



HAL
open science

Modélisation hydrologique distribuée du Rhône

F. Branger, Isabelle Gouttevin, François Tilmant, Thomas Cipriani, Christine Barachet, Marielle Montginoul, Chloé Le Gros, Eric Sauquet, Isabelle Braud, Etienne Leblois

► **To cite this version:**

F. Branger, Isabelle Gouttevin, François Tilmant, Thomas Cipriani, Christine Barachet, et al.. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône. [Rapport de recherche] irstea. 2016, pp.116. hal-02605058

HAL Id: hal-02605058

<https://hal.inrae.fr/hal-02605058v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Modélisation hydrologique distribuée du Rhône

RAPPORT FINAL

4 novembre 2016

**FLORA BRANGER
ISABELLE GOUTTEVIN
FRANÇOIS TILMANT
THOMAS CIPRIANI
CHRISTINE BARACHET
MARIELLE MONTGINOUL
CHLOE LE GROS
ERIC SAUQUET
ISABELLE BRAUD
ETIENNE LEBLOIS**

**HHLY - IRSTEA
5 rue de la Doua BP32108
69616 VILLEURBANNE Cedex**

**UMR G-Eau - IRSTEA
361 rue J.-F. Breton BP 5095
34196 Montpellier Cedex 5**



Remerciements

Le projet MDR est une action de recherche réalisée avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (phase 1 et phase 2), de fonds européens FEDER (opération Présage 45537, dans la phase 1) et de la Compagnie Nationale du Rhône (phase 1 et phase 2). MDR a également indirectement bénéficié du soutien de la Région Rhône-Alpes au travers du financement de l'allocation doctorale de Marko Adamovic (2011-2014).

Outre les co-auteurs du présent rapport, plusieurs personnes ont également contribué au projet, notamment Marko Adamovic et Mériem Labbas (doctorants), ainsi que Dorian Noël, Amina Khalfaoui et Nicolas Bahl (stagiaires).

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire.....	3
1 Introduction.....	7
2 Une brève présentation du modèle.....	9
2.1 Structure du modèle	9
2.1.1 Maillage.....	9
2.1.2 Fonctionnement hydrologique de J2000-Rhône sur une HRU	10
2.1.3 Routage.....	12
2.1.4 Implémentation informatique	12
2.2 Données physiographiques et leur traitement pour J2000-Rhône.....	12
2.2.1 Occupation des sols	13
2.2.2 Pédologie	14
2.2.3 Géologie.....	16
2.2.4 Topographie.....	17
2.3 Données climatiques.....	18
2.3.1 Température et précipitation	18
2.3.2 Evapotranspiration potentielle de référence	19
2.4 Données relatives aux usages anthropiques.....	19
2.4.1 Dérivations-barrages.....	20
2.4.2 Irrigation	20
2.4.3 Alimentation en eau potable	21
3 Amélioration de la modélisation en hydrologie naturelle.....	23
3.1 Performances antérieures et démarche	23
3.2 Critique de la donnée climatique	24
3.3 Modifications de la paramétrisation.....	25
3.3.1 Retour sur les améliorations effectuées sur la Tille à Crécey.....	25
3.3.2 Simulation des étiages : évolution des paramètres de géologie	26
3.3.3 Réactivité des bassins : paramétrisation du ruissellement de surface.....	28
3.3.4 Saisonnalité des débits : taille des réservoirs du sol superficiel.....	29
3.3.5 Révision du routage	30
3.3.6 Autres ajustements mineurs.....	31
3.3.7 Evaluation de l'apport de données pédologiques à plus haute résolution	32
3.4 Conclusions sur les améliorations en hydrologie naturelle	35
4 Impact anthropique.....	41

4.1	Barrages et dérivations	41
4.1.1	Enjeux et périmètre de la modélisation	41
4.1.2	Fonctionnement du module d'influence « Barrages et dérivations »	43
4.1.3	Résultats	44
4.1.4	Conclusion et perspectives	49
4.2	Irrigation.....	50
4.2.1	Principe du module et implémentation.....	50
4.2.2	Application au bassin du Rhône.....	52
4.2.3	Résultats	57
4.2.4	Discussion et conclusion.....	61
4.3	Consommation d'eau potable.....	62
4.3.1	Démarche.....	62
4.3.2	Modélisation de la demande en eau	63
4.3.3	Résultats et estimation de la pression sur la ressource pour l'année 2009	69
4.3.4	Conclusion et perspectives d'intégration au modèle J2000-Rhône	71
5	Les usages de l'eau aux horizons futurs : déclinaison de quelques scénarios d'évolution et d'adaptation..	73
5.1	Contexte et méthodologie	73
5.2	Cas de l'irrigation	76
5.3	Cas de l'alimentation en eau potable	81
5.3.1	Construction des scénarios d'usage	81
5.3.2	Résultats et estimation de la pression sur la ressource	83
5.4	Conclusions et perspectives.....	88
6	Maillage du modèle : les améliorations techniques et ergonomiques.....	89
6.1	Relocalisation automatique des stations.....	89
6.2	Découpage des brins aux stations.....	89
6.3	Barrages.....	89
6.4	Irrigation.....	89
6.5	Adaptations techniques	90
6.6	Perspectives	91
6.6.1	Délimitation des HRUs.....	91
6.6.2	Etape de génération de la topologie	91
6.6.3	Ergonomie.....	91
7	Valorisation de données hydrologiques historiques.....	93
7.1	Enjeux et méthodes	93
7.2	Valorisation pour la modélisation hydrologique.....	94
8	Vers une modélisation intégrée pluie et hydrologie.....	97

8.1	Principe de SAMPO	97
8.2	Résultats.....	101
9	Conclusion et Perspectives.....	103
10	Références	105
11	Annexes.....	109
11.1	Rapports et documents rédigés dans le cadre du projet MDR.....	109
11.2	Synthèse des sources de données pour la paramétrisation de J2000_Rhône.....	111
11.3	Implications du scénario « tout goutte-à-goutte » pour le Rhône Moyen et la Haute Durance.....	113
11.4	Pression sur la ressource pour les différents scénarios prospectifs d'eau potable (débits influencés)..	115

1 Introduction

Le bassin versant du Rhône est un bassin versant extrêmement varié, aussi bien du point de vue climatique, topographique, géologique, que du point de vue des activités humaines. Les ressources en eau provenant du bassin versant et alimentant le fleuve ont été jusqu'à maintenant abondantes. Elles revêtent une importance cruciale, pour la production d'énergie, l'activité industrielle, l'agriculture, et le quotidien de la population de territoires parfois positionnés en dehors des frontières naturelles du bassin versant. Le devenir de ces ressources dans un contexte de changement climatique est une question importante pour définir une gestion durable et appropriée de ces ressources. Il s'agit cependant d'une question complexe, sujette à de nombreuses incertitudes qui rendent la prospective et la définition de politiques de gestion difficiles.

L'objectif du projet « Modélisation hydrologique Distribuée du Rhône » (MDR) est de développer un outil de modélisation hydrologique quantitative distribué et à base physique, qui doit permettre de réaliser des tests de scénarios d'évolution des usages sous changement climatique. Le modèle choisi pour ce projet est le modèle hydrologique J2000, développé à l'Université de Jena en Allemagne et disponible sous licence open-source (Krause, 2002 ; Krause et al., 2006 ; Krause et Hanisch, 2009). Ce modèle est pris en main depuis plusieurs années à l'Unité de Recherche HHLy (Irstea, centre Lyon-Villeurbanne) sur différents cas d'application. Il présente l'avantage d'être adaptable aux grandes échelles spatiales et d'une structure modulaire qui permet l'ajout de nouvelles composantes.

Le phasage du projet envisageait deux volets de deux ans qui se chevauchent en partie :

- la première phase (2013-2014) concernait la collecte de données et le déploiement du modèle hydrologique en hydrologie « naturelle » (hors usages), ainsi qu'à son évaluation ;
- la seconde phase (2014-2016) a été consacrée à l'implémentation des modules relatifs à trois grands usages de l'eau (gestion des grands réservoirs pour l'hydro-électricité, irrigation, consommation en eau potable), et à leur mise en œuvre, d'abord pour une évaluation par rapport aux observations (en mode « influencé » cette fois), puis pour des exercices de prospective pour une confrontation avec la ressource disponible fournie par le modèle hydrologique.

Ce rapport synthétise les résultats obtenus au fil du projet, et s'attache à décrire plus en détail les derniers travaux réalisés depuis le dernier rapport d'avancement (2015). Il est entendu que, bien que la première phase se soit achevée fin 2014, d'autres améliorations ont été apportées au modèle en hydrologie naturelle. Les développements réalisés en 2016 poursuivent ceux engagés en 2015 ; ils concernent l'exploitation de base de données sol pour une meilleure paramétrisation du modèle hydrologique et la représentation des demandes en irrigation et en eau potable. Les résultats d'un exercice de prospective sont également présentés pour illustrer les possibilités offertes par les modélisations engagées.

Dans ce rapport, les concepts et principes du modèle ainsi que les données utilisées sont brièvement présentés chapitre 2. Le chapitre 3 présente les différents résultats obtenus en hydrologie naturelle, pour le temps présent. Le chapitre 4 présente le travail réalisé dans la représentation de 3 grands usages de l'eau : barrages, irrigation et alimentation en eau potable. Les exercices de prospective réalisés et les résultats obtenus sont présentés au chapitre 5. Le chapitre 6 est consacré à l'outil de délimitation du maillage hru-delin. Le chapitre 7 présente le travail réalisé sur les données anciennes, et le chapitre 8 celui réalisé avec un outil de simulation de pluie.

2 Une brève présentation du modèle

Ce chapitre vise à synthétiser des éléments déjà explicités dans les rapports précédents, relatifs aux principes du modèle, de son outil de maillage et des données spatialisées utilisées. Il servira ainsi de support pour la compréhension des développements réalisés au cours des années 2015 et 2016, qui font le corps de ce rapport.

2.1 Structure du modèle

Le déploiement du modèle hydrologique semi-distribué J2000, développé à l'Université de Jena, sur le bassin du Rhône dans le cadre du projet MDR a donné lieu à la création d'un modèle spécifique :

- de par les paramètres distribués assemblés pour le territoire du Rhône, qu'il utilise,
- de par le type de données météorologiques qu'il accepte en entrée¹.

Nous avons baptisé ce modèle « **J2000-Rhône** ».

2.1.1 Maillage

Comme J2000, le modèle J2000-Rhône repose sur un maillage irrégulier en unités spatiales réputées homogènes du point de vue des processus hydrologiques, les HRUs (Hydrological Response Units). Ces HRUs résultent du croisement de diverses informations spatialisées (pentes et altitudes issues d'un modèle numérique de terrain (MNT), substrat, couvert végétal, géologie, et sous-bassins hydrologiques) et de leur regroupement sur des critères d'homogénéité. Dans notre modélisation, ces mailles sont également découpées aux sous-bassins des stations de contrôle du réseau hydrographique², sur lesquelles les sorties de modélisation doivent être disponibles pour comparaison aux observations. Le maillage intègre aussi la définition d'une direction d'écoulement entre les HRUs, puis des HRUs au réseau hydrographique et enfin le long de ce dernier dans les bassins versants. Un cours d'eau, dans le modèle, existe au-delà d'une surface drainée de 20 km².

L'amélioration de l'outil de maillage originel, Grass-HRU, a donné lieu à un nouvel outil développé à Irstea, HRU-delin. Son développement s'est poursuivi pendant l'année 2015 (cf. chapitre 6) ; nous en rappelons ici brièvement les principes (Figure 1) :

- étape 1 : utilisation de données au format *shape* ou *vecteur* d'un système d'information géographique (SIG) relatives à la localisation des stations hydrométriques, et à la topographie, géologie, pédologie et au couvert végétal (informations « additionnelles »), pour dériver un plan de drainage et re-classifier ces dernières informations selon la granularité souhaitée du maillage,
- étape 2 : relocalisation des stations (qui ne sont pas nécessairement positionnées sur le plan de drainage élaboré en étape 1), génération des sous-bassins et des brins de rivière aux stations,
- étape 3 : croisement des « informations additionnelles » (géologie, pédologie, occupation des sols) re-classifiées et les contours des sous-bassins topographiques et sous-bassins aux stations, pour déterminer sur chaque sous-bassin des zones homogènes : elles seront les HRUs définitives,
- étape 4 : création de la topologie (c'est-à-dire du chemin de l'écoulement de l'eau d'une HRU à l'autre, puis dans le réseau hydrographique), et écriture des fichiers de paramètres relatifs aux HRUs (*hru.par*)

¹ Le modèle J2000 « standard », développé à Jena, utilise la durée d'ensoleillement (fournie par les services météorologiques allemands) pour le calcul de l'évapotranspiration. Les bases de données météorologique n'incluant pas cette variable (SAFRAN, SPAZM), nous avons adapté le modèle.

² Ce découpage avait dans un premier temps été fait en post-traitement du maillage produit par l'outil de délimitation des HRUs. Il y est désormais intégré.

et aux brins de rivière (*reach.par*). Ces fichiers intègrent à la fois les « informations additionnelles » relatives aux HRUs, et les informations de nature topologique.

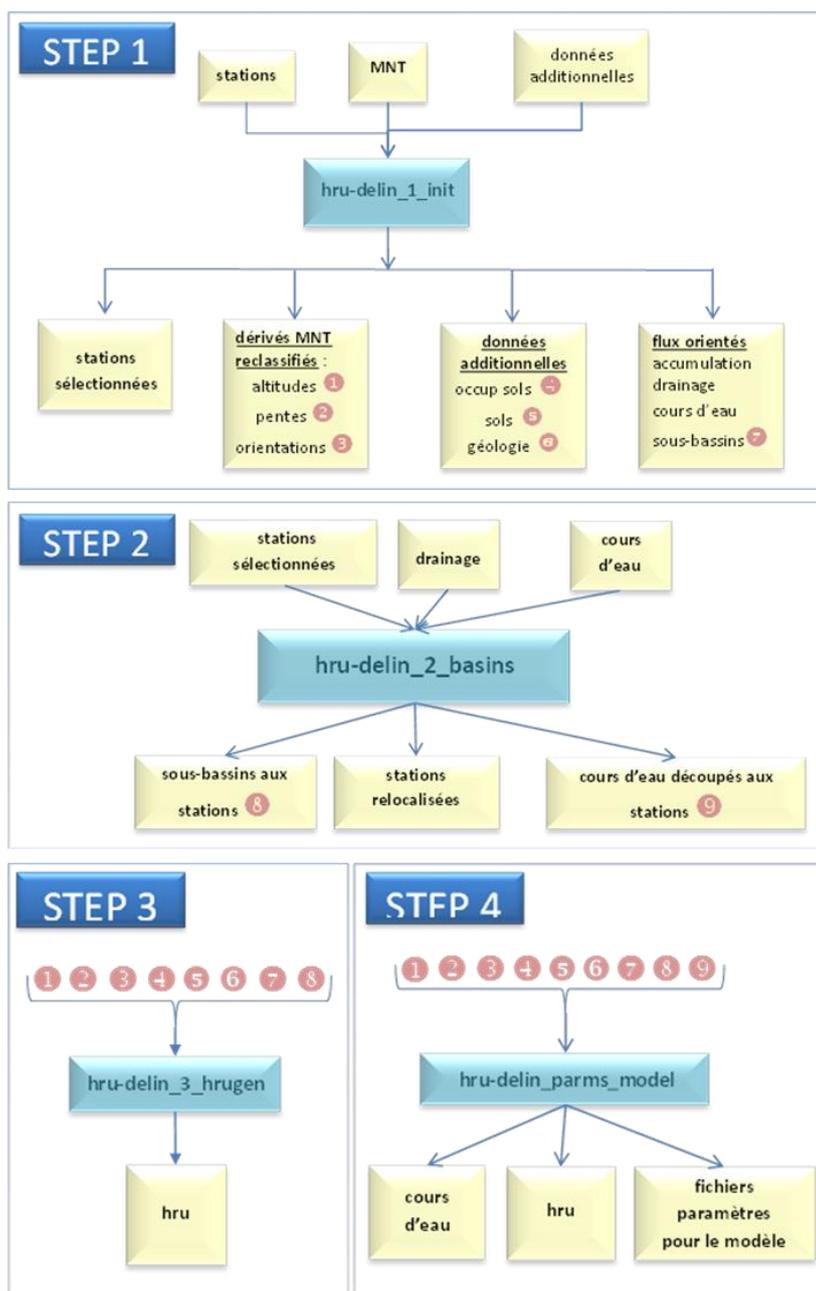


Figure 1 : Traitements et flux dans HRU-delin.

À l'issue de HRU-delin, le maillage et les caractéristiques physiques des mailles et du réseau hydrographique sont fournis au modèle J2000-Rhône via des fichiers de paramètres.

2.1.2 Fonctionnement hydrologique de J2000-Rhône sur une HRU

La Figure 2 résume la représentation des processus hydrologiques à l'échelle d'une HRU dans J2000-Rhône, et les principaux paramètres qui les régissent.

Lors d'un évènement pluvieux, l'eau est partiellement interceptée par le couvert végétal s'il existe, en fonction de son indice de surface foliaire *LAI* ; le complément atteint le sol où une partie s'infiltré et l'autre ruisselle. La partie non infiltrée constitue le ruissellement de surface *RD1*.

Dans J2000-Rhône, l'eau infiltrée remplit d'abord un réservoir de macro-pores *LPS* (Large Pore Space) : ce dernier doit être vu comme l'**eau gravitaire** du sol, occupant les pores les plus grossiers. Cette eau peut ensuite diffuser vers un réservoir plus fin *MPS* (Medium Pore Space) qui correspond à la **capacité au champ**. L'évapotranspiration est prélevée prioritairement sur l'eau interceptée par couvert végétal et sur l'eau disponible dans le sol (c'est-à-dire sur la réserve utile *MPS*).

À ce niveau, on considère que la demande évaporative des plantes est un pourcentage (k_c ou **coefficient cultural**) de l'**évaporation potentielle de référence de Penman-Monteith** (qui est calculée en amont de la modélisation, cf. 2.3). Ce coefficient cultural est prescrit pour chaque type d'occupation des sols selon des données de la FAO (Allen et al., 1998), selon la phénologie des plantes.

Le modèle prévoit que l'eau du sol puisse former un **écoulement de sub-surface** (*RD2*), si la pente est importante ou le substrat peu infiltrant ; le complément « percole » vers un **réservoir profond** (*RG1*).

L'écoulement d'eau généré sur une HRU est la somme du ruissellement, des écoulements de sub-surface et d'un écoulement (lent) depuis le réservoir profond. Ce dernier est régi par un **coefficient de rétention *k*** lié à la géologie du substrat.

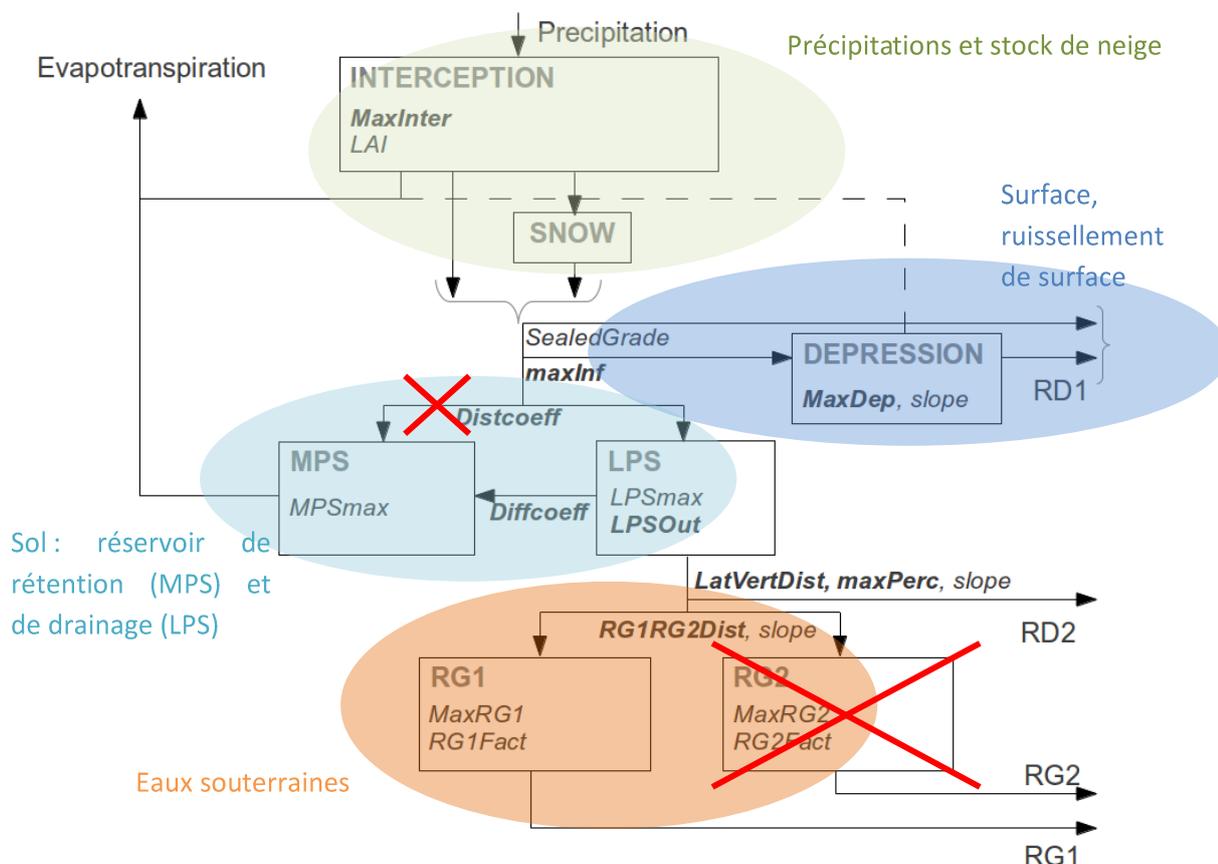


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique J2000. Les simplifications au modèle original apportées dans J2000-Rhône sont précisées en rouge.

2.1.3 Routage

Cet écoulement alimente un brin de rivière si la HRU sur lequel il est généré est traversée par un tel brin (fonds de vallée). Sinon la connexion de cette HRU est déterminée dans le maillage, et l'écoulement généré sur la HRU est transféré à la HRU réceptrice voisine. Dans le réseau hydrographique, l'acheminement de l'eau est réalisé par une méthode d'onde cinématique simplifiée.

2.1.4 Implémentation informatique

Au plan informatique, le modèle J2000-Rhône, suivant la philosophie de J2000, s'articule comme une intégration de « contextes » qui sont implémentés comme structures de base de la plateforme de modélisation JAMS³ à laquelle émerge J2000 (Figure 3) :

- un contexte temporel s'itérant au pas de temps journalier,
- un contexte spatial simulant les processus hydrologiques sur chaque HRU du domaine (HRU-loop), puis sur chaque brin de rivière du domaine (Reach-loop), et permettant d'agrégier les résultats de ces processus à l'échelon spatial choisi par l'utilisateur, dans notre cas : les sous-bassins aux stations de mesure hydrologique et les brins de rivière à ces mêmes stations.

La spécification des paramètres globaux du modèle, la lecture des paramètres spatialisés d'entrée, et l'initialisation de l'ensemble des variables d'état du modèle, s'effectuent en amont du contexte temporel présenté Figure 3.

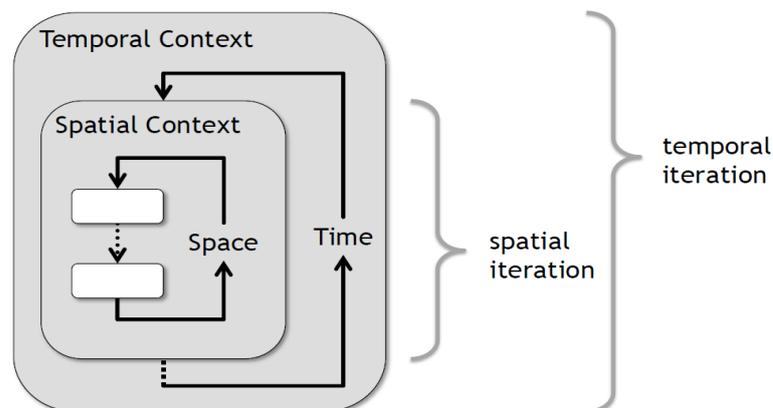


Figure 3 : Séquençage des opérations dans J2000-Rhône.

2.2 Données physiographiques et leur traitement pour J2000-Rhône

Les données physiographiques sont le support spatial et physique de la modélisation distribuée ; elles servent à déterminer le maillage et la valeur des paramètres spatialisés d'entrée du modèle, qui sont propres à chaque maille. Les données utilisées se déclinent en :

- carte d'occupation des sols,
- carte pédologique,
- carte géologique,

³ JAMS : Jena Adaptable Modelling System. <http://jams.uni-jena.de/>. Plateforme de modélisation open-source conçue en Java et permettant la construction et l'assemblage de modèles pour l'environnement eux-mêmes écrits en Java.

- carte de topographie remplacée en fait par un modèle numérique de terrain (MNT).

Ces données ont les caractéristiques suivantes :

- elles couvrent l'ensemble du bassin de façon continue, à des résolutions spatiales différentes mais plus fines que les entités les plus petites de notre maillage de modélisation,
- elles ont été traduites (par nos soins ou en amont) en fichiers exploitables sous SIG,
- elles sont considérées comme fixes dans le temps à l'échelle de notre modélisation (qui concerne la période « temps présent », *i.e.* 1987-2012),
- dans le cadre de MDR nous avons cherché à exploiter une information spatialement homogène sur l'ensemble du domaine d'étude.

2.2.1 Occupation des sols

La définition de l'occupation des sols a reposé sur la base de données européenne Corine Land Cover 2006 (CLC2006), base vectorielle de granularité minimale 25 ha, et comprenant dans son raffinement maximal 44 types d'occupation différents. Pour les besoins de notre modélisation un tel degré de raffinement n'était pas nécessaire ; les occupations du sol de CLC2006 ont donc été initialement regroupées en 8 grands types (Figure 4, Tableau 1).

Tableau 1 : Présence des différents types d'occupation des sols sur le bassin du Rhône modélisé. Les classes dominantes (> 5%) sont indiquées en vert.

Classe d'occupation des sols MDR	% de présence sur le bassin du Rhône à Beaucaire	N° dans J2000-Rhône
Terres agricoles	38.08 %	4
Forêts diverses	36.31 %	2
Landes et prairies naturelles	11.04 %	5
Roche nue	6.86 %	6
Territoires artificialisés	4.97 %	3
Etendues d'eau	1.49 %	1
Glaces et névés	1.13 %	7
Alluvions	0.12 %	8

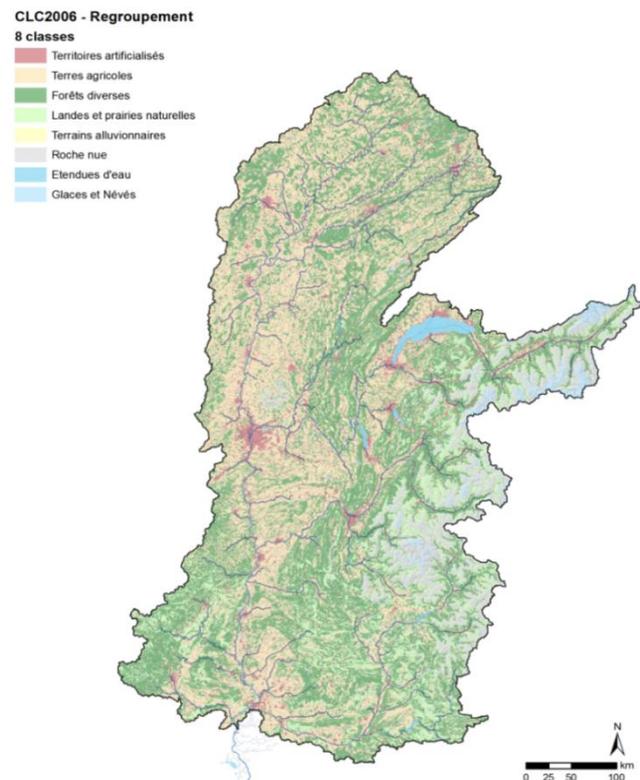


Figure 4 : Occupation des sols utilisée dans J2000-Rhône.

À chacun des 8 grands types d'occupation du sol retenu, nous avons associé un coefficient cultural sur la base des données de la FAO (Allen *et al.*, 1998) (typiquement une valeur par mois), et un LAI (une valeur par mois également) provenant de la base de données ECOCLIMAP⁴, qui comporte diverses informations relatives à la végétation et aux sols.

⁴ <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/spip.php?article8>

2.2.2 Pédologie

Les informations pédologiques sont destinées à estimer la taille des réservoirs du sol superficiel, MPS et LPS. Ces derniers se rattachent aux grandeurs classiquement utilisées en science des sols : capacité au champ et son complément (dit aussi « capacité d'air ») pour atteindre le stock maximal d'eau dans le sol.

