteurs dans la modélisation, en réussissant à faire varier l'occupation du sol avec le temps, par exemple.

## 6. Conclusions

Ce projet avait pour objectif de quantifier l'impact hydrologique de l'implémentation de la gestion des eaux pluviales à la source à l'échelle d'un bassin versant, dans un contexte d'urbanisation du territoire et de changement climatique.

Le modèle hydrologique distribué à base physique J2000P a été mis en place sur le bassin versant du Ratier (20 km<sup>2</sup>). Ce modèle a été modifié pour inclure un modèle d'ouvrage de gestion à la source. Une gamme de scénarios (urbanisation, changement climatique, gestion des eaux pluviales) a été créée. 640 simulations croisant les scénarios ont été réalisées puis analysées. Pour chacune d'entre elle, des indicateurs hydrologiques furent calculés (débits moyens, débits maximums, volumes et fréquence des rejets en réseau par les déversoirs d'orages, etc.).

Les résultats montrent que l'implémentation des techniques alternatives permet de contrer les effets négatifs de l'urbanisation sur le régime d'écoulement et même, si ambitieuse, d'améliorer ce régime d'écoulement. L'impact de la gestion à la source est très fort en réseau, et moindre en rivière, dû à la faible proportion de ruissellement imperméable, par rapport aux composantes souterraines du débits, modélisé en rivière.

Les incertitudes restent fortes quant à la modélisation du changement climatique (+2°C, +3°C ?), qui contrôle la réponse hydrologique de façon prépondérante. Les débits sont amenés à varier sensiblement, en fonction des scénarios testés, bien que tous les scénarios s'accordent sur un ruisseau plus sec l'été. Les extrêmes, notamment, devront faire l'objet d'études spécifiques. Etant donné que tout le bassin versant subit les impacts du changement climatique et pas seulement les zones urbaines, la gestion à la source du ruissellement imperméable urbain ne peut compenser les effets du changement climatiques sur tout le régime d'écoulement du ruisseau, mais peut limiter et réduire considérablement les rejets des déversoirs d'orages au milieu.

L'étude conclut donc sur la nécessité d'adopter une politique ambitieuse de gestion à la source pour rendre les réseaux d'assainissement résilients face aux pressions de l'urbanisation et du changement climatique. La gestion à la source permet également de protéger le régime d'écoulement du ruisseau face à l'urbanisation, et dans une certaine mesure du changement climatique. Mais ce dernier impacte tout le bassin versant et pas seulement les zones urbaines et ne peut pas être compensé entièrement par la seule gestion à la source des zones imperméables.

## 7. Références

- Bell, C.D., McMillan, S.K., Clinton, S.M., Jefferson, A.J., 2016. Hydrologic response to stormwater control measures in urban watersheds. *Journal of Hydrology* 541, 1488-1500.
- Bhaskar, A.S., Beesley, L., Burns, M.J., Fletcher, T.D., Hamel, P., Oldham, C.E., Allison H Roy, 2015. Will it rise or will it fall? Managing the complex effects of urbanization on base flow. *Freshwater Science* 35(1), 293-310.
- Bonneau, J., Fletcher, T.D., Costelloe, J.F., Burns, M.J., 2017. Stormwater infiltration and the 'urban karst' - a review. *Journal of Hydrology*.
- Bonneau, J., Fletcher, T.D., Costelloe, J.F., Poelsma, P.J., James, R.B., Burns, M.J., 2020. The hydrologic, water quality and flow regime performance of a bioretention basin in Melbourne, Australia. *Urban Water Journal*, 1-12.
- Bonneau, J., Kouyi, G.L., Lassabatere, L., Fletcher, T.D., 2021. Field validation of a physically-based model for bioretention systems. *Journal of Cleaner Production*, 127636.
- Braud, I., Branger, F., Chancibault, K., Jacqueminet, C., Breil, P., Chocat, B., Debionne, S., Dodane, C., Honegger, A., Joliveau, T., 2011. Assessing the Vulnerability of PeriUrban Rivers. Rapport scientifique final du projet AVuPUR (ANR-07-VULN-01). irstea.
- 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.
- Braud, I., Chancibault, K., Debionne, S., Kouyi, G.L., Sarrazin, B., Jacqueminet, C., Andrieu, H., Béal, D., Bocher, E., Boutaghane, H., 2010. The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urbans Rivers): experimental set up, modelling strategy and first results, 7th Novatech 2010 Conference. p. 10 p.
- Brudler, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Hauschild, M.Z., Rygaard, M., 2016. Life cycle assessment of stormwater management in the context of climate change adaptation. *Water Research* 106, 394-404.
- Burns, M.J., Fletcher, T.D., Walsh, C.J., Ladson, A.R., Hatt, B.E., 2012. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform. *Landscape and Urban Planning* 105(3), 230-240.
- Burns, M.J., Fletcher, T.D., Walsh, C.J., Ladson, A.R., Hatt, B.E., 2014. Flow-Regime Management at the Urban Land-Parcel Scale: Test of Feasibility. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(12), 04015037.
- Davis, A.P., 2007. Field performance of bioretention: Water quality. *Environmental Engineering Science* 24(8), 1048-1064.
- Davis, A.P., 2008. Field performance of bioretention: Hydrology impacts. *Journal of Hydrologic Engineering* 13(2), 90-95.
- DeBusk, K., Hunt, W., 2011. Bioretention Outflow: Does It Mimic Rural Water Interflow?, World Environmental and Resources Congress. pp. 375-386.
- Devers, A., Sauquet, É., 2016. Application d'une approche « bottom-up » pour caractériser la vulnérabilité des bassins versants aux variations climatiques. Evaluation de la sensibilité des étiages des bassins versants. Irstea.
- Dietz, M.E., Clausen, J.C., 2008. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. *J Environ Manage* 87(4), 560-566.
- Dodane, C., Joliveau, T., Rivière-Honegger, A., 2014. Simuler les évolutions de l'utilisation du sol pour anticiper le futur d'un territoire. Analyse critique d'une expérience de géoprospective dans un bassin versant périurbain de l'agglomération lyonnaise. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Fillo, N.K., Bhaskar, A.S., Jefferson, A.J., 2021. Lawn irrigation contributions to semi-arid urban baseflow based on water-stable isotopes. *Water Resources Research*, e2020WR028777.
- Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources* 51, 261-279.
- Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M., 2014. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 1-18.

