



**HAL**  
open science

# Amélioration de la représentation des eaux souterraines dans la Modélisation hydrologique du Rhône J2000, pour une meilleure connaissance de la ressource en eau en contexte de changement global

Flora Branger, Jean Marçais, Ivan Horner, Isabelle Braud

## ► To cite this version:

Flora Branger, Jean Marçais, Ivan Horner, Isabelle Braud. Amélioration de la représentation des eaux souterraines dans la Modélisation hydrologique du Rhône J2000, pour une meilleure connaissance de la ressource en eau en contexte de changement global. INRAE. 2021. hal-03993797

**HAL Id: hal-03993797**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03993797>**

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.

# Amélioration de la représentation des eaux souterraines dans la Modélisation hydrologique du Rhône J2000, pour une meilleure connaissance de la ressource en eau en contexte de changement global

## Rapport final

12 novembre 2020

**Flora Branger, Jean Marçais, Ivan Horner,  
Isabelle Braud**

INRAE  
UR RiverLy  
5 Rue de la Doua, CS20244  
69625 Villeurbanne Cedex

## Table des matières

1 Introduction : contexte et objectifs du projet.....	5
2 Rappel du fonctionnement du modèle J2000-Rhône et méthodologie générale du projet.....	7
2.1 Principes de J2000.....	7
2.2 Paramétrisation de J2000-Rhône.....	9
2.3 Méthodologie générale du projet.....	10
3 Développement de signatures hydrologiques caractéristiques du compartiment souterrain.....	12
3.1 Les signatures hydrologiques : définition et intérêt.....	12
3.2 Présentation du jeu de signatures hydrologiques.....	12
3.3 Caractérisation des signatures spécifiques du compartiment souterrain.....	15
4 Diagnostic du modèle J2000-Rhône.....	19
4.1 Comparaison avec la recharge potentielle estimée par le BRGM.....	19
4.2 Diagnostic par signatures hydrologiques sur un échantillon de sous-bassins.....	22
4.3 Expertise hydrogéologique.....	29
4.4 Conclusions.....	31
5 Modification de J2000-Rhône.....	32
5.1 Reclassification de la couche « lithologie » et refonte du maillage.....	32
5.2 Stratégie de reparamétrisation.....	34
5.3 Validation des modifications.....	37
5.4 Discussion.....	44
6 Conclusion et perspectives.....	46
7 Références.....	47

## Liste des Figures

Figure 1 : Structure du modèle J2000 et processus principaux représentés pour chaque HRU (Hydrological Response Unit).....	7
Figure 2 : Le modèle J2000-Rhône.....	8
Figure 3 : Principales lithologies prises en compte dans la paramétrisation du module hydrogéologique de J2000-Rhône.....	9
Figure 4 : Contributions des différentes composantes du débit (moyennes journalières interannuelles, période 1980-2010), simulées par le J2000-Rhône à la station du Breuchin à La Poiselière et Langle.....	10
Figure 5 : Liste et description des signatures développées, d'après Horner, Branger, Vannier, Braud and Lauvernet [2020a] .....	13
Figure 6 : Résultats de l'analyse de sensibilité, d'après Horner et al. [2020a]. L'effet de premier ordre SM correspond à l'effet principal de chaque paramètre; l'effet total ST intègre en plus les interactions entre paramètres.....	17
Figure 7 : Caractérisation des liens entre signatures hydrologiques et paramètres du modèle hydrologique J2000, d'après Horner et al. [2020a].....	18
Figure 8 : Recharge annuelle moyenne des entités hydrogéologiques de la BD LISA calculée sur les années 1981-2010 (source : projet RECHARGE).....	19
Figure 9 : Comparaison entre la recharge annuelle moyenne simulée par J2000-Rhône et celle estimée dans le projet RECHARGE du BRGM pour les 216 stations de contrôle de J2000.....	20
Figure 10 : Cartographie de la différence entre recharge annuelle moyenne simulée par J2000-Rhône (RG) et celle estimée dans le projet RECHARGE du BRGM.....	21
Figure 11 : Localisation et géologies dominantes des 45 sous-bassins sélectionnés pour l'application du diagnostic à l'aide de signatures hydrologiques.....	22
Figure 12 : Distributions des valeurs obtenues pour les 6 signatures représentatives du compartiment souterrain, calculées à partir des débits observés, et classifiées selon la géologie dominante des sous-bassins.....	24
Figure 13 : Distributions des écarts entre valeur observée et simulée pour les 6 signatures représentatives du compartiment souterrain.....	27
Figure 14 : Décomposition du régime des débits pour le bassin du Renon à Neuville-les-Dames. Paramétrisation du compartiment souterrain dans J2000-Rhône : $RG_{max} = 10$ mm ; $\tau_{RG} = 100$ jours.....	28
Figure 15 : Modèles perceptuels du fonctionnement hydrogéologique pour 7 familles de systèmes identifiées sur le bassin versant du Rhône.....	30
Figure 16 : Nouvelle classification de la couche lithologie pour J2000 Rhône.....	33
Figure 17 : Surfaces de réponses obtenues pour chacune des signatures en faisant varier les paramètres $\tau_{RG}$ (abscisse) et $RG_{max}$ de la composante souterraine pour le bassin du Hérisson à Doucier (V2206010). La valeur de signature obtenue à partir des données observées est représentée en trait noir.....	35
Figure 18 : Valeurs de la fonction objectif $\Phi$ et sélection des meilleurs modèles (rouge : le meilleur modèle ; noir : les 19 meilleurs modèles) pour la représentation des signatures. Exemple du bassin du Hérisson à Doucier (V2206010).....	36

Figure 19: Valeurs des critères de performance pour l'ancienne et la nouvelle version de J2000-Rhône sur les 45 bassins du diagnostic.....	38
Figure 20: Comparaison des erreurs sur la reproduction des signatures hydrologiques pour l'ancienne et la nouvelle version de J2000-Rhône.....	39
Figure 21: Régime hydrologique (observé / simulé) et composante souterraine RG pour la station du Breuchin à La Poiselière-et-Langle.....	40
Figure 22: Comparaison des valeurs de biais sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle.....	41
Figure 23: Comparaison des valeurs du KGE sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle.....	42
Figure 24: Comparaison des valeurs du NSE sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle.....	43
Figure 25: Comparaison des valeurs du NSElog sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle.....	44

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Surface, géologie dominante et dates de disponibilité des débits observés pour les 4 sous-bassins de l'Ardèche.....	16
Tableau 2 : Caractéristiques des 45 sous-bassins sélectionnés pour la réalisation du diagnostic.....	23
Tableau 3: Caractéristiques des différents bassins versants types utilisés pour l'analyse des signatures.....	34
Tableau 4: Valeur de paramètres obtenues pour le compartiment souterrain de J2000 à l'issue de la phase d'optimisation.....	36

# 1 Introduction : contexte et objectifs du projet

Dans un cadre d'évolution des forçages climatiques et anthropiques, une meilleure connaissance des ressources en eau et de leurs usages à l'échelle d'un grand bassin versant comme le Rhône est un préalable à une meilleure gestion de la ressource et à l'adoption de stratégies d'adaptation pertinentes. C'est pourquoi, en partenariat avec INRAE, l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse a souhaité se doter d'un outil de modélisation hydrologique spatialisée permettant de modéliser les différentes composantes du bilan hydrologique, en incluant les principaux usages de l'eau. Ces travaux se sont déroulés dans le cadre de l'action « Modélisation hydrologique distribuée du Rhône - MDR» (2013-2016), financés par l'AE RM&C et la Compagnie Nationale du Rhône. L'objectif du projet était notamment d'aboutir à une représentation fiable des principaux processus hydrologiques en tout point du bassin drainant plus de 100 km<sup>2</sup> sur le Rhône et ses affluents, et de représenter dans le modèle le couplage entre les ressources naturelles et les trois grands usages de l'eau : les modifications des écoulements par les grands barrages hydro-électriques, les prélèvements pour l'irrigation, et les prélèvements pour l'eau potable, de façon à pouvoir réaliser des tests de scénarios de changement climatique et de modification des usages.

Les résultats du modèle développé (J2000-Rhône) montrent que l'hydrologie naturelle, mais aussi certains usages de l'eau, sont simulés de manière satisfaisante sur le bassin du Rhône à Beaucaire [Branger et al. 2016]. Néanmoins, la première phase du projet, celle de représentation de l'hydrologie « naturelle », a mis en lumière la difficulté de la paramétrisation du modèle sur un bassin aussi grand et complexe que le bassin versant du Rhône. De façon à garder un lien explicite entre les données d'entrée, les hypothèses sur le fonctionnement hydrologique faites dans le modèle, et les résultats obtenus, nous avons choisi une approche manuelle, sans recours à des algorithmes de calage automatique par optimisation. L'exercice s'est révélé difficile et nécessitant une importante part d'expertise subjective, par définition non reproductible. De plus, même si les débits simulés sont satisfaisants du point de vue des critères statistiques utilisés, un travail d'évaluation de la pertinence des résultats en termes de composantes des bilans hydrologiques : composantes des écoulements (surface, sub-surface, souterrain), évapotranspiration, stockage dans les sols reste nécessaire pour s'assurer que le modèle « donne de bons résultats pour de bonnes raisons » [Kirchner 2006]. Cette évaluation sur les composantes des bilans permettra de renforcer la robustesse du modèle, et partant, la pertinence des simulations effectuées sous changement climatique ou changement des usages. En particulier, la représentation de la composante nappe souterraine du modèle J2000-Rhône est très grossière et doit être évaluée, voire revisitée pour améliorer le réalisme des simulations. Cette composante souterraine est d'une importance capitale en contexte de changement global puisqu'elle sera, a priori, plus sollicitée quand des tensions sur la ressource apparaîtront (irrigation, captage AEP, etc.). D'autre part, l'artificialisation des sols sur certains territoires du bassin du Rhône laisse présager d'une modification du partitionnement entre ruissellement et recharge, susceptible d'impacter localement la ressource souterraine. Evaluer la quantité d'eau souterraine disponible ainsi que sa dynamique de renouvellement est donc un enjeu critique. C'est l'objet du projet « MDR Eaux Souterraines » pour lequel le travail a été mené en collaboration étroite avec le BRGM dans le cadre des projets RECHARGE « Étude caractérisation

recharge des aquifères et évolution / changement climatique [Caballero,Lanini,Zerouali & Bailly-Comte 2016].

L'objectif du projet MDR Eaux Souterraines a été de porter un diagnostic sur la simulation de la composante souterraine de J2000-Rhône en hydrologie naturelle :

- en réalisant une comparaison de la recharge simulée par J2000-Rhône et de celle estimée de façon indépendante par le BRGM dans le cadre du projet RECHARGE
- en développant et en mettant en œuvre une méthode de diagnostic du modèle à partir de signatures hydrologiques permettant d'identifier plus spécifiquement les faiblesses du modèle, notamment en termes de paramètres. Ce second point a fait l'objet de la thèse d'Ivan Horner [2020], co-financée par la Compagnie Nationale du Rhône.

L'objectif pratique est d'améliorer la paramétrisation du modèle pour une juste représentation des processus hydrologiques, en particulier dans le compartiment souterrain de J2000-Rhône.

# 2 Rappel du fonctionnement du modèle J2000-Rhône et méthodologie générale du projet

## 2.1 Principes de J2000

Le modèle J2000-Rhône est basé sur le modèle hydrologique J2000, développé à l'Université de Jena (Allemagne) pour répondre aux enjeux de la Directive Cadre sur l'Eau [Krause,Base,Bende-Michl,Fink,Flugel & Pfenning 2006] . J2000 est un modèle « orienté processus », qui représente les processus hydrologiques principaux de manière simplifiée, tout en gardant un lien avec la physique des phénomènes. Le modèle considère les processus suivants (Figure 1) : la partition des précipitations entre pluie et neige ; l'interception des précipitations par la végétation ; l'évapotranspiration ; les processus de fonte et d'accumulation de neige ; l'infiltration dans les sols ; le ruissellement de surface ; la recharge des nappes et le routage dans le réseau hydrographique. C'est un modèle complètement distribué, qui s'appuie sur un maillage élémentaire irrégulier en HRUs (Hydrological Response Units), obtenues par croisement de couches d'informations géographiques décrivant le relief, la géologie, la pédologie et l'occupation des sols. Le réseau hydrographique est aussi découpé en tronçons permettant le calcul des débits sur chaque tronçon et son routage jusqu'à l'exutoire. Une particularité de J2000 est qu'il est capable de tracer, sur chaque HRU et chaque brin du réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire, les différentes composantes de l'écoulement : ruissellement de surface RD1, flux de subsurface RD2, flux souterrain RG.

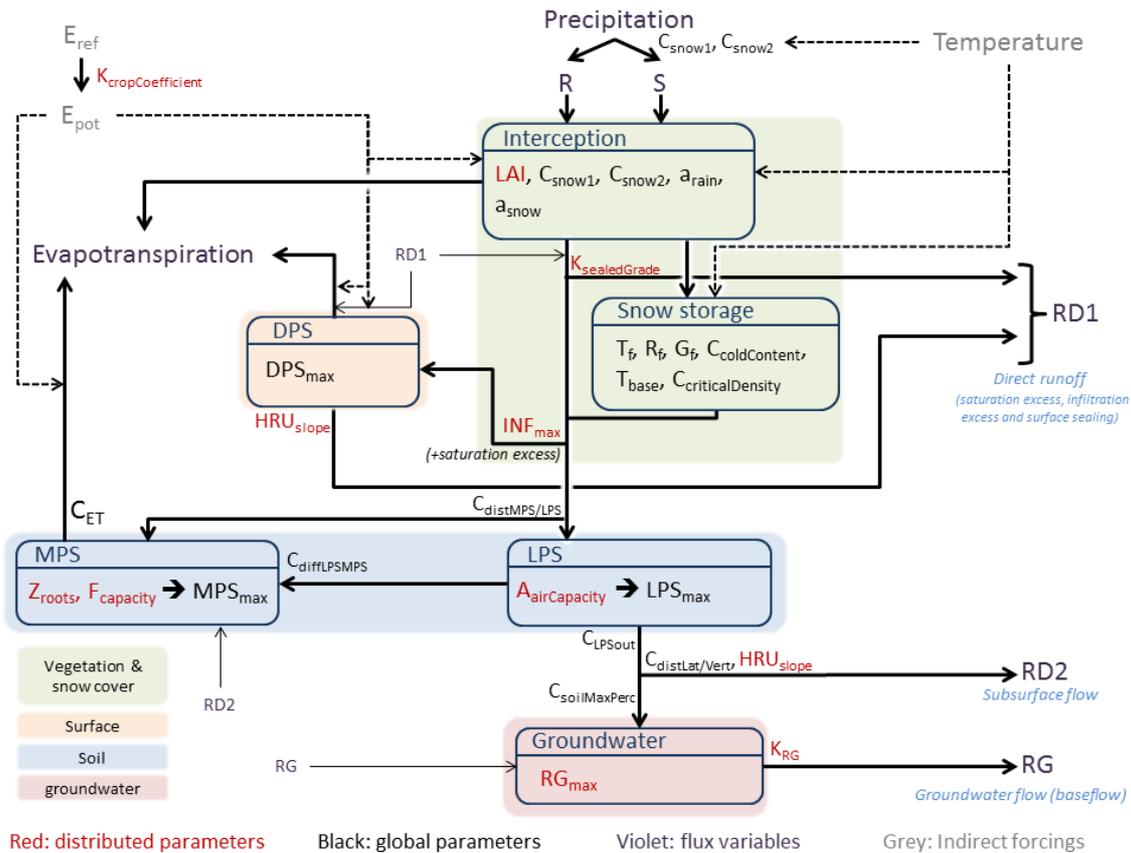


Figure 1 : Structure du modèle J2000 et processus principaux représentés pour chaque HRU (Hydrological Response Unit)

Des modules représentant différents usages de l'eau ont été ajoutés au modèle dans le cadre du projet MDR [Branger et al. 2016] :

- Un module irrigation, où les prélèvements pour l'irrigation sont calculés pour chaque HRU, identifiée comme irriguée. Le calcul de l'irrigation tient compte des besoins en eau des plantes, définis en fonction du type de culture, de l'indice foliaire, de la profondeur racinaire, de la période où l'irrigation est possible dans l'année, du type d'irrigation (gravitaire, aspersion, goutte-à-goutte et de l'humidité du sol). Ces besoins en eau ne sont satisfaits que si l'eau est disponible en quantité suffisante dans le brin de rivière auquel la HRU est connectée ;
- Les besoins en eau potable sont calculés grâce à un modèle économétrique établi à l'échelle communale, fondé sur les données de population, le climat, les revenus des habitants, la nature de l'habitat ;
- La gestion des barrages et dérivations est représentée en s'appuyant sur des fonctions objectifs de remplissage ou de vidange. Ces fonctions ont été estimées en comparant le régime naturel des cours d'eau et le régime influencé, lorsque ces informations étaient disponibles [Cipriani & Sauquet 2014].