Dans le cadre de MDR, un travail important a été réalisé dans la confrontation de différentes bases de données sol et leur exploitation pour la modélisation hydrologique (Tilmant et al., 2014). Ont en particulier été utilisées :

- la Soil European Database⁵ au 1 : 1 000 000, fournissant des épaisseurs de sol via une variable « obstacle aux racines »,
- ECOCLIMAP à résolution de 10 km, fournissant des données de texture des sols,
- la base de données des sols PACA du programme IGCS⁶, exploitable sur la Durance (Tilmant et Braud, 2012).

Les fonctions de pédotransfert de Rawls et Brakensiek (1985), exploitées par Manus et al. (2009) en Languedoc-Roussillon, ont été utilisées pour lier texture et profondeur des sols à la réserve utile et au stock d'eau maximal dans la base de données sol PACA : ces éléments ont été utilisés pour la modélisation hydrologique sur la Durance dans le cadre du projet R²D² 2050. Malheureusement, ces données n'étaient pas disponibles sur tout le bassin du Rhône pour une généralisation à la modélisation du Rhône dans son ensemble. Les données de la Soil European Data base, qui fournit des informations grossières de texture et de profondeur des sols, ont été utilisées à la place dans le cadre du projet MDR, avec la même méthodologie.

Sur la Durance, l'exercice R²D² 2050 avait révélé une sous-estimation systématique des réservoirs de sol superficiels inférés de ces bases de données et de cette méthodologie. D'autres études ont corroboré cette conclusion (e.g. Vannier *et al.*, 2013). La raison est sans-doute l'orientation agronomique de ces bases de données, plus propre à rendre compte des premiers décimètres des sols que de leurs caractéristiques hydrologiques globales. La taille des réservoirs superficiels des sols « recalée » sur le cas d'étude de la Durance (Sauquet *et al.*, 2015) a donc été utilisée dans MDR sur les territoires de montagne, la profondeur des sols exploitée provenant des données de la Soil European Database échantillonnées en quatre classes (Figure 4, Tableau 2).

⁵ http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDB/

⁶ <http://www.gissol.fr/le-gis/programmes/inventaire-gestion-et-conservation-des-sols-igcs-67>

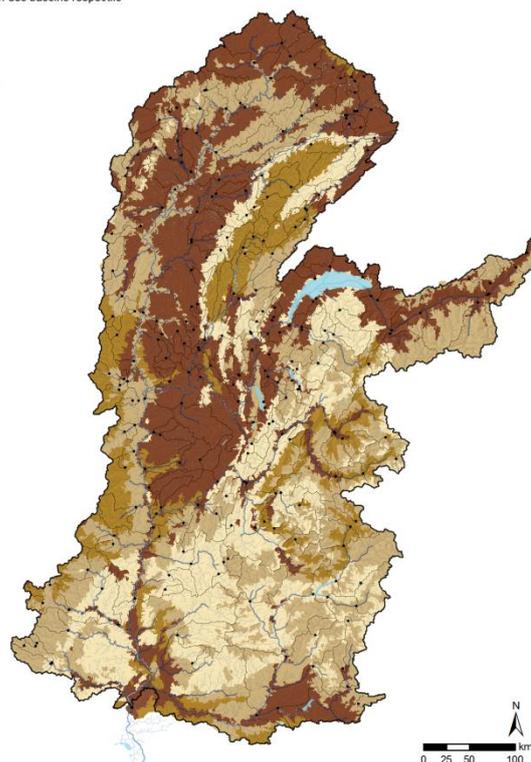
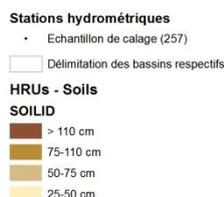


Tableau 2 : Classes d'épaisseurs de sols utilisées dans MDR.

Classe	Epaisseur	Présence sur le bassin
1	110 cm	33%
2	Entre 75 et 110 cm	13%
3	Entre 50 et 75 cm	32%
4	Entre 25 et 50 cm	22%

Figure 5 : Classes de profondeur des sols utilisées dans MDR, sur la base de la Soil European Database.

En 2015, il a néanmoins été possible de récupérer, auprès de la Chambre d'Agriculture du Rhône, les données équivalentes à la base de données des sols PACA sur la région Rhône-Alpes. Ces données ont été mises en forme en 2016 dans le cadre d'un stage de master 2 (Bahl, 2016) et leur apport dans la modélisation a été évalué (voir section 3.3.7). Les propriétaires de ce type de données sur les zones du bassin non encore couvertes ont été contactés afin de compléter la base sur l'ensemble du bassin du Rhône. À ce jour, nous n'avons pu récupérer les données que sur le département de la Haute-Marne. Sur les régions Lorraine et Franche-Comté, les données ne sont pas encore disponibles et nous n'avons pas eu de réponse concernant la disponibilité des données sur la région Bourgogne.

Les données de la région Rhône-Alpes et de la Haute-Marne ont été traitées de la même manière que les données de la région Languedoc-Roussillon ou PACA (cf Bonnet, 2012) permettant la production de cartes des profondeurs des sols, de teneur en sable et en argile ou de la réserve utile (voir Figure 6 pour une illustration).

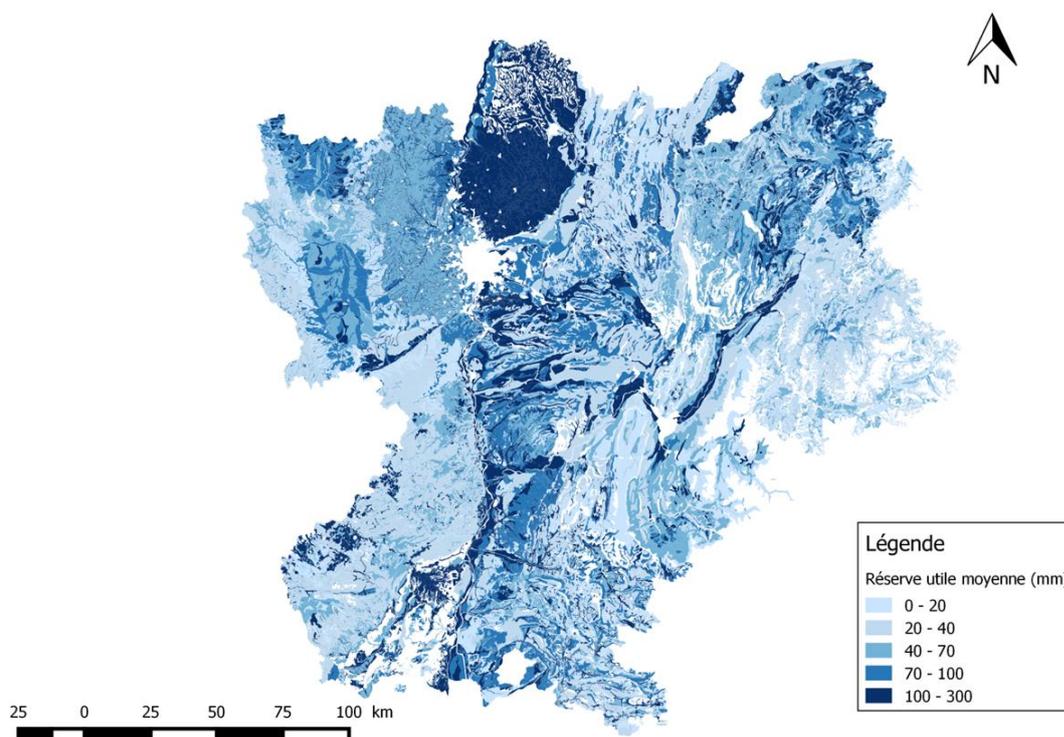


Figure 6 : Carte de la réserve utile calculée sur la région Rhône-Alpes à l'aide des données du programme IGCS (source des données : Chambre d'Agriculture du Rhône). Figure tirée de Bahl (2016)

2.2.3 Géologie

Nos informations géologiques proviennent de la géologie harmonisée au 1 : 250 000 du BRGM⁷, regroupée en 8 classes dont 5 dominent le bassin du Rhône (Figure 7, Tableau 3).

Tableau 3 : Classes géologiques utilisées dans MDR. Les classes dominantes sont indiquées en vert.

Numéro	Classe géologique dans MDR	Présence sur le bassin
1	Alluvions et dépôts glaciaires	19%
2	Schistes et roches métamorphiques	16%
3	Roches cristallines magmatiques	4%
4	Roches volcaniques	< 1%
5	Roches détritiques	13%
6	Sables et argiles	< 1%
7	Calcaires	32%
8	Marnes	16%

⁷ <http://www.brgm.fr/decouverte/ouvrages-cartes-brgm-editions/cartes-geologiques-numeriques> ; Cartes géologiques à 1/250 000 vectorisées par feuille entière

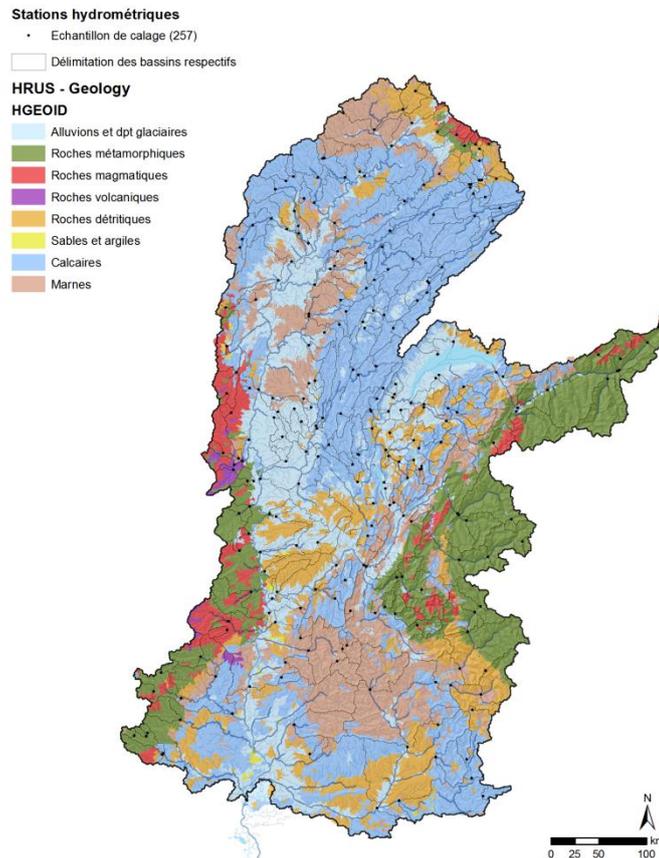


Figure 7 : Classes géologiques utilisées dans MDR.

Dans notre modélisation, la géologie détermine la taille et les temps caractéristiques de vidange des réservoirs profonds du sol (*RG1*, Figure 2).

2.2.4 Topographie

Le MNT utilisé est le modèle numérique de terrain Aster⁸ à 30 m de résolution, agrégé à 200 m.

Cependant, l'utilisation de ce MNT « brut » dans l'outil de maillage HRU-delin conduit à des difficultés en raison de la granularité de la résolution. Un cas typique est le lissage de la topographie survenant à cette échelle de 200 m, qui peut modifier voire supprimer les exutoires naturels de certains bassins. Egalement, le contour des bassins devient assez grossier, pouvant conduire à des incohérences de surfaces drainées pour des sous-bassins aux stations de mesures.

Afin de pallier ces incohérences, le MNT doit donc être prétraité avant d'être fourni à l'outil de maillage. De façon simplifiée, ce prétraitement consiste en un creusement du MNT initial aux exutoires de bassins et sur le réseau hydrographique en cas de non-respect de la topologie de l'écoulement naturel. Il a été effectué à l'aide d'un algorithme d'extraction développé sous HydroDEM (Leblois, 2012). Le résultat est comparé localement à un réseau hydrographique de référence en Figure 8, illustrant les conséquences de la résolution spatiale de notre MNT.

⁸ <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

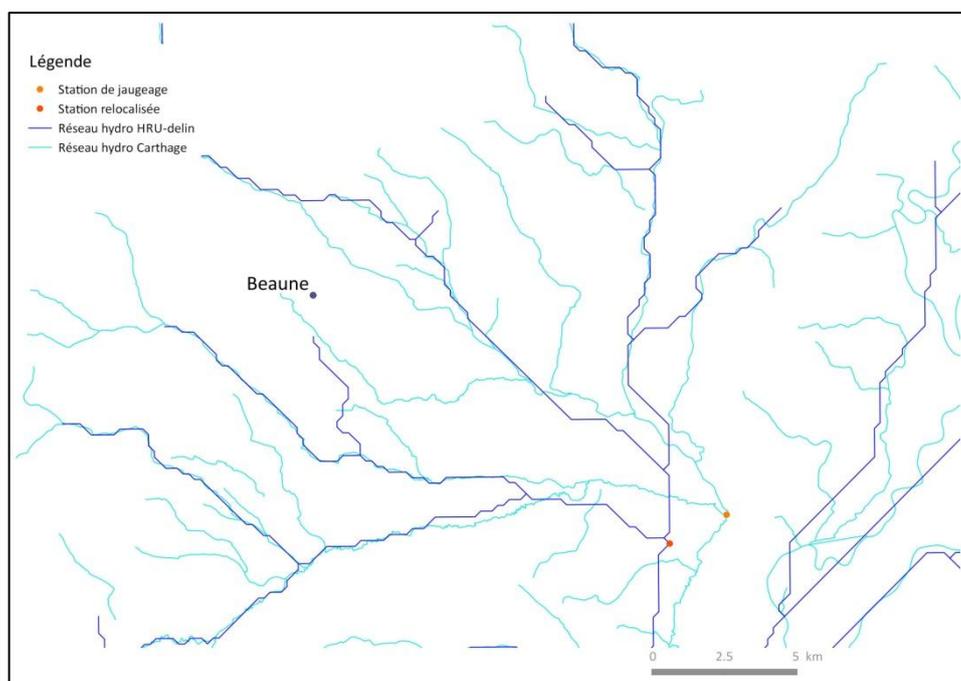


Figure 8 : Différences entre le réseau hydrographique utilisée dans notre modalisation (Réseau Hydro HRU-delin) et le réseau hydrologique Carthage établi par le Sandre⁹ autour de Beaune, en Bourgogne. Ces différences impliquent une relocalisation des stations de jaugeage sur le réseau hydrographique de modélisation, qui sera expliquée en partie 6.1.

2.3 Données climatiques

J2000-Rhône utilise en entrée, à résolution journalière, les forçages météorologiques suivants :

- température moyenne de l'air à 2 m,
- précipitation totale (pluie + neige),
- évapotranspiration potentielle de référence (ET0).

On souhaite, pour ces données, une résolution spatiale raisonnable par rapport à celle du modèle et une continuité et qualité homogènes à l'échelle du territoire et de la période ciblée par notre modélisation (1987-2012). Egalement, le modèle J2000-Rhône a vocation à être transféré à des opérationnels avec un forçage climatique qui leur soit accessible (en terme de droit d'utilisation hors contexte de recherche, et de coût).

2.3.1 Température et précipitation

Au vu de ces exigences, nous nous sommes tournés vers des produits de réanalyse qui offrent les avantages de couvrir, en multi-variables cohérentes, l'ensemble du territoire à une résolution parfois infra-journalière. Ils sont le résultat d'une modélisation assimilant un vaste panel d'observations essentiellement atmosphériques. Le produit de la réanalyse française SAFRAN¹⁰ - à 8 km x 8 km de résolution spatiale (Vidal *et al.*, 2010) couvrant la France métropolitaine, et agrégé à une résolution temporelle journalière, a été principalement utilisé pour les variables température et précipitation. Il est mis à disposition gratuitement par Météo France pour des besoins de recherche et peut être vendu à des opérationnels.

⁹ <http://www.sandre.eaufrance.fr/>

¹⁰ Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

Cependant, la résolution spatiale de SAFRAN s'avère peu adaptée en zone de montagne en raison du gradient orographique des précipitations, qui y est lissé. En résulte une sous-estimation probable des précipitations à moyenne et haute altitude. Depuis 2009, un autre produit de précipitations spatialisées adaptées aux régions de montagne a été développé par EDF (Gottardi, 2009) sur une partie du territoire français : SPAZM¹¹. Il repose sur le calcul de gradients orographiques de précipitations locaux par types de temps, à une résolution spatiale de 1 km x 1 km, et inclut un traitement spécifique pour la composante nivale. Son utilisation sur la Durance (Sauquet *et al.*, 2015) a montré que SPAZM permettait un meilleur bouclage des bilans d'eau.

Dans le but de séparer, dans la modélisation, les erreurs liées au forçage atmosphérique de celles inhérentes aux paramétrisations internes du modèle, nous avons choisi, pour les analyses présentées dans ce rapport, d'utiliser un forçage hybride tirant le meilleur parti des deux jeux de données de précipitations disponibles. Ce forçage hybride consiste en :

- SPAZM sur le bassin de la Durance, agrégé sur la grille SAFRAN à 8 km x 8 km,
- SAFRAN ailleurs.

Notons qu'il a été jugé préférable de ne pas utiliser SPAZM sur l'ensemble du bassin du Rhône, en raison de corrections sur la précipitation neigeuse non encore stabilisées à cette échelle spatiale (Gailhard, communication personnelle).

Pour la température les données SAFRAN ont été utilisées sur tout le domaine d'étude.

Le modèle J2000-Rhône reste compatible avec un forçage en précipitations provenant uniquement de SAFRAN, et les résultats obtenus dans cette dernière configuration sont également présentés dans la suite du rapport (partie 3.4).

Notons enfin que nous avons rapatrié des données climatiques mises à disposition par l'office fédéral de météorologie et climatologie MeteoSuisse¹² sur la partie suisse du bassin du Rhône. Nous n'avons à ce jour pas exploité ces données par souci d'homogénéité et afin de permettre le transfert du modèle à des utilisateurs extérieurs au monde de la recherche avec un seul jeu de données climatiques (SAFRAN), chaque jeu de données ayant un coût pour des usages non-académiques. Elles permettraient cependant un regard critique sur les forçages SPAZM et SAFRAN sur la partie helvète du bassin du Rhône.

2.3.2 Evapotranspiration potentielle de référence

L'évapotranspiration potentielle de référence ET₀ est calculée selon la formule de Penman-Monteith déclinée par la FAO (Allen *et al.*, 1998) en amont de la modélisation hydrologique. Ce calcul utilise les données SAFRAN à 8 km x 8 km : température, humidité de l'air, vitesse du vent, rayonnement incident. ET₀ correspond à l'évaporation d'un gazon bien irrigué (i.e. pour lequel la disponibilité en eau n'est pas limitante). L'utilisation d'ET₀ par le modèle a été décrite en partie 2.1.

2.4 Données relatives aux usages anthropiques

Les données présentées ici ont servi de base à la construction des modules d'usage de l'eau présentés en partie 4, ou à l'évaluation de leur performance.

¹¹ SPAtialisation en Zone de Montagne

¹² <http://www.meteosuisse.admin.ch>

2.4.1 Dérivations-barrages

La mise en œuvre du module de dérivations et de barrages dans J2000-Rhône a reposé sur différents types de données :

- La localisation et la surface drainée des barrages et dérivations représentées : ces éléments ont été extraits de la base de données SIOUH¹³ et d'une base de données développée à Irstea (Chandesris et Pella, 2006). Ils ont permis le positionnement des ouvrages retenus sur le réseau hydrographique du modèle (cf. 6.3).
- La capacité (maximale) des barrages : cette donnée provient des deux bases de données précédemment citées. Elle est exploitée par le module représentant les barrages et dérivations, comme capacité de stockage maximale des réservoirs. Pour les dérivations, le débit maximal dérivé est implicitement pris en compte dans la fonction objectif de la dérivation et n'a pas besoin d'être autrement spécifié dans le modèle.
- Le « fonctionnement moyen » (en termes de cycle mensuel interannuel) des ouvrages : ce fonctionnement moyen est traduit en « fonctions objectifs » de remplissage/vidange ou de volume dérivées, décrites dans le rapport MDR (Tilmant *et al.*, 2014). Elles sont une estimation journalière des volumes retenus, relâchés ou dérivés aux ouvrages représentés, réalisée sur la base de données historiques en régime hydrologique naturel, de débits naturels interpolés, et/ou de débits influencés et renaturalisés concomitamment disponibles au niveau des ouvrages (Cipriani et Sauquet, 2014). La méthodologie et les données ayant conduit à l'élaboration de ces fonctions objectifs ont été détaillées dans le rapport MDR livré en 2014 et ne sont pas reprises ici.

2.4.2 Irrigation

Sur le bassin du Rhône, nous disposons de deux sources d'information pouvant caractériser l'irrigation dans son implantation géographique, sa nature, et les volumes concernés :

- les données du Recensement Général de l'Agriculture 2010¹⁴ (RGA), indiquant pour chaque commune le nombre et la superficie totale et irriguée des exploitations pour différents types de cultures. Afin de respecter les contraintes du secret statistique imposé par les gestionnaires du RGA, nous avons agrégé ces données de recensement à l'échelle cantonale et par grands types de cultures qui sont repris en partie 4.2.2,
- les redevances annuelles de prélèvements de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (en milliers de mètres cube par an), consultables¹⁵ sur la période 1987 à 2012, et catégorisées en différents usages dont l'irrigation (gravitaire et non-gravitaire). Ces redevances sont majoritairement signalées par commune, sans être précisément géo-référencés. Un changement de la typologie en 2008 a conduit à la création d'un type « alimentation de canaux », dont une analyse poussée dans le rapport MDR (Tilmant *et al.*, 2014) a prouvé qu'il recouvrait partiellement les usages agricoles.

Dans notre modélisation de l'irrigation, nous avons exploité les données du RGA 2010 pour la délimitation des HRUs irriguées du modèle, et les données de prélèvement à des fins de validation de nos résultats.

¹³ Système d'Information sur les OUvrages Hydrauliques ; <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/barrages-ponctuels-classes-de-rhone-alpes>

¹⁴ <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/>

¹⁵ <http://sierm.eaurmc.fr/>

2.4.3 Alimentation en eau potable

Diverses données ont été collectées pour la construction d'un modèle économétrique de la demande en eau potable. Cette modélisation a cherché à expliquer la consommation en eau au travers de facteurs socio-économiques. Les données collectées ont donc trait à la consommation d'eau, mais aussi aux déterminants de cette consommation identifiés dans la littérature. Y émergent :

- concernant la consommation d'eau : la base de données SISPEA¹⁶ sur la consommation, le prix et la gestion des réseaux d'eau potable, ainsi que les consommations facturées sur le Grand Lyon en 2014,
- concernant les facteurs explicatifs possibles de cette consommation en eau, des données climatiques de Météo France (SAFRAN), des données topographiques de l'IGN¹⁷, et des données socio-économiques fournies par l'INSEE¹⁸.

La nature précise de ces données et leur période d'exploitation sont détaillées en partie 4.3.

¹⁶ SISPEA : Services Publics d'Eau et Assainissement. Base de données développée par l'ONEMA

¹⁷ IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

¹⁸ INSEE : l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

3 Amélioration de la modélisation en hydrologie naturelle

3.1 Performances antérieures et démarche

Notre démarche de modélisation dans la construction du modèle du Rhône a pour objectif de représenter au mieux les processus hydrologiques en tout point du bassin versant. 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 avoir recours à des algorithmes de calage automatique. Cela n'exclut bien évidemment pas la modification de paramètres *a posteriori*, d'autant plus que les performances du modèle avec la toute première paramétrisation se sont révélées largement améliorables (cf. le rapport 2014 et la Figure 9).

Le rapport 2014 présentait déjà un certain nombre de pistes de modifications susceptibles d'améliorer le comportement de J2000- Rhône. En 2015, ce travail a été poursuivi, toujours avec la même méthodologie :

- au-delà du constat d'une mauvaise performance (Nash ou biais important), identification du problème précis sur un bassin versant donné (ou un groupe de bassins versants) à partir de l'analyse visuelle de l'hydrogramme produit et des variables d'état du modèle : débit de base insuffisant ou insuffisamment variable dans le temps, trop ou pas assez de ruissellement de surface, etc. Nous avons plutôt travaillé sur les têtes de bassin, de façon à avoir des processus caractéristiques non influencés par ce qui se passe en amont,
- identification des paramètres en cause et modification de manière à améliorer la performance, en portant attention à la vraisemblance physique des valeurs obtenues,
- généralisation sur l'ensemble du bassin versant et évaluation de l'intérêt général des modifications apportées.

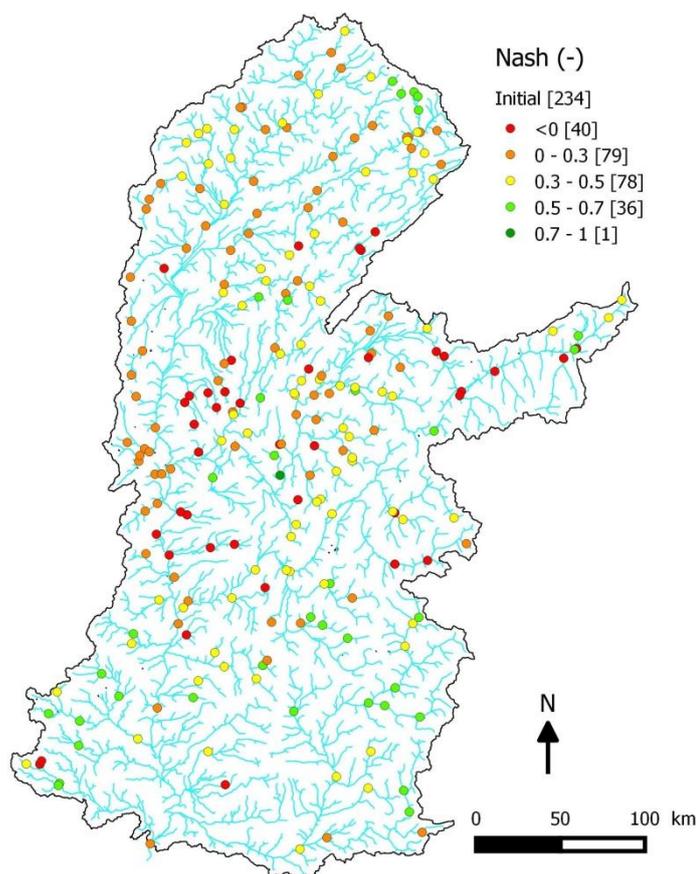


Figure 9 : Critères de Nash pour les 234 stations retenues sur le bassin versant du Rhône avec la paramétrisation initiale. Extrait du rapport MDR (Tilmant, *et al.*, 2014).

D'une manière générale, nous avons essayé de travailler par étape, des processus les plus lents et globaux (génération du débit de base) au processus les plus détaillés et rapides. Dans cette démarche, les résultats obtenus permettent de valider ou infirmer des hypothèses sur la représentation des processus, qui sont portées par des jeux de paramètres concernés. Mais cela n'a pas empêché des aller-retour, certaines modifications s'étant révélées contre-productives, notamment lors de la généralisation sur tout le bassin du Rhône. Nous présentons ici seulement les modifications qui ont été finalement retenues.

3.2 Critique de la donnée climatique

Nous avons en partie 2.3 justifié l'utilisation des précipitations SPAZM sur une partie de notre domaine d'étude (bassin de la Durance), par le meilleur bouclage des bilans d'eau hydrologiques que ce produit permet. Ici, nous mettons en regard les biais, en module interannuel, de nos simulations utilisant les précipitations SAFRAN uniquement, avec la différence de pluies moyennes annuelles entre SPAZM et SAFRAN (plus précisément : SPAZM « moins » SAFRAN). Cette comparaison (Figure 10) permet de mettre en évidence le lien entre un biais de notre modélisation avec SAFRAN, et l'incertitude sur les précipitations SAFRAN entrantes, potentiellement à l'origine de ce biais.