Gagrani, V., Diemer, J.A., Karl, J.J., Allan, C.J., 2014. Assessing the Hydrologic and Water Quality Benefits of a Network of Stormwater Control Measures in a SE U.S. Piedmont Watershed. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 50(1), 128-142.

Gnouma, R., 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques: application au bassin versant de l'Yzeron. Thèse de doctorat, INSA Lyon.

Golden, H.E., Hoghooghi, N., 2018. Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 5(1), e1254.

Grand Lyon (data.grandlyon.com), 2021. Data Grand Lyon.

Gustard, A., Bullock, A., Dixon, J.M., 1992. Low flow Estimation in The United Kingdom. Institute of Hydrology.

Hale, R.L., Scoggins, M., Smucker, N.J., Suchy, A., 2016. Effects of climate on the expression of the urban stream syndrome. *Freshwater Science* 35(1), 421-428.

Hopkins, K.G., Bhaskar, A.S., Woznicki, S.A., Fanelli, R.M., 2020. Changes in event-based streamflow magnitude and timing after suburban development with infiltration-based stormwater management. *Hydrological processes* 34(2), 387-403.

Horner, I., Branger, F., McMillan, H., Vannier, O., Braud, I., 2020. Information content of snow hydrological signatures based on streamflow, precipitation and air temperature. *Hydrological Processes* 34(12), 2763-2779.

Hou, X., Guo, H., Wang, F., Li, M., Xue, X., Liu, X., Zeng, S., 2020. Is the sponge city construction sufficiently adaptable for the future stormwater management under climate change? *Journal of Hydrology* 588, 125055.

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.

Kong, F., Ban, Y., Yin, H., James, P., Dronova, I., 2017. Modeling stormwater management at the city district level in response to changes in land use and low impact development. *Environmental Modelling & Software* 95, 132-142.

Krause, P., Bäse, F., Bende-Michl, U., Fink, M., Flügel, W., Pfennig, B., 2006. Multiscale investigations in a mesoscale catchment—hydrological modelling in the Gera catchment. *Advances in Geosciences* 9, 53-61.

Kuhlemann, L.-M., Tetzlaff, D., Soulsby, C., 2021. Spatio-temporal variations in stable isotopes in peri-urban catchments: a preliminary assessment of potential and challenges in assessing streamflow sources. *Journal of Hydrology*, 126685.

Labbas, M.r., 2015. Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales: Application au bassin de l'Yzeron (130km<sup>2</sup>). Université Grenoble Alpes.

Lagouy, M., Branger, F., Thollet, F., Breil, P., Dramais, G., 2015. Suivi hydrologique du bassin versant périurbain de l'Yzeron; Irstea

Li, C., Fletcher, T.D., Duncan, H.P., Burns, M.J., 2017. Can stormwater control measures restore altered urban flow regimes at the catchment scale? *Journal of Hydrology* 549, 631-653.

Li, H., Sharkey, L.J., Hunt, W.F., Davis, A.P., 2009. Mitigation of impervious surface hydrology using bioretention in North Carolina and Maryland. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(4), 407-415.

Loperfido, J.V., Noe, G.B., Jarnagin, S.T., Hogan, D.M., 2014. Effects of distributed and centralized stormwater best management practices and land cover on urban stream hydrology at the catchment scale. *Journal of Hydrology* 519, 2584-2595.

Martel, J.-L., Mailhot, A., Brissette, F., 2020. Global and regional projected changes in 100-yr subdaily, daily, and multiday precipitation extremes estimated from three large ensembles of climate simulations. *Journal of Climate* 33(3), 1089-1103.

Nelson, K.C., Palmer, M.A., Pizzuto, J.E., Moglen, G.E., Angermeier, P.L., Hilderbrand, R.H., Dettinger, M., Hayhoe, K., 2009. Forecasting the combined effects of urbanization and climate change on stream ecosystems: from impacts to management options. *Journal of Applied Ecology* 46(1), 154-163.

Nicolle, P., Andréassian, V., Royer-Gaspard, P., Perrin, C., Thirel, G., Coron, L., Santos, L., 2021. RAT—a robustness assessment test for calibrated and uncalibrated hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(9), 5013-5027.

OTHU - Grand Lyon, 2021.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of hydrology* 303(1-4), 290-306.