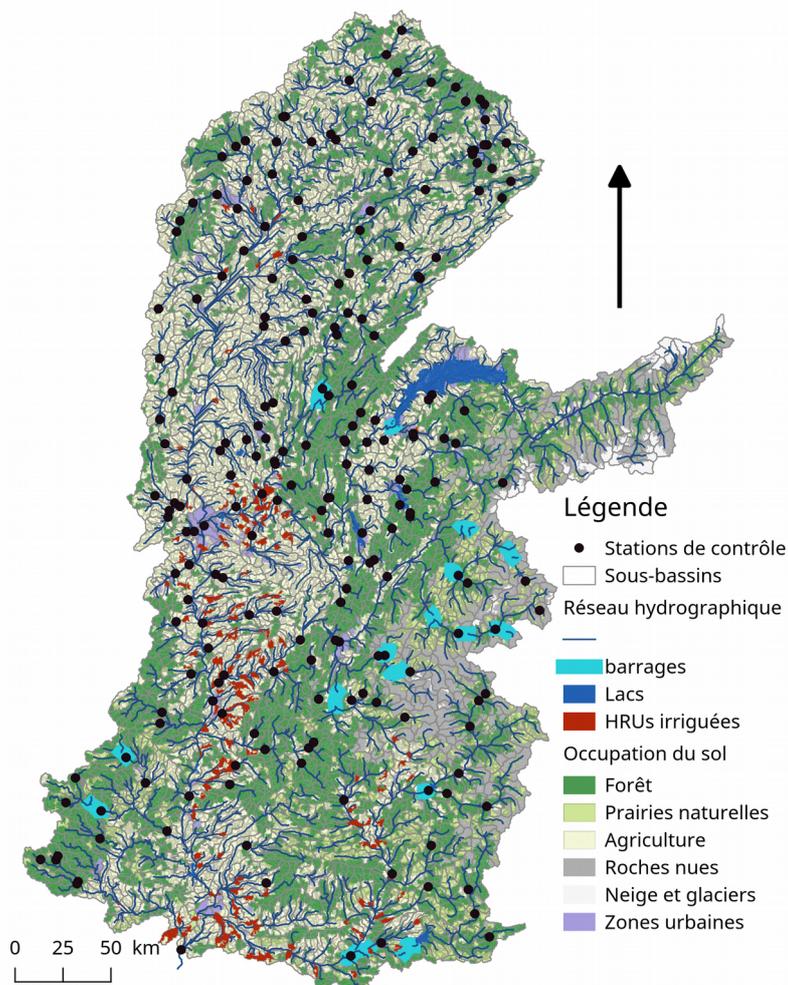


Figure 2 : Le modèle J2000-Rhône

## 2.2 Paramétrisation de J2000-Rhône

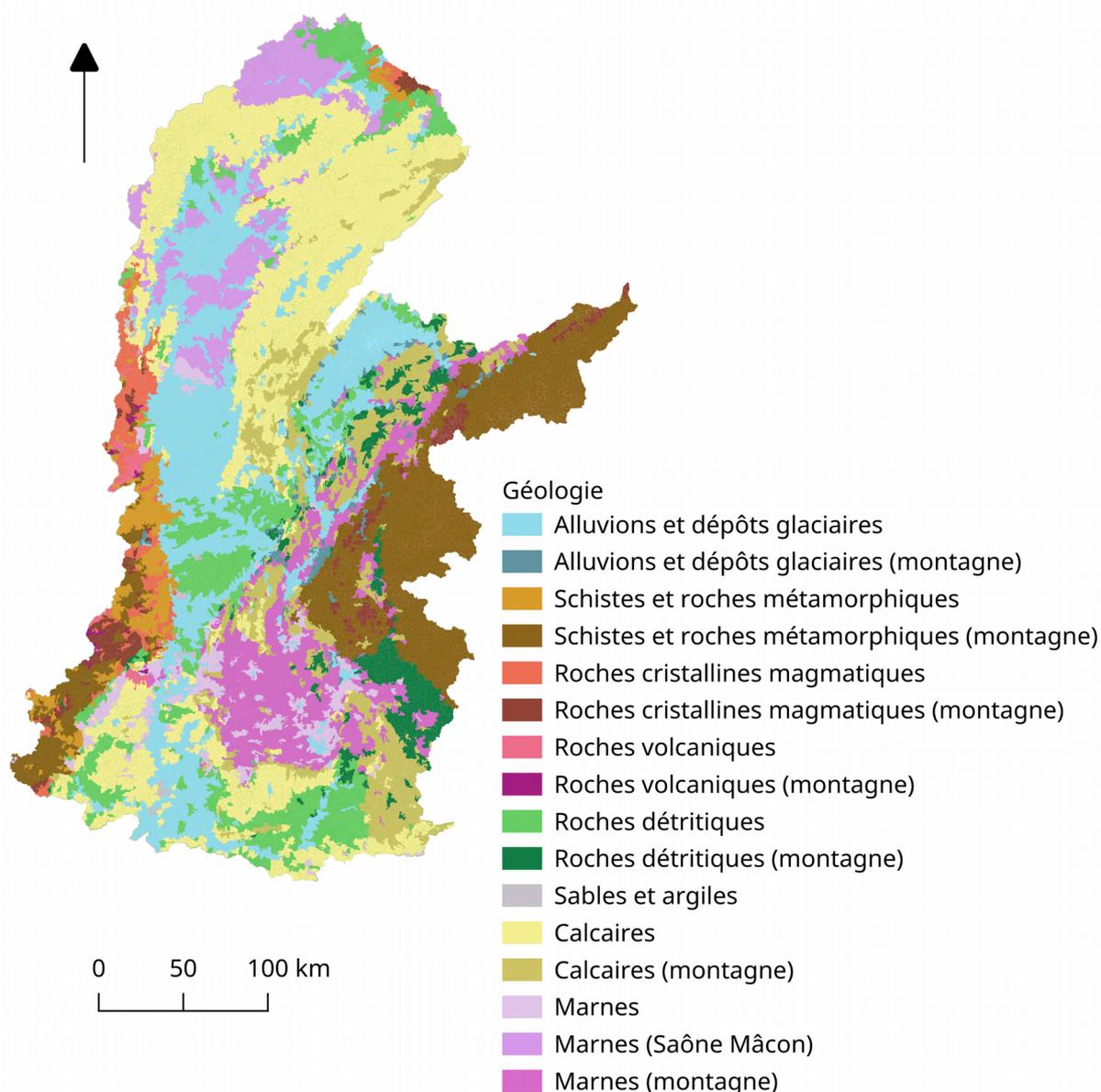


Figure 3 : Principales lithologies prises en compte dans la paramétrisation du module hydrogéologique de J2000-Rhône.

J2000 a été mis en œuvre à l'échelle du bassin du Rhône pour former le modèle J2000-Rhône (Figure 2), avec un maillage représentant près de 12500 HRUs. Pour la période présente, des simulations ont été réalisées au pas de temps journalier, en s'appuyant sur les données de forçage issues de la réanalyse SAFRAN de Météo-France [Vidal, Martin, Franchistéguy, Baillon & Soubeyroux 2010]. Les paramètres du modèle ont été spécifiés à partir de la littérature et améliorés de manière itérative, tout en leur gardant un sens physique. En particulier, le réservoir profond du modèle (« Groundwater », voir Figure 1) a été paramétré à partir de la carte géologique au 1:100000 du BRGM dans laquelle les différentes lithologies ont été grossièrement regroupées en 8 classes dominantes (Figure 3). Les paramètres du modèle (taille du réservoir et temps caractéristique de vidange) ont été fixés grossièrement pour chaque classe à partir de considérations qualitatives sur la perméabilité des différentes lithologies. Le travail d'ajustement des paramètres mené dans le projet

MDR a conduit à distinguer, pour chaque lithologie, une configuration « plaine » et une configuration « montagne » paramétrées différemment. Les détails sur la mise en œuvre et les performances du modèle sont détaillées dans Branger et al. [2016]. Le modèle a été évalué à l'exutoire de 234 sous-bassins, correspondant à des stations hydrométriques sélectionnées dans la Banque Hydro. Avec un critère de Nash (NSE) de plus de 0,5 sur plus de 50 % des stations, la performance du modèle a été jugée satisfaisante pour permettre son exploitation préliminaire sur des scénarios de projections.

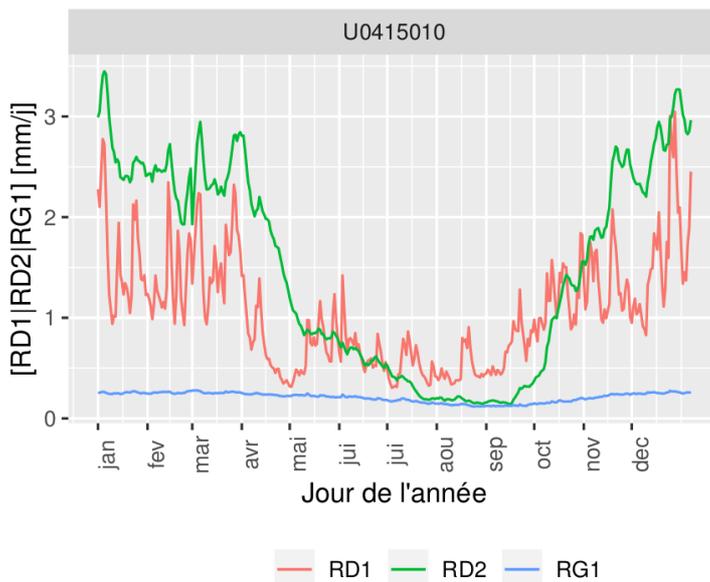


Figure 4 : Contributions des différentes composantes du débit (moyennes journalières interannuelles, période 1980-2010), simulées par le J2000-Rhône à la station du Breuchin à La Poiselière et Langle.

Une exploitation plus fine de ces résultats a montré néanmoins que la performance du modèle est encore problématique sur près de 25 % des stations (NSE inférieur à 0,3). Cela montre les limites de notre stratégie de paramétrisation manuelle. Plus grave, nous avons aussi remarqué que sur certaines stations présentant pourtant une excellente performance, les proportions des différentes composantes du débit calculées par le modèle sont peu réalistes. C'est le cas de la station U0415010, le Breuchin à La Poiselière et Langle, qui malgré un NSE de 0.75, présente une contribution du débit de base étonnamment faible et constante, sans variabilité saisonnière (Figure 4), ce qui fait douter de la paramétrisation du modèle sur le sous-bassin correspondant.

Un diagnostic approfondi de la paramétrisation de J2000-Rhône, et en particulier de sa composante souterraine, s'avère donc nécessaire.

## 2.3 Méthodologie générale du projet

De manière à pouvoir réaliser ce diagnostic, nous avons construit une démarche en plusieurs étapes.

La première étape a consisté en un travail de recherche méthodologique sur des indicateurs permettant de réaliser ce diagnostic : les signatures hydrologiques. Ce travail a fait l'objet de la

thèse d'Ivan Horner, co-financée par le projet, et qui a conduit au développement d'un jeu de 12 signatures hydrologiques dont certaines spécifiques du compartiment souterrain.

La seconde étape a été la réalisation du diagnostic du modèle J2000-Rhône, en plusieurs sous-étapes : comparaison entre la recharge calculée par J2000-Rhône et la recharge potentielle calculée par le BRGM, réalisation du diagnostic à partir des signatures hydrologiques sur 45 sous-bassins contrastés, et affinement de ce diagnostic à l'aide d'une expertise hydrogéologique (grâce à Yvan Caballero du BRGM et Laurent Cadilhac de l'Agence de l'Eau) sur ces 45 mêmes sous-bassins.

## **3 Développement de signatures hydrologiques caractéristiques du compartiment souterrain**

Les travaux et résultats présentés dans cette partie ont fait l'objet de la thèse d'Ivan Horner [2020], co-financée par la Compagnie Nationale du Rhône. L'objectif de la thèse se place dans la continuité directe du constat de la difficulté de paramétrisation du modèle J2000-Rhône, fait au cours du projet MDR et présenté précédemment. Elle vise à dépasser ces limites en développant un cadre d'évaluation et diagnostic des modèles hydrologiques en s'appuyant sur des signatures hydrologiques.

### **3.1 Les signatures hydrologiques : définition et intérêt**

Le concept de signature hydrologique a été introduit par Gupta, Wagener and Liu [2008] en même temps que celui d'évaluation/diagnostic. Il s'agit de proposer des indicateurs de la qualité des simulations d'un modèle qui puissent donner des indications sur les causes des mauvaises performances des modèles et des pistes pour y remédier, à la manière d'un diagnostic médical. Ces indicateurs sont appelés signatures hydrologiques. Ce terme générique désigne un ensemble d'indicateurs dérivés des données de terrain pour identifier et quantifier, à différentes échelles spatiales et temporelles, les propriétés émergentes des bassins versants [McMillan, Clark, Bowden, Duncan & Woods 2011; McMillan, Gueguen, Grimon, Woods, Clark & Rupp 2014]. Il existe une grande diversité de signatures hydrologiques, focalisées sur des aspects spécifiques du fonctionnement des bassins versants. Elles peuvent être caractéristiques du régime hydrologique général (courbes de débits classés, coefficient de ruissellement annuel), se focaliser sur le débit de base produit par le bassin et caractériser la relation entre le stock d'eau et le débit (pente des récessions), ou au contraire sur la réaction du bassin à des événements pluvieux, en volume (distribution des pics, coefficients de ruissellement par événement) ou en temps (temps de montée caractéristiques). La plupart de ces indicateurs utilisent des données classiques de pluie et débit, mais peuvent aussi intégrer d'autres types de données (par exemple humidité des sols pour déterminer des seuils de génération du ruissellement ou produits de télédétection pour la couverture neigeuse). Les signatures hydrologiques sont maintenant de plus en plus utilisées dans la communauté scientifique, mais elles sont souvent réduites à des critères supplémentaires à optimiser, ce qui s'écarte de leur objectif d'origine. La question de la formalisation du lien entre signatures hydrologiques, processus et paramètres des modèles, ainsi que de leur contenu en information véritable, reste pour l'instant non résolue [McMillan 2020]. La démarche proposée par Ivan Horner dans sa thèse est une contribution importante à cette question.

### **3.2 Présentation du jeu de signatures hydrologiques**

Un jeu de 15 signatures hydrologiques a été proposé, recouvrant l'ensemble des compartiments hydrologiques d'un bassin versant, y compris la cryosphère. Certaines de ces signatures sont issues de la littérature et présentent l'avantage d'être bien connues et couramment utilisées. Plusieurs autres signatures ont été spécifiquement développées dans le cadre de ce projet et de la thèse d'Ivan

Horner. Nous présentons ici les 12 signatures liées aux compartiments sol / sous-sol (hors cryosphère) qui sont d'un intérêt plus spécifiques pour le projet MDR Eaux Souterraines.

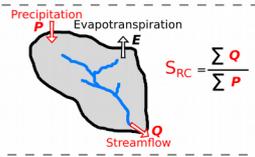
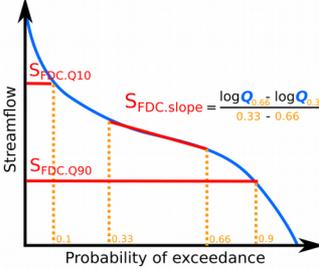
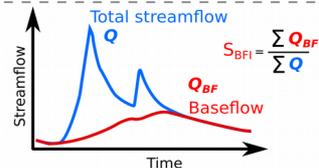
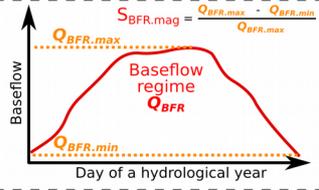
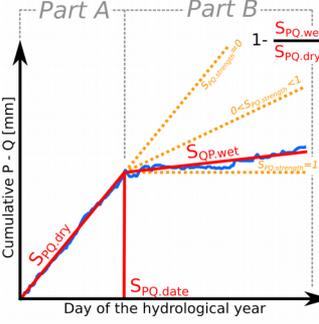
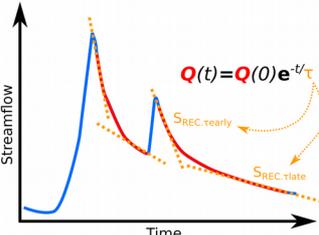
Symbol	Unit	Short description	Illustration diagram	A priori link to hydrological processes
$S_{RC}$	[-]	Runoff coefficient		evapotranspiration demand; water available for evapotranspiration
$S_{FDC.slope}$	[-]	FDC mid-segment slope		partitioning between fast and slow streamflow generation processes (overland flow / soil infiltration, sub-surface flow / percolation)
$S_{FDC.Q90}$	[mm.day <sup>-1</sup> ]	FDC 90% quantile		slow flow generation processes (percolation, groundwater storage and release)
$S_{FDC.Q10}$	[mm.day <sup>-1</sup> ]	FDC 10% quantile		fast flow generation processes (overland flow, sub-surface flow)
$S_{BFI}$	[-]	Baseflow index		partitioning between fast (overland flow / sub-surface) and slow (groundwater) flows
$S_{BFR.mag}$	[-]	Baseflow regime magnitude		catchment storage capacity (soil, groundwater) and release characteristics (overland flow, subsurface flow and groundwater flow)
$S_{PQ.dry}$	[mm.day <sup>-1</sup> ]	P-Q curve dry period slope		evapotranspiration demand; catchment storage capacity, overland flow and sub-surface flow
$S_{PQ.wet}$	[mm.day <sup>-1</sup> ]	P-Q curve wet period slope		catchment storage capacity, overland flow, sub-surface flow and groundwater flow
$S_{PQ.strength}$	[-]	P-Q curve threshold strength		evapotranspiration demand; catchment storage capacity and catchment release rates
$S_{PQ.date}$ <td [mm.day <sup>-1</sup> ]	P-Q curve breakpoint date	evapotranspiration demand; catchment storage capacity, overland flow and sub-surface flow		
$S_{REC.tearly}$	[day]	Early recession time		overland-flow and sub-surface flow processes
$S_{REC.tlate}$	[day]	Late recession time		evapotranspiration, percolation, groundwater storage capacity and release characteristics

Figure 5 : Liste et description des signatures développées, d'après Horner, Branger, Vannier, Braud and Lauvernet [2020a] .

Ces 12 signatures sont présentées Figure 5 et peuvent être regroupées par familles de la façon suivante :

### 3.2.1 Bilan hydrologique (1 signature)

La signature considérée est le **coefficient de ruissellement (noté  $S_{RC}$ )**, qui est calculé comme le ratio entre le débit cumulé sur une période donnée et la précipitation cumulée sur cette même période. On peut calculer un coefficient de ruissellement à une échelle temporelle longue (plusieurs années) ou à l'échelle événementielle. Nous nous intéressons ici au coefficient de ruissellement à long terme, calculé sur plusieurs années. C'est une signature hydrologique classique et beaucoup utilisée, et qui permet de quantifier le bilan hydrologique de long terme (partition entre débit et évapotranspiration).

### 3.2.2 Signatures basées sur la courbe des débits classés (3 signatures)

La seconde famille de signatures s'appuie sur la Courbe de débit classés ou Flow Duration Curve (FDC), qui peut être définie comme la distribution cumulée des débits. Pour une valeur de débit donnée, la FDC indique la proportion du temps pendant lequel cette valeur est dépassée. Sa forme est caractéristique du type de régime hydrologique, et donc des influences respectives des différents compartiments de surface et souterrains [Yilmaz, Gupta & Wagener 2008]. Un bassin avec beaucoup d'écoulements rapides aura ainsi une courbe de débits classés avec une forte pente, au contraire d'un bassin plus influencé par les écoulements souterrains. Pour caractériser la forme de la FDC, 3 signatures hydrologiques ont été retenues :

- **la pente du segment de la FDC situé entre les quantiles 33 % et 66 %, notée  $S_{FDC.slope}$**  ;
- **la valeur du quantile à 90 %, notée  $S_{FDC.Q90}$** , qui indique une valeur typique de débit d'étiage, soutenu par le compartiment souterrain ;
- **la valeur du quantile à 10 %, notée  $S_{FDC.Q10}$** , qui donne des indications sur les dynamiques de crue du bassin (écoulements rapides).

### 3.2.3 Signatures basées sur l'analyse du débit de base (2 signatures)

La troisième famille de signature s'appuie sur l'extraction de la chronique de débit de sa composante Débit de Base (Base Flow), l'hypothèse étant que le Débit de Base correspond à la contribution du compartiment souterrain. Il existe plusieurs méthodes permettant de séparer le débit de base du débit total (méthodes analytiques, filtres digitaux, méthodes graphiques) [Stewart 2015]. À l'issue d'une analyse bibliographique menée conjointement avec le BRGM, différentes méthodes ont été implémentées et testées. La méthode graphique de [Gustard, Bullock & Dixon 1992] a finalement été sélectionnée car fournissant les débits de base les plus réalistes. Les deux signatures de cette famille sont :

- **le Base Flow Index, noté  $S_{BFI}$** , qui correspond au ratio du débit de base cumulé sur le débit total cumulé. Il s'agit d'un indicateur très classique qui est déjà beaucoup utilisé comme signature hydrologique ;
- **l'amplitude de variation du Base Flow ou Base Flow Magnitude, noté  $S_{BFR.mag}$** , qui correspond à l'écart relatif entre la valeur minimale et maximale du Base Flow sur une

année de régime moyen (débits journaliers moyens interannuels). Le Base Flow Magnitude est une nouvelle signature développée spécifiquement dans cette thèse.