**Différence de précipitation moyenne
annuelle SPAZM-SAFRAN (1987-2012,
mm/an)**

**Biais moyen annuel du module simulé en forçage
SAFRAN, ramené en mm/an (1987-2012)**

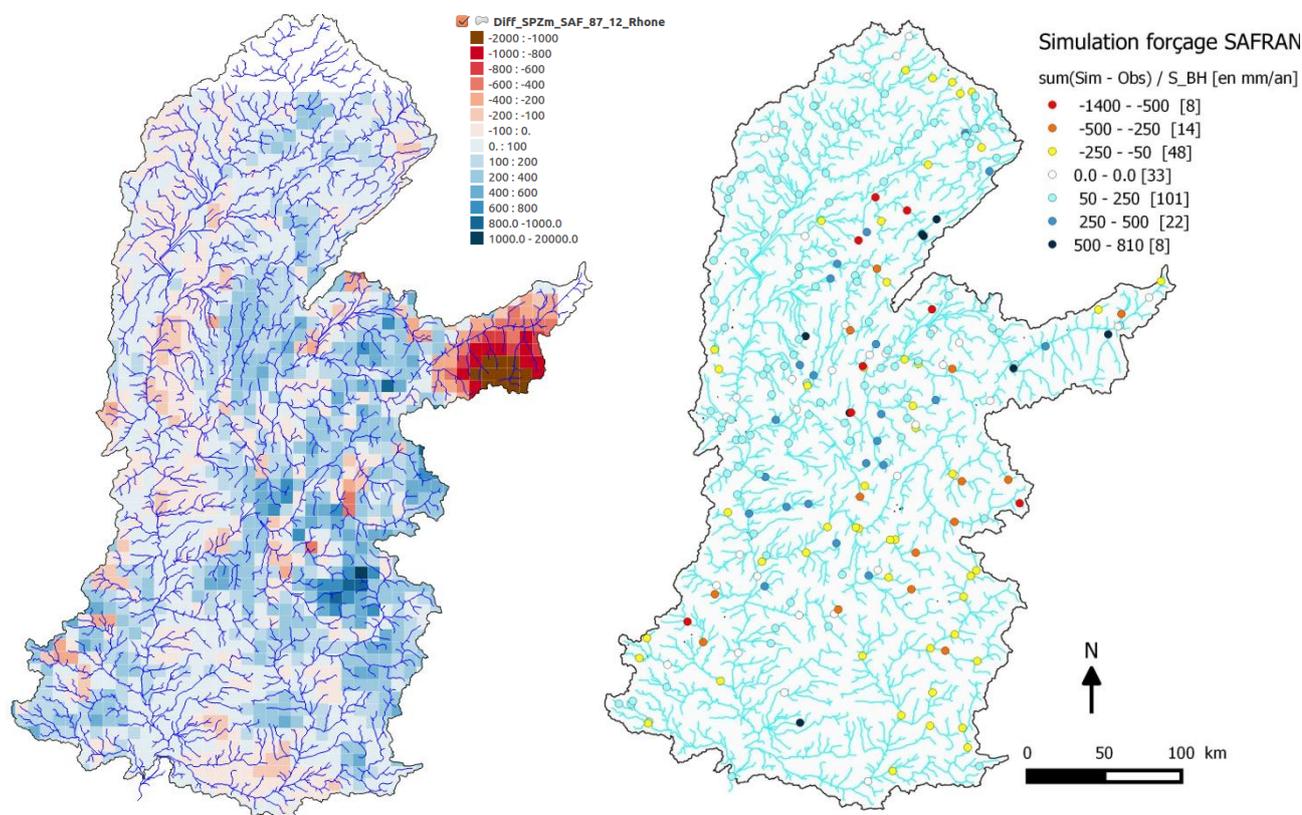


Figure 10 : à GAUCHE, différence de précipitations annuelles moyennes entre SPAZM et SAFRAN (SPAZM « moins » SAFRAN). À DROITE, biais moyen annuel des modules simulés avec les pluies SAFRAN, ramenés en mm/an sur les bassins versants aux stations.

Une bonne correspondance se dessine entre les endroits où nos modules simulés sont surestimés par rapport aux observations (Alpes Suisses, Arc Lémanique, basse Saône, et vallée du Rhône à l’aval proche de Lyon), et où SPAZM présente des précipitations inférieures à SAFRAN, laissant entrevoir une possible surestimation des précipitations par SAFRAN. À l’inverse, nos modules simulés sont nettement sous-estimés sur l’ensemble des Alpes françaises, en particulier dans les Alpes du nord et un peu plus modérément sur la Durance : dans ces régions de montagne, les précipitations SPAZM sont en général beaucoup plus abondantes que les précipitations SAFRAN, les écarts pouvant aller jusqu’à 1000 mm/m²/an.

3.3 Modifications de la paramétrisation

3.3.1 Retour sur les améliorations effectuées sur la Tille à Crécey

L’exemple de la Tille à Crécey (224 km², val de Saône), détaillé dans le rapport MDR (Tilmant et al., 2014), permet d’illustrer sur un cas concret la démarche mise en œuvre.

La mise en évidence de divers biais de simulation sur ce bassin (surestimation des étiages, sous-réactivité) a été suivie de divers tests de sensibilité débouchant sur des améliorations du jeu de paramètres initial. Parmi ces modifications, la diminution importante de la taille de réservoir souterrain (*maxRG1*) et du temps de vidange (*kRG1*) a eu un impact positif marqué sur la saisonnalité du débit de base et la représentation des étiages. Par

ailleurs, l'augmentation du ruissellement de surface sur les types d'occupation du sol de ce bassin, à savoir les forêts et les zones agricoles, a augmenté la réactivité du bassin, en accord avec les observations. Enfin, une meilleure estimation de la capacité de stockage dans le sol a permis de réduire le décalage observé dans la simulation du régime en jouant directement sur l'inertie du sol.

Tous ces changements ont conduit à une simulation de très bonne qualité pour ce bassin versant. Cependant, les ajustements mis en évidence sur ce bassin ne s'appliquent potentiellement qu'aux bassins ayant les mêmes caractéristiques (sols, géologie et occupation du sol); leur extrapolation à l'ensemble du bassin du Rhône est également hasardeuse en raison de contextes très différents (montagne, etc.). Ainsi, cette procédure doit être répétée pour des bassins aux caractéristiques différentes. C'est l'objet de la présente partie.

3.3.2 Simulation des étiages : évolution des paramètres de géologie

Similairement au cas de la Tille exposé ci-dessus, nos résultats antérieurs révélaient une difficulté à simuler les étiages, en lien avec un débit de base généralement sur-estimé par le modèle. Un travail d'ajustement des paramètres gérant la taille ($maxRG1$) et la capacité de rétention d'eau ($kRG1$) des réservoirs profonds du sol ($RG1$) a donc été mené. Ces caractéristiques étant liées à la géologie, un ajustement a d'abord été recherché sur des bassins représentatifs des différents types de géologie rencontrés sur le bassin du Rhône. Le Tableau 4 présente les sous-bassins sélectionnés, leurs caractéristiques géologiques, et les paramètres géologique ajustés. Sur la plupart de nos bassins tests, l'amélioration des débits d'étiage est passée par une réduction des tailles des réservoirs profonds, et pour certains, par une augmentation (cas des substrats alluviaux et cristallins) ou une réduction (pour toutes les autres géologies) de leur inertie à travers une constante de rétention accrue (resp. réduite).

Les paramètres correspondants ont ensuite été appliqués sur l'ensemble du bassin du Rhône, conduisant à des résultats hétérogènes : amélioration des débits d'étiage sur la Saône et la basse vallée du Rhône et ses affluents rive droite ; dégradation sur la plupart des bassins de montagne. **Cette hétérogénéité nous a conduits à distinguer les zones de plaine, sur lesquelles le nouveau jeu de paramètres de réservoirs profonds semble applicable, des zones de montagne, où nous préférons la paramétrisation initiale de la géologie.** Cette distinction plaine/montagne a été faite sur un critère de pente moyenne des unités spatiales, une pente supérieure à 10° (resp. inférieure à 10°) caractérisant la montagne (resp. la plaine). Nous avons vérifié que toutes les régions d'altitude supérieure à 1500 m sont ainsi bien classées en « montagne » (Figure 11). **Nous verrons que la plupart des paramétrisations examinées relatives au sol ou au couvert végétal requièrent cette distinction plaine/montagne, que justifient des caractéristiques physiographiques effectivement bien différentes.**

La sous-estimation des précipitations en montagne par SAFRAN est un biais connu de ce forçage ; la méthodologie déployée par SPAZM, incluant des observations nivales, permet objectivement d'approcher davantage la réalité des précipitations dans ces régions. C'est aussi ce que confirme notre modélisation hydrologique, qui présente des biais négatifs importants sur les modules simulés dans les régions alpines avec le forçage SAFRAN. La conversion des biais de module en mm/an (Figure 10, à droite) permet de comparer les écarts entre SPAZM et SAFRAN à nos biais de débits simulés avec SAFRAN : ils ont des ordres de grandeur similaires. L'utilisation de SPAZM sur l'ensemble du bassin du Rhône pourrait donc offrir donc la perspective de réduire fortement des biais de modélisation très probablement liés à la qualité du forçage SAFRAN en précipitations. C'est ce qui a été mis en œuvre sur la Durance avec le forçage hybride (cf. 2.3) qui est exploité dans le reste du rapport. **Sauf précision contraire, les figures présentées dans le reste du rapport utilisent le forçage hybride.**

Tableau 4 : Evolution des paramètres pour les différentes classes de géologie du bassin versant du Rhône.

Nom du bassin	Station (Aire drainée)	Type de géologie	Pourcentage en surface sur le bassin	Initial			Final		
				maxRG1	kRG1	Nash	maxRG1	kRG1	Nash
Vieux Jonc à Buellas	U4216010 (95 km ²)	1 = alluvions et dépôts glaciaires	100%	1000	20	-0.01	10	100	0.25
Gier à Givors	V3124010 (405 km ²)	2 = schistes et roches métamorphiques	74%	500	60	0.13	15	30	0.27
Grosne à Jalogny	U3205210 (25 km ²)	3 = roches cristallines magmatiques	66%	200	20	0.13	10	30	0.33
Brévenne à Sain-Bel	U4635010 (194 km ²)	4 = roches volcaniques	60%	200	20	0.13	40	10	0.22
Concy à Xertigny	U0104010 (68 km ²)	5 = roches détritiques	100%	500	100	0.36	250	70	0.49
Guye à Sigy-le-Châtel	U3225010 (279 km ²)	6 = sables et argiles	12%	500	100	0.06	10	10	0.28
Tille à Crécey-sur-Tille	U1204010 (224 km ²)	7 = calcaires	100%	200	200	0.49	20	20	0.58
Roubion à Soyans	V4414010 (196 km ²)	8 = marnes	51%	500	100	0.35	80	30	0.41

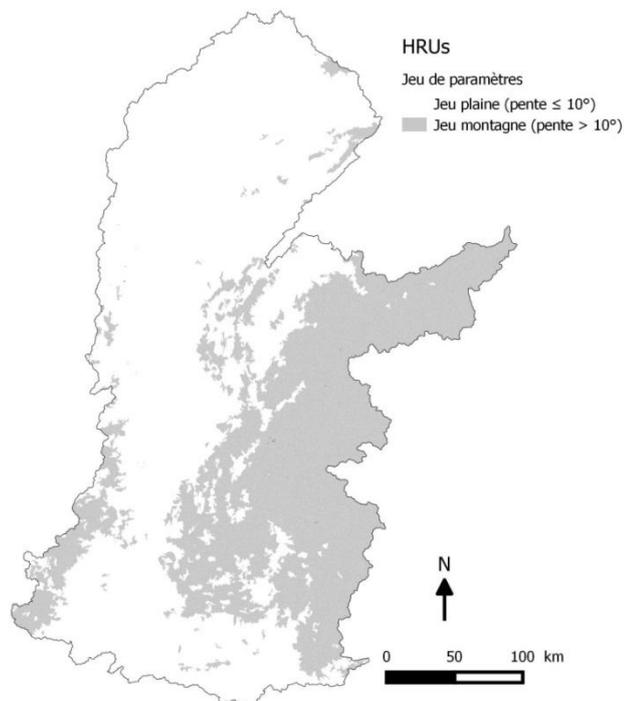


Figure 11 : Distinction plaine/montagne sur le bassin du Rhône.

3.3.3 Réactivité des bassins : paramétrisation du ruissellement de surface

Un autre diagnostic de faiblesse du modèle à l'issue de la phase 1 était le manque de réactivité de certains bassins, particulièrement sur la Saône, signe possible d'une paramétrisation inadaptée du ruissellement de surface. Il existe trois sources de production du ruissellement de surface dans J2000-Rhône :

- le ruissellement direct sur surfaces imperméables,
- le ruissellement hortonien par refus d'infiltration,
- le ruissellement par saturation du sol.

Le troisième type de ruissellement est entièrement contrôlé par les paramètres de sol (taille des réservoirs *LPS* et *MPS*), alors que les deux autres font appel à des paramètres spécifiques : le taux d'imperméabilisation des sols *sealedGrade* pour le ruissellement sur surfaces imperméables, et le taux d'infiltration maximale *MaxInf* pour le ruissellement hortonien.

- Ruissellement sur surfaces imperméables :

Alors que la version standard de J2000 ne propose que deux valeurs du taux d'imperméabilisation des sols (0.2 et 0.6), la réalité est moins binaire et nos ajustements ont conduit à proposer, pour chaque type d'occupation des sols, le taux d'imperméabilisation présenté en Tableau 5.

Tableau 5 : Valeurs du paramètre *sealedGrade* pour les différents types d'occupation du sol.

Occupation du sol <i>sealedGrade</i>	Lacs	Forêts Saône / Plaine / Montagne	Zones urbaines	Zones agricole Plaine / Montagne	Prairies naturelles Plaine / Montagne	Roches et sol nu	Glaciers	Zones ripariennes
<i>Initial</i>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2
<i>Final</i>	0	0.25 / 0.05 / 0.15	0.45	0.25/0.05	0/0.05	0.45	1	0

On y retrouve la distinction plaine/montagne déjà évoquée à la partie précédente, dont on peut comprendre la logique à travers certains exemples :

- Typiquement, les zones agricoles de montagne présentent une moindre imperméabilité des sols que celles de plaine. Les exploitations agricoles de plaine sont souvent insérées dans un réseau routier plus dense, et ont une taille moyenne plus grande que celles de montagne, avec des infrastructures (bâti) plus développées : ces éléments sont générateurs d'une imperméabilisation accrue des surfaces classées comme agricoles dans notre modélisation. À l'inverse, une part importante des zones agricoles de montagne sont occupées par des prairies souvent bordées de forêts et peu anthropisées. On comprend qu'on y retrouve des taux d'imperméabilisation des sols plus faibles,
- La forêt a requis un traitement particulier sur la Saône : nos simulations ont révélé une forte réactivité de régions couvertes de forêts sur ce bassin, qui nous a conduits à augmenter le taux d'imperméabilisation sur ces forêts. Elles diffèrent de celles du reste du bassin par une prédominance des feuillus (75% sur la Haute Saône¹⁹). Nous verrons aussi à la partie suivante que les capacités d'infiltration des sols ont aussi dû être réduites sur ces forêts, et discuterons des raisons possibles de ce traitement particulier.

¹⁹ http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/PubDep/70-haute-saone/ifn_70_3_haute-saone_1995.pdf

➤ Ruissellement par refus d'infiltration (hortonien) :

La capacité d'infiltration maximale des sols dépend grandement du couvert végétal, en raison de la macro et micro-porosité qu'induisent racines et micro-faune forestière par exemple. Nous avons donc développé une paramétrisation de la capacité maximale d'infiltration dépendant du couvert végétal, plus à même de décrire la variabilité spatiale du ruissellement hortonien. Ces capacités maximales d'infiltration dépendent également de la saison et de la phase des précipitations (Tableau 6). Dans le modèle original J2000, la capacité d'infiltration des sols était spatialement uniforme sur les bassins.

La sous-estimation de la réactivité des bassins a été grandement corrigée par la réduction de la plupart des capacités d'infiltration sur les zones de plaine ; elles ont été inchangées en montagne, sauf sur les forêts qui ont requis un traitement particulier : une infiltration très réduite sur les forêts de feuillus de Saône, une infiltration relativement réduite sur les forêts de montagne, et l'infiltration initiale conservée sur les autres forêts de plaine.

Tableau 6 : Régionalisation des paramètres d'infiltration maximale.

Paramètre	Initial	Final				
		Tous types de surface sauf forêt PLAINE	Tous types de surface sauf forêt MONTAGNE	Forêts		
				Saône	Plaine	Montagne
maxInfSummer	80	40	80	30	80	50
maxInfWinter	100	50	100	40	100	60
maxInfSnow	40	20	40	10	40	20

Comme pour l'imperméabilisation des sols à la partie précédente, c'est la réactivité observée des forêts de Saône (et plus modérément des forêts alpines) qui nous a conduits à limiter les capacités d'infiltration sur ces forêts. La raison physique sous-tendant ce phénomène est peu claire. L'hypothèse d'une infiltration réduite sous couvert de feuillus en hivers en raison d'une couverture de feuilles peu infiltrante peut être avancée. Il est aussi possible qu'un biais de modélisation (dans l'interception des précipitations par les canopées par exemple, ou la génération du ruissellement sur les zones en pente) nous impose ce choix paramétrique. Il prendrait alors la forme d'une compensation d'erreurs.

3.3.4 Saisonnalité des débits : taille des réservoirs du sol superficiel

Une analyse visuelle des régimes observés et simulés de l'ensemble des stations du Rhône avait permis d'identifier que des stations présentaient un décalage d'un mois dans la simulation du régime. L'étude sur le bassin versant de la Durance dans le cadre de R²D² 2050 avait permis de constater que la modification des capacités de stockage des sols avait un effet important sur le régime. **Il avait été retenu d'augmenter la taille des réservoirs du sol pour améliorer la modélisation hydrologique.**

Par rapport à ces « références » acquises sur la Durance, les bases de données de sol disponibles sur le reste du bassin du Rhône (cf. 2.2) proposent des stockages plus importants sur les sols très profonds, et moins importants sur les sols peu profonds.

Tableau 7 : Capacités de stockage des sols retenues pour la Saône et le reste du bassin du Rhône.

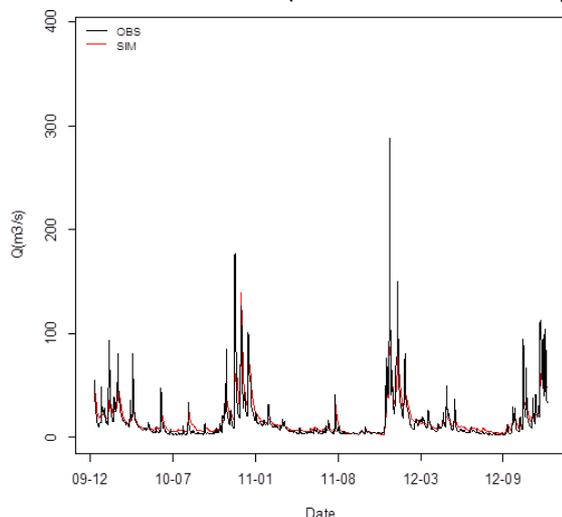
Classe de sol	Epaisseur moyenne (en cm)	Stock maximal moyen (en mm)		RU moyenne (en mm)		Air Capacity (en mm)	
		Saône	Reste du bassin	Saône	Reste du bassin	Saône	Reste du bassin
1	110	375	507	125	136	250	371
2	80	266	560	86	146	180	413
3	50	194	530	54	130	140	400
4	20	155	330	25	41	130	248

Sur la Tille, le respect de ces-dernières valeurs (que nous appellerons « BD » en référence aux bases de données) conduit à de meilleures performances en termes de saisonnalité. C’est aussi le cas sur l’ensemble du bassin de la Saône, mais ces valeurs BD dégradent en revanche notre modélisation sur le reste du Rhône et *a fortiori* sur la Durance. Une distinction Saône / Reste du bassin a donc aussi été adoptée pour la taille des réservoirs du sol superficiel (Tableau 7).

3.3.5 Révision du routage

Malgré les nettes améliorations apportées à la simulation sur le bassin du Rhône, nous avons mis en évidence un problème persistant sur le bassin versant : au-delà d’une certaine surface drainée, nous observons un « lissage » des débits simulés (Figure 12).

La Saône à Cendrecourt (U0230010 – 1170 km²)



La Saône à Pagny-la-Ville (U1420010 – 11600 km²)

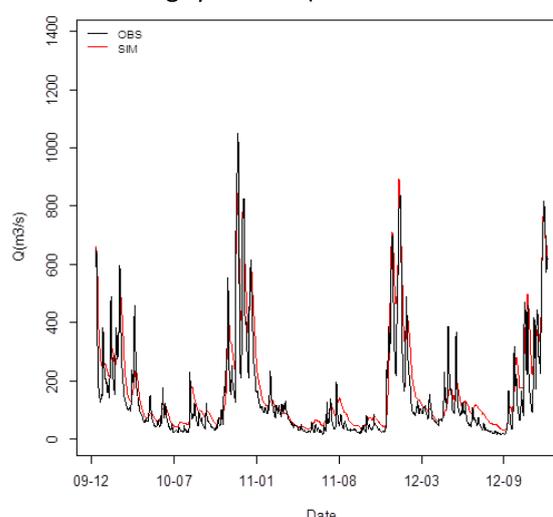


Figure 12 : Représentation des débits journaliers simulés (rouge) et observés (noir) sur les stations de la Saône à Cendrecourt (gauche) et à Pagny-la-Ville (droite) sur la période 01/01/2010 au 31/12/2012.

Sur la Figure 12, on peut voir que les pics sont bien simulés et que le modèle réagit bien aux variations de débits à la station de la Saône à Cendrecourt (gauche). Au contraire, à la station de la Saône à Pagny-la-Ville (droite), les pics ne sont pas aussi marqués et on remarque une sous-réaction combinée à un temps de récession trop long. Afin d’identifier la source du problème, nous avons dans un premier temps fixé toutes les pentes des cours d’eau du bassin du Rhône à 5%. Dans ces conditions, la simulation aux stations ayant une surface drainée élevée s’est révélée bien meilleure. Ceci témoigne d’un problème au niveau du module de routage car il s’agit du seul module présent dans le modèle J2000-Rhône à utiliser la pente du cours d’eau comme paramètre. Evidemment,

cette solution de fixer les pentes à une valeur donnée n'est pas envisageable car la pente est un paramètre physique qui ne peut être modifié.

L'analyse plus détaillée du module de routage nous a montré que le calcul d'onde cinématique modifiée implémenté dans J2000 implique une exponentielle décroissante dans le calcul de la quantité d'eau sortant d'un brin. Sur les grands cours d'eau de plaine (pente relativement faible), ceci est la cause d'un amortissement trop important du signal. N'ayant pas matériellement le temps, dans le projet MDR, de réécrire le module de routage, nous avons opté pour une solution plus rapide (bien que non physique) : faire intervenir un paramètre de calage, TA, qui est un facteur multiplicatif dans l'exponentielle et donc peut « accélérer » le transfert d'un brin à l'autre. Ce paramètre a été précisément conçu pour ce type d'application, mais son potentiel n'était pas utilisé dans la version d'origine de J2000.

Nous avons décidé de régionaliser le paramètre TA en fonction de l'aire drainée par le brin de rivière. Une analyse de sensibilité a été réalisée sur le paramètre TA afin d'adapter au mieux la réactivité du modèle et le temps de récession. Cette régionalisation s'est effectuée par essais-erreurs en échantillonnant des valeurs de TA de 0.1 à 10, et en regardant les effets combinés de différents choix de TA par tailles de sous-bassins aux stations de contrôle du Rhône. Nous avons remarqué des différences de comportements lors de la modification du paramètre TA entre le bassin de la Saône et le reste du bassin. En raison des pentes très faibles sur la Saône, le modèle a du mal à représenter fidèlement l'écoulement dès l'amont. Nous avons donc autorisé un paramètre TA plus élevé pour les brins dont la surface drainée est inférieure à 300 km² sur le bassin versant de la Saône à Mâcon. Le Tableau 8 présente les résultats la régionalisation du paramètre TA pour les stations non influencées du bassin du Rhône. Cette régionalisation conduit globalement à des améliorations du critère de Nash sur les stations retenues sur le bassin.

Tableau 8 : Distribution du paramètre TA sur le bassin du Rhône et impact sur la modélisation en terme de critère de Nash pour les stations non influencées du bassin du Rhône.

Surface drainée (km2)	TA retenu Saône	TA retenu	Nb Stations	Dégradation Nash		Aucun effet	Amélioration Nash	
				Forte (> 0.05)	Légère (< 0.05)		Légère (< 0.05)	Forte (> 0.05)
Entre 20 et 100	1	0,5	53	5	1	19	6	22
Entre 100 et 300	2	1,5	48	8	15	7	13	5
Entre 300 et 25000	5	2	50	1	6	6	13	24
Supérieure à 25000	10		0	0	0	0	0	0
			Bilan	14	22	32	32	51

On remarque que la régionalisation du paramètre TA sur les stations aux surfaces drainées comprises entre 100 et 300 km² n'est globalement pas bénéfique. Cependant, les dégradations majeures sont localisées sur des zones où les simulations sont très mauvaises en raison des spécificités du terrain (cas de la Dombes et région karstique sur le Doubs par exemple).

3.3.6 Autres ajustements mineurs

D'autres ajustements mineurs ont été apportés aux paramétrisations initiales du modèle, que nous mentionnons ici par souci d'exhaustivité :

- la classe géologique « marne » a été associée à des capacités de stockage profond différentes pour le bassin de la Saône par rapport au reste du bassin. Cette capacité avait en effet été choisie par

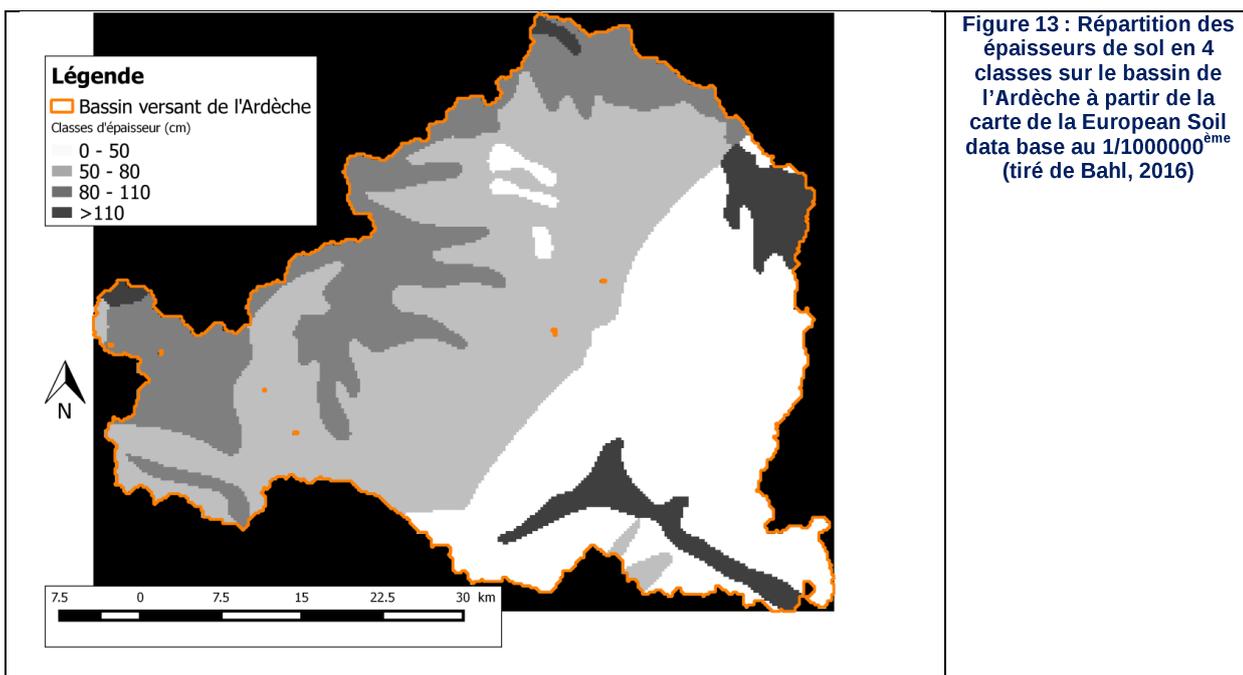
optimisation du modèle sur le bassin du Roubion à Soyans, occupé par des marnes à 50% et sans doute peu représentatif de la qualité de ce substrat sur l'ensemble du bassin,

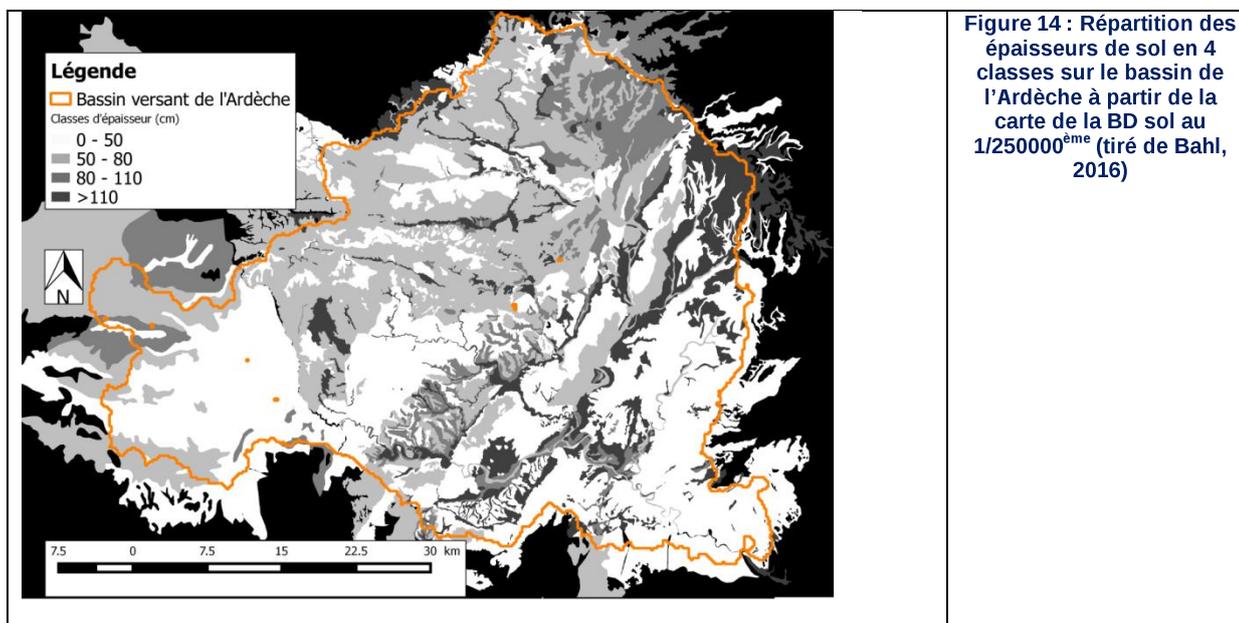
- la région des Dombes a fait l'objet d'une paramétrisation spécifique (sous forme de nouvelle classe de couvert végétal) pour représenter les effets des étangs :
 - o leur évaporation via des coefficients culturaux plus élevés,
 - o leur stockage d'eau via des capacités d'infiltration et de stockage des sols accrues.