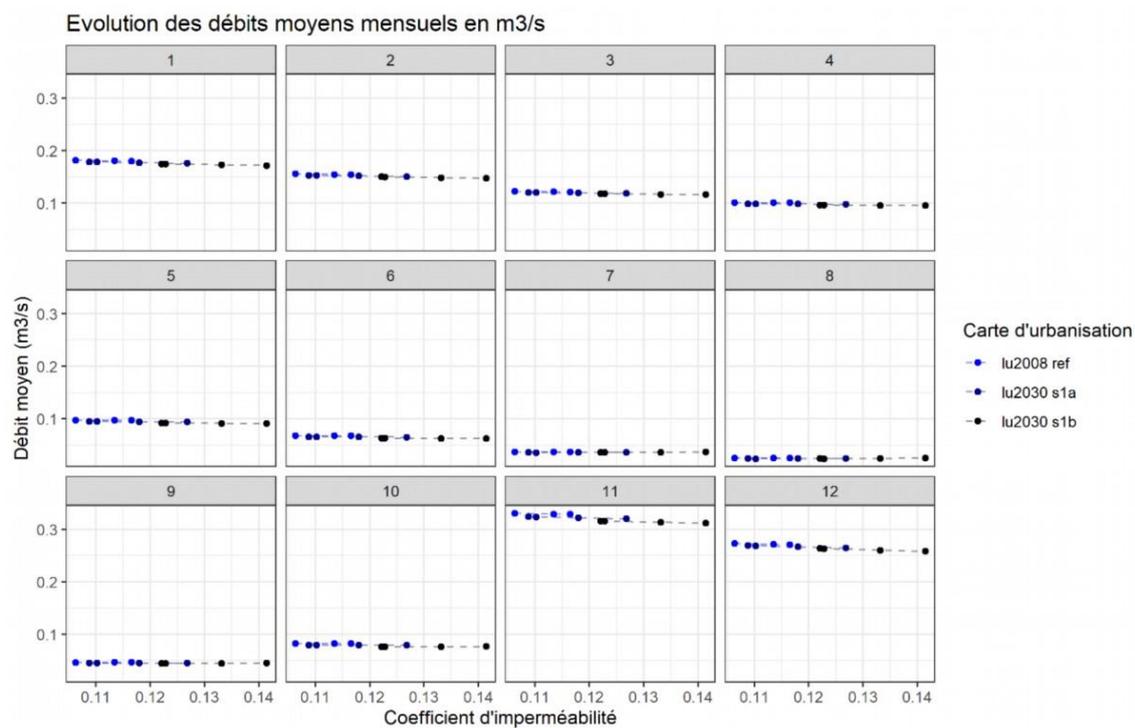
- Palla, A., Gnecco, I., 2015. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology* 528, 361-368.
- Pophillat, W., Sage, J., Rodriguez, F., Braud, I., 2021. Dealing with shallow groundwater contexts for the modelling of urban hydrology—A simplified approach to represent interactions between surface hydrology, groundwater and underground structures in hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 105144.
- Pyke, C., Warren, M.P., Johnson, T., LaGro Jr, J., Scharfenberg, J., Groth, P., Freed, R., Schroeer, W., Main, E., 2011. Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change. *Landscape and Urban Planning* 103(2), 166-173.
- Rio, M., Salles, C., Tournoud, M.-G., 2021. Modelling the effects of stormwater control measures on runoff volume and particulate load in urban catchments. *Urban Water Journal* 18(2), 79-90.
- Rosenberg, E.A., Keys, P.W., Booth, D.B., Hartley, D., Burkey, J., Steinemann, A.C., Lettenmaier, D.P., 2010. Precipitation extremes and the impacts of climate change on stormwater infrastructure in Washington State. *Climatic change* 102(1), 319-349.
- Sauquet, E., Richard, B., Devers, A., Prudhomme, C., 2019. Water restrictions under climate change: a Rhône–Mediterranean perspective combining bottom-up and top-down approaches. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(9), 3683-3710.
- Shuster, W., Rhea, L., 2013. Catchment-scale hydrologic implications of parcel-level stormwater management (Ohio USA). *Journal of Hydrology* 485, 177-187.
- Terray, L., Boé, J., 2013. Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience* 345(3), 136-149.
- Tikkanen, H., 2013. Hydrological modeling of a large urban catchment using a stormwater management model (SWMM).
- Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30(11), 1627-1644.
- Walsh, C., 2005. The urban stream syndrom: current knowledge and the search for a cure. *Journal of North American Benthological Society* 24(3), 706-723.
- Walsh, C.J., Booth, D.B., Burns, M.J., Fletcher, T.D., Hale, R.L., Hoang, L.N., Livingston, G., Rippey, M.A., Roy, A.H., Scoggins, M., 2015. Principles for urban stormwater management to protect stream ecosystems. *Freshwater Science*.
- Willems, P., Olsson, J., 2012. Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems. IWA publishing.
- Wood, R., Ludwig, R., 2020. Analyzing internal variability and forced response of subdaily and daily extreme precipitation over Europe. *Geophysical Research Letters* 47(17), e2020GL089300.