### 3.2.4 Signatures explorant la transition automnale (4 signatures)

Cette famille de signatures est aussi une contribution originale de la thèse d'Ivan Horner. Comme représenté sur la Figure 5, elle considère la courbe cumulée de précipitations moins celle de débits. Sur cette courbe, il s'agit ensuite de repérer le point d'inflexion qui correspond au moment où le bassin commence à réagir lors de la réhumidification à l'automne. Cette famille de signatures permet donc de donner des indications sur la capacité de stockage du bassin versant et l'évapotranspiration. Plus précisément, les quatre signatures sont :

- **la pente de la période sèche, notée  $S_{PQ,dry}$  ;**
- **la pente de la période humide, notée  $S_{PQ,wet}$  ;**
- **le ratio des deux pentes, noté  $S_{PQ,strength}$ , caractérisant le contraste entre les deux états sec et humide ;**
- **la date de la transition, notée  $S_{PQ,date}$ .**

### 3.2.5 Signatures basées sur l'analyse des récessions (2 signatures)

La dernière famille de signature concerne l'aspect dynamique de la réponse hydrologique ; il s'agit de la caractérisation des récessions. La récession est la phase de la réponse hydrologique après l'événement pluvieux, pendant laquelle le débit décroît. La forme de ces récessions est caractéristique des propriétés d'évacuation de l'eau du bassin versant [Wittenberg & Sivapalan 1999]. On distingue souvent deux phases de récession, qui sont visibles sur la Figure 5. Dans un premier temps, la récession est rapide, le débit chute fortement du fait de l'arrêt des écoulements rapides en fin d'événement (ruissellement de surface, débit de subsurface). Dans un second temps, la récession s'amortit et correspond à la fin des écoulements de subsurface et au tarissement de la nappe. Le calcul de signature consiste à détecter les récessions non interrompues de longueur comprises entre 1 et 30 jours, puis à calculer, en calant des lois exponentielles décroissantes :

- **le temps caractéristique de la récession rapide, noté  $S_{REC,early}$  calé sur les jours 1 à 4 ;**
- **le temps caractéristique de la récession lente, noté  $S_{REC,late}$  calé sur les jours 15 à 30.**

## 3.3 Caractérisation des signatures spécifiques du compartiment souterrain

De façon à explorer le contenu en information de ces signatures hydrologiques, et le lien avec les paramètres du modèle J2000, une analyse de sensibilité a été réalisée. Cette analyse a été menée sur un modèle similaire à J2000-Rhône mais déployé sur 4 sous-bassins de l'Ardèche, pour plus de facilité de mise en œuvre. Ces 4 sous-bassins versants sont présentés dans le Tableau 1. L'analyse de sensibilité consiste à faire varier les paramètres du modèle en calculant pour chaque jeu de paramètres testé les 12 signatures hydrologiques décrites ci-dessus. Les résultats permettent ensuite d'estimer l'espace de variation des signatures et leur sensibilité à différents paramètres du modèle.

Tableau 1 : Surface, géologie dominante et dates de disponibilité des débits observés pour les 4 sous-bassins de l'Ardèche

Nom	Surface [km <sup>2</sup> ]	Géologie	Dates
Labeaume	292	Schistes et roches métamorphiques	1980-2013
Goulette	103	Schistes et roches métamorphiques	1983-2014
Meyras	99	Schistes et roches métamorphiques	1985-2017
Claduègne	43	Calcaires / Roches volcaniques	2012-2017

Au total, 13000 simulations ont été réalisées sur chaque sous-bassin. La Figure 6 présente les résultats pour chaque signature et chaque sous-bassin, sous la forme d'indices de sensibilité de premier ordre (qui correspond à l'effet principal des paramètres) et total (qui prend aussi en compte les interactions entre paramètres). On constate que les résultats sont similaires sur les 4 sous-bassins et font ressortir, pour chaque signature, les paramètres du modèle qui sont les plus influents. On constate également que certaines signatures présentent une dépendance marquée à un petit nombre de paramètres (comme  $S_{BFR,mag}$  ou  $S_{PQ,dry}$ ), alors que d'autres présentent des effets beaucoup plus diffus ( $S_{BFI}$  ou  $S_{PQ,strength}$  par exemple).

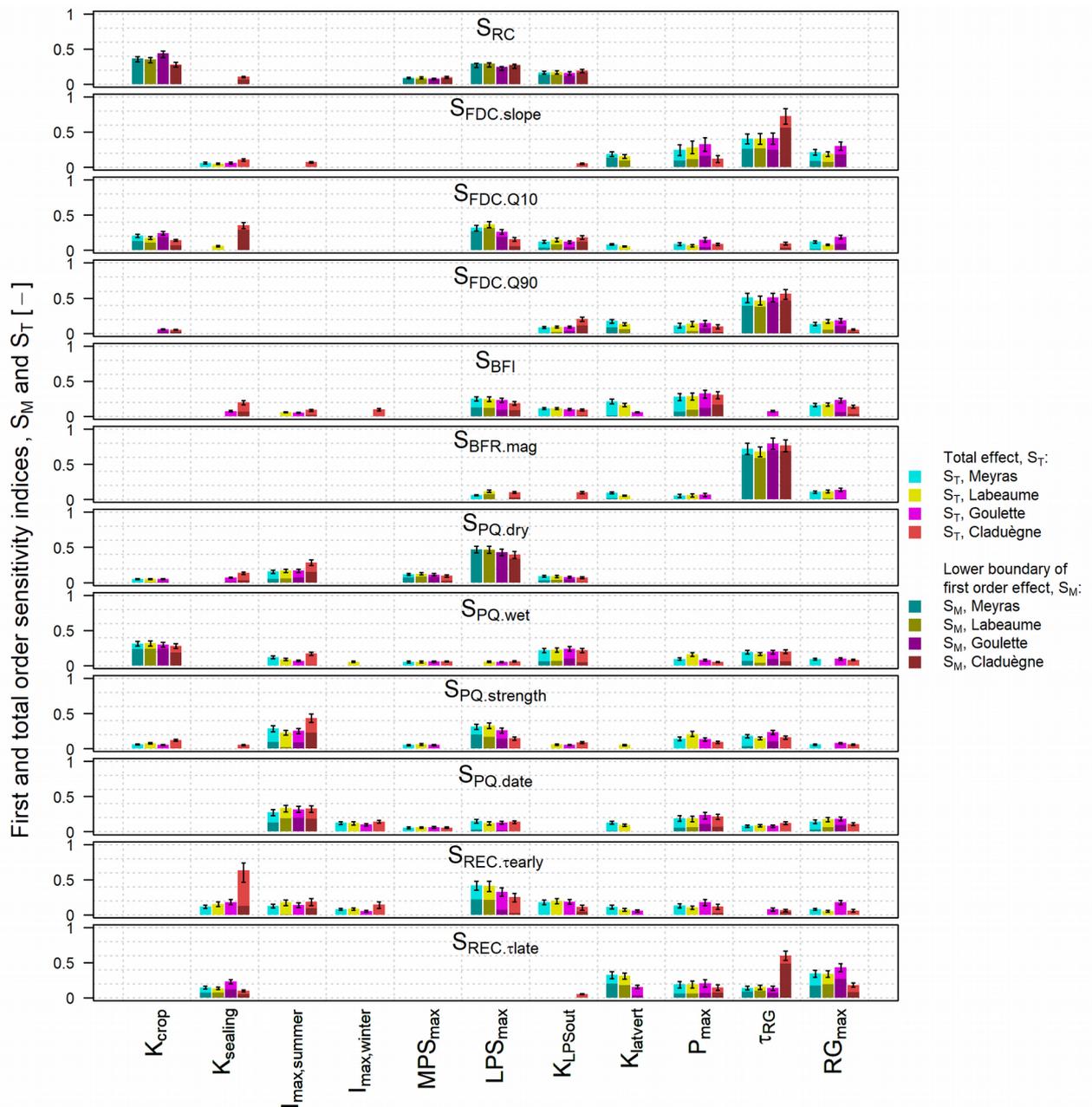


Figure 6 : Résultats de l'analyse de sensibilité, d'après Horner et al. [2020a]. L'effet de premier ordre  $S_M$  correspond à l'effet principal de chaque paramètre; l'effet total  $S_T$  intègre en plus les interactions entre paramètres.

L'interprétation de ces résultats permet formellement d'associer les signatures hydrologiques aux paramètres du modèle J2000, et donc aux compartiments et processus hydrologiques représentés par le modèle, tel que représenté Figure 7. En particulier, la composante souterraine du modèle (paramètres correspondant à la taille du réservoir souterrain et constante de vidange), apparaît particulièrement liée aux signatures  $S_{REC.\tau_{late}}$  (constante de récession lente),  $S_{FDC.slope}$  et  $S_{FDC.Q90}$  (quantile à 90 % et pente de la courbe de débits classés), et  $S_{BFR.mag}$  (amplitude de variation saisonnière du baseflow). On peut également remarquer que le Base Flow Index, pourtant traditionnellement interprété comme correspondant à la contribution souterraine, n'apparaît pas spécifiquement informatif du compartiment souterrain de J2000, et présente plus de liens (assez peu spécifiques) avec le compartiment sol.

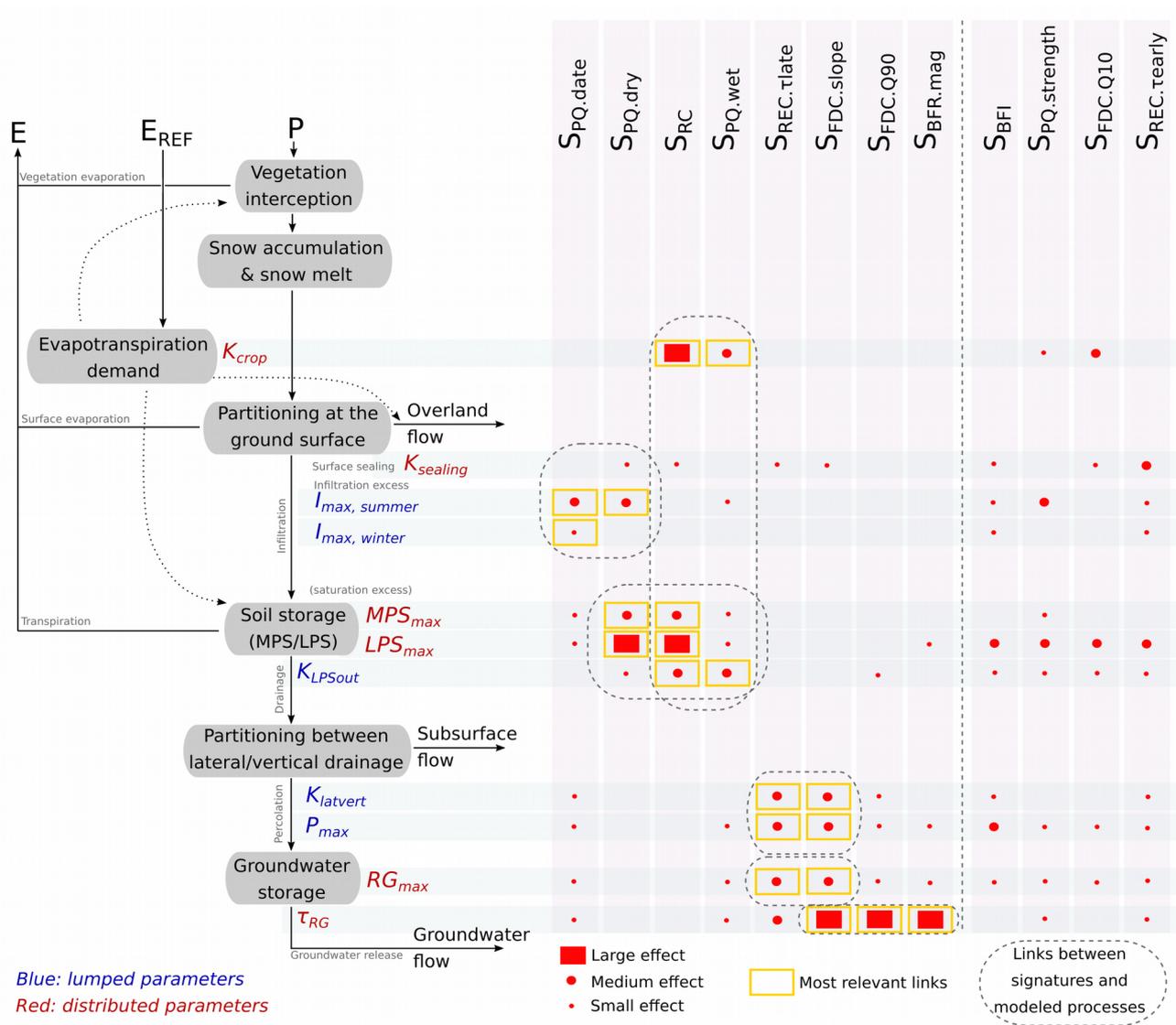


Figure 7 : Caractérisation des liens entre signatures hydrologiques et paramètres du modèle hydrologique J2000, d'après Horner et al. [2020a]

Au final, le travail de thèse d'Ivan Horner nous permet donc de disposer d'un jeu de signatures hydrologiques pertinentes notamment pour décrire la contribution souterraine dans le modèle J2000, et qui peut nous servir pour réaliser le diagnostic de J2000-Rhône.

## 4 Diagnostic du modèle J2000-Rhône

### 4.1 Comparaison avec la recharge potentielle estimée par le BRGM

#### 4.1.1 Méthodologie

Le projet RECHARGE conduit par le BRGM [Caballero et al. 2016] a permis de produire une estimation de la recharge moyenne annuelle des nappes sur l'ensemble des entités hydrogéologiques du bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Cette recharge a été calculée sur la base des données de précipitation de la réanalyse SAFRAN, sur la période 1981-2010. La méthodologie mise en œuvre par le BRGM a fait intervenir un calcul de pluie efficace selon plusieurs méthodes, et dont le résultat a été moyenné, ainsi qu'un calcul de ratio d'infiltration de la pluie efficace (RIPE) qui s'appuie sur la cartographie des entités hydrogéologiques en France (la BD LISA<sup>1</sup>) et également plusieurs méthodologies de calcul. La recharge moyenne annuelle ainsi estimée sur le bassin versant du Rhône est présentée Figure 8.

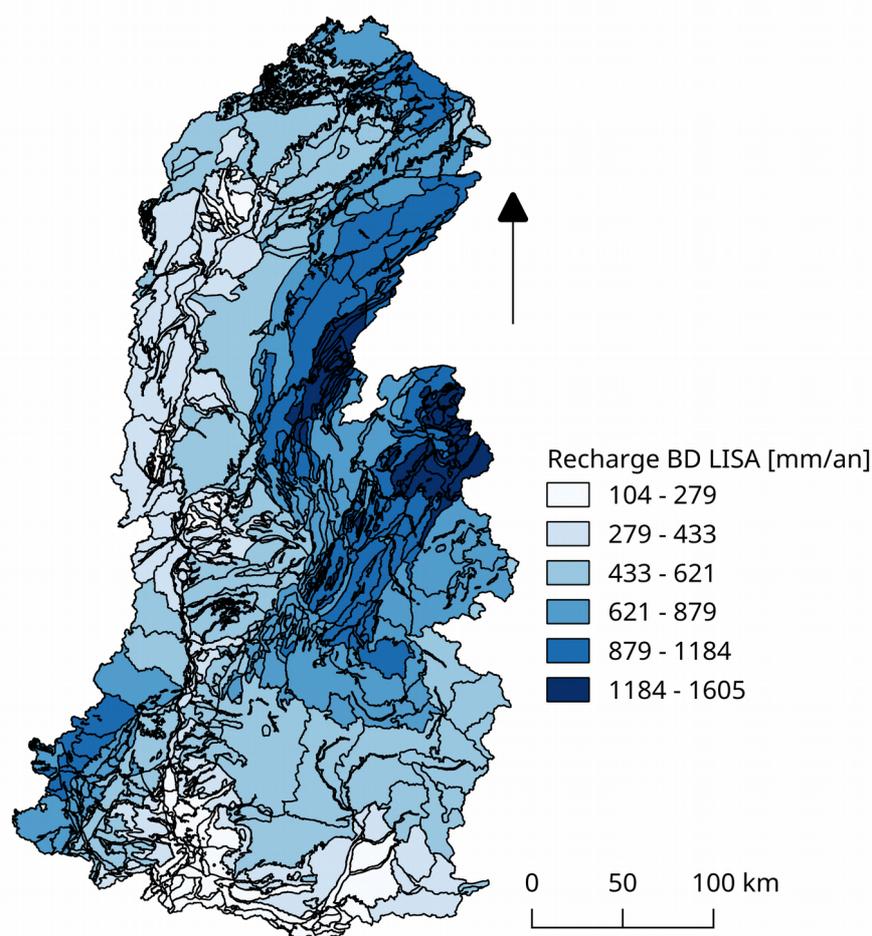


Figure 8 : Recharge annuelle moyenne des entités hydrogéologiques de la BD LISA calculée sur les années 1981-2010 (source : projet RECHARGE)

<sup>1</sup> <https://bdlisa.eaufrance.fr/>

De son côté, le modèle J2000 Rhône permet de simuler, de façon totalement indépendante du calcul du BRGM, sur chacune de ses 234 stations de contrôle, les trois composantes du débit, la composante de surface RD1, la composante de subsurface RD2 et la composante souterraine RG (voir Figure 1), ainsi que le débit total qui est la somme de ces trois composantes. A l'échelle pluriannuelle, on peut considérer que les bilans sont équilibrés et que donc la composante souterraine du débit RG est égale à la recharge moyenne de la nappe de chaque sous-bassin.

La comparaison entre la recharge estimée par J2000-Rhône et la recharge estimée par le BRGM a donc été menée de la façon suivante :

- simulation par J2000-Rhône sur la période d'intérêt 1981-2010 avec le même forçage climatique que le BRGM (réanalyse SAFRAN de Météo-France), et en hydrologie naturelle, c'est-à-dire ne tenant pas compte des usages (barrages et prélèvements), de façon à être dans les mêmes hypothèses de calcul que le BRGM ;
- les estimations du BRGM n'étant disponibles que sur la partie française du bassin du Rhône, soustraction de la contribution de la partie suisse des RG simulés par J2000-Rhône. Cela nous a conduit à réduire le nombre de stations de contrôle à 216 ;
- interpolation spatiale de la recharge estimée par le BRGM à l'échelle des sous-bassins drainés par ces 216 stations.