3.3.7 Evaluation de l'apport de données pédologiques à plus haute résolution

Sur la région Rhône-Alpes, il a été possible de récupérer les bases de données sol au 1/250000^{ème} issues du programme IGCS. Une fois ces données mises en forme, l'apport de ces données à la modélisation J2000-Rhône a été évalué sur le sous-bassin de l'Ardèche qui avait fait l'objet de travaux dans le cadre d'autres projets et sur lesquels des données de débits de qualité étaient disponibles (stage de N. Bahl, 2016). A noter que, sur ce bassin, on a ainsi pu exploiter une dizaine de stations pour l'évaluation, alors que seulement 4 stations ont été considérées sur ce bassin dans l'évaluation du modèle J2000-Rhône global.

La mise en œuvre du modèle sur le seul bassin de l'Ardèche, ainsi que l'ajout de nouvelles stations, ont nécessité de refaire tourner l'ensemble de la chaîne de modélisation : la génération du maillage en HRUs à l'aide de HRU-delin, la génération du code incluant les nouvelles stations, la révision des fichiers de paramètres du modèle, les simulations proprement dites, puis leur post-traitements pour calculer les critères de performance et tracer les graphes résumant les sorties.





La Figure 13 et la Figure 14 illustrent les différences de résolution entre les deux informations pédologiques pour l'épaisseur de sol, qui a été divisée en 4 classes (nous avons con: Répartition des épaisseurs de sol en 4 classes sur le bassin de l'Ardèche à partir de la carte de la European Soil data base au 1/1000000^{ème} (tiré de Bahl, 2016)servé ici les 4 classes définies avec les données au 1/ 1000000^{ème}). Néanmoins, en dépit de ces différences de résolution, les nombres et formes des HRUs obtenues à l'issue des traitements avec le logiciel HRU-delin sont proches pour les deux cartes (Figure 15). Ceci est probablement lié au fait que les paramètres de HRU-delin liés à la topographie et au découpage en sous-bassins, ainsi que les tailles minimales des HRUs sont similaires dans les deux cas. On note cependant des différences dans les contours des HRUs entre les deux cartes.

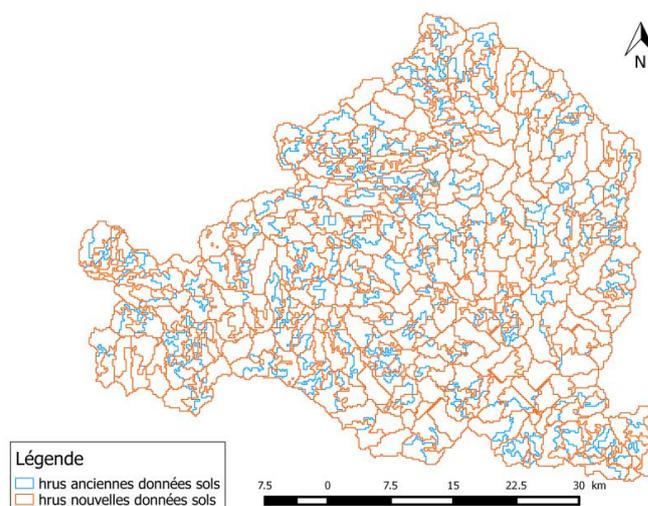


Figure 15 : Maillage en HRUs obtenu avec la carte pédologique au 1/1000000^{ème} de la European Soil Data Base (bleu) et avec la carte pédologique au 1/250000^{ème} du programme IGCS (orange) (tiré de Bahl, 2016)

Le bassin de l'Ardèche a une taille de 2300 km² environ, avec des temps de réponse rapides, notamment lors des épisodes pluvieux d'automne. Une évaluation au pas de temps horaire de l'apport des données sol IGCS aurait été préférable, mais sortait du cadre du stage proposé. Les simulations ont donc été réalisées à l'échelle journalière.

Tableau 9 : Simulations réalisées avec J2000-Rhône sur l’Ardèche.

Simulation	Distinction Plaine/Montagne	Données utilisées pour le fichier sol	Données utilisées pour le maillage
Simulation de référence sans distinction plaine/montagne	Non	Saône	Soil European Database (1/1 000 000ème)
Simulation de référence avec distinction plaine/montagne	Oui	Saône (plaine) et Durance (montagne)	
Simulation 1	Non	Saône	BD Rhône Alpes (1/250 000ème)
Simulation 2	Oui	Saône (plaine) et Durance (montagne)	
Simulation 3	Non	Rhône-Alpes	
Simulation 4	Oui	Rhône-Alpes (plaine et montagne)	

Six simulations ont été réalisées (Tableau 9). Deux simulations de référence (avec ou sans distinction plaine/montagne) ont été définies et s’appuient sur les données sol au 1/1000000^{ème}. Les simulations 1 et 2 permettent d’isoler l’impact des différences de maillages entre les deux cartes pédologiques. Les simulations 3 et 4 permettent d’évaluer l’impact du maillage et de l’utilisation de valeurs différentes pour les propriétés du sol entre les deux bases de données. Pour les autres paramètres du modèle, les valeurs finales du modèle J2000-Rhône ont été utilisées. Le modèle utilisé ici est le modèle en hydrologie naturelle.

Le Tableau 10 illustre les performances du modèle pour l’ensemble des stations disponibles et les différentes simulations. On note que, sur ce bassin, les performances sont meilleures sans la distinction plaine-montagne. Par ailleurs, l’utilisation de la base IGCS au 1/250000^{ème} conduit à des performances similaires, voire légèrement meilleure que l’utilisation des données au 1/1000000^{ème}. A noter néanmoins que ces performances sont obtenues sans recalage particulier. Le biais important et la sous-estimation systématique des débits par le modèle sont liés au fait que ces simulations ont été réalisées sans prendre en compte la dérivation Loire-Ardèche.

Tableau 10 : Valeur de la moyenne du biais et de la médiane du critère de Nash sur l’ensemble des stations disponibles sur l’Ardèche.

Simulation	Biais moyen	Critère de Nash (\sqrt{Q}) médian
simulation de référence sans distinction plaine/montagne	-18,9	0,74
1	-19,3	0,76
3	-19,3	0,76
simulation de référence avec distinction plaine/montagne	-27,9	0,70
2	-27,8	0,71
4	-26,8	0,72

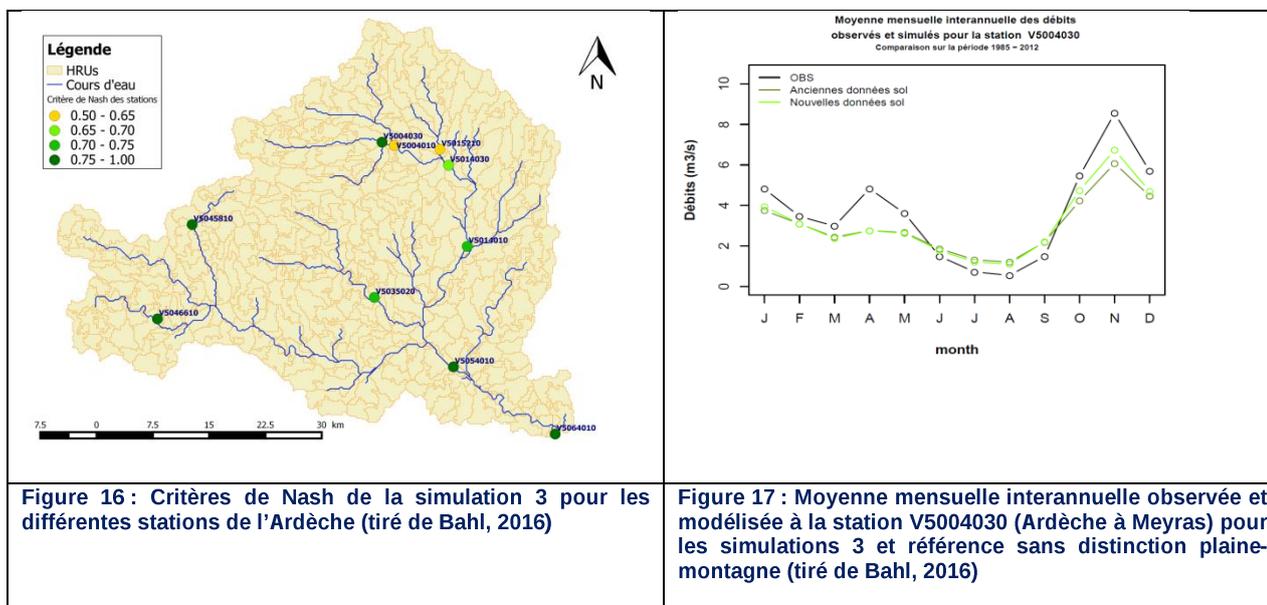


Figure 16 : Critères de Nash de la simulation 3 pour les différentes stations de l’Ardèche (tiré de Bahl, 2016)

Figure 17 : Moyenne mensuelle interannuelle observée et modélisée à la station V5004030 (Ardèche à Meyras) pour les simulations 3 et référence sans distinction plaine-montagne (tiré de Bahl, 2016)

La Figure 16 illustre les performances (critère de Nash) pour les différentes stations de l’Ardèche et la Figure 17 montre qu’on améliore sensiblement la simulation des débits d’automne sur certaines stations.

Ce travail montre l’apport des données sols à plus haute résolution pour la modélisation J2000-Rhône. Sur le bassin de l’Ardèche, on obtient des performances similaires à la simulation de référence, sans ajustement supplémentaire. Ce résultat devrait être vérifié sur d’autres sous-bassins. Il serait aussi intéressant d’évaluer le modèle J2000-Rhône à un pas de temps plus fin (horaire) pour évaluer de manière plus complète l’apport de ces données. Dans tous les cas, l’application a montré la souplesse des outils de maillage et de modélisation, qui permettent, si besoin, d’affiner la modélisation sur certains sous-bassins cibles, sans un effort démesuré.

3.4 Conclusions sur les améliorations en hydrologie naturelle

Ainsi, au terme de ces modifications dans la paramétrisation du modèle J2000-Rhône, les simulations sur l’ensemble du bassin ont été globalement améliorées (Figure 18). **La moitié de nos stations (117/234) ont désormais un critère de Nash sur les débits supérieur à 0.5, contre seulement 16 % avant les ajustements de paramétrisation en hydrologie naturelles présentées ici.** 73 % de nos stations (171/234) ont désormais un critère de Nash supérieur à 0.3. La carte des différences de Nash illustre que **la majorité des améliorations ont été réalisées sur la Saône, où différentes stratégies ont été conjointement mises en œuvre pour obtenir une réactivité et une dynamique réaliste des cours d’eau** : limitation de la taille des réservoirs superficiels et profond, réduction de l’infiltration sur les sols, accélération du routage sur les petits cours d’eau des bassins de tête. Des améliorations sont aussi visibles sur les cours d’eau alpins et des Cévennes, en particulier sur la haute et moyenne Durance et ses affluents, sur l’Arve et l’Ardèche. Ici, c’est aussi majoritairement la limitation de l’infiltration en zone de forêts qui a joué.

En revanche, quelques points faibles subsistent :

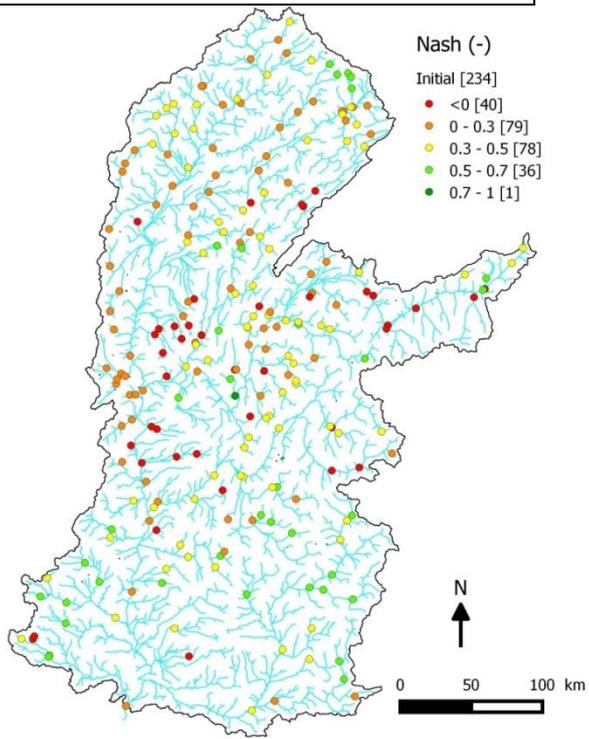
- nos paramétrisations semblent moins adaptées à certains petits bassins de la Saône sur lesquels les performances ont été dégradées,
- la région de la Dombes, en dépit d’une paramétrisation spécifique, présente des scores de Nash minés par une surestimation des débits pouvant aller jusqu’à un facteur 2. La probable surestimation des pluies

de SAFRAN sur cette région fournit une explication partielle à ce biais, mais elle n'est sans doute pas la seule.

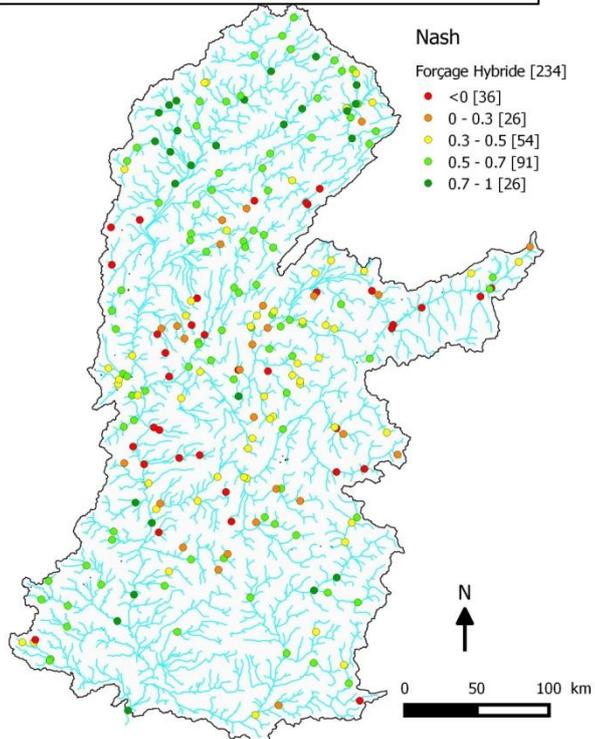
Sur une partie des affluents de l'Isère, et même pour des stations réputées non-influencées (Avérole à Bessan, Doron à Bauzel, Romanche à Mizoën), les performances sont parfois modérées : il s'agit de la combinaison de déficiences identifiées dans le module de neige (illustrées sur la Romanche à Mizoën en Figure 19) et d'un déficit clair de précipitations sur le massif alpin dans SAFRAN (qui fournit les précipitations du forçage hybride en dehors du bassin de la Durance). Ce déficit est illustré ici sur le cas caractéristique de l'Avérole à Bessan (Figure 19).

Nous mettons en regard ces performances avec un indicateur du degré d'influence des stations : celui-ci correspond au code d'influence renseigné par le gestionnaire des stations dans la Banque HYDRO ; nous y avons ajouté une identification des stations karstique sur la base de l'expertise d'Irstea (Figure 20).

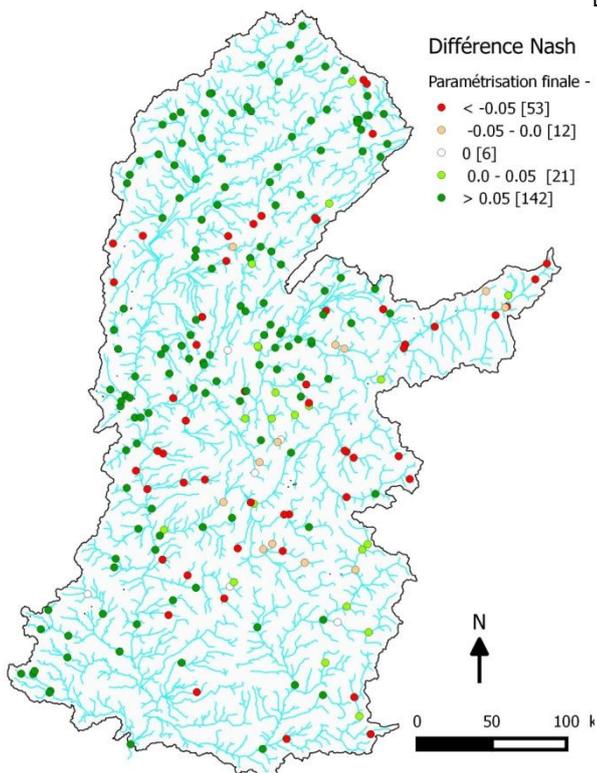
Critère de Nash aux stations AVANT nos modifications



Critère de Nash aux stations APRES nos modifications



Delta-Nash (APRES « moins » AVANT)



Biais moyen du module simulé (APRES), mm/an

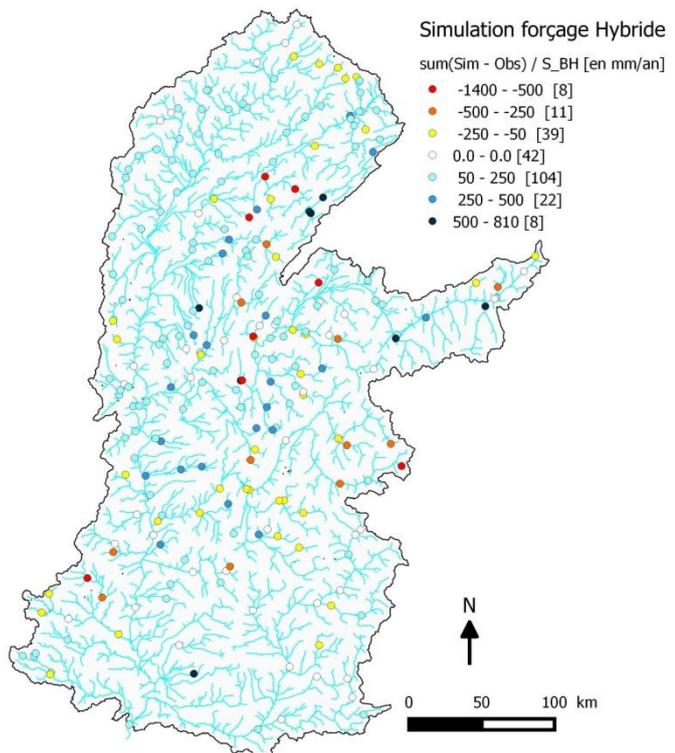


Figure 18 : En haut : Critère de Nash à nos stations de contrôle AVANT et APRES les modifications en hydrologie naturelle décrites dans cette partie 3. Ces simulations ont été réalisées avec le forçage hybride. En bas : Différence entre les critères de Nash et biais du modèle en module.

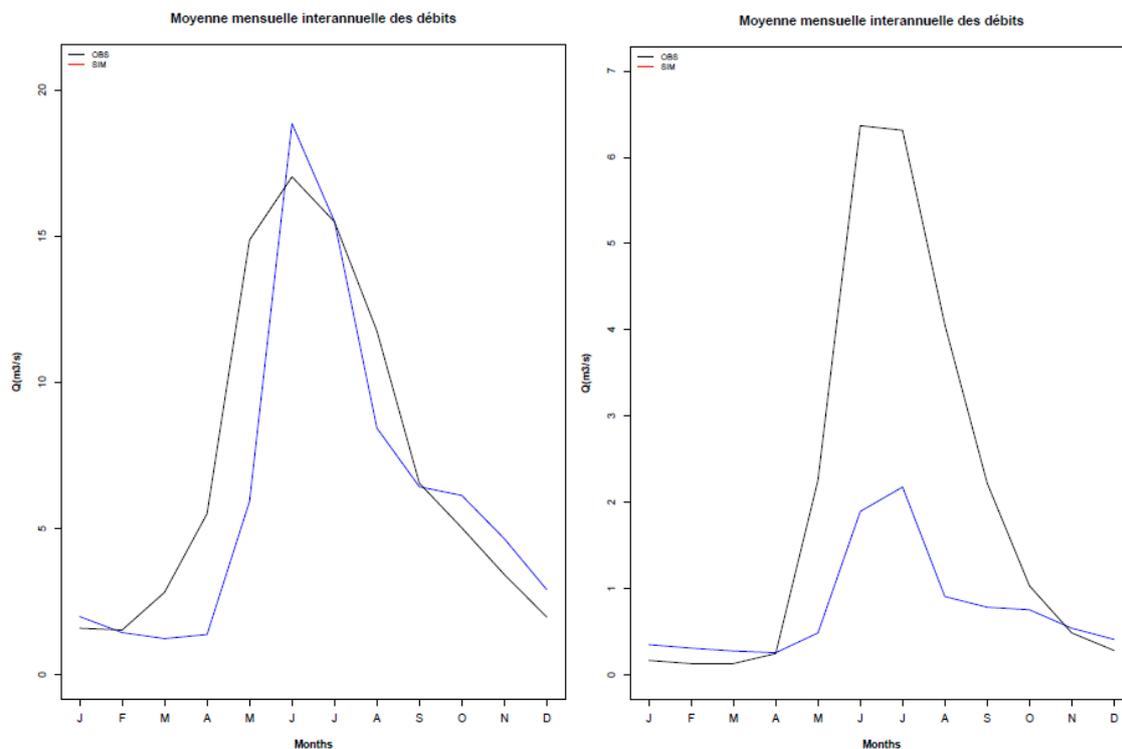


Figure 19 : Illustration de biais résiduels de la modélisation en zone de montagne. A GAUCHE : la Romanche à Mizoën (problèmes de saisonnalité du débit lié à la représentation de la fonte). A DROITE : l'Avérole à Bessans (sous-estimation dramatique des débits, en lien avec une sous-estimation des précipitations dans les forçages).

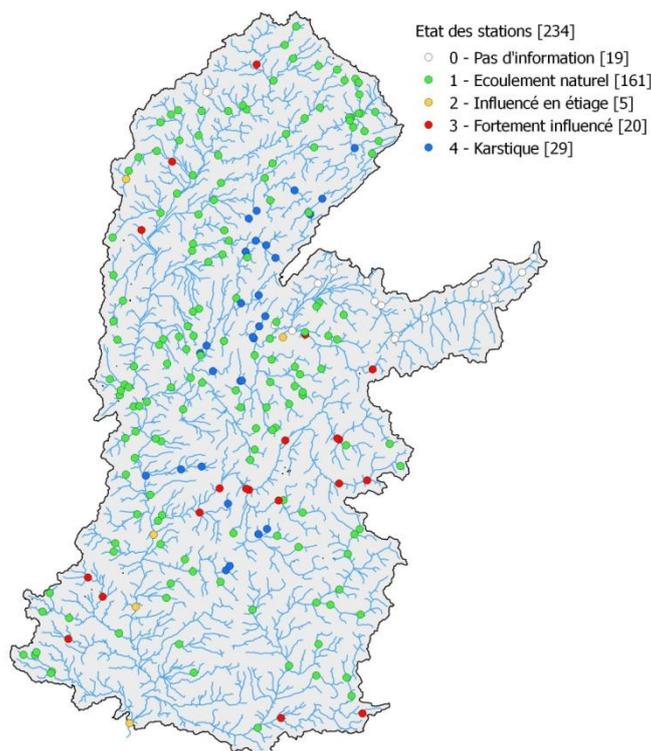


Figure 20 : Degré d'influence de nos stations de contrôle, et stations identifiées comme karstiques.

Nos simulations en hydrologie naturelle aux stations influencées de la Tarentaise et Haute-Maurienne présentent des scores de Nash faibles, ce qui est attendu. Egalement, une part importante de nos Nash décevants porte sur des stations où la présence de karsts est avérée : la moitié des stations réputées karstiques ont un score de Nash inférieur à 0.3 ; il est même inférieur à 0 pour un tiers d'entre elles.

Les performances obtenues avec le forçage SAFRAN sont également satisfaisantes (Figure 21) ; elles ne diffèrent de celles montrées précédemment que sur le bassin de la Durance. Elles confirment la possibilité d'utiliser la base SAFRAN comme forçage météorologique.

Au terme de ce travail, il apparaît qu'un certain nombre d'ajustements des paramètres du modèle sur certaines zones a été rendu nécessaire par une classification initiale de l'occupation du sol et de la géologie en un nombre de classes trop restreint, ne permettant pas de représenter de manière satisfaisante la diversité des contextes du bassin du Rhône. Il serait utile de revenir sur ces choix dans une deuxième phase de développement du modèle. De plus, le travail manuel d'ajustement des paramètres a conduit à des adaptations un peu au cas par cas, et il n'est pas facile dans ces conditions de conserver une vision claire de la cohérence et de la robustesse globale du modèle. S'il est à peu près sûr que la mise en place d'un tel modèle est un travail continu qui sera amélioré graduellement au fil des années, des outils spécifiques sont nécessaires pour réaliser ce travail de façon plus rigoureuse. C'est précisément l'objet d'une thèse, qui démarrera en janvier 2017, et qui devrait permettre de développer un cadre d'évaluation pour modèle hydrologique distribué allant au-delà des critères de performance classiques (et utilisés ici), s'appuyant sur les signatures hydrologiques. Les signatures hydrologiques sont des indicateurs dérivés des données observées et caractérisant différents aspects de la réponse hydrologique de façon physiquement interprétable. Chaque indicateur est spécifique d'un aspect du comportement du bassin versant (débit de base, saisonnalité, réaction à un événement, etc...), et permet de quantifier la capacité ou non d'un modèle à représenter tel ou tel processus (au-delà de l'analyse visuelle). On espère ainsi arriver à une paramétrisation à la fois plus robuste et rigoureuse d'un point de vue scientifique, mais aussi à de meilleures performances. Cela permettra de disposer d'une base plus stable et plus solide pour les études de prospective.

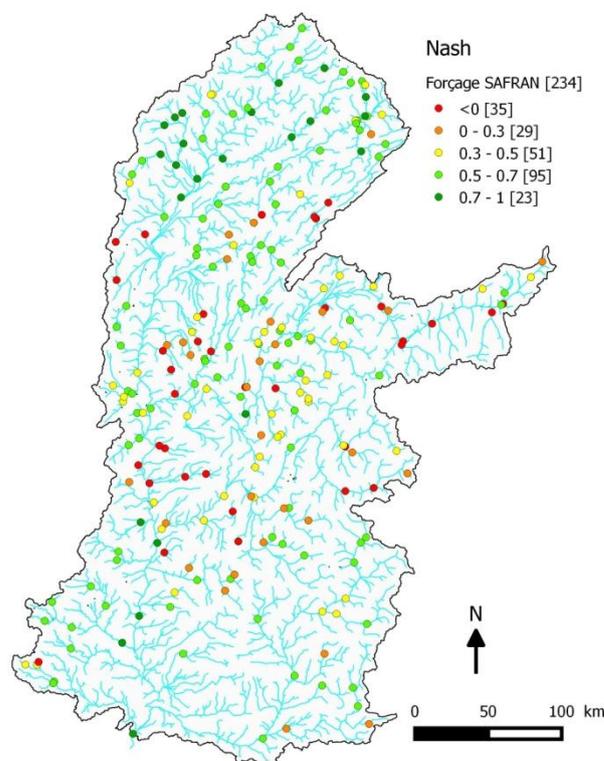


Figure 21 : Critère de Nash à nos stations de contrôle et APRES les modifications en hydrologie naturelle décrites dans cette partie. Cette simulation a été réalisée avec le forçage météorologique SAFRAN.