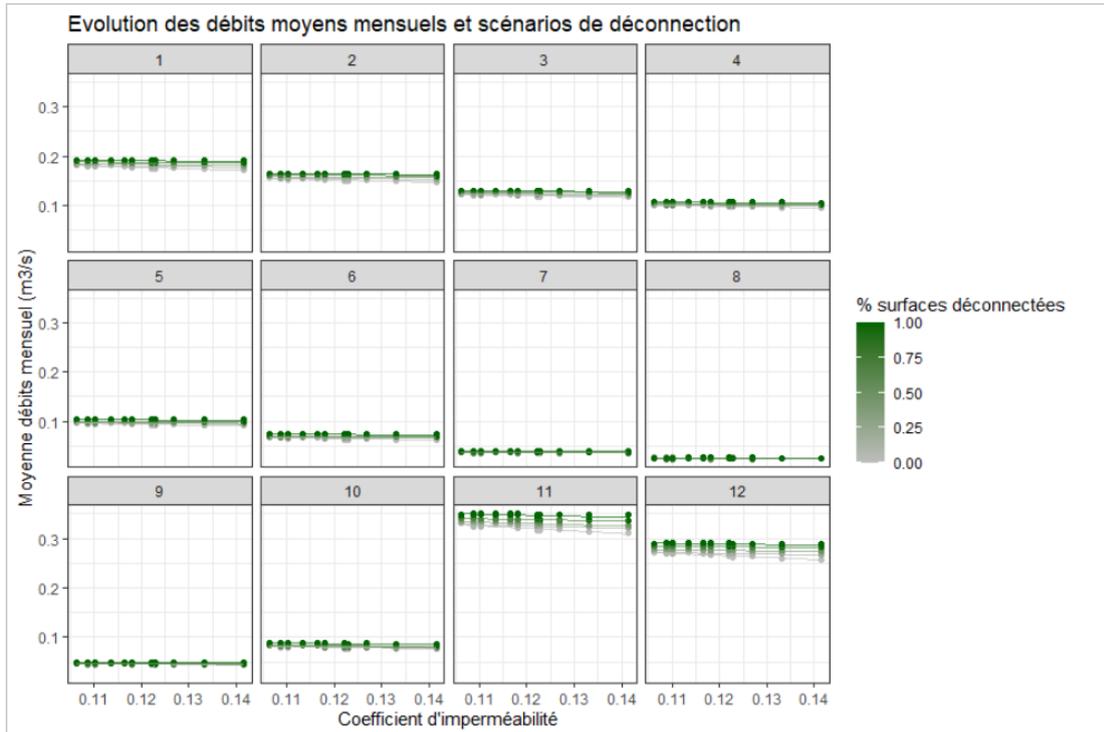
## 8. Annexe 1

### Indicateurs hydrologiques en m<sup>3</sup>/s

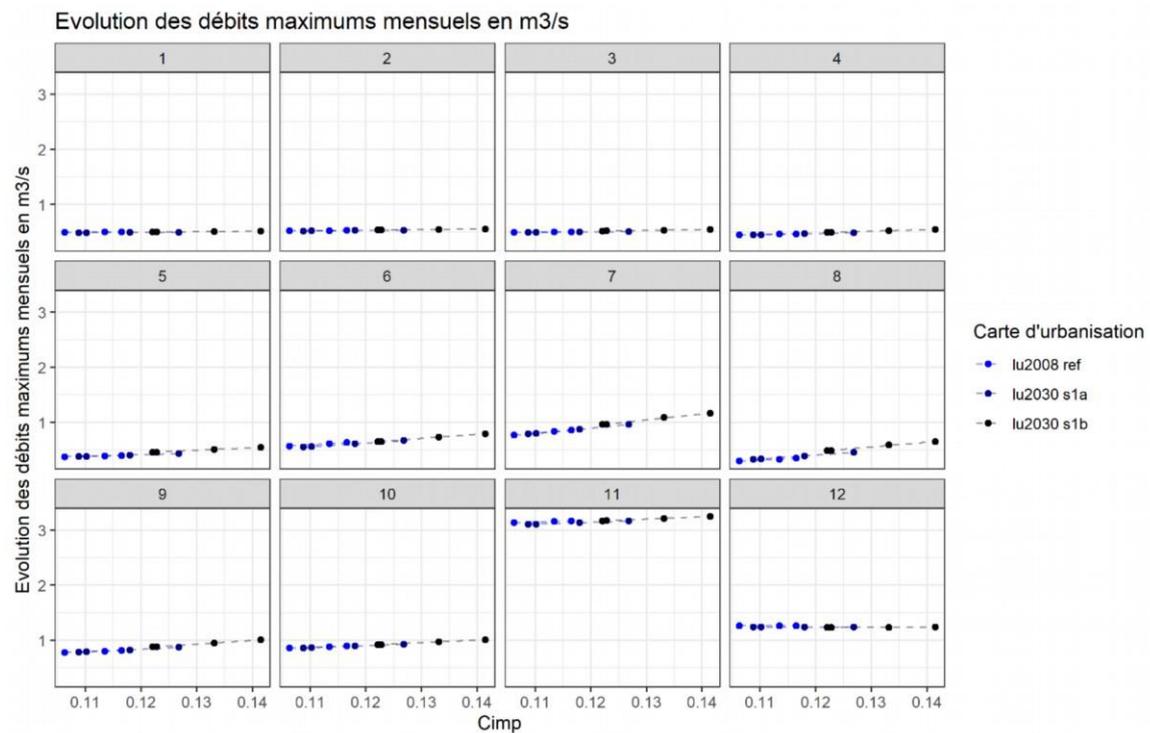
#### 8.1. Gestion et urbanisation

##### 