#### 4.1.2 Résultats

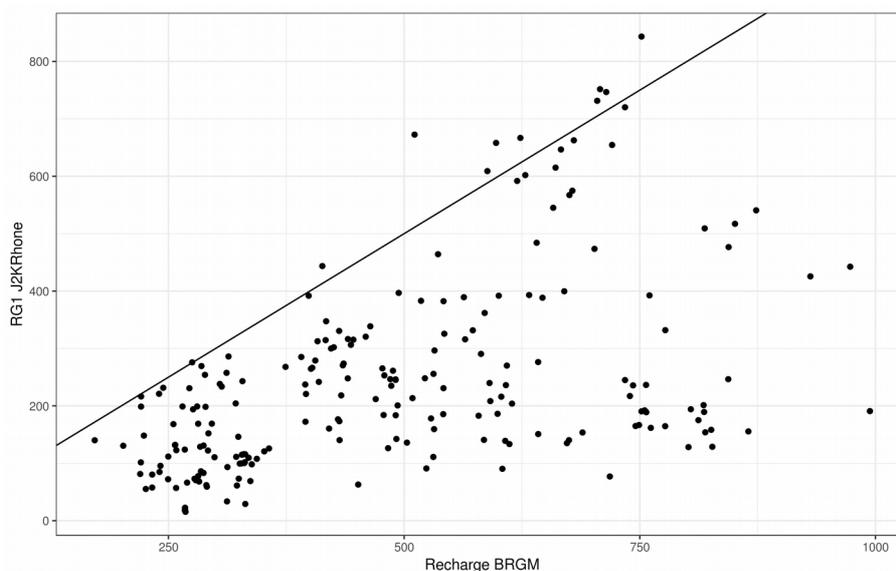


Figure 9 : Comparaison entre la recharge annuelle moyenne simulée par J2000-Rhône et celle estimée dans le projet RECHARGE du BRGM pour les 216 stations de contrôle de J2000.

La comparaison générale présentée Figure 9 montre que même si les ordres de grandeur sont similaires, J2000-Rhône sous-estime nettement la recharge par rapport au calcul du BRGM (en moyenne 240 mm/an contre 483 mm/an). La sous-estimation par J2000-Rhône atteint 803 mm/an sur la station V2024010 de la Saine à Foncines-le-Bas (55.8 km<sup>2</sup>) dans le Jura. Sur l'ensemble du bassin versant (station du Rhône à Beaucaire) l'écart est de 258 mm/an. Il existe quelques stations pour lesquelles la recharge est surestimée par J2000, mais dans des proportions beaucoup plus

restreintes. La plus forte surestimation est de 161 mm pour la station V1535210 de la Leysse à Nances (Novalaise, 26 km<sup>2</sup>) en Savoie.

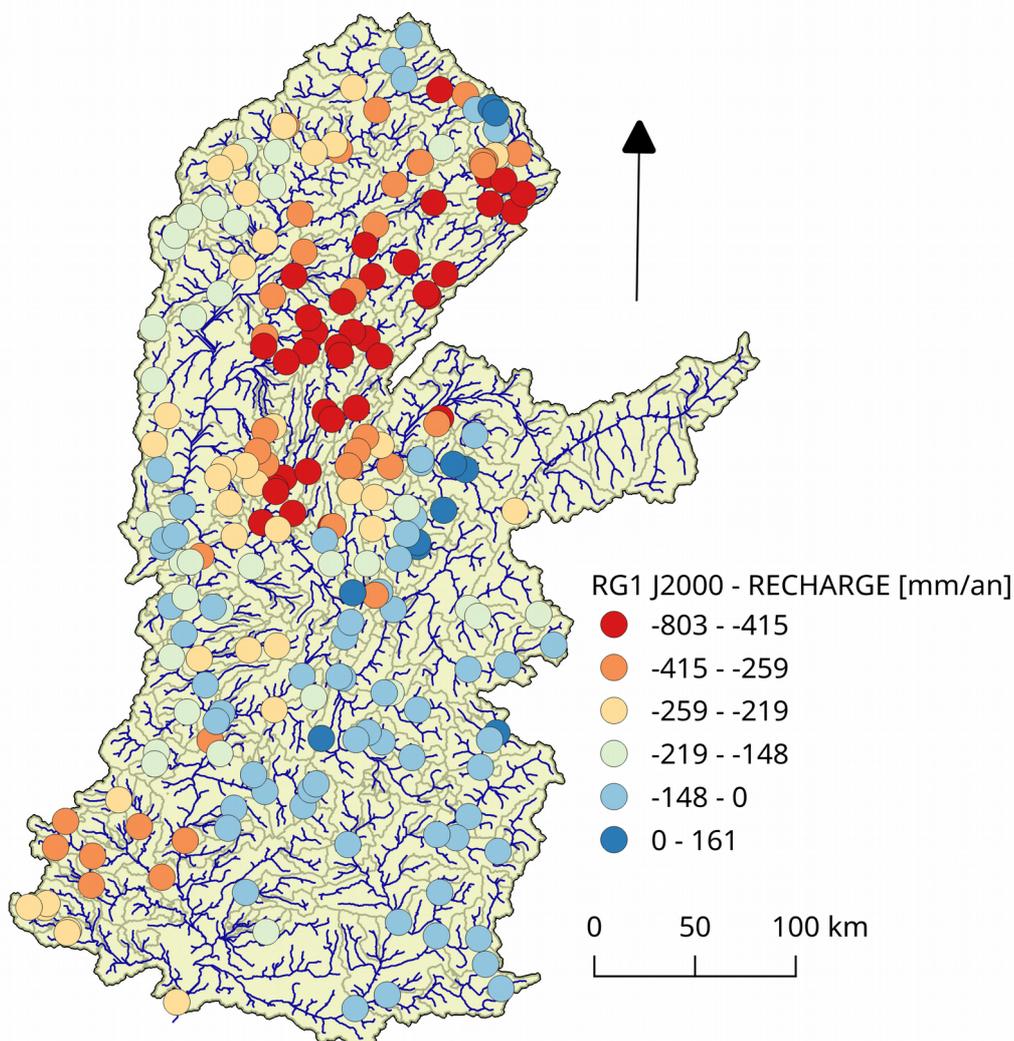


Figure 10 : Cartographie de la différence entre recharge annuelle moyenne simulée par J2000-Rhône (RG) et celle estimée dans le projet RECHARGE du BRGM.

La Figure 10 montre la répartition spatiale des différences entre recharge J2000 et recharge BRGM. Les points de surestimation de la recharge par J2000 correspondent tous à des sous-bassins alpins ou dans les Vosges. Il est possible que la couverture neigeuse sur ces bassins ait une influence sur l'estimation de la recharge. En ce qui concerne les sous-estimations, les valeurs les plus importantes sont toutes situées à l'Est du bassin versant de la Saône, dans et en bordure du massif du Jura. Ce sont tous des sous-bassins indiqués comme à dominante calcaire pour le modèle J2000 (Figure 3), et dans les faits beaucoup sont des bassins karstiques. On peut remarquer que dans cette zone, quelques bassins présentent une surestimation de la recharge : ce sont les sous-bassins sur socle toujours d'après la Figure 3. Il semble donc assez clairement que ces écarts très importants entre J2000 et le BRGM soient attribuables à la prise en compte de la géologie dans le modèle hydrologique, et en particulier celle de la classe « Calcaire » de J2000, qui ne distingue pas de façon spécifique les formations karstiques. Enfin on observe également une forte sous-estimation de la

recharge par J2000 sur les bassins cévenols, plutôt pour des géologies de type socle mais dans des contextes différents du contexte alpin.

## 4.2 Diagnostic par signatures hydrologiques sur un échantillon de sous-bassins

Ce travail a été mené en 2019 dans le cadre du stage de Abdillahi Robleh [2019] et en 2020 [Branger & McMillan 2020].

### 4.2.1 Sélection de l'échantillon

Nous avons choisi un échantillon de 45 sous-bassins versants pour mener cette analyse. Ces bassins versants sont présentés Figure 11 et Tableau 2. Ces bassins ont été sélectionnés conjointement avec le BRGM pour la qualité des mesures à bas débit aux stations exutoires. Ils couvrent des surfaces variant de 34 à plus de 7000 km<sup>2</sup>, sont répartis sur l'ensemble du territoire et échantillonnent les grandes familles de lithologies que l'on peut trouver sur le bassin (socle, karst, sédimentaire, lithologies plissées en montagne).

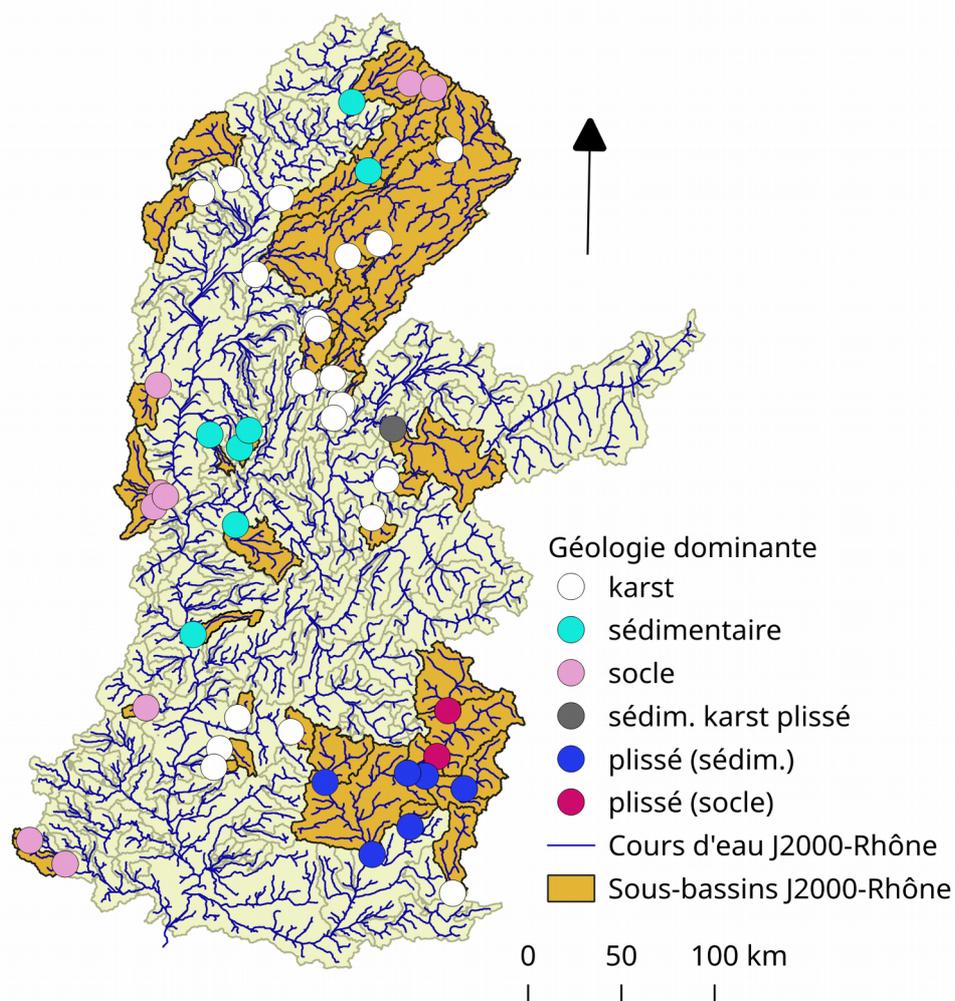


Figure 11 : Localisation et géologies dominantes des 45 sous-bassins sélectionnés pour l'application du diagnostic à l'aide de signatures hydrologiques.

Les performances du modèle J2000 pour la simulation des débits à ces stations sont également extrêmement contrastées, puisque l'on retrouve des valeurs de biais allant de -58 % - +128 % et un critère de Nash NSE entre -1.79 – 0.84. Certaines simulations sont donc très mauvaises, alors que d'autres sont excellentes.

Tableau 2 : Caractéristiques des 45 sous-bassins sélectionnés pour la réalisation du diagnostic

Code Hydro	Nom	Surface [km <sup>2</sup> ]	Lithologie_BDLISA	Biais	KGE	NSE
U0415010	Le Breuchin a la Proiseliere-et-Langle	123	socle	-0,1	0,84	0,75
U0474010	La Lanterne a Fleurey-les-Faverney	1020	sédimentaire	0,07	0,87	0,84
U1004010	L ognon a Servance [Fourguenons]	74	socle	-0,12	0,69	0,66
U1054010	L ognon a Beaumotte-aubertans	1250	sédimentaire	0,2	0,77	0,78
U1084010	L ognon a Pesmes	2038	karst	0,26	0,72	0,74
U1224010	La Tille a arceau [arcelot]	708	karst	0,39	0,59	0,75
U1324010	L ouche a Plombieres-les-Dijon	655	karst	0,25	0,73	0,75
U2356610	Le Rupt a Dung	42	karst	0,61	0,34	0,4
U2604030	La Loue à Vuillafans	478	karst	-0,55	0,27	0,33
U2615830	Le Lison a Myon	217	karst	-0,07	0,67	0,63
U2722010	Le Doubs a Neublans-abergement	7290	karst	0	0,72	0,69
U3214010	La Grosne a Jalogny [cluny]	332	socle	0,08	0,76	0,72
U4014010	La Reysouze a Montagnat	84	sédimentaire	1,71	-0,98	-1,79
U4204010	La Veyle a Lent	34	sédimentaire	-0,07	0,49	0,34
U4235010	Le Renon a Neuville-les-Dames	102	sédimentaire	0,24	0,42	0,28
U4624010	L azergues a chatillon	336	socle	0,01	0,66	0,66
U4635010	La Brevenne a Sain-Bel	219	socle	0,16	0,49	0,43
U4644010	L azergues a Lozanne	792	socle	0,26	0,61	0,59
V0222010	L arve a arthaz-Pont-Notre-Dame	1664	plissé (karst)	-0,17	0,67	0,64
V1015010	La Valserine a Lelex [Niaizet]	85	karst	0,4	0,44	0,22
V1015030	La Valserine a chezery-Forens [chezery]	119	karst	-0,09	0,57	0,5
V1214010	Le Fier a Dingy-Saint-clair	222	karst	-0,21	0,33	0,39
V1255010	Le cheran a alleves [La charniaz]	249	karst	0,02	0,63	0,53
V1774010	La Bourbre a Tignieu-Jameyzieu	703	sédimentaire	0,19	0,59	0,56
V2202010	L ain a Marigny [chalain]	650	karst	-0,01	0,72	0,64
V2206010	Le Herisson a Doucier	49	karst	0,1	0,73	0,51
V2322010	L ain a cernon [Vouglanges]	1120	karst	-0,02	0,65	0,57
V2414010	La Bienne a Saint-claude [chenavier]	216	karst	0,03	0,63	0,55
V3614010	La Galaure à Saint-Uze	232	sédimentaire	0,42	0,46	0,37
V4145210	La Glueyre a Gluiras [Tisonneche]	71	socle	-0,32	0,43	0,55
V4225010	Le Bez a chatillon-en-Diois	227	karst	-0,08	0,66	0,59
V4275010	La Gervanne a Beaufort-sur-Gervanne	108	karst	0,44	0,46	0,39
V4414010	Le Roubion a Soyans	186	karst	0,25	0,66	0,5
V4455010	Le Jabron a Souspierre	85	karst	0,15	0,73	0,57
V7115010	Le Gardon de Sainte-croix a Gabriac [Pont Ravagers]	47	karst	0,43	0,47	0,39
V7135010	Le Gardon de Saint-Jean a corbes [Roc courbe]	263	socle	-0,11	0,52	0,61
X0130010	La Durance a l argentiere-la-Bessee	517	socle	-0,32	0,56	0,51
X0310010	La Durance a embrun [La clapiere]	2170	plissé (socle)	-0,39	0,37	0,37
X0434010	L ubaye a Barcelonnette [abattoir]	549	plissé (socle)	-0,29	0,38	0,48
X0454010	L ubaye au Lauzet-ubaye [Roche Rousse]	946	plissé (sédim.)	-0,46	0,24	0,31
X0500010	La Durance a espinasses [Serre-Poncon]	3580	plissé (sédim.)	-0,42	0,31	0,32
X1034020	Le Buech à Serres [Les Chambons]	723	plissé (sédim.)	-0,24	0,47	0,55
X1130010	La Durance a oraison [escale]	6760	plissé (sédim.)	-0,29	0,43	0,43
X1225010	Le Bes a la Javie [esclançon-Peroure]	165	plissé (sédim.)	-0,59	0,1	0,09
X2202010	Le Verdon a Demandolx [castillon]	655	plissé (sédim.)	-0,34	0,38	0,49

## 4.2.2 Analyse des signatures obtenues sur les données observées

L'analyse a plus spécifiquement porté sur les 4 signatures identifiées précédemment comme plus particulièrement liées au compartiment souterrain :  $S_{BFR.mag}$  (amplitude de variation saisonnière du baseflow),  $S_{FDC.slope}$  et  $S_{FDC.Q90}$  (pente de la courbe de débits classés et quantile à 90 %),  $S_{REC.tlate}$  (constante de récession lente). Nous y avons aussi ajouté le Base Flow Index  $S_{BFI}$  plutôt comme un point de comparaison avec la littérature car c'est une signature classique même si elle est d'après notre analyse peu informative, ainsi que la recharge calculée par le BRGM présentée en 4.1.

La Figure 12 présente les valeurs de signatures calculées à partir des données observées (séries temporelles de débits) sur la période 1981-2010, et classifiées selon les différentes lithologies dominantes issues de l'expertise du BRGM sur ces bassins d'après la BD LISA.