4 Impact anthropique

4.1 Barrages et dérivations

4.1.1 Enjeux et périmètre de la modélisation

L'hydrologie du Rhône est perturbée par de nombreux ouvrages. Sur certains affluents (Isère, Durance), les grands barrages ou les galeries de dérivation absorbent ou dérivent une part importante de l'écoulement, influant sur le bilan hydrologique total ou la saisonnalité des écoulements. Cet impact rend indispensable la prise en compte du rôle hydrologique de ces ouvrages dans un modèle destiné à simuler la ressource effective dans les cours d'eau du bassin versant, à des fins de sensibilité des usages notamment. C'est l'ambition du module d'influence « barrages et dérivations » de J2000-Rhône.

Le modèle J2000-Rhône fonctionnant au pas de temps journalier, les ouvrages au fil de l'eau, dont l'impact hydrologique se fait sentir à une échelle infra-journalière, ne sont pas représentés. C'est le cas de la plupart des ouvrages hydro-électriques du Rhône en aval de Lyon. Dans le cadre de la modélisation du Rhône, nous n'avons retenu que les principaux ouvrages, en termes de **volume de stockage (capacité totale > 50 Mm³ pour les barrages)** (Tableau 11 et Figure 22). Ce choix de représentation a ses limites : la liste des ouvrages représentés n'est pas exhaustive ; certains ensembles d'ouvrages comme les barrages du Drac sont représentés de façon agrégée, rendant délicate la modélisation hydrologique sur les tronçons intermédiaires entre ces ouvrages. En revanche, notre modélisation a le mérite de représenter les principaux réservoirs et dérivations d'importance au plan de la dynamique hydrologique journalière sur le bassin du Rhône, et d'esquisser ainsi les grandes lignes de l'influence des retenues et dérivations à vocation hydro-électriques ou pour l'irrigation sur notre domaine d'étude.

Tableau 11 : Caractéristiques des grands ouvrages hydrauliques du bassin du Rhône pris en compte dans le projet MDR. (Bge : Barrage ; PH : de production d'hydroélectricité ; PHSE : de production d'hydroélectricité couplée au soutien des étiages ; T : Transfert ; OUT : vers l'extérieur du bassin ; IN : entrant dans le bassin).

ID	Nom	Type	Capacité Maximale (Mm ³)	Ordre de grandeur de l'influence journalière sur le débit ²⁰ (m ³ /s)
A	Vouglans	Bge-PHSE	600	+/- 30
B	Léman	Bge-PH	89000	+/- 50
BARRAGES	C1	Tignes	Bge-PH	+/- 25
	C2	Roselend	Bge-PH	+/- 25
	D1	Mont-Cenis	Bge-PH	+/- 15
	D2	Bissorte	Bge-PH	+/- 3
	E1	Chambon	Bge-PH	+/- 4
	E2	Grd Maison	Bge-PH	+/- 7

²⁰ Cette colonne n'est pas une donnée à proprement parler. Mais il nous a paru utile d'indiquer des valeurs repères permettant de cerner l'importance et l'impact potentiel, en termes de débits, de ces ouvrages. Les valeurs indiquées ici proviennent des fonctions objectifs présentées dans le rapport MDR de 2014, qui sont originellement mensuelles donc non représentatives de la variabilité journalière. Pour les barrages, on a reporté la moyenne des débits minimum et maximum de stockage ou de lâcher ; pour les dérivations, le débit moyen annuel dérivé.

	E3	Monteynard+... ²¹	Bge-PH	440	+/- 25
	F	Serre Ponçon	Bge-PHSE	1040	+/- 100
	G	Chassezac	Bge-PHSE	58	+/- 7
	H	Sainte Croix	Bge-PHSE	760	+/- 15
DERIVATIONS	I1	Isère-Arc	T	--	60
	I2	Arc-Isère	T	--	40
	J1	Verdon-Canaux	T-OUT	--	20
	J2	Durance-Canaux	T-OUT	--	140
	K	Loire-Ardèche	T-IN	--	8

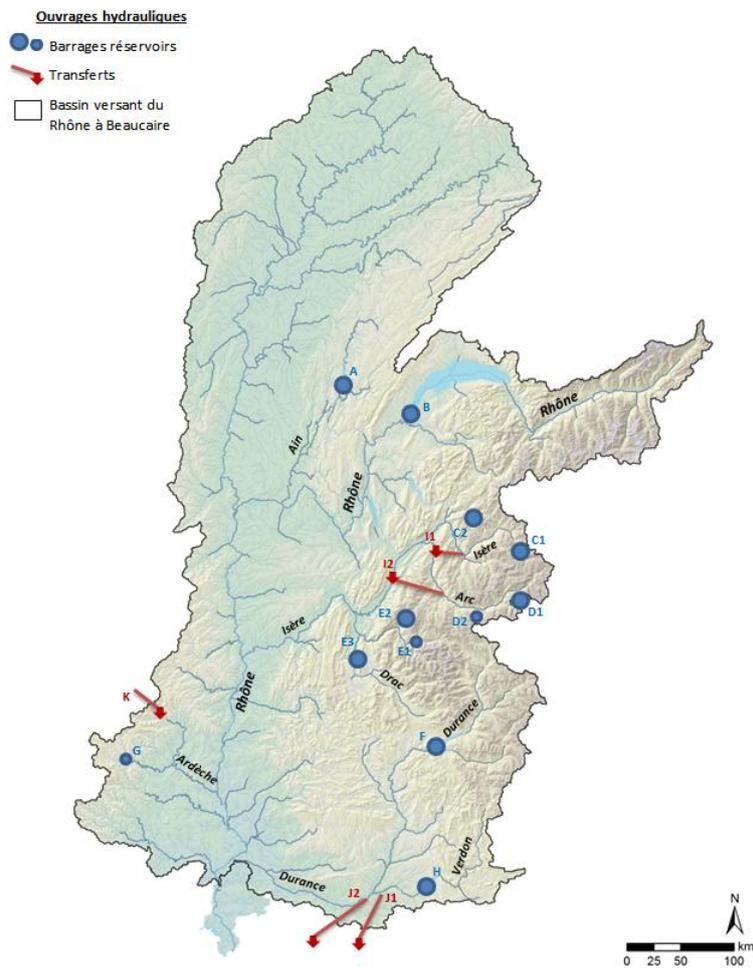


Figure 22 : Présentation des principaux ouvrages hydrauliques (barrages et dérivations) présents sur le bassin du Rhône, ayant un effet notable sur le régime hydrologique

²¹ Monteynard +... : cette désignation s'applique à l'ensemble des ouvrages hydrauliques du Drac (barrages du Sautet (108 Mm³), de St Pierre de Cognet (28 Mm³), du Monteynard (275 Mm³) et de Notre Dame de Commiers (34 Mm³), dont seul le fonctionnement d'ensemble est modélisé).

4.1.2 Fonctionnement du module d'influence « Barrages et dérivations »

Le rapport MDR de 2014 a mis en évidence la difficulté d'adopter une représentation du fonctionnement des ouvrages hydrauliques pilotée par l'état du système (débit amont, stock d'eau disponible) et des éléments extérieurs au contexte hydrologique, que sont par exemple un respect de cote de remplissage (pour des besoins touristiques ou agricoles) et l'intérêt à turbiner (lui-même dépendant fortement de facteurs socio-économiques).

Nous avons donc fait le choix de représenter, en climat présent (1987-2012), le fonctionnement saisonnier moyen des ouvrages sélectionnés sur notre domaine d'étude. Ce fonctionnement est traduit par des **fonctions objectifs (FO)** de remplissage ou vidange des barrages, qui sont fournies en entrées du modèle pour chaque ouvrage. L'avantage de cette méthode, outre sa simplicité, est qu'elle intègre les contraintes liées aux différents usages de l'eau des barrages (hydroélectricité, irrigation, cote touristique etc.), ainsi que les débits réservés, sans que celles-ci aient besoin d'être explicités au cas par cas. **La méthodologie déployée pour l'élaboration des FOs a été détaillée dans le rapport 2014.** Un barrage ou un groupe de barrages est caractérisé par sa fonction objectif, son volume minimal et maximal, et les deux brins de rivière auxquels il est connecté (amont / aval). La connaissance de la capacité du barrage, et la simulation de son stock journalier et du débit à l'amont, permettent alors de déroger à la fonction objectif si le barrage est trop plein, trop vide, ou si le débit amont ne permet pas de prélèvement suffisant.

En cohérence avec cette représentation, nous avons initialement représenté une dérivation représentée comme la mise en relation de deux ouvrages : un ouvrage amont dont la FO n'est que prélèvement (FO négative), et un ouvrage aval dont la FO n'est que restitution (FO positive, avec la même amplitude). Malheureusement cette représentation ne donnait pas satisfaction. Aussi, un nouveau module de dérivation a été déployé dans la phase 2 du projet MDR : il réalise des transferts d'eau d'un brin de rivière vers un autre. L'eau est transférée entre la prise de la dérivation et son exutoire en un pas de temps de modélisation, c'est-à-dire un jour. Nous avons fait ce choix eu-égard à l'extension spatiale des dérivations représentées, qui couvrent quelques centaines de kilomètres lorsqu'elles sont internes à notre domaine d'étude. Nous examinerons les conséquences de ce choix sur notre modélisation sur un exemple de la partie 4.1.3. La prise d'eau est régie par une fonction objectif ; le volume transféré y déroge si l'eau disponible au niveau de la prise d'eau n'est pas suffisante. Notons que certaines dérivations (ex : Loire-Ardèche) connectent le bassin du Rhône à un bassin voisin : dans ce cas, seule la partie rhodanienne de la dérivation est prise en compte, avec une FO positive (apports au bassin du Rhône) ou négative (export hors du bassin du Rhône). Une des limites de notre approche est que les transferts internes à une HRU ne peuvent pas être représentés.

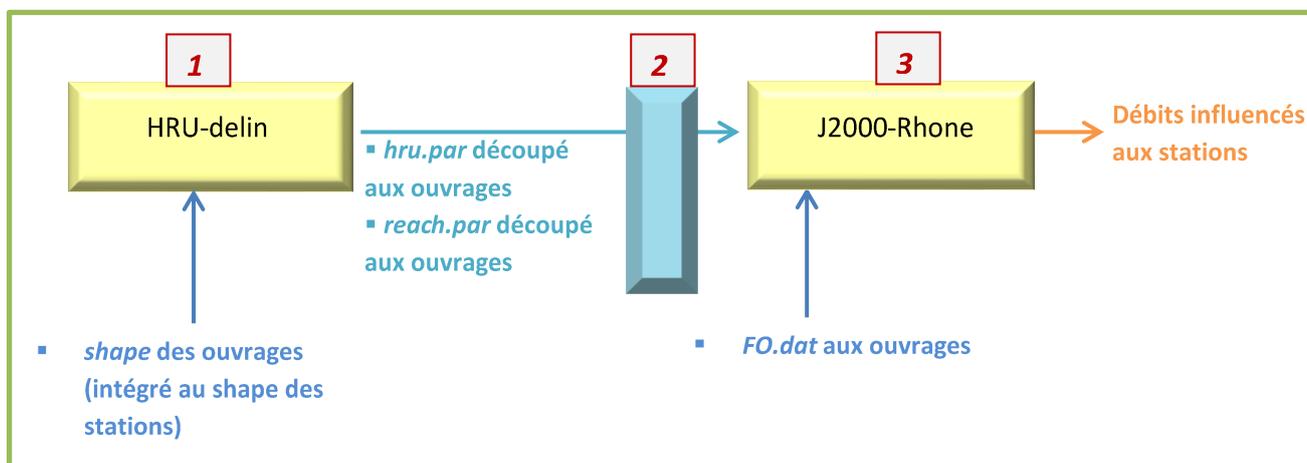


Figure 23 : Fonctionnement schématique du module d'influence « barrages et dérivations ».

Du point de vue de l'architecture du modèle, les FOs sont écrites au pas de temps journalier et pour chaque ouvrage dans un fichier de données *FO.dat*, qui est lu par le modèle de la même façon qu'un forçage climatique (e.g. *rain.dat*). Les actions (stockage et vidange pour un barrage, transfert pour une dérivation) sont alors effectuées à chaque pas de temps, dans la mesure du respect des capacités des ouvrages et du volume d'eau dérivable, au sein du module de routage de J2000-Rhône. **La Figure 23 résume les étapes nécessaires à la mise en place du module d'influence « barrages et dérivations ».** Le prélèvement, l'ajout ou le transfert d'eau au niveau des ouvrages a nécessité un découpage du maillage en ces points par l'outil HRU-delin. Cet aspect méthodologique sera abordé en partie 6.3.

4.1.3 Résultats

Cas d'une dérivation : la double dérivation Arc-Isère et Isère-Arc.

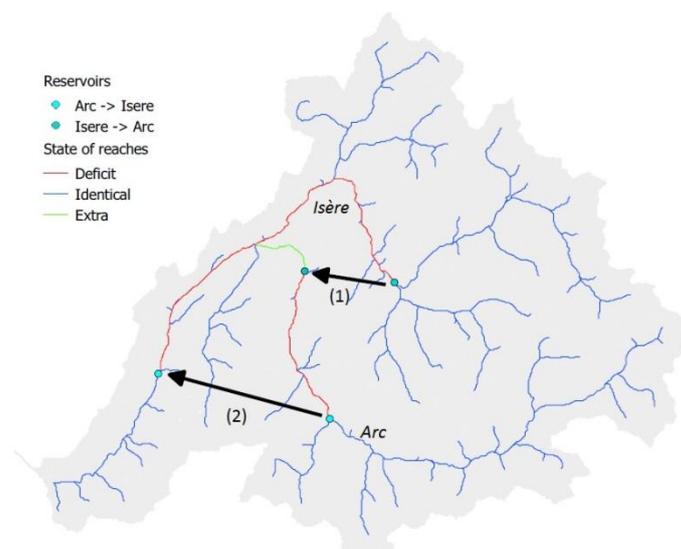


Figure 24 : Présentation et impact qualitatif de la double dérivation entre l'Arc et l'Isère.

La Figure 24 présente la configuration et l'influence qualitative de la double dérivation Isère-Arc et Arc-Isère sur les débits simulés à l'aval des points de prélèvement (« entrées des dérivations»). Elle résulte de la différence les débits annuels moyens simulés sans prise en compte des dérivations et avec prise en compte des dérivations. Les fonctions objectif de ces dérivations figurent en Figure 25.

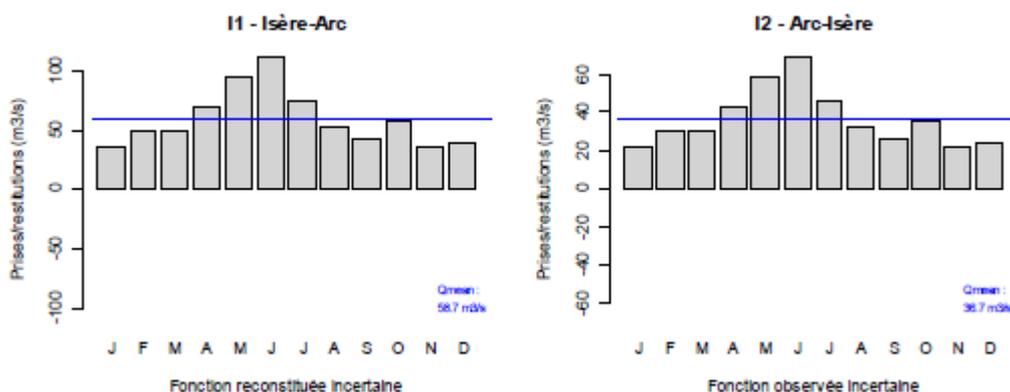


Figure 25 : Fonction objectif (FO) des deux dérivations Isère-Arc et Arc-Isère.

Les deux dérivations induisent un déficit à l'aval immédiat des points de dérivation ; sur l'Arc, ce déficit est comblé dès l'exutoire de la dérivation provenant de l'Isère, indiquant que les volumes transférés de l'Isère vers

l'Arc dépassent, en moyenne, ceux transférés de l'Arc vers l'Isère. C'est en accord avec les FOs prescrites pour ces dérivations, et confirmé par la chronique des volumes journaliers dérivés Figure 26.

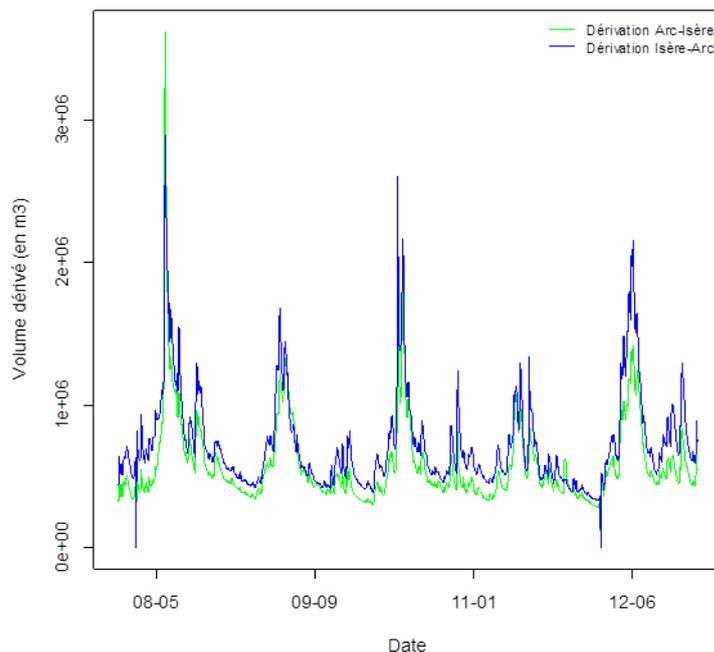


Figure 26 : Volumes journaliers dérivés au niveau des dérivations Isère-Arc et Arc-Isère sur la période 01/2008 – 12/2012.

En aval de l'exutoire de la dérivation la plus en aval, de l'Arc vers l'Isère, les simulations avec et sans dérivation ne présentent plus de différences (Figure 24). Dans la simulation sans dérivation, l'eau a été routée jusqu'à l'aval dans le réseau hydrographique. Avec la dérivation, les eaux dérivées regagnent le linéaire du cours d'eau au pas de temps suivant leur prélèvement. L'absence de différence entre les deux simulations à l'aval de l'exutoire aval de la double dérivation indique que l'eau routée par le réseau hydrographique et l'eau dérivée ont un temps de parcours caractéristique similaire sur cette dérivation. L'impact des deux dérivations est visible sur le réseau hydrographique entre les points de prélèvement et le dernier exutoire, par exemple sur l'Arc avant sa confluence avec l'Isère (Figure 27). Les volumes impliqués restent faibles en regard du débit total de l'Arc. L'absence de point de contrôle (station hydrométrique) sur les tronçons intermédiaires impactés par la double dérivation rend difficile la validation de notre modélisation sur ce cas d'étude. Il sera cependant peut-être possible d'exploiter, dans un futur proche, des données collectées par la DREAL sur ces tronçons.

Cas des barrages :

Dans le rapport MDR de 2014, nous avons mis en évidence une difficulté à simuler l'influence des barrages notamment sur la Durance : en effet, les débits des rivières y étant largement sous-estimés, les fonctions objectif étaient généralement non-satisfaites, mettant en défaut le remplissage des barrages. L'utilisation du forçage hybride en phase 2 du projet MDR, avec les précipitations SPAZM sur la Durance, a permis de résoudre ce problème. Ainsi, la Figure 28 montre que l'influence du barrage de Sainte-Croix à Vinon-sur-Verdon peut être modélisée, avec des lâcher d'eau en hiver pour la production hydro-électrique, du prélèvement au printemps et de la restitution en fin d'été en soutien d'étiage. La fonction objectif du barrage de Sainte-Croix est incertaine en raison de l'absence de données naturelles historiques existantes mais on remarque que le barrage permet une meilleure simulation de l'étiage et réduit (trop fortement d'ailleurs) un pic printanier des débits modélisés qui est absent des observations influencées.

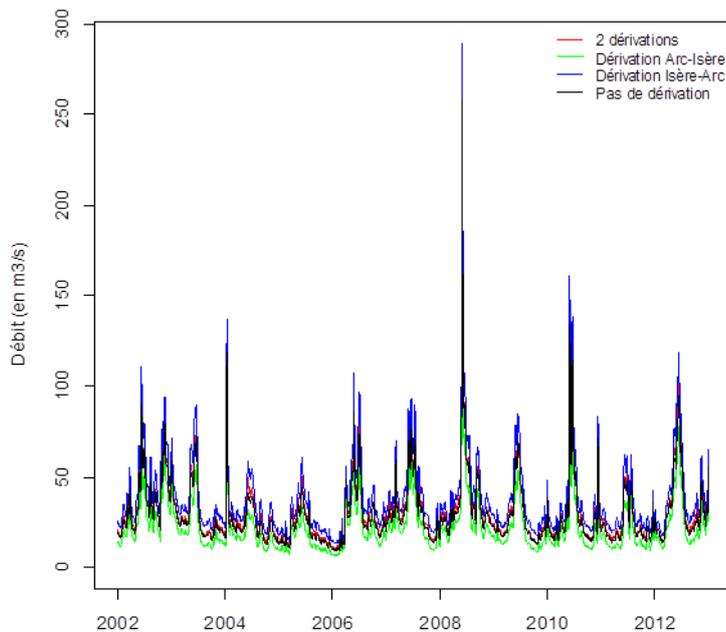


Figure 27 : Débit simulé de l’Arc à sa confluence avec l’Isère sans dérivation (noir), avec dérivation Isère-Arc (bleu), avec dérivation Arc – Isère (vert) et avec les 2 dérivations (rouge).

L’impact des ouvrages hydrauliques est également illustré sur l’Ardèche à St-Martin d’Ardèche (Figure 28). Dans le modèle J2000-Rhône, la station de l’Ardèche est influencée par les barrages du Chassezac et l’apport d’eau en provenance de la Loire. On constate que l’influence des ouvrages sur le bassin est en accord avec les observations, notamment l’apport de la dérivation Loire – Ardèche au printemps, à l’automne et en hiver.

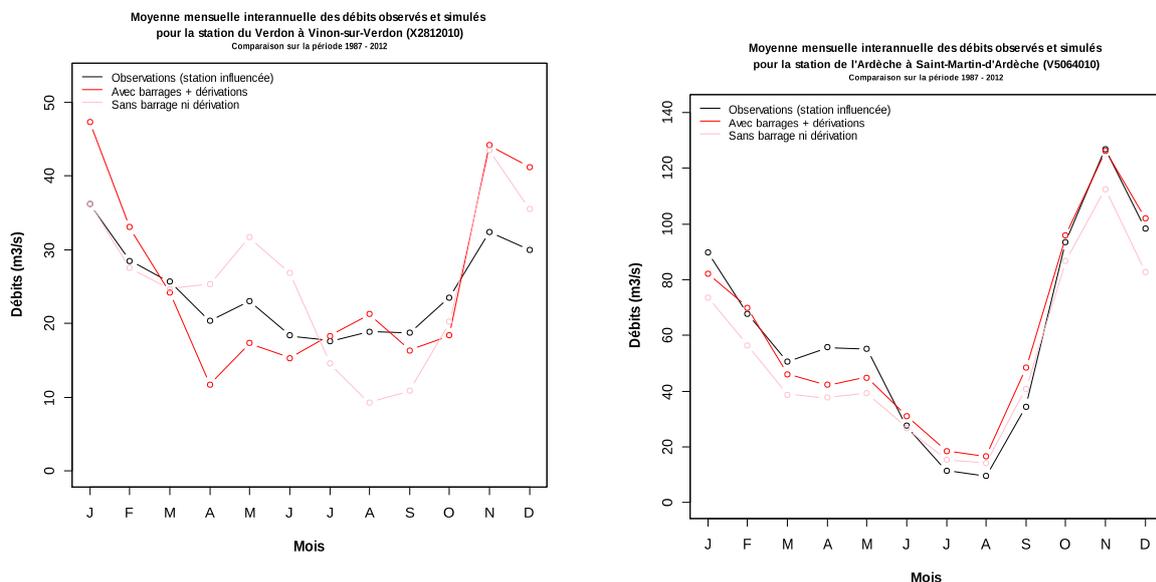
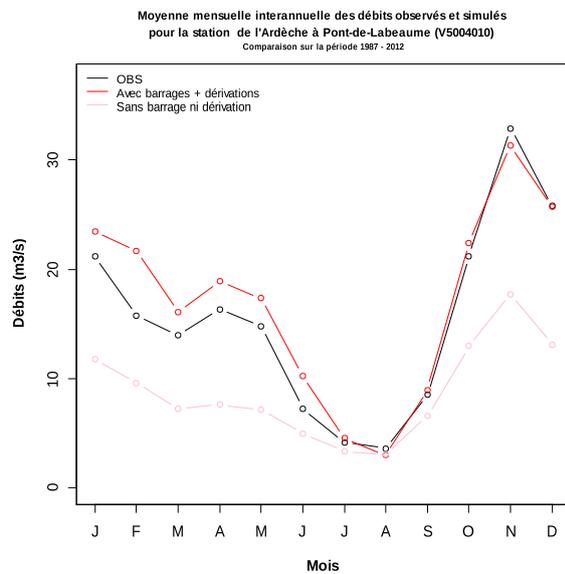
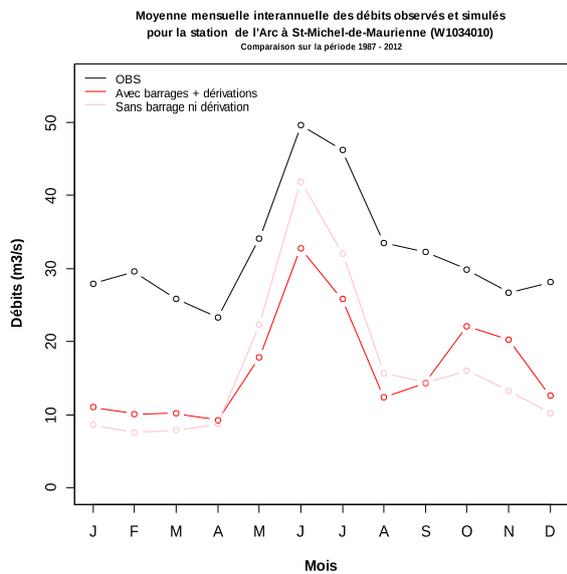
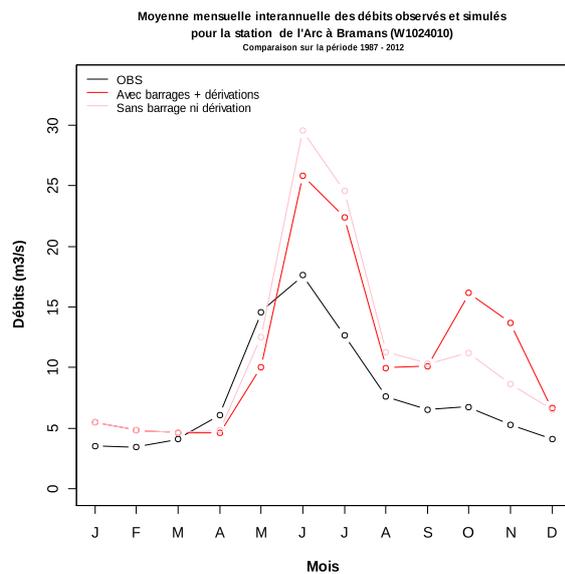
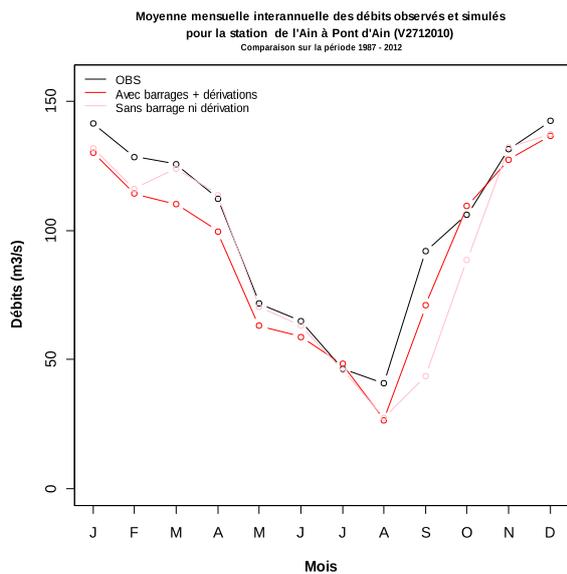


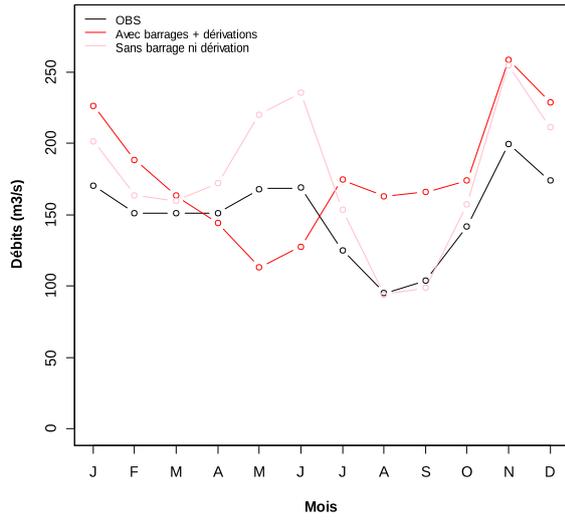
Figure 28 : Moyennes mensuelles interannuelles des débits observés (noir) et simulés en présence (rouge foncé) et absence (rouge clair) des ouvrages hydroélectriques sur 2 stations influencées du bassin du Rhône sur la période 1987 - 2012. À gauche, la station du Verdon à Vinon-sur-Verdon. A droite, la station de l’Ardèche à St-Martin d’Ardèche.