8.1.1. Débits moyens mensuels

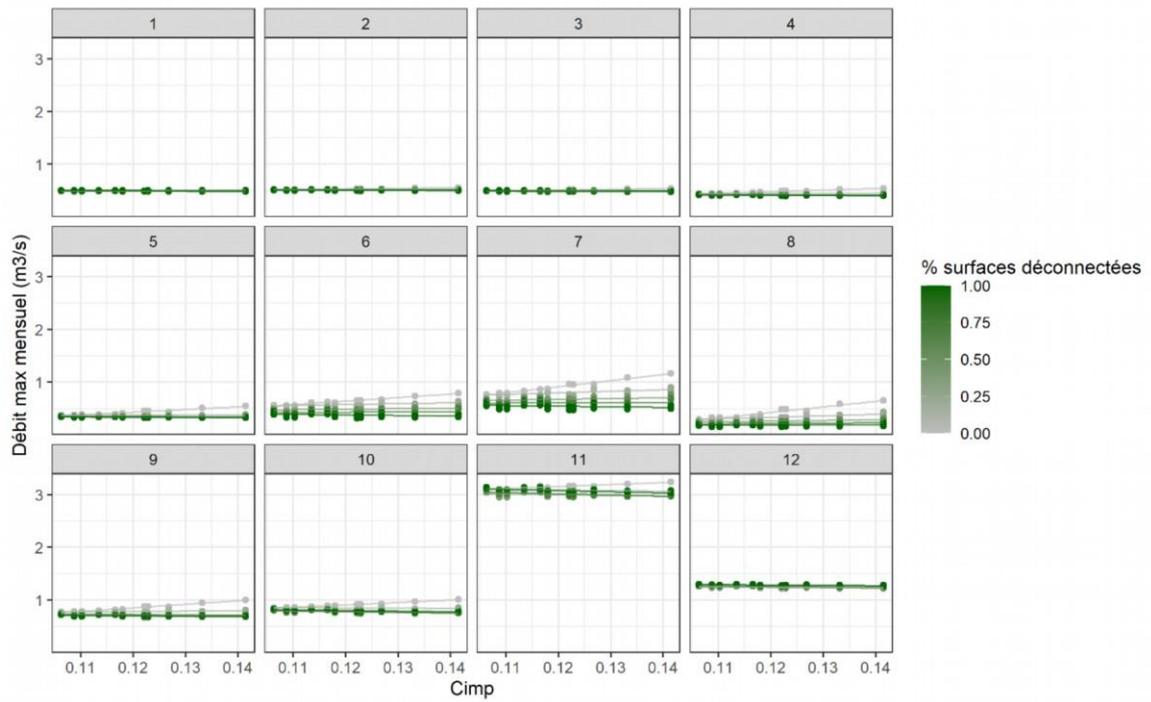




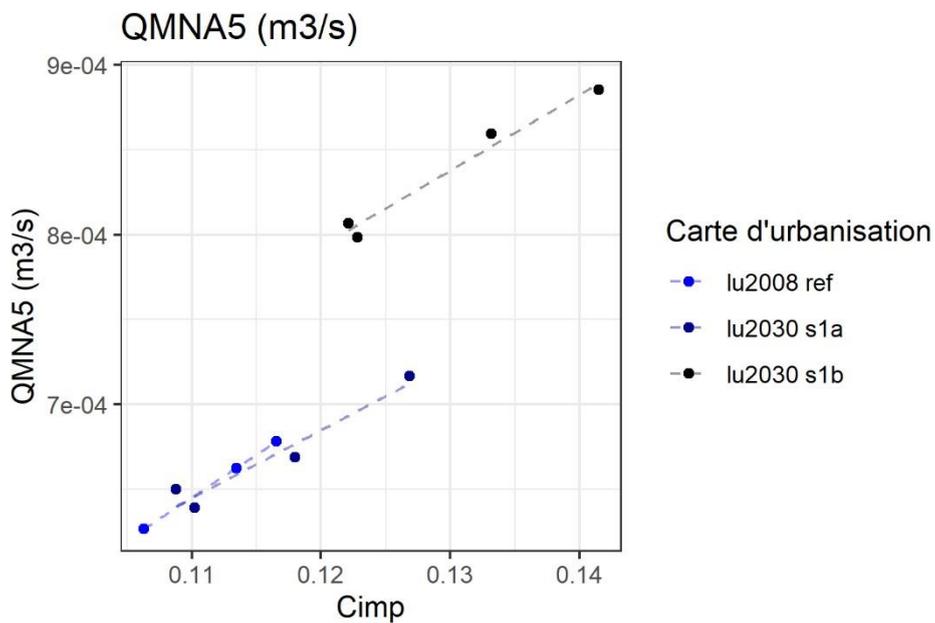
## 8.1.2. Indicateurs de débits élevés : débits maximums mensuels