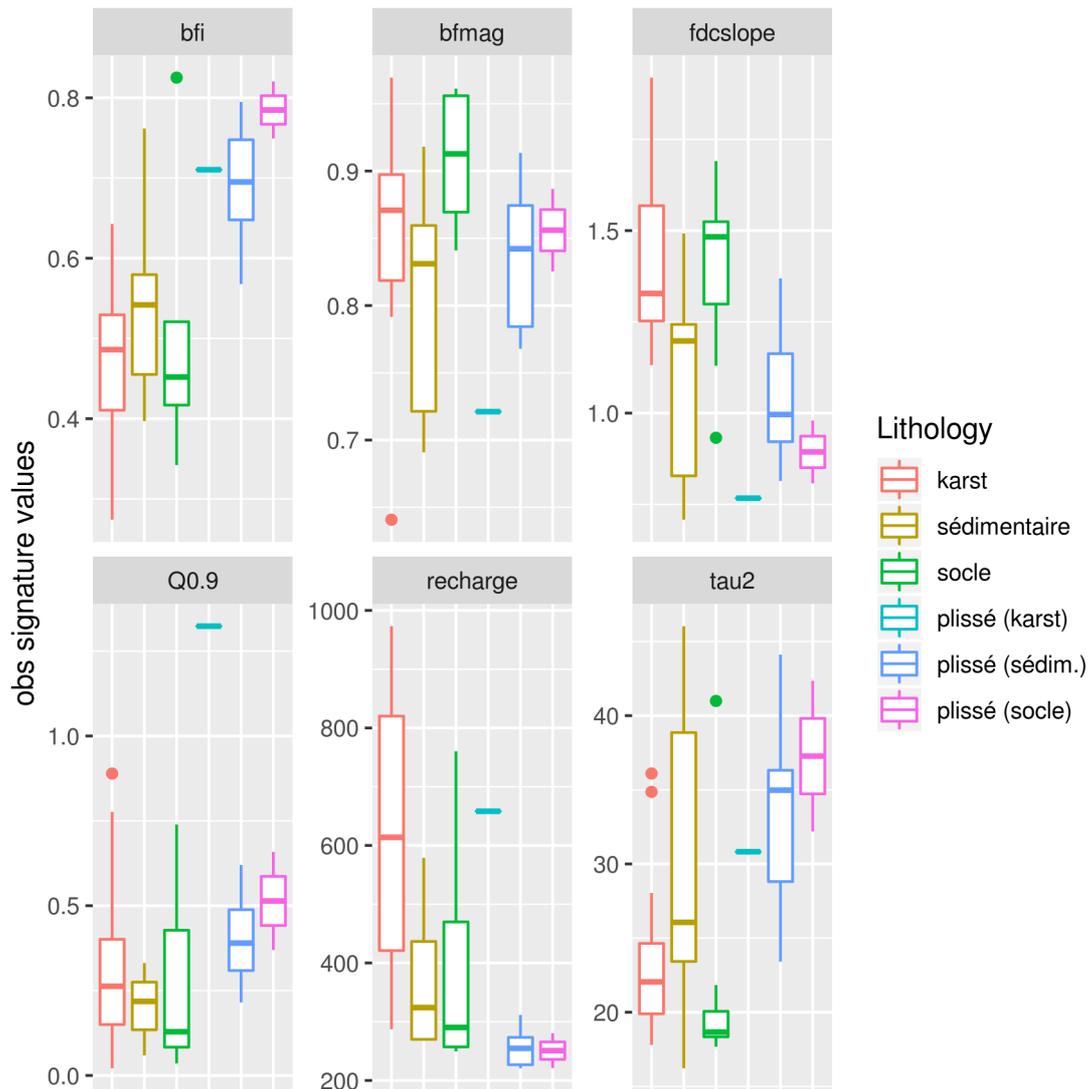


Figure 12 :Distributions des valeurs obtenues pour les 6 signatures représentatives du compartiment souterrain, calculées à partir des débits observés, et classifiées selon la géologie dominante des sous-bassins.

D'une manière générale on observe une différence assez nette entre lithologies de plaine et lithologies de montagne (plissées). Les valeurs de signatures obtenues pour les bassins de montagne ont moins de variabilité à l'intérieur d'une classe, et les classes sont également très proches les unes

des autres en moyenne. D'une manière générale, les bassins versants de montagne, quelle que soit leur lithologie dominante, présentent un  $S_{BFI}$  plus élevé, un  $S_{BFR.mag}$  plus faible, un  $S_{FDC.slope}$  plus faible aussi, un  $S_{FDC.Q90}$  plus élevé, une recharge plus faible, et un  $S_{REC.tlate}$  plus élevé que les autres bassins. On doit néanmoins remarquer le cas un peu particulier du seul bassin de la classe karst plissé, qui est le bassin de l'Arve à Arthaz, et qui présente les mêmes tendances que les autres bassins de montagne en plus extrême ( $S_{FDC.Q90}$  très élevé,  $S_{BFR.mag}$  et  $S_{FDC.slope}$  très faibles), et une recharge qui par contre ne va pas dans le même sens que les autres (recharge à hauteur de 650 mm/an contre 250 mm/an pour les autres). Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Premièrement, il s'agit également du seul bassin de régime hydrologique nivo-glaciaire de notre échantillon. L'influence de la composante nivale sur ce bassin est donc très importante, ce qui peut induire des réponses en débit différentes qui rejaillissent sur les signatures, et ne sont pas nécessairement imputables à la lithologie dominante. Deuxièmement, la recharge est elle-même dépendante du climat, en l'occurrence les données de la réanalyse SAFRAN. Il a déjà été observé lors du projet MDR que SAFRAN fournit un cumul de précipitation très important sur les Alpes du Nord, alors qu'il est assez fortement sous-estimé sur les Alpes du Sud. En conclusion, il semble donc que sur les bassins de montagne, la combinaison de la topographie et du climat soit plus importante que les distinctions entre géologies pour décrire la réponse du bassin versant.

Concernant les bassins versants de plaine, les valeurs de signatures obtenues présentent plus de variabilité. Les bassins à dominante karstique sont plutôt bien regroupés, même s'ils présentent plus de variabilité que les bassins de montagne, sauf pour la Recharge qui présente une variabilité intra-classe élevée (recharge entre 400 et 800 mm/an). Cela peut aussi être dû à l'effet du climat, très contrasté entre les bassins karstiques du Nord (Jura) et du Sud (Drôme, Vaucluse). D'une manière générale les bassins karstiques présentent un  $S_{BFR.mag}$  élevé, un  $S_{FDC.slope}$  élevé, un  $S_{FDC.Q90}$  assez faible, un  $S_{REC.tlate}$  assez faible aussi. Ces valeurs de signatures sont cohérentes entre elles et vont dans le sens d'une importante variabilité saisonnière et un fonctionnement peu tamponné, ce qui est cohérent par rapport à ce qu'on attend de bassins karstiques.

Les bassins versants de socle sont assez bien regroupés aussi, avec des valeurs de signatures indiquant des caractéristiques encore plus marquées que le karst dans le sens de la forte variabilité saisonnière et de stocks souterrains limités.

Les bassins versant sédimentaires présentent par contre une importante variabilité intra-classe, principalement au niveau de  $S_{BFR.mag}$ ,  $S_{FDC.slope}$  et  $S_{REC.tlate}$ , ce qui indique que les bassins versants de cette classe ont sans doute des fonctionnements assez différentes les uns des autres et qu'il faut probablement la redécouper pour avoir une vision plus claire de leur fonctionnement. Les valeurs médianes de ces signatures indiquent potentiellement un fonctionnement assez tamponné pour une partie de ces bassins. Toutefois, il peut apparaître surprenant que le  $S_{FDC.Q90}$  et la recharge soient plus faibles que pour les bassins karstiques.

### **4.2.3 Comparaison entre signatures observées et simulées par J2000**

Les écarts entre signatures issues des valeurs de débit observées et simulées par J2000 sont représentées Figure 13, classées encore par géologie dominante. La taille des boîtes à moustache est

une indication de la variabilité des écarts entre observations et modèle pour chaque classe de bassins. Une grande variabilité indique que la classification des lithologies faite dans J2000 (voir Figure 3) et la paramétrisation associée ne permettent pas de reproduire correctement le comportement d'une classe donnée. Une valeur médiane proche de zéro indique une paramétrisation plutôt satisfaisante pour reproduire la signature.

D'une manière générale les signatures ne sont pas très bien reproduites par le modèle. La signature la mieux reproduite (écarts de moins de 20%) est  $S_{BFR.mag}$ , cela n'est pas nécessairement très significatif étant donné qu'il s'agit d'une signature à faible variabilité (voir Figure 12). A contrario, la signature la plus mal reproduite est  $S_{FDC.Q90}$ , mais les forts écarts relatifs peuvent être expliqués par le fait que cette signature par construction a des valeurs très faibles (moins de 1 mm/jour, voir Figure 12).

La Figure 13 montre encore une différence notable entre les bassins versants de montagne et les autres. La variabilité des écarts sur les signatures est plus faible pour ces bassins, et globalement identique pour toutes les lithologies de montagne, ce qui confirme qu'un regroupement de toutes les classes de géologie de montagne peut être envisagé. Au niveau de la paramétrisation, les distributions sont plus proches de zéro que pour les bassins de plaine pour les signatures  $S_{BFI}$ ,  $S_{FDC.Q90}$  et la recharge. Cela pourrait être interprété comme une indication que la paramétrisation du compartiment souterrain est bien adaptée, mais cela reste à confirmer par une analyse plus poussée, d'autant plus que ces signatures sont également influencées par la composante nivale.

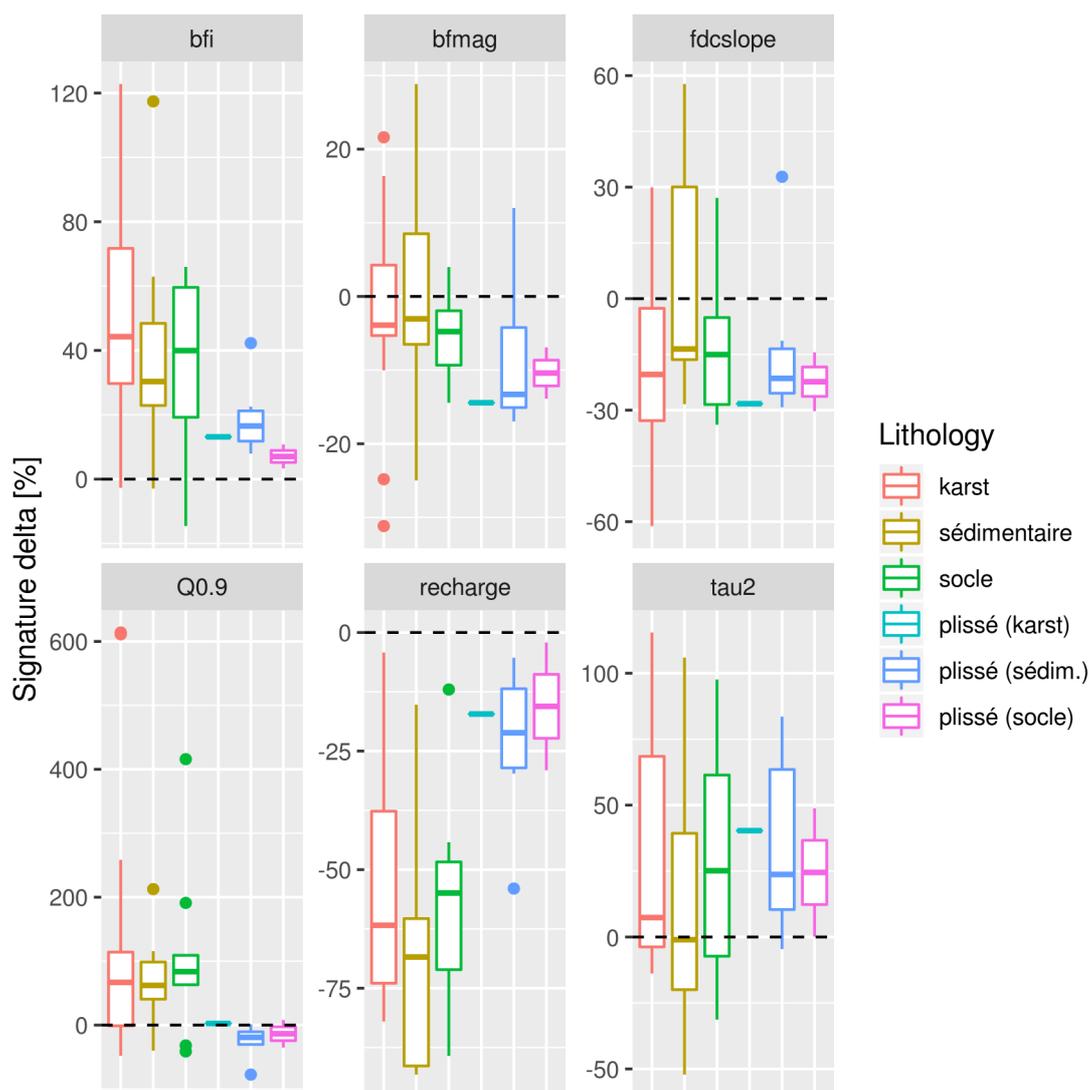


Figure 13 :Distributions des écarts entre valeur observée et simulée pour les 6 signatures représentatives du compartiment souterrain

Sur les bassins versants de plaine, on retrouve une variabilité importante des écarts relatifs pour toutes les lithologies, ce qui indique que la classification faite dans J2000-Rhône (voir Figure 3) est à reprendre. En moyenne, les valeurs de ces écarts relatifs sont assez similaires sur l'ensemble des bassins. Le modèle sous-estime l'amplitude de variation saisonnière du débit de base  $S_{BFR.mag}$ , sous-estime la pente de la courbe de débits classés  $S_{FDC.slope}$ , et surestime le quantile à 90 %  $S_{FDC.Q90}$ . Cela indique des débits globalement trop élevés durant les périodes d'étiage (ce qui va également dans le sens d'un  $S_{BFI}$  surestimé), que l'on peut attribuer à une contribution souterraine trop importante. La recharge est par contre fortement sous-estimée par le modèle, ce qui peut paraître contradictoire. Pour les bassins karstiques et surtout de socle, la surestimation du temps de récession long  $S_{REC.tlate}$  peut être interprétée dans le sens d'une contribution du compartiment souterrain trop tamponnée et manquant de variabilité.

En termes de paramètres du modèle (voir Figure 7), ces comportements peuvent être expliqués par une constante de récession du réservoir souterrain  $\tau_{RG}$  trop longue, et / ou par une taille de réservoir  $RG_{max}$  trop petite. En effet, si ce réservoir est de trop faible capacité, il est constamment saturé et ne

permet plus d'avoir une contribution souterraine variable dans le temps. Cela pourrait également expliquer le paradoxe de la sous-estimation de la recharge. En effet un réservoir RG de faible taille constamment saturé produit un débit RG1 faible. Les flux d'eau qui débordent du réservoir RG sont évacués via la composante de subsurface RD2, qui devient alors dominante bien que non prise en compte dans le calcul de la recharge simulée par le modèle. Il est normal que cela ne soit pas reflété par  $S_{BFI}$  qui est calculé à partir du débit total (somme des trois composantes).

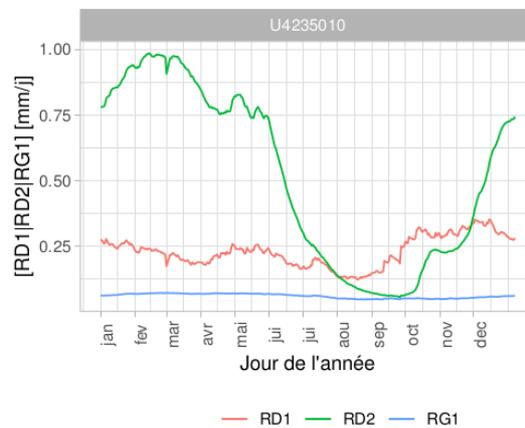


Figure 14 : Décomposition du régime des débits pour le bassin du Renon à Neuville-les-Dames. Paramétrisation du compartiment souterrain dans J2000-Rhône :  $RG_{max} = 10 \text{ mm}$  ;  $\tau_{RG} = 100 \text{ jours}$

Ce phénomène est typiquement illustré par la Figure 14. La paramétrisation du compartiment souterrain pour la lithologie dominante de ce bassin sédimentaire, avec un réservoir de très petite taille et une longue constante de temps, conduit à une contribution souterraine constante dans le temps et très faible au profit du flux de subsurface RD2.

#### 4.2.4 Bilan

L'application des signatures hydrologiques sur les 45 sous-bassins confirme leur pertinence pour décrire le comportement hydrologique dominant de ces bassins, au moins dans les grandes lignes. La comparaison entre signatures observées et simulées nous apprend que la classification des lithologies réalisée dans J2000-Rhône et présentée Figure 3 n'est pas adaptée et doit être refaite. Les recommandations que l'on peut faire après l'analyse des résultats sont notamment un regroupement des différentes lithologies de montagne, la séparation des lithologie sédimentaires karstique et non karstique (qui n'avait pas été faite de façon inexplicable), et d'identifier et séparer d'autres familles dans les lithologies sédimentaires non karstiques. La famille « socle » apparaît également assez homogène.

Des conclusions directes sont plus difficiles à tirer en ce qui concerne les valeurs de paramètre à attribuer à ces différentes classes. D'une manière générale, les signatures sont assez mal reproduites par le modèle, sans qu'on puisse voir des différences très nettes entre les lithologies (ce qui est sans doute attribuable à une mauvaise classification). Plusieurs phénomènes peuvent expliquer les écarts obtenus entre signatures observées et simulées. On a quand néanmoins pu identifier des paramétrisations problématiques comme celle du Renon (Figure 14), qui permettent aussi d'expliquer d'apparentes contradictions entre les signatures.

Concernant la paramétrisation, la prudence reste également de mise concernant les bassins de montagne. En effet l'influence nivale n'est pas négligeable sur certains de ces bassins et peut conduire à des valeurs de signatures qui ne sont pas représentatives du compartiment souterrain uniquement, mais incorporent également de l'information issue de la composante nivale. Cet aspect reste à caractériser plus précisément (l'étude du BRGM sur un échantillon de bassins en France n'a pas trouvé d'influence nivale caractéristique sur la signature Base Flow Index, mais cela reste à préciser sur nos bassins alpins et pour les autres signatures). Les conclusions concernant la classification des lithologies restent néanmoins valides, d'autant plus qu'on peut supposer une influence nivale similaire sur l'ensemble de l'échantillon. Mais il convient de rester prudent à ce stade sur la « conversion » des valeurs des signatures en valeurs de paramètres.

## **4.3 Expertise hydrogéologique**

### **4.3.1 Méthodologie**

La motivation principale pour la réalisation de cette expertise hydrogéologique est de compléter et affiner le diagnostic fait avec les signatures, qui à ce stade ne permet pas de conclure sur les valeurs des paramètres à attribuer aux différentes classes.

La méthodologie adoptée a consisté à travailler sur les mêmes 45 sous-bassins, et de réaliser pour chacun une étude de cas en ajoutant aux valeurs des signatures observées / simulées des graphiques de régime (débit observé et simulé par J2000-Rhône), la décomposition des débits comme Figure 14, la lithologie dominante dans J2000-Rhône avec les valeurs de paramètres associées. On a aussi exploité plus en détails la BDLISA, en allant pour chaque sous-bassin jusqu'à la description de la ou les entités hydrogéologiques dominantes. Ces 45 études de cas ont ensuite été discutées (regroupées par grandes familles) avec Yvan Caballero du BRGM et Laurent Cadilhac de l'Agence de l'Eau, lors d'une séance de travail le 24 janvier 2020, de manière à aboutir à des schémas de fonctionnement-types de l'hydrogéologie dans ces bassins, notamment en terme de capacité de stockage et temps de réponse. Ces schémas de fonctionnement-types sont appelés modèles perceptuels.

### **4.3.2 Modèles perceptuels de fonctionnement de la composante souterraine**

Ces discussions nous ont permis d'aboutir à l'élaboration de 7 modèles perceptuels de fonctionnement hydrogéologique, qui sont présentés Figure 15. En ce qui concerne les formations karstiques, nous avons distingué les systèmes karstiques purs (type Lison, Rupt, Gervanne) et les systèmes karstiques mixtes (karst mélangé avec une ou plusieurs autres formations), qui ont un comportement plus tamponné (cas des bassins de la Tille, du Hérisson). Pour les familles sédimentaires non karstiques, il apparaît qu'il faut distinguer les formations plutôt aquifères correspondant par exemple à des sables et molasses (cas de la Bourbre et de la Galaure), et les formations plutôt semi-perméables à imperméables correspondant à des dépôts superficiels et glaciaires, formations morainiques et roches détritiques de type marnes (bassins de la Dombes, bassin du Roubion). Pour les formations de socle, nous distinguons des comportements différents pour les bassins peu pentus pour lesquels une couche d'altérites importante peut se développer et

ainsi apporter une certaine capacité aquifère. C'est par exemple le cas des bassins situés dans les Vosges (Breuchin). Les socles pentus correspondent par exemple aux Cévennes (Gardons). Enfin pour les formations situées en montagne dans les Alpes, on considère qu'il n'y a pas vraiment de contribution souterraine, toutes lithologies confondues.