L’ensemble des résultats présentant l’influence des ouvrages hydrauliques sur les débits simulés aux stations impactées immédiatement à l’aval des ouvrages, est proposé en Figure 29. Notons les implications de la dérivation Loire-Ardèche (« K » en Figure 22, apport de l’extérieur vers le bassin versant du Rhône) sur la première station hydrométrique à l’aval de cet apport (Ardèche à Pont-de-Labeaume). Il est manifeste que seule

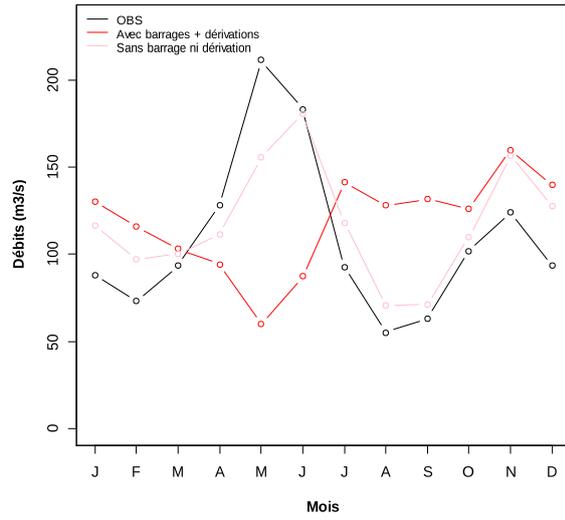
la prise en compte de cette dérivation permet une reproduction réaliste de la saisonnalité du débit observé à cette station dans nos simulations.



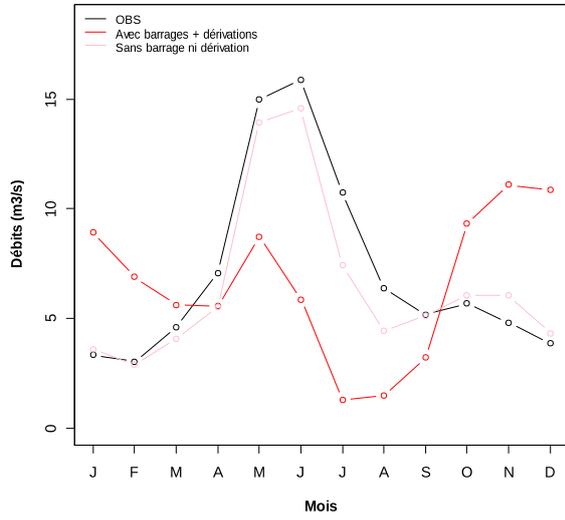
Moyenne mensuelle interannuelle des débits observés et simulés
pour la station de la Durance à Saint-Paul-lès-Durance [Jouques-Cadarache] (X3300010)
Comparaison sur la période 1987 - 2012



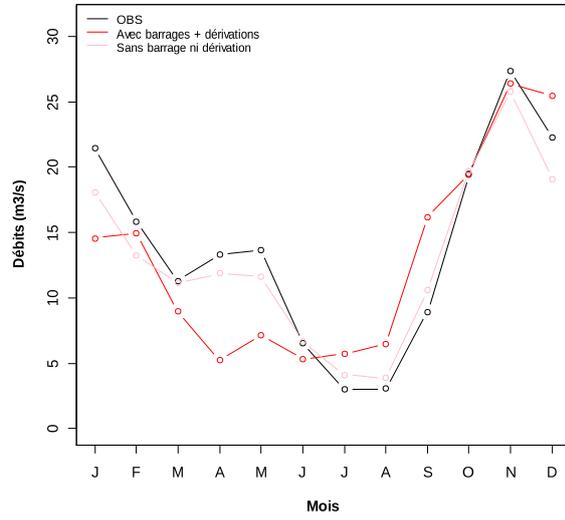
Moyenne mensuelle interannuelle des débits observés et simulés
pour la station de la Durance à Oraison (X1130010)
Comparaison sur la période 1987 - 2012



Moyenne mensuelle interannuelle des débits observés et simulés
pour la station de l'Eau d'Olle à Allemont (W2755010)
Comparaison sur la période 1987 - 2012



Moyenne mensuelle interannuelle des débits observés et simulés
pour la station du Chassezac à Chambonas (V5045020)
Comparaison sur la période 1987 - 2012



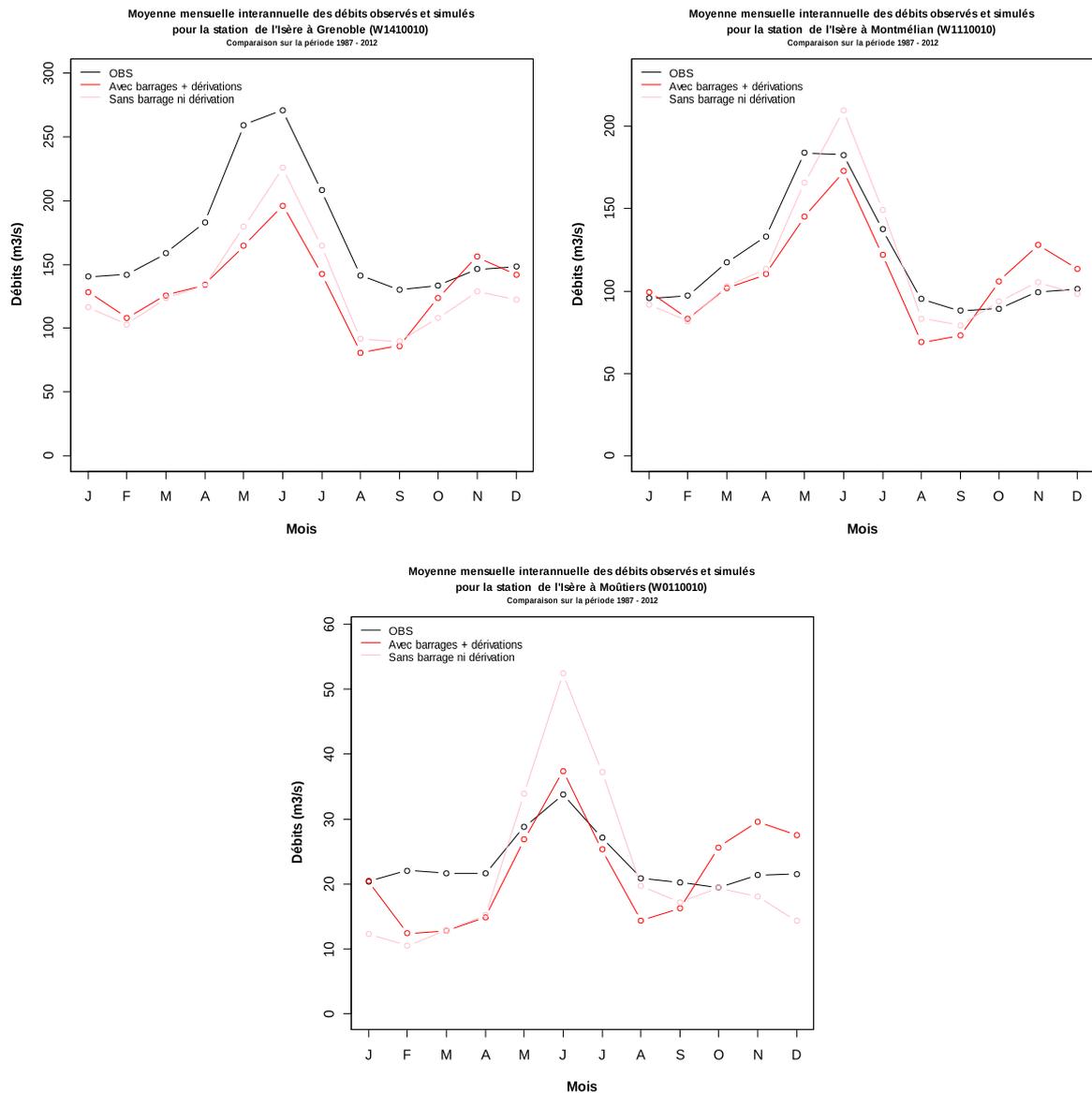


Figure 29 : Influence des ouvrages hydrauliques représentés dans J2000-Rhône.

Le module de barrages et le nouveau module de dérivation semblent donner satisfaction, et complètent ainsi la représentation de l'influence des ouvrages hydrauliques dans J2000-Rhône, dans la limite des incertitudes associées à l'élaboration des fonctions objectifs et des connaissances sur les transferts.

4.1.4 Conclusion et perspectives

On a ainsi amélioré la prise en compte des barrages et dérivation dans le modèle sur deux points :

- en améliorant l'hydrologie naturelle et en réduisant le déficit d'écoulement dans les rivières, que ce soit par l'utilisation du forçage pluviométrique hybride SPAZM/SAFRAN (Durance) ou par les modifications de la paramétrisation (voir partie 3). Au final, même sans modification directe des modules de barrage et dérivation, on arrive ainsi à des simulations plus réalistes,
- en développant une nouvelle modélisation pour les dérivations (cas Arc-Isère) qui permet de boucler les bilans en eau.

Il est difficile de valider formellement ces modules faute de données précises, mais ils semblent fonctionner de façon satisfaisante. Les fonctions objectif pour chaque barrage ou groupe de barrages sont les points les plus sensibles dans la paramétrisation, et ceux sur lesquels il faudra jouer pour les scénarios d'évolution future des territoires.

4.2 Irrigation

4.2.1 Principe du module et implémentation

Dans le but de représenter l'influence des usages sur la ressource en eau, nous avons développé, au sein de la plateforme JAMS, un outil permettant de simuler l'irrigation : estimation du besoin en eau des plantes, prélèvement d'eau pour l'irrigation et retour au milieu. Sa mise en œuvre sur le bassin du Rhône s'est accompagnée d'une description spatialisée des cultures irriguées sur ce bassin.

Fonctionnement du module d'irrigation de J2000-Rhône

Cette section décrit brièvement les grands principes du module d'irrigation.

- **Trois types d'irrigation** sont représentés : gravitaire, par aspersion et par goutte-à-goutte

Chacun de ces types recouvre une façon différente d'apporter l'eau au sol, que nous avons traduite dans la modélisation :

- en gravitaire, l'eau « inonde » directement le sol. Dans notre modélisation l'eau d'irrigation gravitaire est donc ajoutée aux précipitations atteignant la surface du sol, sans possible interception par le feuillage.
- en aspersion, l'eau est projetée sur une partie du feuillage des cultures. Elle est donc ajoutée à la pluie dans notre modélisation, et peut être interceptée par le feuillage.
- en goutte-à-goutte, l'eau d'irrigation parvient à la plante directement au niveau racinaire : dans le module d'irrigation elle sera est directement ajoutée à la réserve utile du sol, i.e. au réservoir superficiel *MPS*.

Le type d'irrigation choisi dépend dans la réalité des pratiques de l'exploitant et du type de culture. Faute de données statistiques sur les premières, **nous avons relié le type d'irrigation au type de culture**, sur la base des grands types de culture du RGA (Tableau 13). Ces types d'irrigation correspondent aussi à des réseaux d'acheminement d'eau différents et des techniques plus ou moins efficaces : cette efficacité est régie par un paramètre ($param_{EFF}$, Tableau 12) spécifié actuellement par type d'irrigation. Il recouvre des 'pertes en ligne' (fuites) qui affectent les réseaux, et conduit à prélever plus d'eau que le strict besoin en eau des cultures (formulation Tableau 12).

- L'eau d'irrigation est destinée à couvrir **le besoin en eau des plantes** en période d'irrigation.

Dans la littérature, il existe différentes façons de calculer ce dernier (Braud *et al.*, 2013) :

- par le calcul du déficit en évapotranspiration par rapport à l'évapotranspiration maximale de la plante. Ce déficit doit être comblé partiellement ou complètement par l'irrigation. C'est la formulation par exemple retenue par le modèle SISPAT (Braud, 2000 ; 2002), que nous appellerons « **ETdéficit** »,
- par le calcul du déficit en eau du réservoir des sols (généralement, de la réserve utile). Similairement, ce déficit doit être comblé partiellement ou complètement par l'irrigation. C'est la formulation des

modèles FIVE-CORE et MODIC (Chopart *et al.*, 2007 ; Sauquet *et al.*, 2010), comparés dans l'étude de Braud *et al.* (2013). Nous appellerons cette formulation « **%MPS** ».

Dans le modèle du Rhône ces deux formulations ont été implémentées ; leurs résultats ont été comparés dans le rapport 2015, conduisant à sélectionner la formulation « **%MPS** ». Nous nous tiendrons dans ce rapport final à cette formulation

Le **déclenchement de l'irrigation** obéit par ailleurs à deux règles :

- une **période d'irrigation** spécifiée pour chaque type de culture. Elle est actuellement fixée à quelques mois dans l'année selon les cultures (Tableau 13) mais pourrait facilement évoluer pour prendre en compte l'impact de décisions ponctuelles telles des arrêtés sécheresse.
 - un **seuil de déclenchement de l'irrigation**, fondé sur le rapport ET_r/ET_m , où ET_r est l'évapotranspiration réelle calculée par le modèle et ET_m l'évapotranspiration maximale, soit $ET_m = k_c \cdot ETO$. L'irrigation est actuellement déclenchée si $ET_r/ET_m < 0.5$. Ce seuil est paramétrable (paramètre $seuil_{IRR}$) et peut servir à schématiser un comportement d'agriculteurs plus ou moins enclins à l'irrigation.
- Les **prélèvements en eau pour l'irrigation** sont réalisés dans le brin de rivière à l'aval le plus immédiat des surfaces irriguées (Figure 30), et sont limités à une quantité maximale journalière.

Pour ce faire, les besoins en eau d'irrigation sont agrégés par sous-bassins. Le prélèvement nécessaire s'effectue dans la mesure de l'eau disponible dans le brin de rivière (limitation à 50% du débit, paramètre $actPreI$), et dans la limite d'une dose maximale d'irrigation $MaxDose$ (Tableau 12). Cette dernière est tirée de la littérature, considérant qu'un irrigant ne fournit à ses cultures pas plus de 30 mm tous les 3 jours. Notre limitation actuelle à 50% du débit s'avère parfois trop limitante : nous prévoyons à l'avenir de le remplacer par 10% du module annuel, proche de la contrainte de débit réservé, qui est une estimation plus réaliste des contraintes effectivement imposées sur l'irrigation. L'eau prélevée est *in fine* distribuée dans les HRUs irriguées du sous-bassin au prorata de leur besoin en eau, et après retour à la rivière des 'pertes en ligne'.

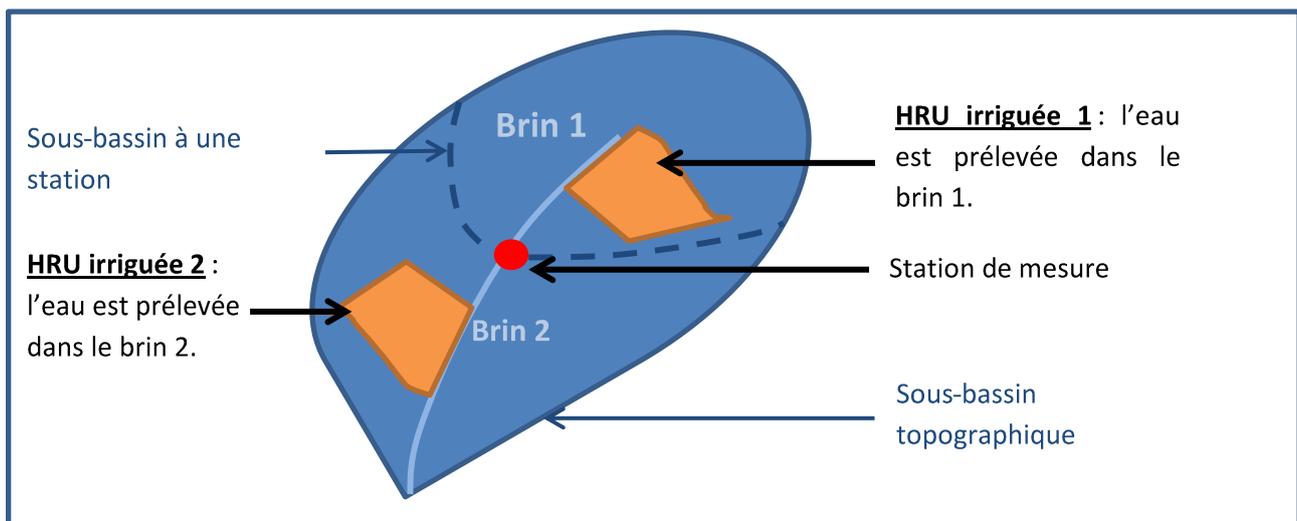


Figure 30 : Prélèvement de l'eau d'irrigation dans un maillage incluant des sous-bassins topographiques et des sous-bassins aux stations.

Le Tableau 12 résume les différents paramètres du module d'irrigation, leur valeur et leur fonction. Il met en évidence les éléments qui peuvent être modifiés dans le modèle afin de reproduire des comportements d'irrigation contrastés.

Délimitation des HRUs irriguées avec HRU-delin

En amont de la modélisation dans J2000-Rhône, le caractère « irrigué » ou « non-irrigué » des HRUs doit être spécifié au modèle. Pour cela, l'outil de maillage (HRU-delin) a été adapté pour lire un fichier shape des cantons irrigués et ajouter une information sur l'irrigation dans le fichier de sorties paramétrant les hrus, hrus.par.

Cependant, cette procédure conduit à considérer comme 'irriguée' toute HRU située dans un canton irrigué, induisant une forte surestimation des surfaces irriguées à l'échelle du BASSIN VERSANT Rhône. Aussi, l'identification des HRUs irriguées dans HRU-delin a été complétée par un **post-traitement** qui est expliqué dans la partie suivante. La Figure 31 résume ces étapes.

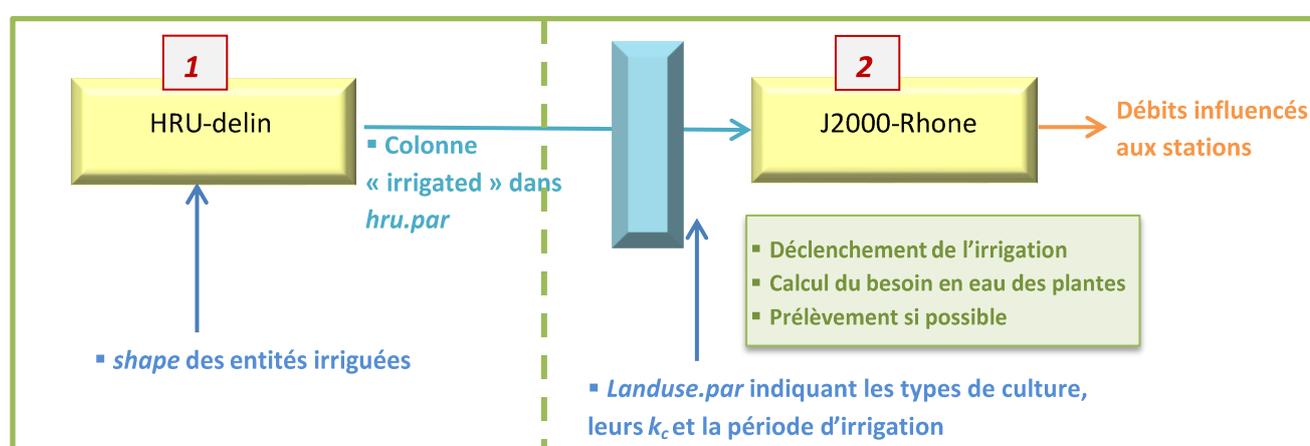


Figure 31 : Fonctionnement du module d'irrigation.

4.2.2 Application au bassin du Rhône

Détermination des surfaces irriguées

La délimitation des HRUs irriguées s'est faite sur la base des données RGA, qui permettent de calculer le **pourcentage de surface agricole utile (SAU) irriguée à l'échelle cantonale**. La Figure 33 met en regard ce pourcentage avec les données « brutes » du RGA et de l'Agence de l'Eau, concernant respectivement les superficies irriguées et les volumes prélevés. Ces deux sources de données dressent un portrait globalement cohérent mais localement contrasté de l'irrigation sur le bassin du Rhône : la Haute Durance prélève des volumes importants du point de vue de l'Agence mais ressort assez peu en termes de surfaces irriguées. Il est possible qu'une partie de ces prélèvements soient en pratique utilisés pour abreuver du bétail. Au contraire, la Haute-Saône présente d'importantes surfaces irriguées pour une consommation en eau assez faible, sans doute en lien avec des conditions hydro-climatiques naturellement plus favorables.

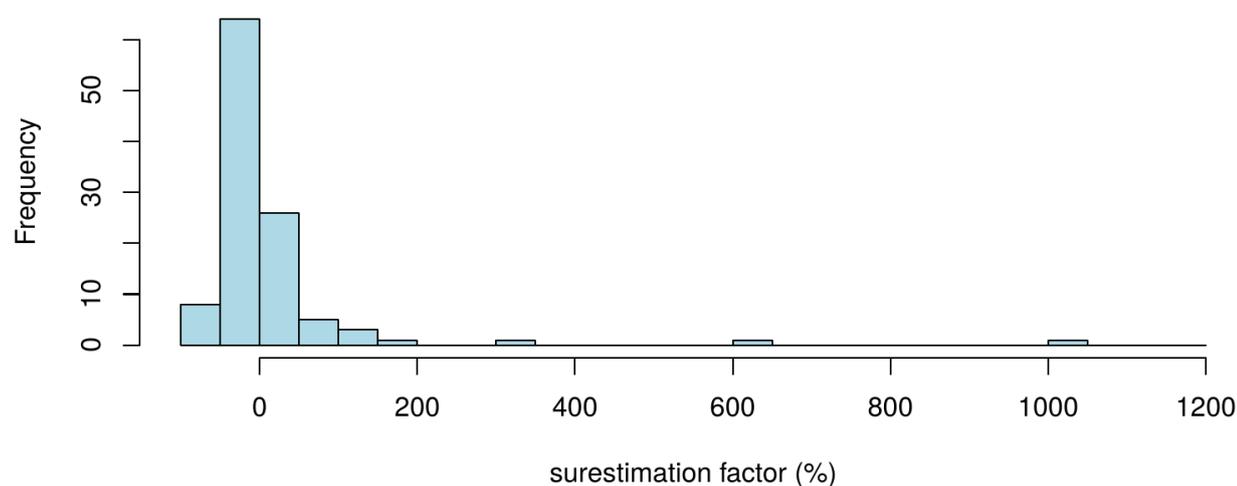
Afin de refléter ces contrastes à travers un critère objectif, **nous avons considéré comme irrigués les cantons dont le ratio « SAU irriguée / Surface du canton » est supérieur à 3%. Une exception est faite pour le maraichage (assez peu représenté mais aux pratiques d'irrigation hétérogènes), où ce seuil est abaissé à 1%.** La délimitation résultante des cantons irrigués est présentée Figure 33 ; ils sont au nombre de 110 (sur 573).

Tableau 12 : Paramétrisations et paramètres du module d'irrigation.

	Calcul du besoin en eau (BE)	Prélèvement (P)	Déclenchement de l'irrigation
Paramétrisations	<ul style="list-style-type: none"> Formulation ETdeficit : $BE = (ET_m - ET_r) * param_{ET}$ Formulation %MPS : $BE = \text{Max}(param_{MPS} * MPS_{\text{max}} - MPS, 0)$ 	$P = \min(BE / param_{EFF}, actPrel * inReach)$ Puis : $P = \min(P, MaxDose)$	Période d'irrigation && $ET_r / ET_m < seuil_{IRR}$
	Nom	Valeur par défaut	Fonction
Paramètres	<i>param_{ET}</i> (non retenu)	0.9	Influe sur le besoin en eau
	<i>param_{MPS}</i>	0.35 (gag) 0.8 (asp) .9 (grav)	Influe sur le besoin en eau
	<i>param_{EFF}</i>	.9 (gag) .7 (asp) .5 (grav)	Gère l' efficacité du réseau / de l'irrigation
	<i>seuil_{IRR}</i>	0.5	Seuil de déclenchement de l'irrigation
	<i>Période d'irrigation</i>	Selon le type de culture	Déclenchement de l'irrigation
	<i>MaxDose</i>	10 mm/j/m ²	Limitation des prélèvements
	<i>actPrel</i>	0.5	Limitation des prélèvements

Au sein de ces cantons, l'irrigation peut avoir lieu sur des HRUs agricoles (dont la caractérisation résulte de la classification Corine-LC), mais irriguer la totalité des HRUs agricoles conduirait à surestimer très largement les surfaces d'irrigations renseignées au RGA. Nous avons par conséquent, dans chaque canton, attribué aléatoirement l'irrigation à un sous-ensemble de HRUs agricoles, de telle sorte que nos surfaces irriguées correspondent aux surfaces irriguées du RGA à un seuil de tolérance près. Cette procédure nous permet de limiter considérablement l'erreur sur les surfaces irriguées modélisées (Figure 32). Elle est résumée par le terme 'post-traitement' dans la Figure 31.

Surestimation of irrigated areas in J2000



Surfaces irriguées dans la modélisation et dans le RGA (hectares)

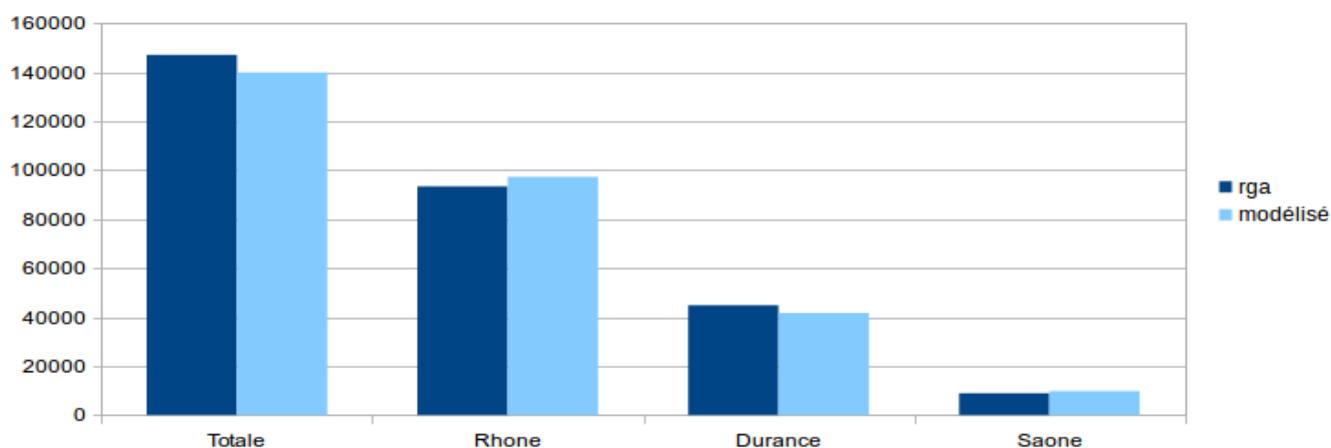
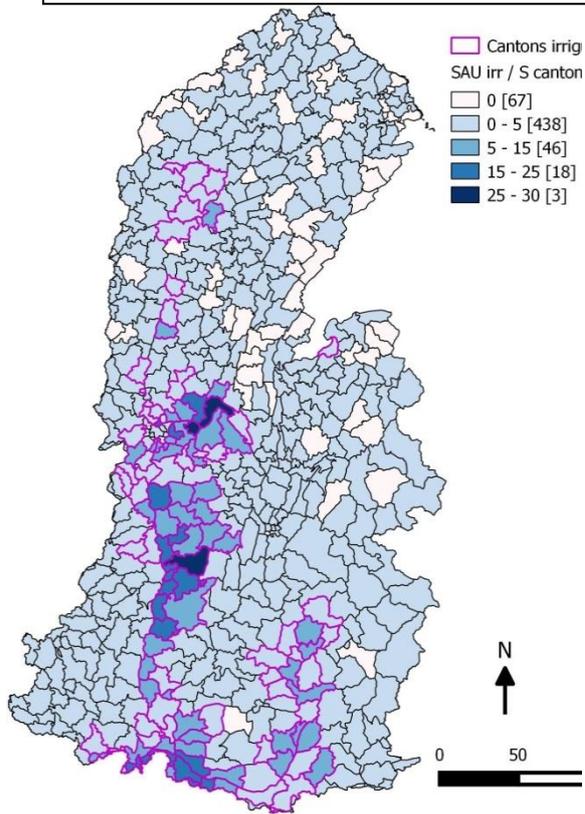


Figure 32 : Erreurs dans les superficies irriguées modélisées par cantons (en haut), et comparaison des superficies irriguées dans la modélisation et dans le RGA, par grandes régions hydrographiques (en bas).