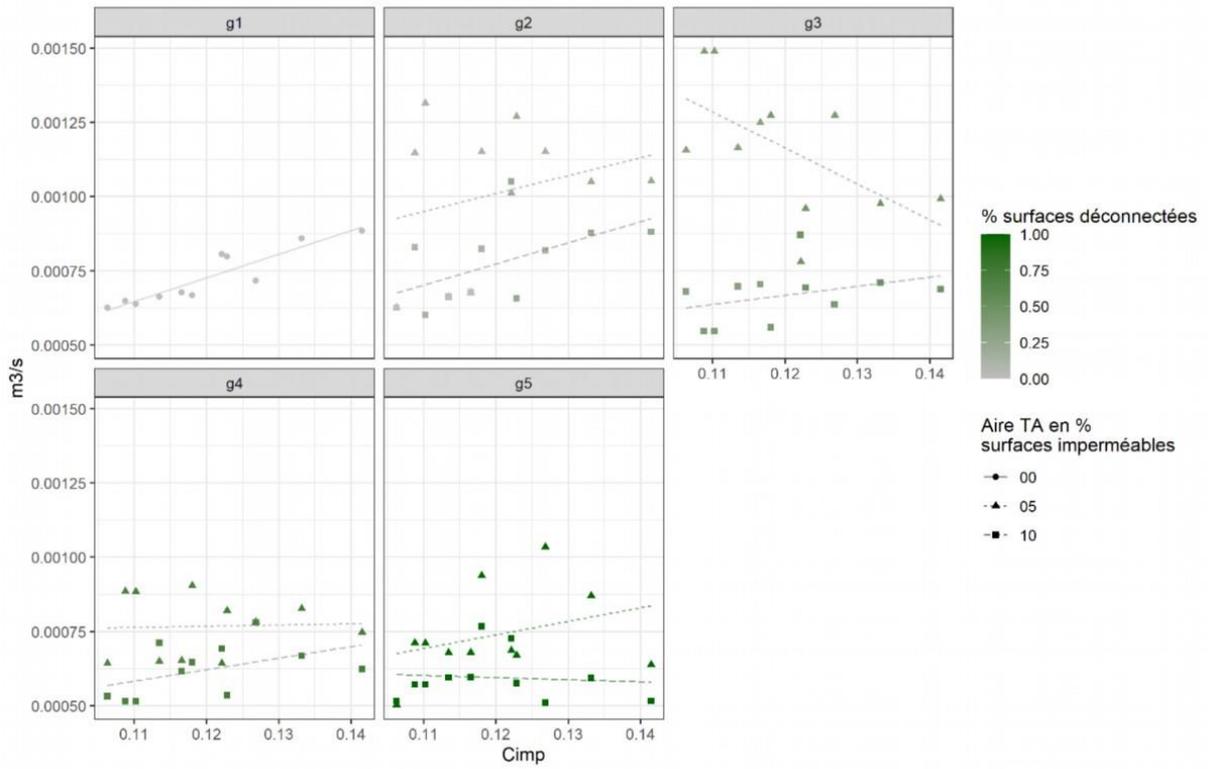
### Evolution des débits maximums mensuels et scénarios de déconnection



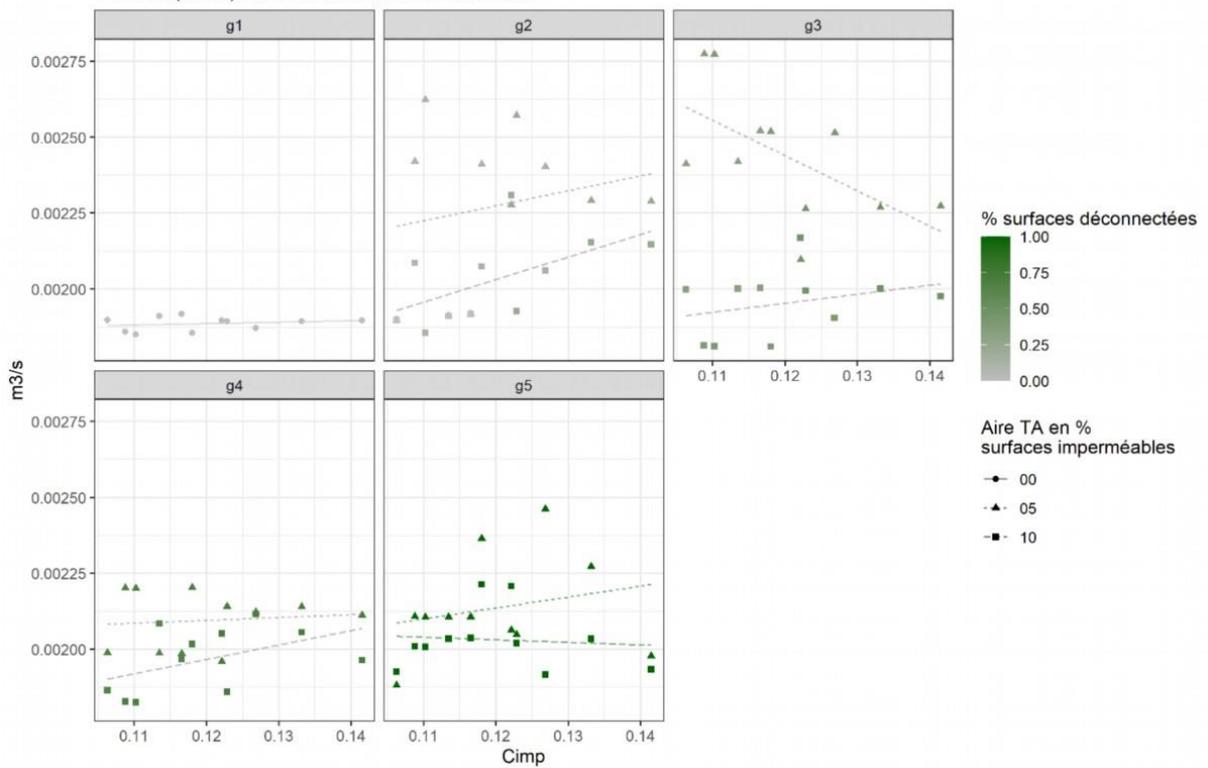
### 8.1.3. Indicateurs d'étiages: QMNA5 et VCN15