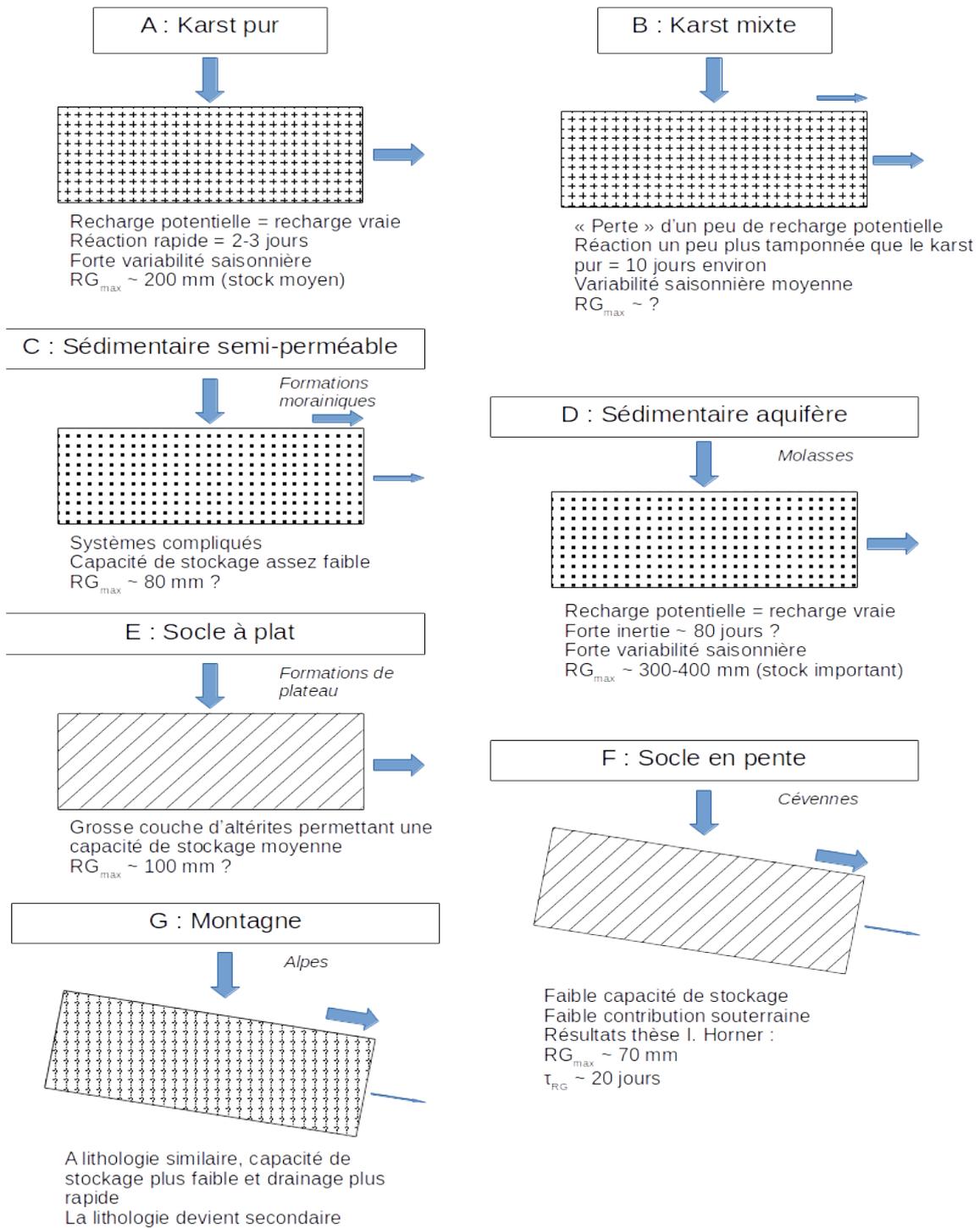


Figure 15 : Modèles perceptuels du fonctionnement hydrogéologique pour 7 familles de systèmes identifiées sur le bassin versant du Rhône

Ces distinctions sont cohérentes avec les résultats du diagnostic par signatures, notamment en ce qui concerne le regroupement possible des formations de montagne et la distinction de plusieurs

familles parmi les sédimentaires non karstiques. Les nouveautés apportées par cette expertise concernent les bassins à dominante karstique et de socle, dans lesquels à chaque fois deux types de comportements peuvent être identifiés.

Des valeurs pour les paramètres  $RG_{max}$  et  $\tau_{RG}$  sont également indiquées pour certains des modèles perceptuels (Figure 15). Ces valeurs sont plutôt à prendre de façon qualitative, et visent surtout à positionner les différents modèles perceptuels les uns par rapport aux autres. En effet, les capacités de stockage et temps de réponse indiqués sont des ordres de grandeur destinés à fixer les idées. Les seules valeurs quantitatives plus précises sont celles du modèle perceptuel F (socle pentu), pour lequel on a pu s'appuyer sur le travail de thèse d'Ivan Horner sur l'Ardèche, et la réoptimisation des paramètres qu'il a pu mener à l'issue du diagnostic par signatures [Horner et al. 2020a]. Il s'agit néanmoins d'un complément d'information important par rapport à ce qu'on a pu extraire des seules signatures.

## 4.4 Conclusions

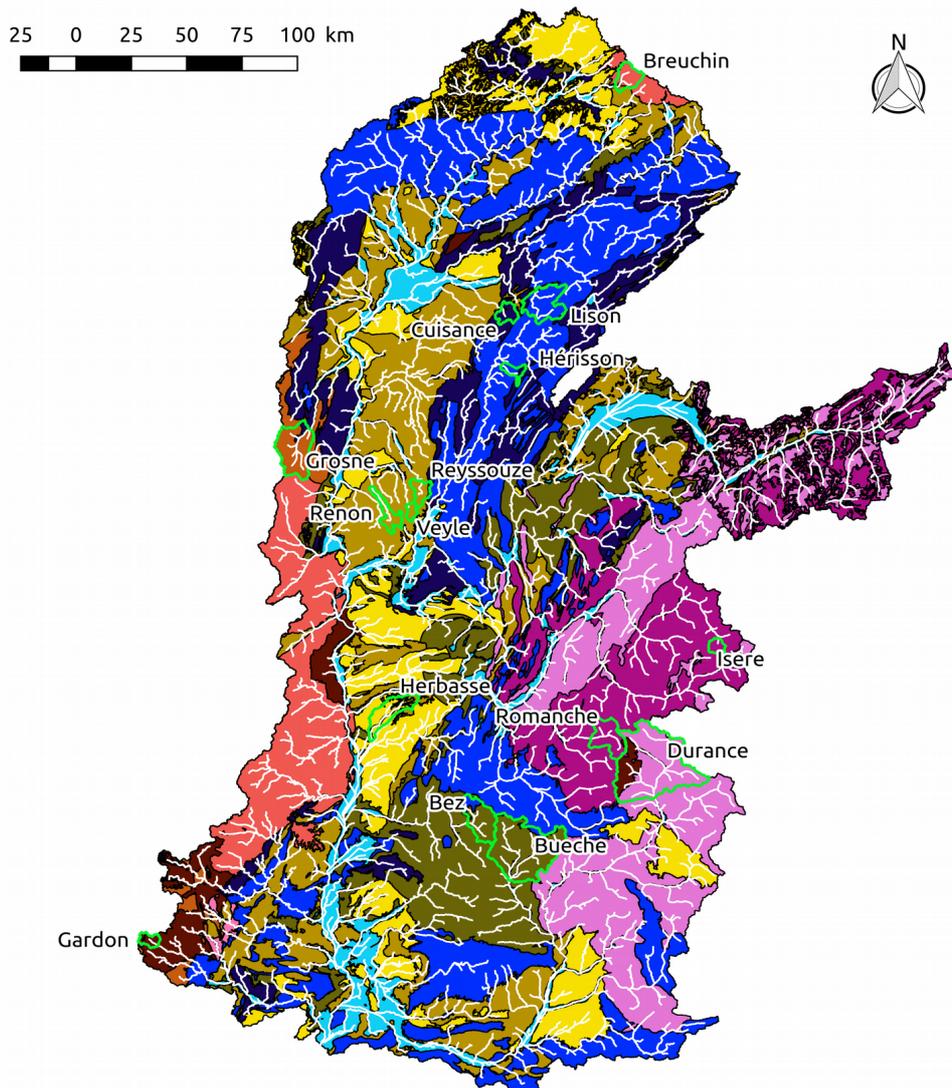
Il apparaît donc que les 3 démarches différentes pour mener le diagnostic sont cohérentes entre elles et complémentaires. La comparaison avec la recharge a apporté un premier étonnement par rapport aux résultats de J2000-Rhône concernant la contribution souterraine. L'application des signatures hydrologiques a permis d'identifier les lithologies les moins bien prises en compte dans le modèle et de donner des premiers éléments pour une reclassification. Enfin, l'expertise hydrogéologique et la construction de modèles perceptuels a permis d'aller plus loin dans les recommandations de reclassification et de disposer d'une ébauche pour les valeurs des paramètres.

## 5 Modification de J2000-Rhône

### 5.1 Reclassification de la couche « lithologie » et refonte du maillage

La couche géologique utilisée en entrée de J2000-Rhône a été entièrement remaniée sur la base des résultats précédents. Nous nous sommes appuyés sur la base de données BDLISA du BRGM, base de données ayant l'avantage de déjà synthétiser l'information géologique en vue d'une utilisation pour l'hydrologie puisque caractérisant l'hydrogéologie du sous sol. La couche BDLISA utilisée est la couche de niveau 3 (régional) d'ordre 1 (entités affleurantes). La distinction des différentes entités hydrogéologiques s'est basée sur les attributs Thème, Milieu, Nature des entités hydrogéologiques. Le thème définit le type de formation hydrogéologique (alluvial, sédimentaire, socle...). La nature distingue s'il s'agit d'une unité aquifère, semi perméable ou imperméable. Le milieu décrit la structure physique d'aquifère présent dans l'unité (poreuse, fracturée, karstique). Cette dernière caractéristique n'a été utilisée que pour distinguer les unités aquifères karstiques ou partiellement karstiques du reste des formations sédimentaires aquifères. Au final, nous avons obtenu 12 classes de lithologie qui sont présentées (Figure 16).

Par rapport aux 7 modèles perceptuels présentés Figure 15, nous retrouvons les deux classes de lithologie karstiques. Les lithologies sédimentaires non karstiques sont séparées en 3 classes contre deux dans le modèle perceptuel. Pour les socles, nous avons également conservé les 3 classes aquifère, semi-perméable et imperméable. Nous n'avons pas pris en compte le critère de pente indiqué dans les modèles perceptuels car nous avons pu obtenir cette distinction à partir de l'attribut « Nature » de la couche BDLISA. En effet, les entités hydrogéologiques des Cévennes, qui correspondent aux bassins de socle les plus pentus, sont classifiées en imperméable, là où les celles des Vosges, plus plates, sont classifiées en aquifère. Nous avons enfin distingué 3 classes de Montagne, en ayant bien à l'esprit que ces trois classes peuvent aussi être paramétrées de façon identique pour ne revenir qu'à une seule classe. La seule classe qui n'apparaît pas du tout dans les modèles perceptuels et qui a été ajoutée ici est la classe « Alluviale aquifère ». Cette dernière classe n'est cependant dominante pour aucun des 45 sous-bassins. Elle se retrouve en effet dans les corridors alluviaux des grands fleuves (Saône, Rhône) et au niveau du Léman et ne représente, pour un bassin versant, que quelques HRUs se connectant au réseau hydrographique.



### Légende

□ BVs utilisés pour l'analyse

#### Géologie

■ Alluviale, aquifère

■ Sédimentaire karstique, aquifère

■ Sédimentaire partiellement karstifié, aquifère

■ Sédimentaire non karstique, aquifère

■ Sédimentaire non karstique, semi-perméable

■ Sédimentaire non karstique, imperméable

■ Socle aquifère

■ Socle semi-perméable

■ Socle imperméable

■ Montagne, aquifère

■ Montagne, semi-perméable

■ Montagne, imperméable

Figure 16: Nouvelle classification de la couche lithologie pour J2000 Rhône

La prise en compte de cette classification géologique implique de devoir délimiter de nouvelles HRUs pour J2000-Rhône. Nous avons donc dû relancer le logiciel de génération du maillage HRU-delin. Nous en avons donc profité pour améliorer aussi la résolution du modèle numérique de terrain (MNT). Nous avons utilisé un MNT à 30m basé sur les données américaines SRTM contre 200m dans l'ancienne version de J2000-Rhône. Cela doit nous permettre d'avoir dans le modèle un réseau de rivières plus précis, notamment dans certaines zones à faible gradient topographique (val de Saône par exemple) pour lesquelles nous avons remarqué des inexactitudes dans le chevelu hydrographique dans l'ancienne version. Une précision accrue du MNT permet en outre un

découpage en HRUs plus fin et, in fine, un découpage plus représentatif de l'hétérogénéité des différentes couches (occupation du sols, type de sols, géologie, ...).

La couche de stations hydrométriques a également été enrichie pour inclure de nouvelles stations hydrométriques dont la période d'enregistrements est suffisamment longue pour permettre des études statistiques hydrologiques approfondies. Nous avons par contre laissé inchangées les couches pédologique et d'occupation des sols.

Au final, la nouvelle version de J2000-Rhône comprend 33000 HRUs (contre 12000 dans la précédente version).

## 5.2 Stratégie de reparamétrisation

La seconde étape a consisté à définir une stratégie de paramétrisation pour déterminer les caractéristiques des réservoirs souterrains de J2000-Rhône : taille du réservoir  $RG_{max}$  et temps de réponse caractéristique  $\tau_{RG}$ . Nous avons développé une stratégie s'appuyant sur les quatre signatures hydrologiques représentatives du compartiment souterrain déjà utilisées pour le diagnostic : la pente de la courbe de débits classés  $S_{FDC.slope}$ , le dernier décile de cette courbe de débits classés  $S_{FDC.Q90}$ , l'amplitude de variation du base flow  $S_{BFR.mag}$  et la constante caractéristique des récessions longues  $S_{REC.tlate}$ .

Tableau 3: Caractéristiques des différents bassins versants types utilisés pour l'analyse des signatures

Bassin Versant	Géologie Pple	Géologie Scaire
AzerguesChatillon	7 (92%)	6 (8%)
BezChatillonDiois	6 (80%)	2 (20%)
Breuchin	7 (92%)	5 (5%) & 1 (2%)
BuecheChambons	6 (96%)	2 (3%) & 1 (1%)
DuranceArgentiere	11 (81%)	9 (18%) & 12 (1%)
Galaure	5 (50%)	4 (40%) & 1 (10%)
GardonSteCroix	9	X
Gervanne	2 (63%)	6 (37%)
Herbasse	4 (85%)	5 (15%)
Herisson	2 (60%)	3 (40%)
Lison	2 (93%)	3 (7%)
OgnonServance	7	X
Renon	5	X
Reyssouze	5 (93%)	2 (7%)
Veyle	5	X
GrosneJalogny	8 (94%)	3 (6%)
Ouches Trouhans	2 (81%)	1 (7.6%) & 5 (10.8%)
IsereValdsere	12	X
RomancheMizoen	12 (97%)	9 (3%)
CuisanceMesnay	3	X
SavoireuseBelfort	7 (37%) & 5 (37%)	1 (26%)

Pour cela nous avons tout d'abord sélectionné un nouvel échantillon de 14 sous-bassins versants, correspondant à chaque fois à une géologie fortement dominante d'après notre nouvelle classification (Figure 16). Les caractéristiques de ces bassins versants sont présentées dans le Tableau 3.

Pour chacun de ces sous-bassins, nous avons réalisé une étude de sensibilité des quatre signatures avec 186 simulations permettant d'explorer systématiquement des intervalles de 1 à 100 jours pour  $\tau_{RG}$  et de 10 à 1000 mm pour  $RG_{max}$ . Les signatures simulées pour chacune de ces paramétrisations sont alors comparées aux signatures observées. La Figure 17 présente un exemple des résultats obtenus pour le bassin versant du Hérissou à Doucier (classe géologique 2 : karst aquifère).

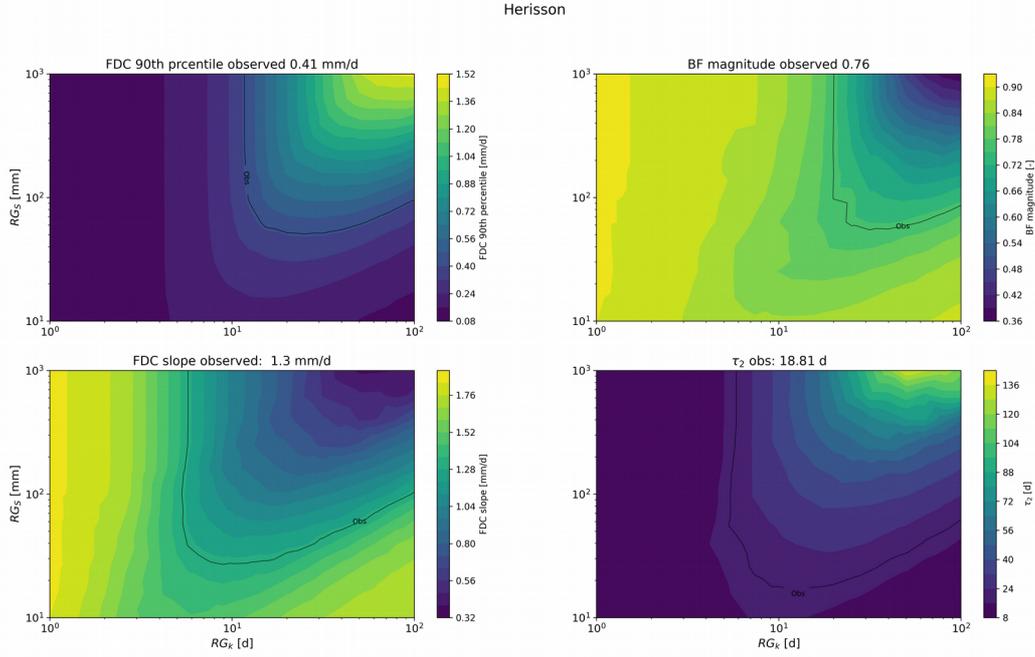


Figure 17: Surfaces de réponses obtenues pour chacune des signatures en faisant varier les paramètres  $\tau_{RG}$  (abscisse) et  $RG_{max}$  de la composante souterraine pour le bassin du Hérissou à Doucier (V2206010). La valeur de signature obtenue à partir des données observées est représentée en trait noir.