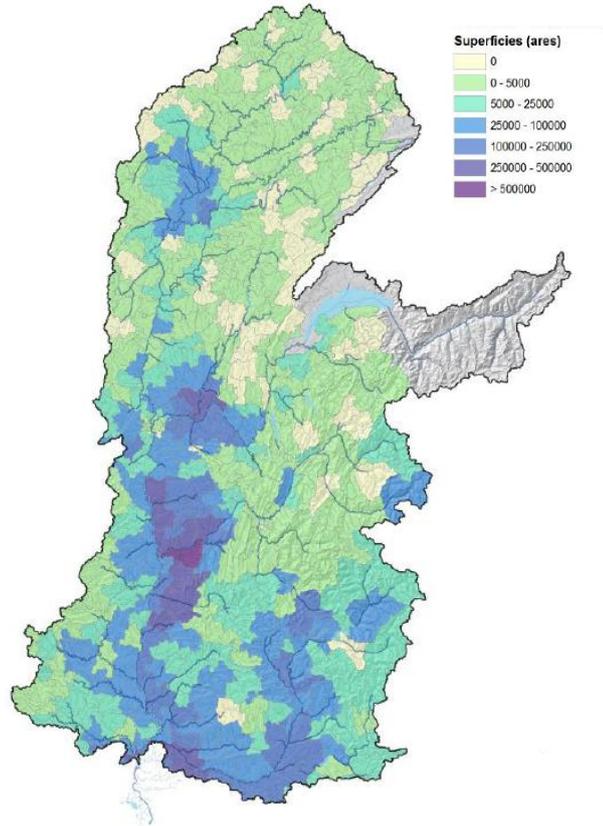
Grands types de cultures représentés

Les grands types de culture présents sur le bassin du Rhône à Beaucaire sont précisés au Tableau 13. Notons que l'irrigation gravitaire, qui est particulièrement déployée pour la culture du riz en Camargue, et les prairies dans la plaine de la Crau, n'est pas présente dans notre modélisation (Crau et Camargue sont en dehors de notre zone d'étude). Sur le bassin du Rhône, les principales cultures irriguées ont une typologie régionale assez marquée : les grandes cultures (maïs) dominent dans la vallée du Rhône, tandis que le maraichage est bien implanté en Haute-Saône. Prairies, vergers et blé dur se côtoient de la haute à la basse vallée de la Durance (Figure 34).

**Données RGA (Ratio SAU irriguée/S canton)
et cantons retenus comme « irrigués »**



Données RGA (Surfaces irriguées par canton)



Prelevs par cantons - 2008-2012
Prelevs irrigation (*1000 m3/an)

- 0
- 0 - 100
- 100 - 250
- 250 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 10000
- 10000 - 65000

**Données Agence de l'eau
(Volumes prélevés par canton)**

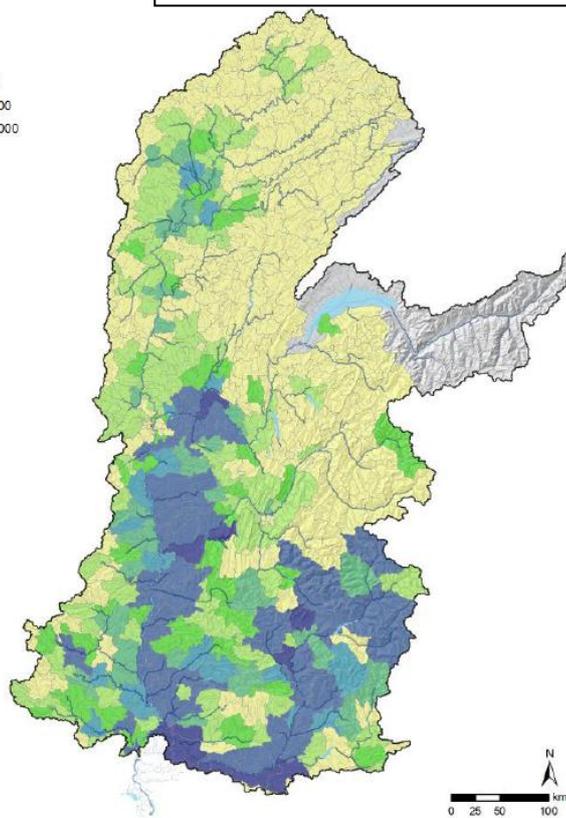


Figure 33 : en haut à gauche : Pourcentage de SAU irriguée par canton, et délimitation des cantons retenus comme irrigués dans notre modélisation ; en haut à droite : surface irriguées par canton selon le RGA ; en bas : volumes prélevés pour l'irrigation selon l'Agence de l'Eau.

Nous avons fait l'hypothèse de ne représenter, par canton, qu'un seul type de culture irriguée : **non pas seulement la culture dominante en terme de surface, mais celle qui, au prorata de la surface qu'elle occupe dans le RGA, est la plus gourmande en eau en contexte hydro-climatique actuel**. Cela permet une estimation conservatrice des tensions sur la ressource pouvant survenir du fait de l'irrigation.

Détermination du type d'irrigation

L'attribution du type d'irrigation par grand type cultural représenté sur le bassin du Rhône est résumée Tableau 13.

Tableau 13 : Attribution d'un type d'irrigation à chaque grande culture du RGA (Gag : goutte-à-goutte ; Asp : aspersion ; Grav : gravitaire).

acronyme	Grands types de cultures RGA	Cultures regroupées	Proportion de la SAU irriguée totale du bassin du Rhône	Type d'irrigation retenu
VGO	Vigne / Olivier	Vigne ; Olivier	5%	Gag
MCE	Maïs / Autres céréales	Blé tendre ; Orge ; Avoine ; Seigle ; Triticale ; Maïs ; Autres céréales	35%	Asp
TOU	Tournesol / Sorgho	Tournesol ; Sorgho	7%	Asp
BDU	Blé dur	Blé dur	3%	Asp
MAR	Maraichage	Maraichage	10%	Gag
PDT	Pomme de terre	Pomme de terre	2%	Asp
VER	Vergers	Fruits à noyau ; Fruits à pépin ; Petits fruits ; Fruits à coque	22%	Gag
PRA	Prairies	Prairies	13%	Asp
PRO	Protéagineux	Protéagineux	1%	Gag
AUT	Plantes industrielles	Plantes industrielles ; Fleurs ornementales	2%	Gag

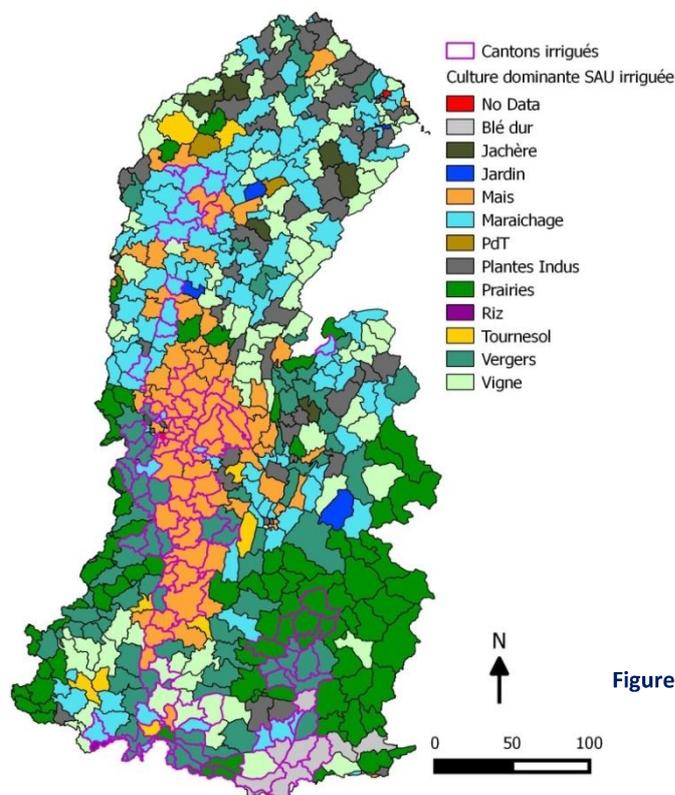


Figure 34 : Cultures irriguées dominantes par canton selon le RGA.

Prise en compte des spécificités culturelles

Les grands types de culture définis par le RGA diffèrent par des spécificités de nature à influencer leur demande en eau d'irrigation. Y émarginent : leur période de culture et d'irrigation, leur coefficient culturel k_c et leur LAI. Nous avons utilisé les bases de données de la FAO pour les coefficients cultureux et ECOCLIMAP pour les valeurs de LAI, selon une méthodologie déjà déployée dans le projet R²D² 2050 sur la Durance. En résultent des valeurs de k_c et LAI mensuelles pour chaque grand type de culture, respectant les dates du cycle phénologique prescrites par la FAO (feuillaison, floraison, fructification, jaunissement automnal) (Figure 35). L'évolution en dents de scie du LAI et du k_c pour le maraichage s'explique par une rotation des cultures, à savoir tomate et melon d'avril à octobre puis salade sur le reste de l'année. La période d'irrigation a également été prescrite pour chaque type de culture sur la base d'une compilation importante de revues, rapports techniques et littérature « grise » relatives aux cultures de la région PACA (Chérel, 2010).

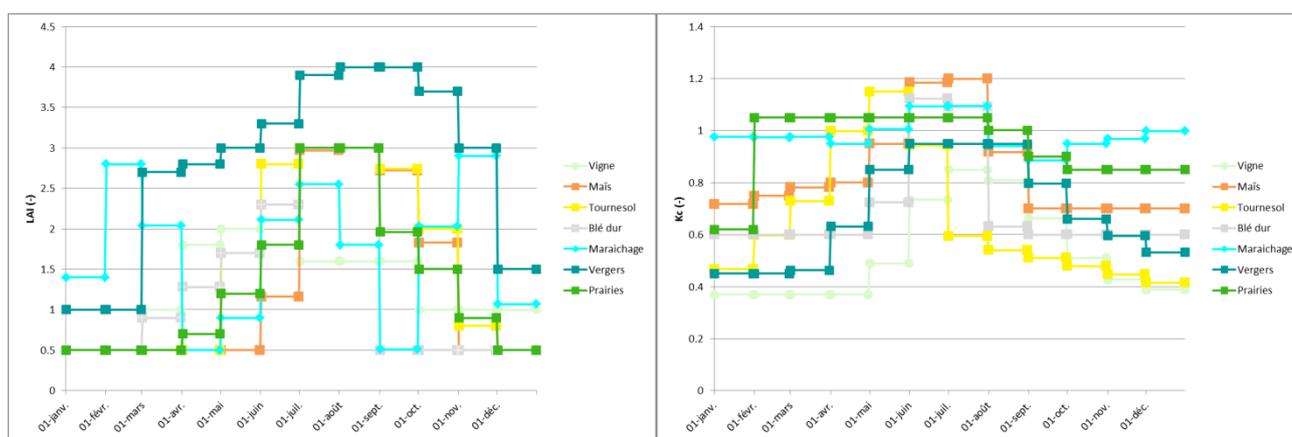


Figure 35 : Evolution mensuelle du LAI (gauche) et du k_c (droite) pour les grands types de cultures retenus sur le bassin du Rhône.

Tableau 14 : Périodes d'irrigation pour les cultures représentées sur le bassin du Rhône.

Culture	Vigne	Maïs	Tournesol	Blé dur	Maraichage	Vergers	Prairies
Début d'irrigation	01/04	20/04	10/04	01/04	01/01	18/03	01/04
Fin d'irrigation	30/09	20/09	20/08	30/06	31/12	30/09	30/09

4.2.3 Résultats

Résultats généraux sur l'ensemble du bassin

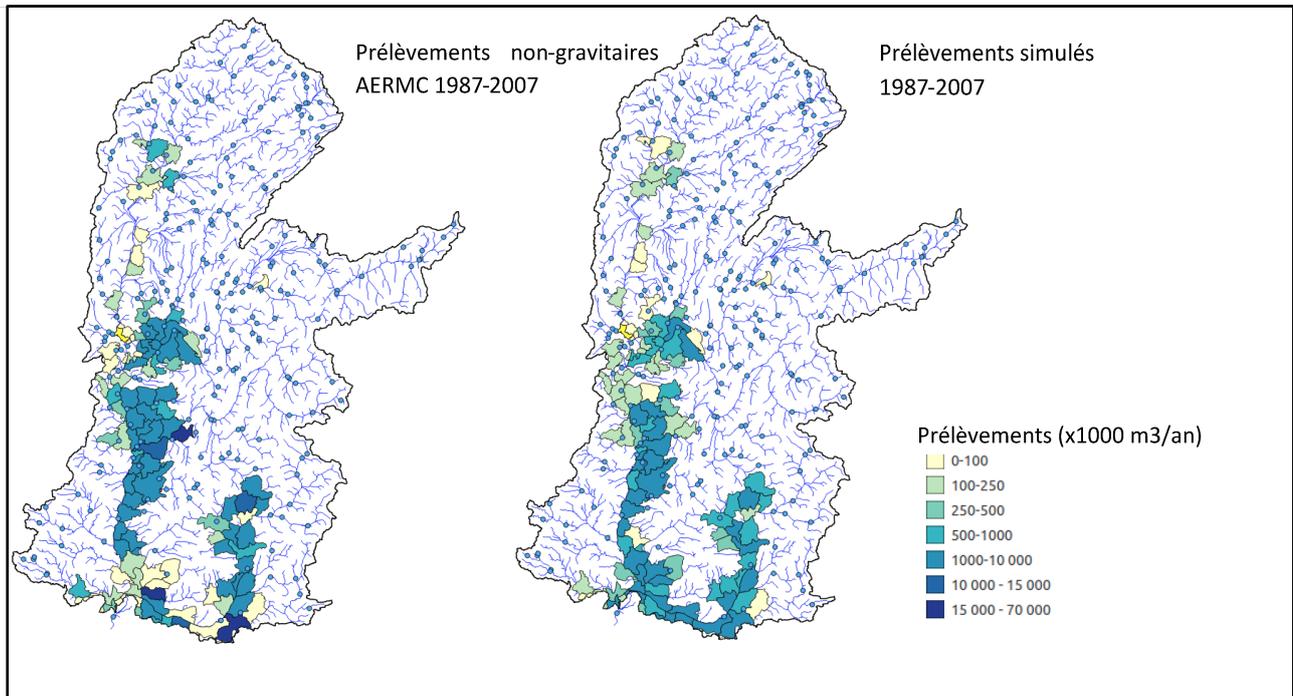


Figure 36 : Comparaison des volumes annuels d'irrigation simulés (à droite) aux prélèvements recensés par l'AERMC (à gauche). En moyenne annuelle sur 1987-2007.

La Figure 36 compare les volumes annuels prélevés pour l'irrigation dans nos simulations, aux données collectées par l'AERMC, concernant les prélèvements non-gravitaires. **En effet, les prélèvements en gravitaire recouvrent pour une grande partie l'irrigation par canaux, qui n'est pas représentée dans notre modélisation.** Cela constitue **une limitation forte à notre modélisation**, qui de fait n'est pas capable de reproduire dans leur intégralité les volumes prélevés pour l'irrigation sur l'ensemble du territoire Rhône. L'irrigation par canaux est très développée en Durance et basse vallée du Rhône, et une modélisation appropriée devra être développée pour aller vers une estimation quantitative des volumes globaux mobilisés pour l'irrigation sur ces territoires.

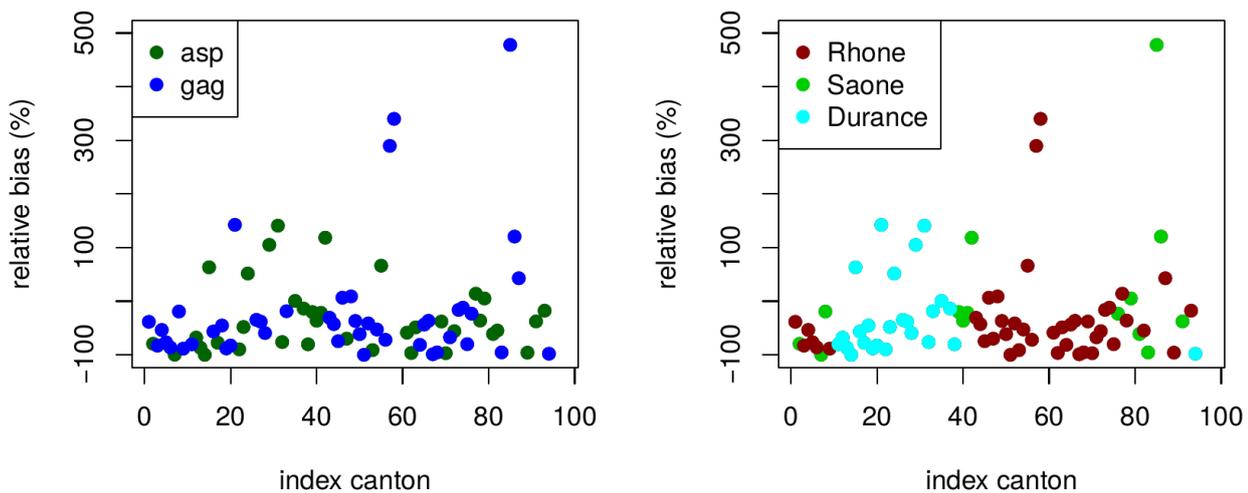


Figure 37 : Biais relatif (en %) des volumes simulés pour l'irrigation par rapport aux données de l'AERMC en non-gravitaire. A gauche, ce biais est illustré en fonction du type d'irrigation ; à droite, il l'est en fonction de la situation géographique des cantons irrigués.

Cette comparaison révèle que notre modélisation capture cependant les grandes tendances de l'irrigation sur le Rhône : essentiel des prélèvements en moyenne vallée du Rhône, Rhône en amont de Lyon, Basse Isère et en Durance ; prélèvements assez mineurs en Saône. D'une façon générale, les prélèvements modélisés sont plus faibles que les relevés de l'Agence de l'Eau (Figure 37). Les prélèvements sont en revanche surestimés sur 3 cantons (2 en Rhône et un en Saône) : ces erreurs peuvent correspondre à des surestimations des surfaces irriguées, qui ont été illustrées en Figure 32, ou au fait que l'irrigation sur les cantons à très gros prélèvements de la basse Durance ou du Rhône n'est pas bien représentée : ces cantons relèvent normalement d'une alimentation par canaux mais affichent aussi des prélèvements forts en non-gravitaire.

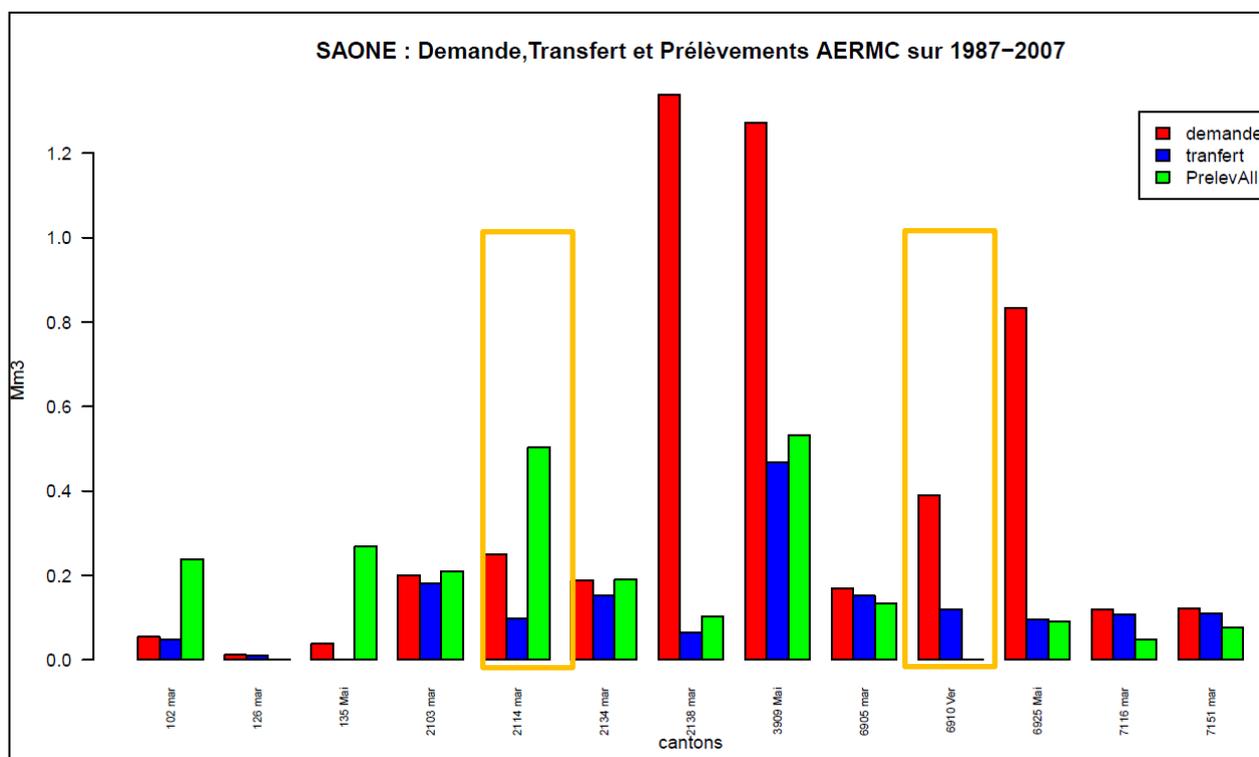


Figure 38 : Comparaison par canton (abscisse) des demandes en eau d'irrigation et transferts modélisés (rouge et bleu), aux prélèvements gravitaires et non-gravitaires recensés par l'AERMC, sur la Saône.

La Figure 38 compare en détail, pour chaque canton de la Saône, les demandes en eau d'irrigation et transferts modélisés, aux prélèvements gravitaires et non-gravitaires recensés par l'AERMC. Elle illustre la bonne adéquation de notre modélisation, qui reproduit bien la variabilité des prélèvements selon les cantons.

À travers l'exemple du canton 2114 (canton de Genlis, surligné), elle permet aussi d'illustrer une autre limite importante de notre modélisation, qui explique la sous-estimation fréquente des prélèvements : nous prélevons systématiquement l'eau pour l'irrigation dans le brin de rivière situé à l'aval immédiat des cultures irriguées. Or, ce choix n'est pas fidèle à la réalité :

- (i) la localisation de nos cultures irriguées ne reflète pas nécessairement la réalité, du fait de l'attribution aléatoire de l'irrigation à l'échelle cantonale. Le lieu de prélèvement de l'eau d'irrigation n'est donc pas non plus nécessairement réaliste ;
- (ii) dans la réalité, les prélèvements n'ont pas systématiquement lieu à l'aval immédiat des zones irriguées : il y a possibilité de transferts depuis de plus gros affluents voisins, voire de répartition des prélèvements d'une même zone irriguée sur plusieurs affluents plus ou moins proches.

Dès lors, un cas fréquent dans notre modélisation est l'attribution du point de prélèvement dans un tout petit affluent, alors qu'une rivière plus alimentée est proche. C'est le cas sur le canton de Genlis. Alors que les rivières voisines sont riches, le modèle prélève dans (et assèche partiellement) un petit affluent de la Tille, résultant en une limitation de l'irrigation (« demande » supérieure au « transfert »). Il est souvent difficile de dire si cette limitation est un artefact (erroné) de notre modélisation ou fidèle à la réalité. Notamment, de tels cas de limitation sont fréquents en Haute-Durance, là où ils sont rares en Saône : cela peut refléter une logique de contextes hydro-climatiques différents.

Sur la Figure 38, nous avons également surligné le canton 6910 (Limonest), pour lequel les données du RGA indiquent des surfaces irriguées importantes justifiant des prélèvements non-nuls. Là, les redevances perçues par l'AERMC indiquent des prélèvements négligeables : notre modélisation permet de détecter des incohérences, qui pourraient justifier une étude de cas plus approfondie.

Influence sur les débits en étiage

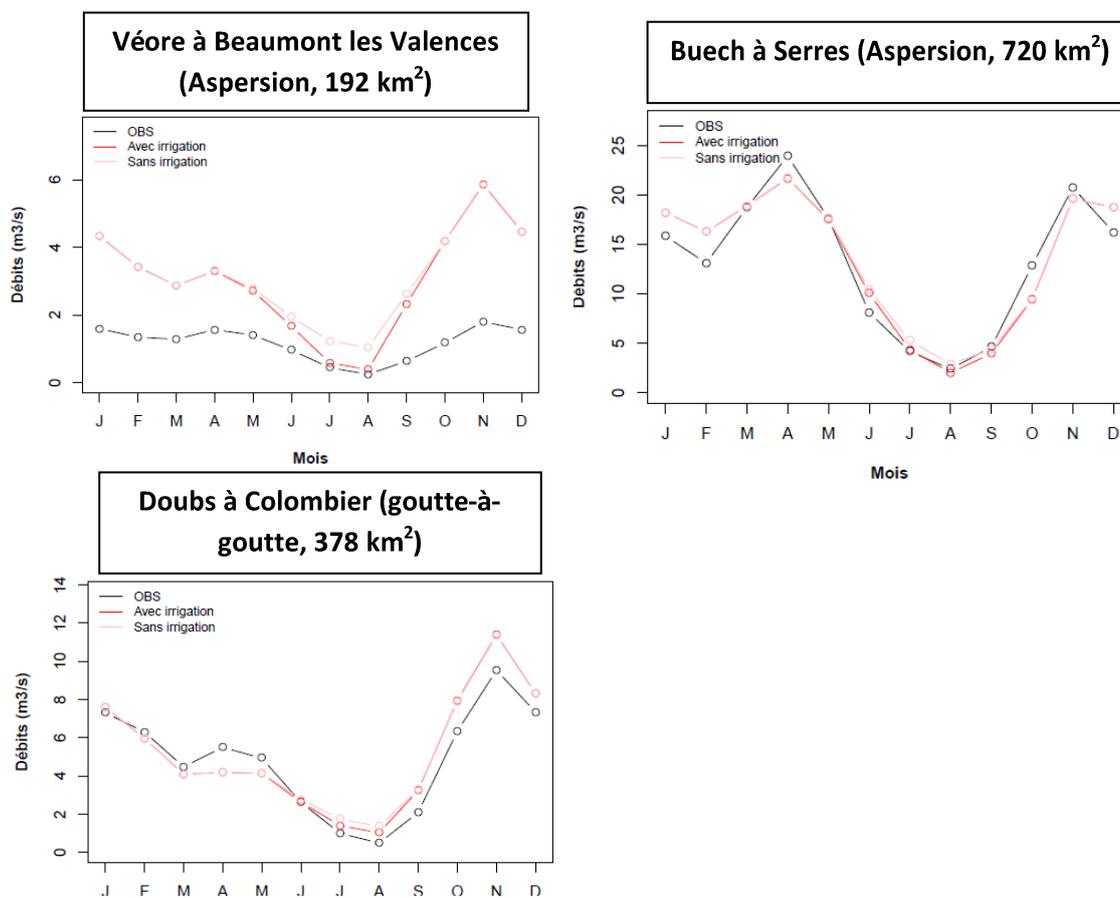


Figure 39 : Impact de l'irrigation sur les débits mensuels interannuels sur des sous-bassins partiellement irrigués.

La Figure 39 montre l'influence de notre module d'irrigation sur les débits simulés à quelques stations drainant un sous-bassin partiellement irrigué. Conformément à l'attendu, l'irrigation réduit les débits d'étiage estivaux. La réduction est cependant faible à nos stations, hors très petits cours d'eau, et sur lesquels la surface irriguée est, en proportion, extrêmement faible. Cependant, on observe dans tous les cas que l'irrigation permet une meilleure représentation des étiages. Il est à noter le biais important sur les débits simulés de la Véore : à l'échelle des très petits bassins, l'imprécision des forçages climatiques peut devenir critique car les compensations d'erreur opérant à des échelles plus larges n'ont pas lieu (le syndrome du « la pluie est en fait tombée sur le massif voisin » est lissé à grande échelle).