QMNA5 (m3/s) et scénarios de déconnection



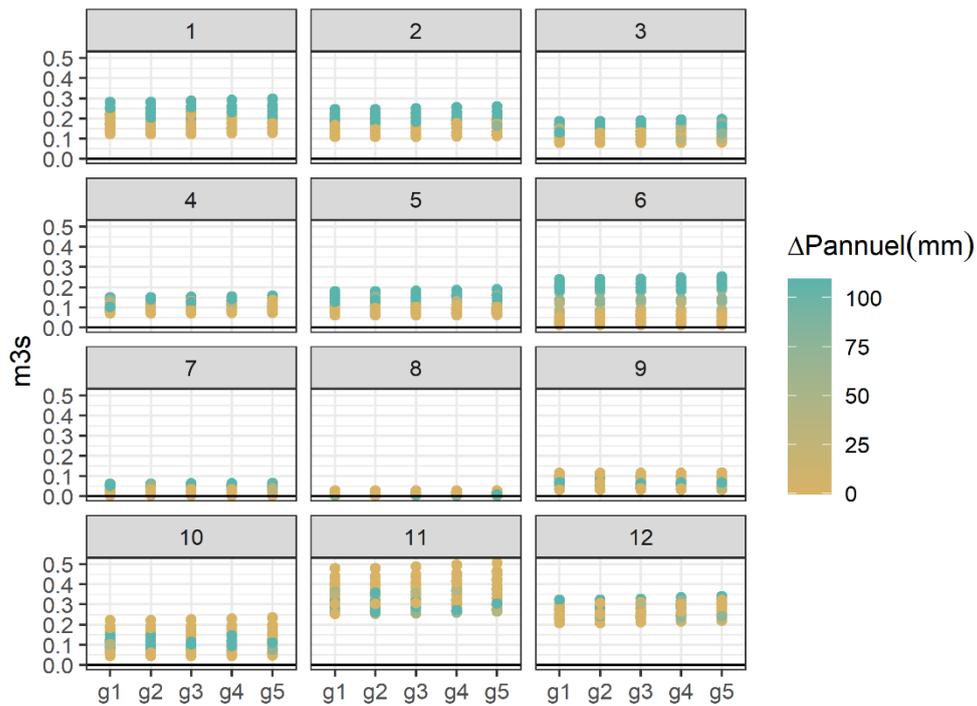
VCN15 (m3/s) et scénarios de déconnection



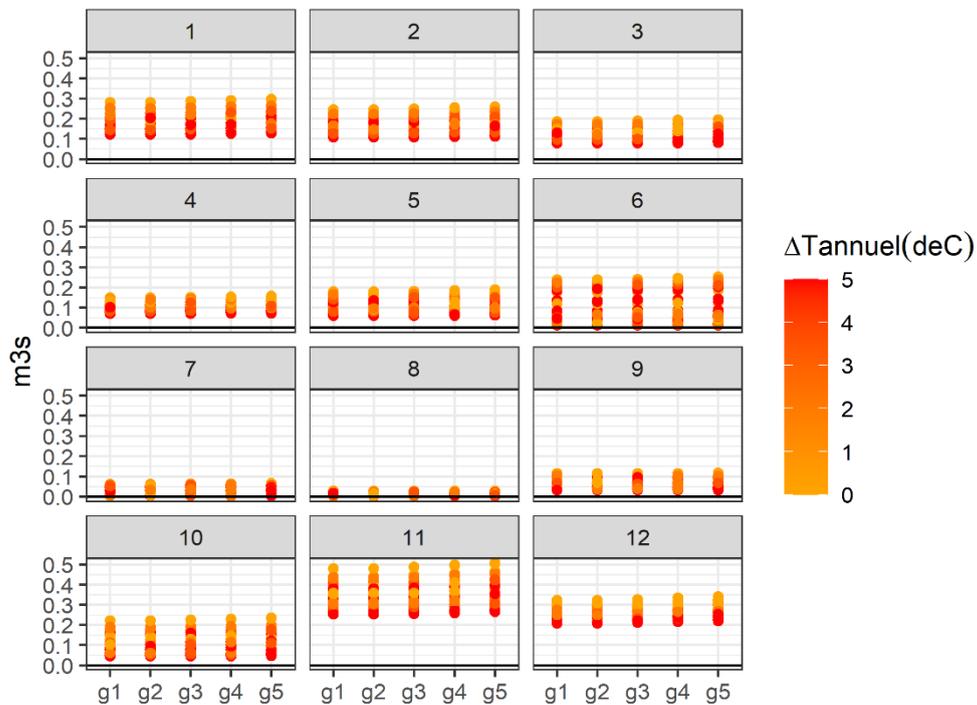
## 8.2. Gestion et changements climatiques