Une fois cette étude de sensibilité réalisée, plusieurs fonctions objectifs ont été définies pour quantifier la capacité de ces différentes modélisations à rendre compte des signatures observées. Ces différentes fonctions objectifs portent sur une signature hydrologique spécifique ou sur une combinaison de l'ensemble des signatures hydrologiques. 5 fonctions objectifs ont donc été utilisées au total :

$$\Phi_1(\tau_{RG}, RG_{max}) = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left| \widehat{FDC}_{slope}^{obs} - \widehat{FDC}_{slope}^{mod} \right| + \left| \widehat{FDC}_{90}^{obs} - \widehat{FDC}_{90}^{mod} \right| + \left| \widehat{BF}_{mag}^{obs} - \widehat{BF}_{mag}^{mod} \right| + \left| \widehat{\tau}_{late}^{obs} - \widehat{\tau}_{late}^{mod} \right|,$$

$$\Phi_2(\tau_{RG}, RG_{max}) = 1 - \left| \widehat{FDC}_{slope}^{obs} - \widehat{FDC}_{slope}^{mod} \right|,$$

$$\Phi_3(\tau_{RG}, RG_{max}) = 1 - \left| \widehat{FDC}_{90}^{obs} - \widehat{FDC}_{90}^{mod} \right|,$$

$$\Phi_4(\tau_{RG}, RG_{max}) = 1 - \left| \widehat{BF}_{mag}^{obs} - \widehat{BF}_{mag}^{mod} \right|,$$

$$\Phi_5(\tau_{RG}, RG_{max}) = 1 - \left| \widehat{\tau}_{late}^{obs} - \widehat{\tau}_{late}^{mod} \right|,$$

où l'opérateur  $\widehat{\phantom{x}}$  définit la variable centrée réduite pour les données modélisées, la même transformation s'appliquant aux données observées.

Ces fonctions objectives permettent d'identifier différents sets optimaux de paramètres  $\tau_{RG}$  et  $RG_{max}$  pour chacune des fonctions  $\Phi$ . Ces paramètres optimaux sont obtenus en prenant l'ensemble des meilleurs modèles (ie appartenant au premier décile des plus hautes valeurs de  $\Phi$ ) et en calculant leur médiane géométrique. A titre d'illustration, pour la fonction objectif  $\Phi_1$  et pour le bassin versant du Hérisson (karst aquifère), le meilleur modèle est représenté en rouge sur la Figure 18) et le set de meilleurs modèles (i.e. les 19 meilleurs modèles) sont matérialisés par les points noirs entourés de la ligne de contour blanche, Figure 18). A partir des 5 différentes estimations obtenues pour chacune des fonctions  $\Phi$ , nous avons choisi un set moyen, permettant de reproduire au mieux les différentes signatures hydrologiques.

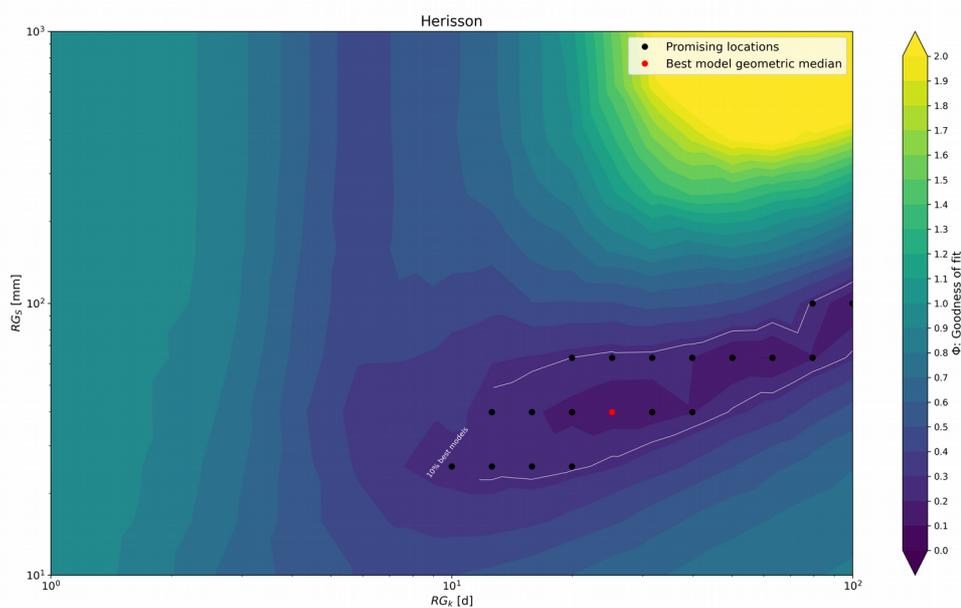


Figure 18: Valeurs de la fonction objectif  $\Phi$  et sélection des meilleurs modèles (rouge : le meilleur modèle ; noir : les 19 meilleurs modèles) pour la représentation des signatures. Exemple du bassin du Hérisson à Doucier (V2206010).

Tableau 4: Valeur de paramètres obtenues pour le compartiment souterrain de J2000 à l'issue de la phase d'optimisation

ClasseGeol	Name	$\tau_{RG}$ (jours)	$RG_{max}$ (mm)
1	Alluviale, aquifère	10	410
2	Sédimentaire karstique, aquifère	10	300
3	Sédimentaire partiellement karstifié, aquifère	30	200
4	Sédimentaire non karstique, aquifère	50	410
5	Sédimentaire non karstique, semi perméable	40	170
6	Sédimentaire, imperméable	20	160
7	Socle ou volcanique, aquifère	20	250
8	Socle, semi-perméable	6	390
9	Socle imperméable	25	385
10	Montagne, aquifère	35	280
11	Montagne, semi-perméable	35	280
12	Montagne, imperméable	35	280

Des valeurs de paramètres optimaux sont ainsi obtenues pour chacun des sous bassins versants considérés. Ces paramètres ont ensuite été inversés en utilisant les proportions des différentes classes géologiques dans les sous-bassins (Tableau 3) pour obtenir des valeurs de paramètre-types par classe géologique. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 4. Seule la classe 1 (alluviale, aquifère) n'a pas pu être optimisée faute encore une fois de sous-bassin dans lequel elle est clairement dominante. Nous avons donc conservé pour cette classe des valeurs de paramètres a priori. Si l'on compare ces valeurs de paramètres aux éléments issus des modèles perceptuels Figure 15, on remarque que les valeurs obtenues sont globalement plus élevées que celles auxquelles on pouvait s'attendre, notamment au niveau des tailles de réservoir. La hiérarchie attendue est néanmoins globalement à peu près bien respectée, les lithologies karstiques aquifères possédant les temps de réponse les plus courts, alors que les lithologies sédimentaires aquifères possèdent les temps de réponse les plus longs. Les lithologies de socle ont des temps de réponse intermédiaires.

On peut néanmoins s'étonner de la taille de réservoir importante trouvée pour la classe Sédimentaire imperméable (type bassin du Buech, zones de marnes), qui si elle est la plus faible par rapport aux autres lithologies, reste néanmoins importante pour une zone censée ne quasiment pas avoir de composante souterraine d'après l'expertise hydrogéologique. Nous notons également une contradiction pour la classe socle imperméable (Cévennes / Ardèche) avec les résultats de Horner (2020) qui a abouti à une taille de réservoir 4 fois plus faible (70 mm contre 385 mm à l'issue de l'optimisation). Enfin, les résultats obtenus pour les classes de Montagne confirment que l'on peut paramétrer ces classes de la même façon (et ainsi simplifier le modèle). On peut encore s'étonner de la taille importante du réservoir souterrain (280 mm), mais il faut rappeler que l'optimisation des paramètres sur les signatures dans les bassins de montagne se heurte à l'influence forte du compartiment neige, qui donne vraisemblablement des valeurs de signatures biaisées.

## **5.3 Validation des modifications**

### **5.3.1 Vérification sur les 45 stations du diagnostic**

Une simulation de la nouvelle version de J2000-Rhône a été relancée avec le même forçage climatique (SAFRAN) et sur la même période (1980-2010), ce qui permet de comparer les résultats avec ceux de l'ancienne version.

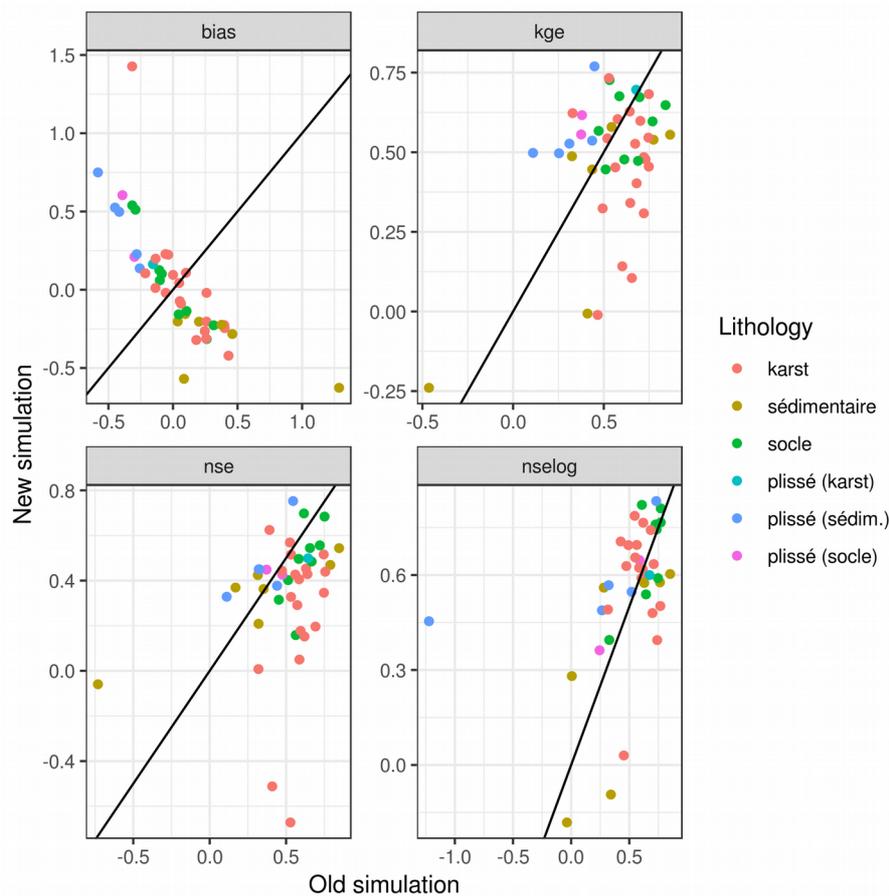


Figure 19: Valeurs des critères de performance pour l'ancienne et la nouvelle version de J2000-Rhône sur les 45 bassins du diagnostic

La Figure 19 présente la comparaison des performances pour 4 critères (Biais, KGE, NSE, NSElog). Pour le biais, un point situé autour de l'horizontale à 0 signifie que le biais de simulation a été réduit par le passage à la nouvelle version. Respectivement, un point situé autour de la verticale passant par 0 signifie que le biais a été augmenté. Pour les 3 critères KGE, NSE et NSElog, dont les valeurs sont comprises entre  $-\infty$  et 1 (1 signifiant une simulation parfaite), un point situé à gauche de la bissectrice signifie que la valeur du critère a été améliorée par rapport à l'ancienne simulation. Respectivement, un point situé à droite signifie que la valeur du critère a été dégradée.

On constate donc qu'il n'y a pas d'amélioration significative au niveau du biais, qui reste en général au même niveau que pour l'ancienne simulation. Par contre on constate un changement de signe du biais pour la majorité des stations. Pour les sous-bassins de socle, le biais est passé de positif à négatif (passage d'une sur-estimation à une sous-estimation des débits). Pour les sous-bassins de montagne c'est le contraire, ce qui n'est pas nécessairement une bonne nouvelle dans la mesure où nous savons que le forçage SAFRAN possède un biais négatif sur les zones de montagne. On peut donc suspecter une compensation du biais des forçages par la paramétrisation de la géologie. Au niveau des critères de performance, on constate une amélioration pour les bassins de montagne (mais pas forcément pour les bonnes raisons, voir biais), et une dégradation pour la plupart des autres bassins. La dégradation est surtout sensible pour le NSE qui met l'accent sur les hautes valeurs de débit, et n'était pas forcément ciblé par notre travail sur la composante souterraine de l'écoulement. Il ne faut pas oublier que les critères de performance sont calculés sur le débit total,

qui intègre non seulement la composante souterraine, mais aussi les autres composantes de surface qui n'ont pas nécessairement été optimisées par rapport à l'ancienne version de J2000-Rhône. Le NSElog, qui met plutôt l'accent sur les bas débits, fait état d'une amélioration pour beaucoup de bassins, y compris en plaine, ce qui est plutôt un bon signe.

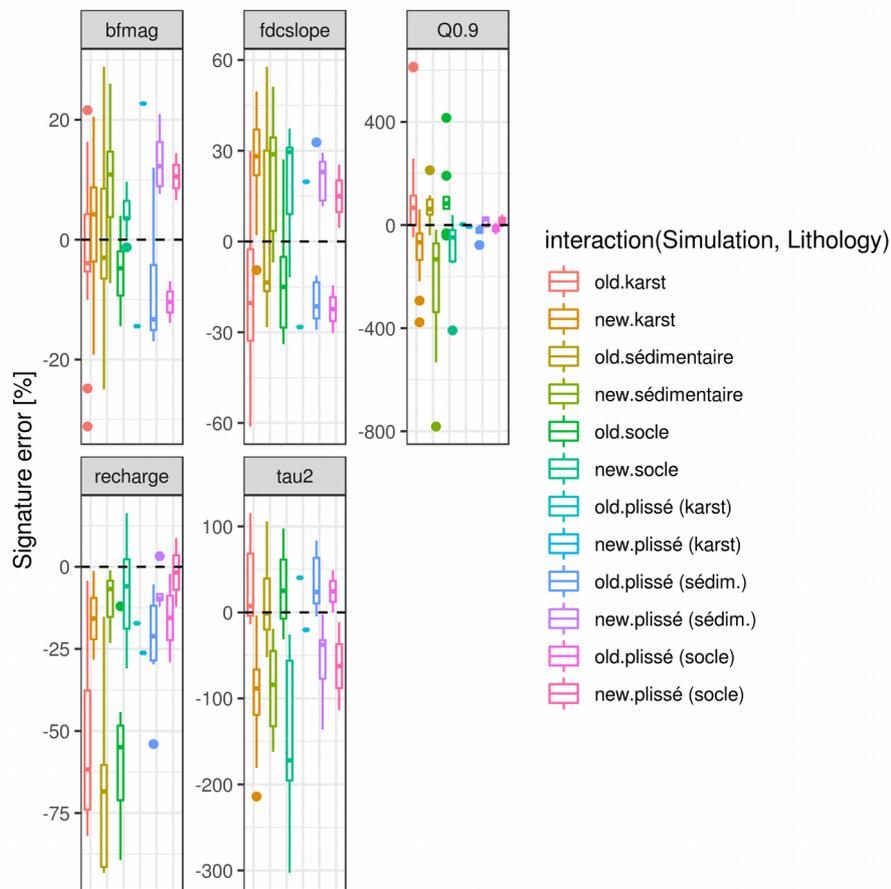


Figure 20: Comparaison des erreurs sur la reproduction des signatures hydrologiques pour l'ancienne et la nouvelle version de J2000-Rhône

Pour compléter cette analyse, la Figure 20 présente la comparaison des erreurs des valeurs de signatures hydrologiques pour l'ancienne et la nouvelle simulation, sous forme de boîtes à moustaches rassemblant les statistiques pour chaque grande famille de lithologies. Nous avons travaillé avec les 4 signatures identifiées comme représentatives du compartiment souterrain, ainsi qu'avec la recharge. Une boîte plus petite signifie une moins grande variabilité à l'intérieur de la famille, et donne des indications sur la pertinence de notre nouvelle classification de la lithologie. Une boîte plus proche de la ligne horizontale à zéro signifie que l'écart entre signature observée et simulée est plus faible.

On obtient d'une manière générale des boîtes plus petites pour les sous-bassins karstiques. Pour les bassins sédimentaires non karstiques et de socle, c'est moins net mais nous avons vu que ces deux classes doivent elle-mêmes être redécoupées. Les boîtes sont également petites pour les bassins de montagne, ce qui était déjà le cas dans l'ancienne simulation. Au niveau de la position par rapport au zéro, nous constatons plutôt une dégradation pour l'ensemble des signatures, sauf pour la recharge qui se trouve beaucoup moins sous-estimée. La signature qui est la plus dégradée est la

constante de récession lente  $S_{REC.tlate}$  qui passe de légèrement sur-estimée à fortement sous-estimée pour tous les bassins. On observe également un changement de signe des erreurs pour les signatures  $S_{FDC.slope}$ ,  $S_{FDC.Q90}$ , et  $S_{BFR.mag}$  : La nouvelle simulation a tendance à surestimer l'amplitude de variation saisonnière, la pente de la courbe de débit classés, et à sous-estimer le Q90. Tous ces indicateurs vont dans le même sens qui est celui d'un compartiment souterrain qui devient un peu trop dynamique et contrasté.

Cependant il ne s'agit pas non plus de tirer des conclusions catastrophistes à ce stade. La Figure 21 présente l'exemple de la station du Breuchin à La Poiselière-et-Langle (bassin de socle dans les Vosges). Pour cette station la nouvelle simulation dégrade légèrement tous les indicateurs de performance, sauf le NSElog. Les signatures, de leur côté, sont toutes améliorées, sauf la constante de récession lente. La Figure 21 montre que la composante souterraine simulée dans la nouvelle version de J2000-Rhône ressemble plus à ce qu'on attendrait (même si elle est légèrement surestimée).

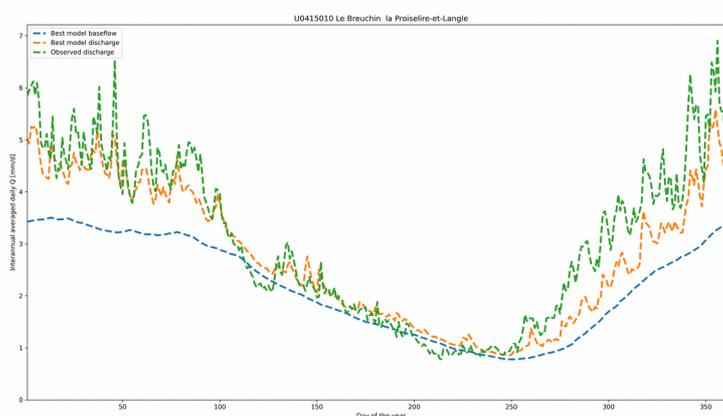


Figure 21: Régime hydrologique (observé / simulé) et composante souterraine RG pour la station du Breuchin à La Poiselière-et-Langle

En conclusion, les améliorations apportées ne se voient pas nécessairement sur les critères de performance. Cependant, le fait que les signatures ne soient pas significativement améliorées nous demande à ce stade de la prudence et des investigations complémentaires.

### 5.3.2 Résultats sur l'ensemble du bassin du Rhône (217 stations)

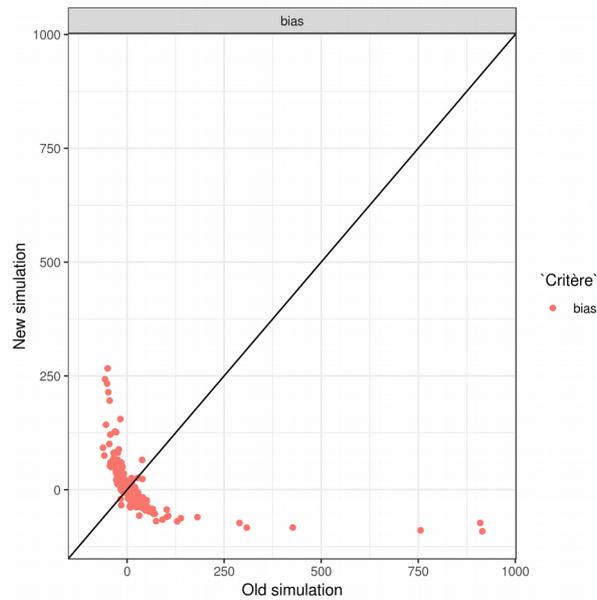


Figure 22: Comparaison des valeurs de biais sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle

Etant donné les résultats sur les 45 bassins du diagnostic, les résultats sur l'ensemble du bassin du Rhône sont présentés à titre illustratif. Nous n'avons repris que les valeurs des critères de performance. La Figure 22 présente le biais ; les Figures 23 à 25 présentent les autres critères sous forme de cartes.

## KGE

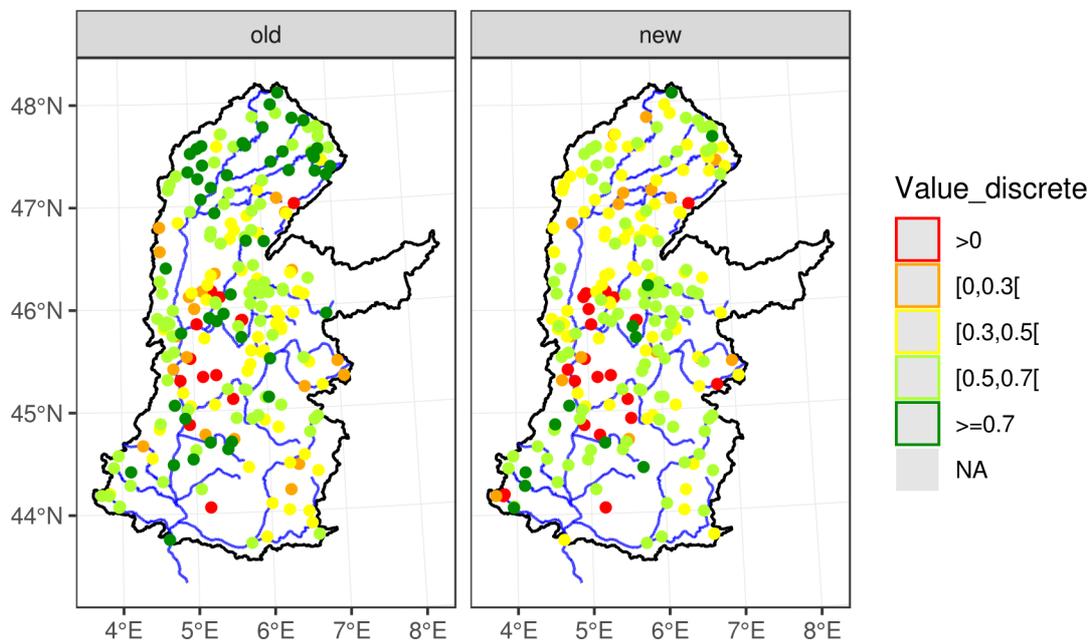


Figure 23: Comparaison des valeurs du KGE sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle

On constate que d'une manière générale la nouvelle simulation permet de réduire les biais les plus extrêmes. Par contre, de la même manière que sur les 45 bassins du diagnostic, on constate une dégradation généralisée du KGE, NSE et NSElog. Cette dégradation est surtout marquée pour le NSE, ainsi que sur le sous-bassin de la Saône. On peut néanmoins remarquer des améliorations manifestes, notamment sur les Cévennes.

## NSE

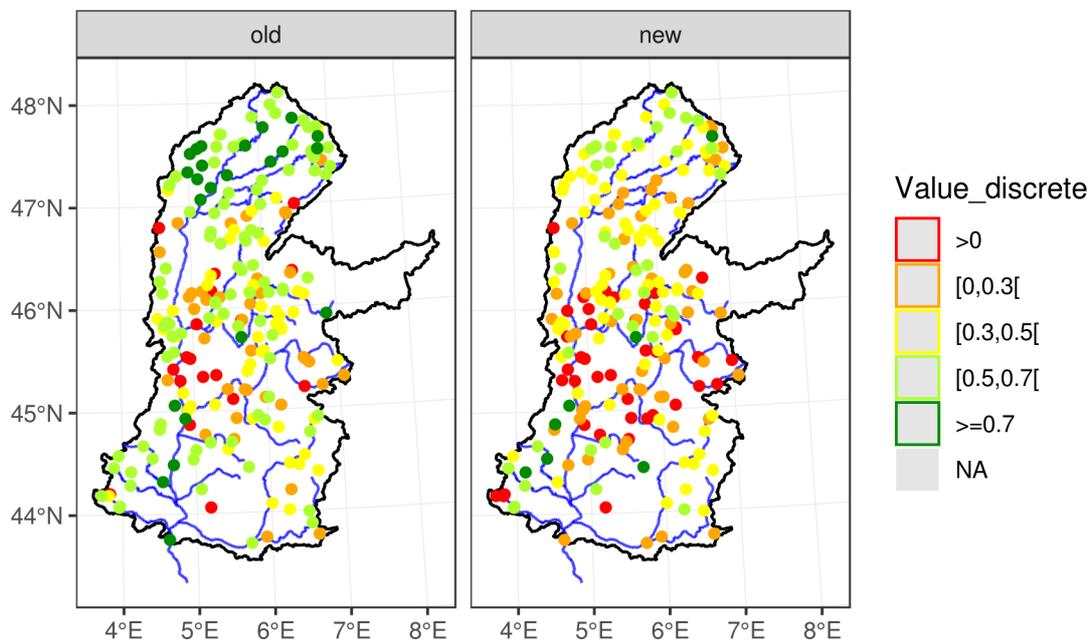


Figure 24: Comparaison des valeurs du NSE sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle

Comme nous l'avons vu, il n'est pas possible de tirer des conclusions en s'appuyant uniquement sur les critères de performance. Cependant la dégradation massive et généralisée de ces critères indique néanmoins qu'encore un peu de travail est nécessaire pour parvenir à exploiter les résultats du diagnostic et pour stabiliser une stratégie de reparamétrisation efficace.

## NSELOG

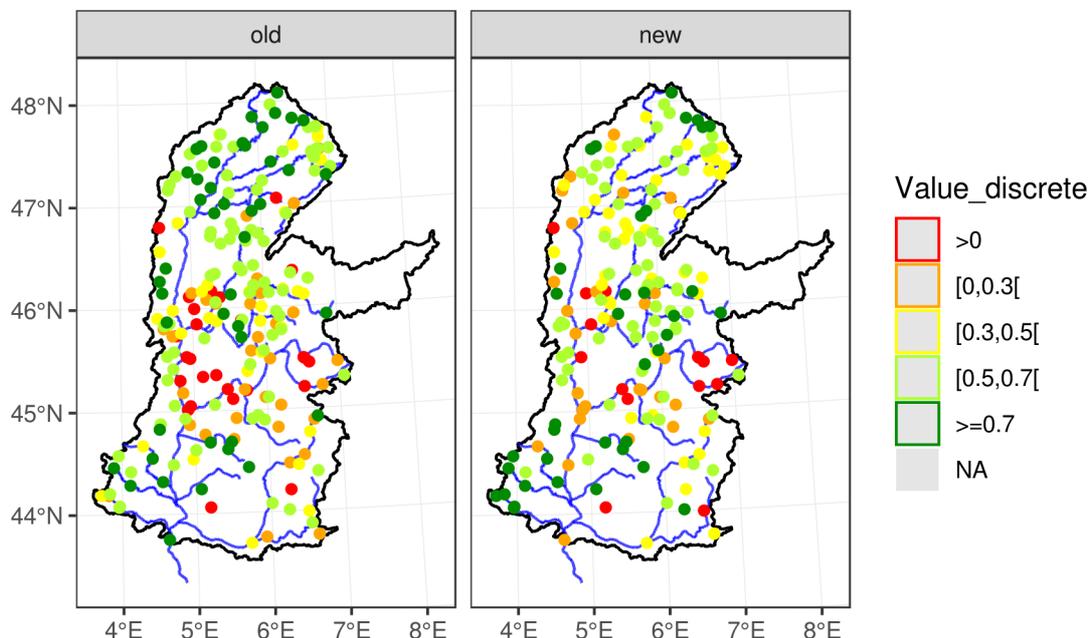


Figure 25: Comparaison des valeurs du NSElog sur les 217 stations de contrôle du bassin du Rhône pour l'ancienne et la nouvelle version du modèle

## 5.4 Discussion

Nous avons donc vu que notre stratégie d'optimisation des paramètres demande encore quelques ajustements pour permettre une amélioration significative du modèle J2000-Rhône.

Les incohérences entre les résultats de notre optimisation avec notamment celle menée par Ivan Horner dans sa thèse ont déjà été remarquées. Sur la base des signatures, Horner a réussi à réoptimiser les paramètres de J2000 sur le bassin de l'Ardèche avec plus de succès. Sa démarche n'est malheureusement pas directement transposable à J2000-Rhône et au projet MDR-Eaux Souterraines, pour les raisons suivantes :

- il a réalisé une optimisation globale sur l'ensemble des compartiments du modèle et en utilisant la totalité du jeu de signatures, alors que nous nous sommes focalisés uniquement sur le compartiment souterrain. De cette façon, il a pu tester un éventail de jeux de paramètres plus large que celui auquel nous avons accès ;

- son approche a été essentiellement manuelle, par essai-erreurs. Si sa démarche générale a été bien documentée et est reproductible, le détail de l'optimisation dépend évidemment des sous-bassins versants concernés (au nombre de 4 sur l'Ardèche). Sur un bassin de très grande taille comme le bassin du Rhône, une approche manuelle d'optimisation par essai-erreur n'est pas envisageable. Il faut trouver une stratégie d'automatisation qui permette d'appliquer la même démarche générale. C'est ce que nous avons tenté de faire avec l'approche décrite précédemment.

Un certain nombre de pistes doivent maintenant être explorées pour raffiner notre stratégie d'optimisation et aboutir à un jeu de paramètres finalisé pour J2000-Rhône sur la base des signatures hydrologiques. Notamment :

- on pourra prendre en compte le biais dû au partitionnement entre évapotranspiration et débit, ainsi que son influence sur les signatures du compartiment souterrain ;
- on pourra revisiter la définition des fonctions objectifs en s'appuyant plus finement sur les résultats de l'analyse de sensibilité et les liens signatures paramètres. Par exemple, les signatures  $S_{FDC.Q90}$  et  $S_{BFR.mag}$  sont plus spécifiquement liées au paramètre  $\tau_{RG}$ , ou encore la signature  $S_{REC.tlate}$  est liée à la fois aux paramètres du compartiment souterrain et à la paramétrisation de la partition entre percolation et débit de subsurface RD2 (voir Figure 7) ;
- en conséquence, il sera aussi souhaitable élargir aussi les paramètres considérés au compartiment sol (notamment capacité de stockage du sol), pour les signatures qui s'y rapportent ;
- on pourra également imposer des contraintes issues de l'expertise et des modèles perceptuels pour l'optimisation. Par exemple, pour les lithologies pour lesquelles on ne veut pas voir apparaître de composante souterraine (montagne, socle imperméable), on pourra plafonner la taille maximale du réservoir  $RG_{max}$ . Il faudra dans ce cas pouvoir compenser par un relâchement des contraintes du niveau des compartiments supérieurs (sols), en cohérence avec l'item précédent ;
- on peut envisager une modification structurelle du modèle pour faciliter cela, à savoir une spatialisation du paramètre LatVertDist (qui gouverne la partition entre percolation et interflow, voir Figure 1) en fonction de la lithologie ;
- il serait peut-être plus prudent d'exclure les bassins versants de montagne de l'optimisation, en attendant d'y voir plus clair concernant l'influence de la composante nivale sur les signatures.

## 6 Conclusion et perspectives

En conclusion, le travail réalisé lors du projet « MDR Eaux Souterraines » avec la collaboration du BRGM nous a permis de construire et mettre en œuvre une stratégie de diagnostic de la composante souterraine d'un modèle hydrologique distribué. Cette stratégie a fait l'objet de développements méthodologiques importants sur les signatures hydrologiques dans le cadre de la thèse d'Ivan Horner.

L'application de cette méthodologie au bassin versant du Rhône nous a permis de stabiliser le diagnostic et d'établir des recommandations pour une nouvelle classification de la lithologie prise en compte dans J2000-Rhône. La paramétrisation du modèle s'avère par contre plus difficile. La méthode que nous avons développée pour déterminer les valeurs de paramètres à partir des signatures hydrologiques n'est à ce stade pas totalement satisfaisante, comme le montrent les résultats obtenus sur nos 45 sous-bassins tests. Plusieurs pistes sont à explorer pour améliorer cela.

Avant de retravailler sur l'optimisation, il conviendra d'apporter au modèle quelques petites corrections issues de la refonte du maillage, et qui ont pu être maintenant totalement identifiées, notamment au niveau de la paramétrisation du routage dans le réseau hydrographique (rugosité, paramètre d'accélération), de l'interpolation des pluies, et de la prise en compte des surfaces imperméables.

Concernant la paramétrisation du compartiment souterrain, la première piste est d'approfondir la technique d'optimisation et de mettre en regard de façon plus systématique ces résultats avec les modèles perceptuels issus de l'expertise hydrogéologique. La seconde piste est d'étudier plus en détails les informations apportées par les différentes signatures pour savoir dans quelle mesure on peut les utiliser comme fonctions objectif pour une optimisation. En ce qui concerne la troisième piste, nous avons vu par exemple que pour les zones de montagne, les signatures de la composante souterraine intègrent aussi la composante neige, ce qui peut conduire à des valeurs de paramètres erronées. Une approche un peu plus globale de l'ensemble des signatures et des composantes est donc à explorer, la manière de la démarche de Horner et al. (2020), même si elle est plus difficilement automatisable. Pour les bassins versants de montagne, il apparaît également essentiel d'introduire des signatures spécifiques permettant de séparer l'influence de la composante nivale [Horner, Branger, McMillan, Vannier & Braud 2020b] .

Ce travail sera réalisé en-dehors du cadre strict du projet MDR Eaux Souterraines, qui se termine au 31/10/2020, mais dans sa continuité immédiate. Nous avons pour objectif de disposer de la nouvelle version de J2000-Rhône opérationnelle pour début 2021, de manière à pouvoir l'utiliser dans les nouveaux projets et études.

A plus long terme, on envisage d'étendre le cadre du diagnostic par signatures hydrologiques à l'ensemble des composantes du modèle, y compris en utilisant d'autres sources de données, comme par exemple l'humidité du sol [Branger & McMillan 2020].

## 7 Références

- Abdillahi Robleh, K. (2019). *Diagnostic du modèle hydrologique distribué J2000-Rhône à l'aide de signatures hydrologiques*, Mémoire de Master 2, Sorbonne Université.
- Branger, F.; Gouttevin, I.; Tilmant, F.; Cipriani, T.; Barachet, C.; Montginoul, M.; Le Gros, C.; Sauquet, E.; Braud, I. and Sauquet, E. (2016). *Modélisation hydrologique distribuée du Rhône: rapport final*, Irstea.
- Branger, F. and McMillan, H. (2020)**. *Deriving hydrological signatures from soil moisture data*, Hydrological Processes 34 : 1410-1427.
- Caballero, Y.; Lanini, S.; Zerouali, L. and Bailly-Comte, V. (2016). *Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport final.*, BRGM.
- Cipriani, T. and Sauquet, E. (2014). *Altération de l'hydrologie des cours d'eau par des ouvrages hydrauliques*, Irstea, Onema.
- Gupta, H.; Wagener, T. and Liu, Y. (2008)**. *Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation*, Hydrological Processes 22 : 3802-3813.
- Gustard, A.; Bullock, A. and Dixon, J. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*, Technical Report.
- Horner, I. (2020). *Design and evaluation of hydrological signatures for the diagnosis and improvement of a process-based distributed hydrological model*, thèse de l'Université de Grenoble-Alpes.
- Horner, I.; Branger, F.; McMillan, H.; Vannier, O. and Braud, I. (2020b)**. *Information content of snow hydrological signatures based on streamflow, precipitation and air temperature*, Hydrological Processes 34 : 2763-2779.
- Horner, I.; Branger, F.; Vannier, O.; Braud, I. and Lauvernet, C. (2020a)**. *Evaluation and value of hydrological signatures for the diagnosis and improvement of a process-based distributed model using a sensitivity analysis*, in preparation for submission to Water Resources Research.
- Kirchner, J. (2006)**. *Getting the right answers for the right reasons: link measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology*, Water Resources Research 42 : W03S04.
- Krause, P.; Base, F.; Bende-Michl, U.; Fink, M.; Flugel, W. and Pfenning, B. (2006)**. *Multiscale investigations in a mesoscale catchment - hydrological modelling in the Gera catchment*, Advances in Geosciences 9 : 53-61.
- McMillan, H. (2020)**. *Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review*, Hydrological Processes 34 : 1393-1409.

**McMillan, H.; Clark, M.; Bowden, W.; Duncan, M. and Woods, R. (2011).** *Hydrological field data from a modeller's perspective: Part 1. Diagnostic tests for model structure*, Hydrological Processes 25 : 511-522.

**McMillan, H.; Gueguen, M.; Grimon, E.; Woods, R.; Clark and Rupp, D. (2014).** *Spatial variability of hydrological processes and model structure diagnostic in a 50 km<sup>2</sup> catchment*, Hydrological Processes 28 : 4896-4913.

**Stewart, M. (2015).** *Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu Catchment, New Zealand*, Hydrology and Earth System Sciences 19 : 2587-2603.

**Vidal, J.-P.; Martin, E.; Franchistéguy, L.; Baillon, M. and Soubeyroux, J.-M. (2010).** *A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*, International Journal of Climatology 30 : 1627-1644.

**Wittenberg, H. and Sivapalan, M. (1999).** *Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation*, Journal of Hydrology 219 : 20-33.

**Yilmaz, K.; Gupta, H. and Wagener, T. (2008).** *A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model*, Water Resources Research 44 : W09417.