### 8.2.1. Débits moyens mensuels

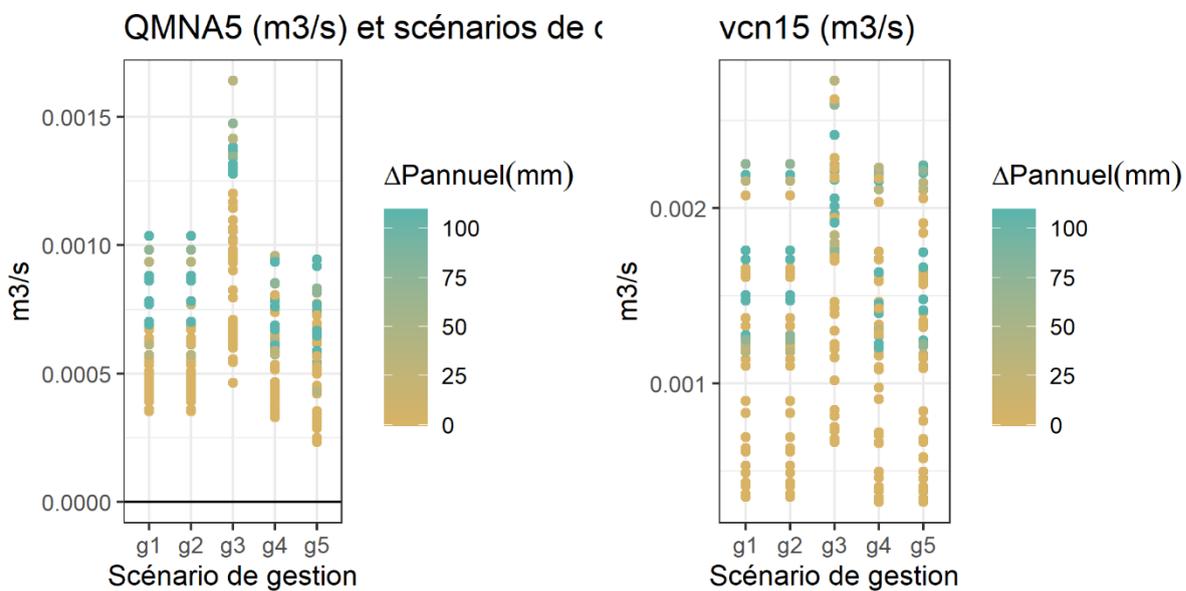
Débits moyens mensuels (pluie et gestion) en m<sup>3</sup>/s



Débits moyens mensuels (température et gestion) en m<sup>3</sup>/s

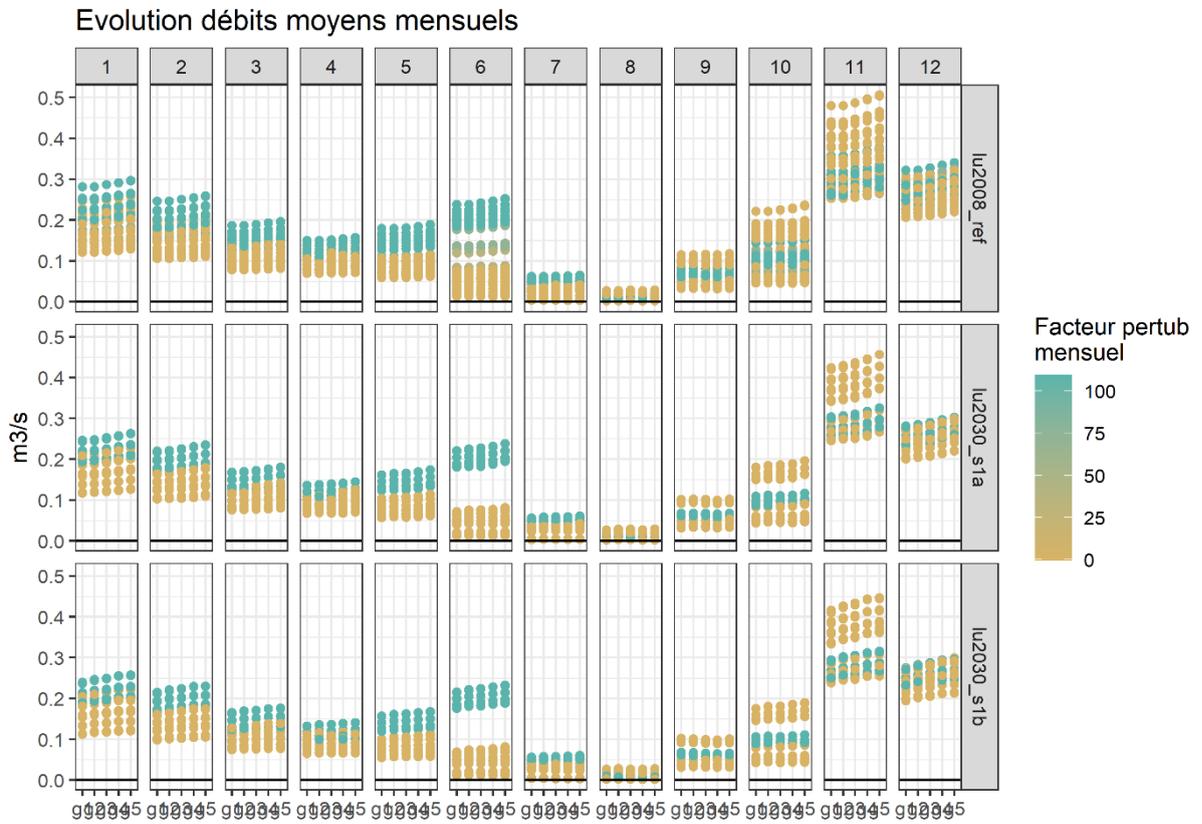


## 8.2.2. Indicateurs d'étiages: QMNA5 et VCN15



## 8.3. Impact cumulés

### 8.3.1. Débits moyens mensuels





**Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes**  
Adresse à préciser

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>