Comparaison de la demande et des transferts à la littérature

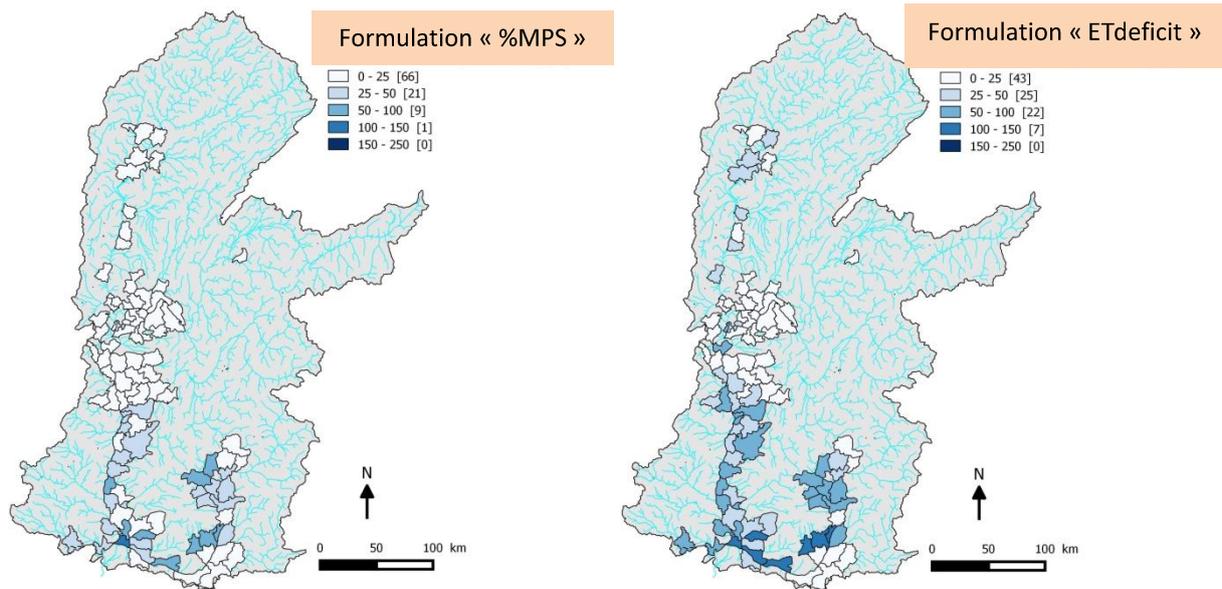


Figure 40 : Prélèvements simulés pour l'irrigation dans les formulations « %MPS » et « ETdeficit », ramenés en mm/m²/an.

Braud *et al.* (2013) proposent une étude du besoin théorique de plantes sur le bassin versant de la Durance, à travers différents modèles spécifiques d'irrigation, dont certains (FIVE-Core, SISPAT) ont été cités dans ce rapport. Pour les différents types de culture existants sur ce bassin (blé, vergers, pomme de terre, vigne...) les besoins théoriques annuels en irrigation sont évalués par cette étude dans une gamme de 35 à 575 mm/m²/an (variant selon les modèles et les cultures). Dans notre modélisation (Figure 40), les transferts simulés sont proches de cette gamme de valeur sur la Durance et la basse vallée du Rhône, où les contextes hydroclimatiques sont comparables. Même si les grandeurs comparées sont différentes par nature (besoin théorique en eau d'irrigation versus dose d'irrigation simulée), elles sont intrinsèquement liées. Leurs ordres de grandeur similaires nous rassurent quant au caractère réaliste de nos simulations.

4.2.4 Discussion et conclusion

La formulation de l'irrigation présente ici des limitations : attribution systématique du point de prélèvement, non-représentation des systèmes de canaux prépondérants dans le Sud du bassin du Rhône, représentation d'une seule culture irriguée par canton. Néanmoins, nous avons mis en évidence une certaine compréhension des grandes tendances : limitation des prélèvements par la ressource sur les petits cours d'eau de la Durance et de la Vallée du Rhône, en réponse à un contexte hydro-climatique méridional ; prélèvements peu contraints par la ressource sur le bassin de la Saône ; dominance des zones du Rhône à l'aval de Lyon, moyen Rhône, de la basse Durance et la basse Isère dans le signal d'irrigation à l'échelle du territoire Rhône. Notre représentation de l'irrigation sur le bassin du Rhône est le fruit d'un compromis : celui de représenter sur un maillage relativement grossier (pour maintenir les performances numériques) une réalité disparate, morcelée, et parfois peu documentée (relativement aux points de prélèvements et au type d'irrigation pratiqué, par exemple). Ce compromis conduit à quelques inadéquations d'échelles, impliquant des artefacts de modélisation.

A l'heure actuelle, les données que nous possédons permettent difficilement d'aller au-delà de certaines limites : par exemple, le secret du RGA ne nous permet pas d'accéder à la localisation de chaque parcelle irriguée ; la connaissance exhaustive de tous les points de prélèvements pour l'irrigation sur le territoire relève

par ailleurs d'un travail hors de portée. La solution résidera peut-être dans le déploiement d'approches moins déterministes pour la répartition des prélèvements (dans la lignée de notre attribution aléatoire de l'irrigation au sein des cantons) ou la mise en place de mécanisme de solidarité (redistribution) vis-à-vis de la ressource en eau à cette même échelle. Pour l'instant, nos résultats concernant l'irrigation ne peuvent pas être exploités pour des études très locales (une rivière, un canton). En revanche, ils peuvent décemment être exploités en temps présent aux échelles des grandes aires (Saône, Durance, Rhône), où la comparaison aux observations a révélé des ordres de grandeurs et tendances géographiques très raisonnables.

La limitation de l'irrigation par l'eau disponible ('débit réservé' de 50% de l'eau disponible) est peut-être exagérée. Une étude de sensibilité de notre modélisation à cette paramétrisation pourrait l'affiner voire la régionaliser si besoin.

La validation du module d'irrigation de J2000-Rhône passera également *in fine* par une comparaison plus exhaustive et régionalisée à l'état de l'art existant, en particulier aux résultats de l'étude quantitative Rhône (BRLi, 2014).

4.3 Consommation d'eau potable

4.3.1 Démarche

La consommation en eau du réseau public de distribution d'eau dite potable²² recouvre des usages très divers : des usages domestiques (en habitat individuel ou collectif, munis de compteurs ou non), municipaux ou « administratifs » au sens large (arrosage des espaces verts, piscines municipales, établissements d'enseignement, hôpitaux...), commerciaux (boulangerie, laverie...), d'hébergement (hôtels, campings...), industriels ou agricoles, etc. Ses facteurs explicatifs sont très divers, quel que soit l'usage. On retrouve des facteurs géographiques (température, pluviométrie, taille de la commune, accès à des ressources alternatives). Mais les variations s'expliquent aussi pour d'autres raisons : nature de l'habitat (ville/campagne, maison/appartement...), équipement du logement (compteur individuel, équipements ménagers, piscine, jardin...), caractéristiques de l'abonné (entreprise, administration, propriétaire/locataire, niveau de revenu, taille du ménage...), prix de l'eau (niveau et structure), existence d'actions de sensibilisation ou de mesures de restriction d'eau.

Les données existantes sur cette consommation en eau potable sont à l'échelle d'une commune ou d'un service d'eau, donc à une échelle agrégée. Pour modéliser la demande en eau potable, nous avons choisi de nous appuyer sur un modèle statistique « économétrique » basé sur les données disponibles sur la zone d'étude à l'échelle communale pour estimer la consommation en fonction des différents facteurs. Les données à collecter sont alors de diverses natures : consommation d'eau, données INSEE (démographie et structure de l'habitat), données météorologiques, données de revenu, données de prix de l'eau, données économiques de la commune...). Cette fonction de demande permet de caractériser le niveau tendanciel de consommation en eau attendu dans les différentes communes. La caractérisation est d'autant meilleure que le nombre de communes est plus important et éventuellement le nombre d'années grand. La difficulté de cette méthode réside principalement en la collecte des données, qui proviennent de différentes sources. En particulier, ce sont les données de consommation et de prix de l'eau qui sont les plus difficiles à rassembler, nécessitant une recherche

²² La consommation en eau totale est composée de l'eau consommée via le réseau de distribution public et de celle consommée via des ressources alternatives (eau de forage ou de puits, récupération des eaux de pluie, eau de réseaux de distribution d'eau brute, ...). Nous n'abordons ici que celle du réseau de distribution public.

spécifique dans chaque service d'eau et ou d'assainissement (donnée renseignée dans un document public : le Rapport sur le Prix et la Qualité du Service – RPQS, mais parfois ne reprenant que l'échelle du service et non renseignée à l'échelle de la commune).

La démarche retenue dans le cadre du projet a donc consisté à construire un modèle économétrique à partir des données d'un échantillon de communes, en s'appuyant notamment sur le site Internet SISPEA tenu par l'ONEMA²³. Ce modèle a été ensuite généralisé à l'ensemble des communes du bassin versant. Les résultats ont été agrégés à l'échelle des sous-bassins versants pour permettre une comparaison avec les débits simulés aux différentes stations de contrôle par le modèle J2000-Rhône.

4.3.2 Modélisation de la demande en eau

La modélisation de la demande en eau à l'échelle du bassin du Rhône a d'abord été conduite à partir de données collectées au niveau national. Une grande campagne de collecte des données a été réalisée par l'ONEMA pour l'année 2009 en particulier, ce qui permettait d'envisager un bon taux de réponse et donc une bonne représentativité des services d'eau.

Source des données

Différentes données ont été rassemblées et reconstituées (en cas de besoin), à deux échelles : celle de la commune (le code INSEE servant alors de clé de fusion) et celle du service d'eau potable.

Données IGN et Météo France

La base de données rassemblée contient ainsi des informations sur l'altitude moyenne, la longitude et la latitude auxquelles se trouvent les communes. Seule la partie française du bassin versant a été retenue, le problème étant le recueil des autres données concernant la partie suisse qui représente seulement 8% du bassin.

Les données SAFRAN contenant des informations météorologiques sur la période de notre modélisation, ont été croisées avec les étendues communales afin de dériver différents indicateurs à l'échelle communale : moyennes annuelle et saisonnières (la saison estivale étant ici considérée comme étant celle correspondant à la période juin-septembre), nombre de jours où la température et la pluviométrie sont supérieures à une valeur pour une période donnée.

Données issues de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

Les données issues de l'Insee concernent les thèmes « caractéristiques de l'habitat » et « caractéristiques du ménage ». Les données disponibles ne le sont parfois que pour quelques années : en particulier pour les caractéristiques du ménage, une linéarisation des données a été opérée afin d'obtenir des données représentant la totalité des années considérées. Une modélisation sur une année en particulier comprend donc l'hypothèse que ces variables linéarisées rendent compte du phénomène en question : par exemple, si le nombre d'habitants entre 2006 et 2011 est en chute, il se peut que le calcul de l'année 2012 donne une donnée négative si la diminution annuelle est assez forte. Dans ce cas, la valeur négative est remplacée par 0 afin de garder une certaine logique dans les données utilisées. Les données sur l'équipement communal sont celles de l'année 2013 : cette donnée est peu variante dans le temps et représente de manière quasi-constante la structure de l'équipement communal dans le bassin versant sur une petite période de temps.

²³ Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques.

Sur les caractéristiques de l'habitat, ces données représentent la nature de l'habitat avec le type (appartement ou maison), la localisation (campagne ou ville, selon des indications législative ou de construction instrumentale) et le statut du logement (résidence principale ou secondaire). L'information sur la présence d'équipements communaux est aussi donnée avec la présence de bassins de natation, de pistes de ski, d'aires de golf, de terrains de grands jeux, de cinémas, de théâtres, de chambres d'hôtel et autres unités touristiques.

Concernant les caractéristiques du ménage, nous avons la taille du ménage qui correspond au nombre de personnes par communauté de gestion rapporté au nombre de ménages de cette même entité de gestion commune de l'eau potable, l'âge moyen du ménage qui correspond à la moyenne d'âge de l'entité, et qui se formalise par un taux de personnes de plus ou moins un âge donné, le revenu des foyers fiscaux par ménage, le taux de chaque catégorie socioprofessionnelle selon les huit catégories de l'Insee par rapport au nombre de personnes de plus de 15ans.

Données SISPEA

Les données sur les consommations, le prix et la gestion des réseaux d'eau potable sont présentes dans la base « ServiceS Publics d'Eau et Assainissement » (SISPEA), développée par l'ONEMA et disponibles pour la période 2008-2013²⁴. Elles sont fournies par nature de service : sont distingués ainsi le service d'eau potable, le service d'assainissement collectif et le service d'assainissement non collectif. À l'intérieur de chacun de ces services, des subdivisions éventuelles sont faites, par exemple si un service est chargé de la production de l'eau et un autre de la distribution de l'eau. Les bases de données SISPEA sont issues des fiches renseignées par ces différents services ou parfois par des services supports (comme les DDTM, les conseils départementaux...). Actuellement leur remplissage est plutôt fait sur une base de volontariat, avec une forte pression toutefois des services de l'ONEMA pour que les services renseignent l'ensemble des données. Toutefois, cela conduit à une hétérogénéité des données collectées et l'on observe que ce sont les plus petits services (composés de communes faiblement peuplées et qui gèrent l'eau seules) qui les renseignent les moins.

C'est à ce niveau que nous nous sommes aussi heurtés au plus de difficultés car il était nécessaire de représenter la situation globale d'un service (l'eau et l'assainissement). Il fallait ensuite être en capacité d'associer ces services aux communes desservies. Un stage de Master a ainsi été conduit où ceci a été tenté (Noël, 2015). Le rapport peut être consulté, toutefois après analyse des erreurs semblent persister, ce qui a conduit à prendre la décision suivante : la prise en compte uniquement des cas de communes isolées pour lesquelles on dispose d'emblée des niveaux de consommation et de prix à l'échelle communale. Voici plus précisément la raison principale : une commune peut appartenir à plusieurs services qui leur délivrent une partie du service d'eau potable et d'assainissement. Cette commune peut donc avoir un prix de l'eau différent d'une autre avec qui elle est liée sur une partie uniquement de ce même service. Sans parler des parties de communes gérées différemment. Or nous disposons comme information sur la consommation que de celle globalisée à l'échelle du service chargé de la distribution de l'eau potable. Nous ne pouvons donc pas, pour les communes intégrées dans une structure collective, être certains du lien établi notamment entre consommation et prix.

Ces deux variables (niveau de consommation en eau potable et prix) étant particulièrement importantes par la suite et ayant été l'objet de calculs particuliers, il nous a semblé nécessaire de bien préciser nos choix à ce niveau.

- La consommation de l'eau potable. L'eau distribuée est issue de la propre production du service en charge de l'eau mais aussi de volumes importés. Les volumes distribués vont être consommés au sein du service, mais peuvent être aussi exportés. Au niveau du service, cette eau est répartie en trois types de consommations : la

²⁴ Données disponibles sur www.services.eaufrance.fr

consommation sans comptage estimée (utilisée par des usagers connus, *e.g.* bouches à incendie), le volume de service (volume utilisé pour le nettoyage ou la purge du réseau de distribution) et le volume consommé comptabilisé (divisé en domestique et non-domestique)²⁵. Nous avons choisi de nous concentrer ici uniquement sur le volume **consommé comptabilisé domestique**. Ce dernier représente la consommation sur une année civile (éventuellement recalculée par proratisation si l'on ne dispose pas de relevés effectués exactement aux deux extrémités des années civiles). Au final, *c'est le volume consommé comptabilisé domestique par habitant permanent des communes qui est la variable à expliquer*.

- Le prix de l'eau potable et de l'assainissement. Nous cherchons ici à représenter le prix qui est facturé à l'utilisateur et qu'il paie via sa facture d'eau. Nous avons retenu ici le prix TTC calculé sur la base d'une consommation type de 120 m³ pour l'eau potable et pour l'assainissement. Ce prix est donc la somme de tous les éléments qui le composent et a dû être reconstitué à partir des renseignements donnés dans les différents tableaux fournis par SISPEA (eau potable et assainissement collectif). Cela explique une importante perte de données due au manque de données concernant le prix de l'assainissement.

Données manquantes

D'autres variables devraient être incluses dans la fonction de demande. Or pour certaines, les données correspondantes n'existent pas, ou sont trop difficiles à obtenir. Des données sur le nombre de nuitées effectuées auraient été un bon indicateur des variations de population saisonnière, mais ceci n'a pu être obtenu. Ne sont pas non plus disponibles les informations concernant les piscines privées ou l'utilisation par les abonnés au réseau de distribution d'eau de ressources alternatives pour satisfaire tout ou partie de leurs besoins : récupérateurs d'eaux de pluies ou sur la présence de puits privés. Il en est de même, naturellement, concernant la présence de chasses d'eau, de robinets et autres équipements individuels économes.

Modèle de demande

Avant de présenter le modèle de demande que nous avons pu estimer, nous décrivons les communes sur lesquelles il est basé.

Comparaison de l'échantillon retenu à la population

Seules 338 communes, sur les 6305 du bassin, sont à la base du modèle de demande. En effet, c'étaient les seules qui disposaient d'une information complète sur les variables d'intérêt, pour l'année 2009, année elle-même la plus complète concernant les données de consommation et de prix (on le constate bien dans le nombre de services où les valeurs de consommation et de prix sont manquantes pour 2009 dans le Tableau 15). Le Tableau 15 permet de comparer cet échantillon de la population totale, la source de comparaison étant donnée non pas à l'échelle des communes mais des services d'eau potable. En moyenne ou en médiane, la consommation de l'échantillon ne diffère guère de la consommation renseignée de l'échantillon total.

²⁵ A titre d'exemple, sur le Grand Lyon, en 2012, le volume consommé est réparti de la manière suivante : 82% de volume consommé domestique, 5% par les industriels, 3% par les usages municipaux et 10% non compté ; le volume facturé sur une année représente 97% du volume consommé (mais ceci est sujet aux aléas des jours de relève, une autre année, il peut représenter 103%).

Tableau 15 : Statistiques descriptives de la population d'un service d'eau potable sur le bassin du Rhône et de l'échantillon analysé.

Thèmes	Sous-thèmes	Variables	Observations retenues				Valeurs manquantes	Population du bassin			
			(338 entités pour 338 communes)					(3181 entités pour 6305 communes)			
			Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum		Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum
Consommation	Volume domestique consommé	m3 / habitant / an	16	66	55	382	2366	0	71	55	1868
Caractéristiques de l'habitat	Géographie locale	Température (moyenne juin-sept)	7,3	18,4	18,5	23,3	11	6,7	18,2	18,3	23,3
		Pluviométrie (nombre jours pluie juin-septembre)	23	54,8	53	97	11	22	57,2	57	101
	Nature de l'habitat	Résidences secondaires (%)	0	16	8	93	7	0	22	14	95
		Propriétaires (%)	31	70	72	95	0	2	78	79	100
Caractéristiques du ménage	Démographie	Population (nombre d'habitants dans les communes raccordées au service d'eau)	66	3 869	1 108	173 021	0	1	3 065	436	1 273 872
		Taille du ménage	1,6	2,3	2,3	3	9	1	2,3	2,3	5
		Moins de 14 ans (%)	8	19	19	31	0	0	19	19	34
	Revenu	Revenu fiscal par foyer (euros)	12 426	21 691	21 059	58 895	193	7 790	21 791	20 908	87 814
Prix de l'eau	Niveau	€/ m3 pour une consommation de 120 m3	0,84	2,83	2,75	5,59	2547	0,43	2,63	2,59	6,55

Si, en termes de poids relatif, cet échantillon ne représente pas une part significative de la population du bassin, c'est davantage le cas si l'on se réfère à la population desservie par le service d'eau, même si elle est un peu plus importante. L'ensemble des variables paraît bien représentative, à part le fait que l'on a une sous-représentation des communes à fort taux de résidences secondaires et que l'on se situe dans des communes dans lesquelles la proportion des propriétaires ne descend jamais en dessous de 38%.

Interprétations et indicateurs tirés du modèle

Le meilleur modèle que nous avons estimé ici a la forme suivante :

$$\text{Log(Consommation 2009 par habitant permanent)} =$$

$$\text{Nombre de jours de pluie en été} + \text{Température moyenne estivale} + \text{Taux de moins de 14 ans} +$$

$$\text{Nombre de personnes par ménage} + \text{Taux de propriétaires} + \text{Taux de résidences secondaires} +$$

$$\text{Log(revenu fiscal par foyer fiscal)} + \text{Log(Prix moyen de l'eau)}$$

Expliquant près de 40% de la variance, ce modèle renvoie des valeurs ou des signes conformes aux prédictions théoriques ou aux autres modèles présents dans la littérature (Tableau 16).

Tableau 16 : Modèle de demande des 338 communes qui gèrent de manière indépendante leur service d'eau potable (données 2009).

Variables	Modèle (log volume consommé par habitant)
(constante)	-1,54
Nombre de jours de pluie en été (juin-septembre)	0,002
Température moyenne estivale (juin-septembre)	0,022 (.)
Taux de moins de 14 ans	1,625 (.)
Nombre de personnes par ménage	-0,43 (**)
Taux de propriétaires	-0,817 (***)
Taux de résidences secondaires	1,398 (***)
Log(revenu fiscal par foyer fiscal)	0,65 (***)
Log(prix moyen de l'eau)	-0,148 (*)
R2	44%
R2 ajusté	43%
F statistique	32,18

Variable significative à 0,1% (***) , 1% (**), 5%(*), 10%(.), sinon non significative

Ainsi, plus le nombre de jours de pluie sur la période estivale (juin-septembre) est important, plus la consommation est réduite ; à l'inverse, une température estivale élevée impacte positivement la consommation. Ce sont ces deux variables météorologiques qui nous sont apparues comme les plus significatives.

Ce modèle indique également que plus la proportion d'enfants (moins de 14 ans) dans la population est élevée, plus la consommation par habitant est importante. Comme constaté aussi dans toutes les autres estimations de la demande en eau, on observe une relation négative entre le niveau de consommation par habitant et le nombre de personnes par ménage, du fait des économies d'échelle. Plus la proportion de ménages est propriétaire de son logement, moins la consommation par habitant est élevée, du fait des investissements que ceux-ci peuvent réaliser. Ceci peut également s'expliquer par le fait que le propriétaire est plus informé de la facture et du prix de l'eau et donc plus sensible aux consommations qu'un locataire qui aurait probablement moins accès à la facture, l'eau étant généralement comprise dans les charges locatives. Une forte portion de résidences secondaires dans une commune augmente logiquement le niveau de consommation par habitant permanent.

Nous avons choisi le log de la consommation, du revenu et du prix pour être en mesure d'estimer directement les valeurs de l'élasticité correspondantes²⁶. Ainsi, on constate que le revenu influence positivement la demande en eau : plus le pouvoir d'achat d'un individu est élevé, plus il aura tendance à avoir des usages consommateurs en eau (piscines, bains...) et donc moins il fera attention à ses consommations, toutes choses égales. L'élasticité-revenu concernant la demande en eau potable est estimée dans les différentes études à une fourchette comprise entre 0,4 et 0,6. Elle est ici un peu plus élevée (0,65) : cela signifie que pour une augmentation de 10% du revenu des ménages compris dans les communes considérées, la consommation en eau potable augmentera de 6,5%.

Le prix pour 120 m³ d'eau potable et de l'assainissement a un effet négatif sur la consommation : l'eau étant un bien de consommation courante, il est logique que l'augmentation de son prix ait un effet négatif sur sa consommation. L'élasticité prix est ici (-0,147) un peu plus faible que celle normalement observée (qui est plutôt comprise entre -0,2 et -0,4). Une augmentation du prix de 10% se traduit par une baisse de la consommation de 1,47%, ce qui est faible, mais non nul.

Cas de Lyon Métropole

La communauté urbaine de Lyon est plus grosse collectivité du bassin, qui réunit environ 1,3 million d'habitants et assure la distribution et l'assainissement de l'eau pour les 59 communes du territoire. Elle a été étudiée à part pour deux raisons principales. La première est que les données disponibles pour Lyon Métropole étaient celles de l'année 2013, ce qui explique qu'elles n'étaient pas directement fusionnables avec les autres données. La seconde, principale, est que le climat étant quasi homogène sur le territoire de la communauté urbaine, un modèle « commun » aurait été fortement influencé par le poids des 59 communes du Grand Lyon et aurait évacué la variable climatique, dont on sait qu'elle n'est pas négligeable en réalité.

Le modèle construit précédemment, appliqué aux communes de Lyon Métropole, s'est révélé effectivement médiocre principalement du fait de la disparition de la variable climatique. Une tentative d'amélioration, en ajoutant des variables, a permis d'améliorer un peu la représentation de la demande en eau, mais globalement même les modèles plus élaborés se sont révélés peu satisfaisants (voir rapport 2015 pour plus de détail). Par contre, certaines variables semblent robustes et sont retrouvées dans les modèles des communes isolées et de Lyon Métropole, à savoir la taille du ménage, le revenu et la nature de l'habitat.

²⁶ L'élasticité (e) de la demande d'un bien donné (Q) par rapport à son prix (P) (ou élasticité prix) est définie de la manière suivante :
$$e = \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta P}{P}}$$
 lorsque $\frac{\Delta Q}{Q}$ et $\frac{\Delta P}{P}$ sont des variations relatives. Elle est la sensibilité de la quantité demandée d'un bien aux variations de son prix, toutes choses étant égales par ailleurs.

Nous avons finalement décidé d'utiliser uniquement le modèle issu des communes isolées pour l'ensemble du bassin versant du Rhône.

Généralisation à l'ensemble du bassin du Rhône

La généralisation a consisté à appliquer le modèle construit sur les 338 communes à l'ensemble des 6305 communes du bassin. Nous avons donc inféré la consommation en eau potable des ménages sur les différentes communes à partir des informations disponibles et de l'équation présentée précédemment. Certaines données étant manquantes, nous avons dû procéder à des estimations.

- Pour 7 communes, les données démographiques ne sont pas renseignées. Nous les avons inférés en considérant la moyenne observée dans les communes de moins de 150 habitants.
- 222 communes n'ont pas de revenu fiscal de référence. Nous avons décidé d'indiquer ici le revenu moyen observé à l'échelle du bassin du Rhône.
- Deux communes n'ont aucune indication sur les variables climatiques. Nous leur avons affecté les valeurs d'une commune voisine.
- Pour les communes pour lesquelles le prix de l'eau et de l'assainissement était une donnée manquante, nous avons appliqué la procédure suivante : nous avons procédé séparément pour les parts eau potable et assainissement, affectant sur chacune de ces parties le prix moyen pondéré à l'échelle du bassin sur les communes où ce prix était renseigné. Nous avons ensuite additionné les deux prix pour déterminer le prix moyen TTC payé.

Ce travail a été effectué pour l'année 2009. Nous avons ensuite procédé à une désagrégation saisonnière de la consommation annuelle. Elle peut être estimée à partir d'une part de chroniques de production d'eau observées à un pas de temps fin sur des communes du territoire et d'autre part des informations disponibles quant à la présence de résidences secondaires, de type de communes (touristiques/non – montagne/non, etc.). N'ayant pas trouvé de chroniques de production d'eau sur des communes du territoire concerné, nous prendrons des hypothèses d'évolution. Pour le deuxième type de données, nous croisons deux sources d'information :

- la liste officielle des communes classées touristiques disponible sur le site <http://www.entreprises.gouv.fr/tourisme/communes-touristiques-et-stations-classees-tourisme>. Cette liste précise si les communes sont classées au titre de leur catégorie « montagne », « thermal », etc.
 - Nous supposons que les communes des départements 39, 73 et 74 catégorisées en « montagne » sont des stations de sports d'hiver, qui seront modélisées en leur affectant une consommation très élevée en période hivernale et moins élevée en période estivale, avec des arrières saisons avec des niveaux de consommation faibles. Par hypothèse, la consommation x annuelle sera répartie de la manière suivante : $x/12$ (décembre et janvier) + $6x/(12*2)$ (février et mars) + $3x/(12*2)$ (juillet et août) + $x/(12*6)$ pour les 6 mois creux.
 - Nous supposons que les communes thermales (hors montagne) connaissent des niveaux de consommation stables au cours de l'année. Donc chaque mois $x/12$.
 - Nous supposons que les communes classées touristiques mais qui ne sont catégorisées ni sports d'hiver ni thermales connaissent un seul pic de saison touristique en été. Par hypothèse, la consommation x annuelle sera répartie de la manière suivante : $6x/(12*2)$ (juillet et août) + $4x/(12*2)$ (juin et septembre) + $2x/(12*8)$ pour les 8 mois creux.
- Le taux de résidences secondaires. Si les communes ne sont pas classées touristiques, nous supposons une saisonnalité pour les communes ayant plus de 30% de leur parc de logement en résidences secondaires. Dans ces conditions, on affectera une consommation plus élevée aux périodes de vacances, notamment estivales. Par hypothèse, la consommation x annuelle sera répartie de la manière suivante : $4x/(12*2)$ (juillet et août) +

$3x/(12*2)$ (juin et septembre) + $x/(12)$ (décembre et mars) + $3x/(12*6)$ pour les 6 mois creux (janv, fév, avril, mai, oct, nov).

Sur l'ensemble du bassin, nous avons ainsi la répartition suivante :

Tableau 17 : Classification des communes pour la saisonnalisation de la consommation en eau potable

Communes	Saisonnalité	Nombre de communes
Sans saisonnalité marquée	CommuneNormale	4991
Avec un haut taux de résidences secondaires	ResidSecSup30%	1023
Avec des sports d'hiver	StationSportHiver	58
Station thermale	StationThermale	17
Station touristique	StationTouristique	207

4.3.3 Résultats et estimation de la pression sur la ressource pour l'année 2009

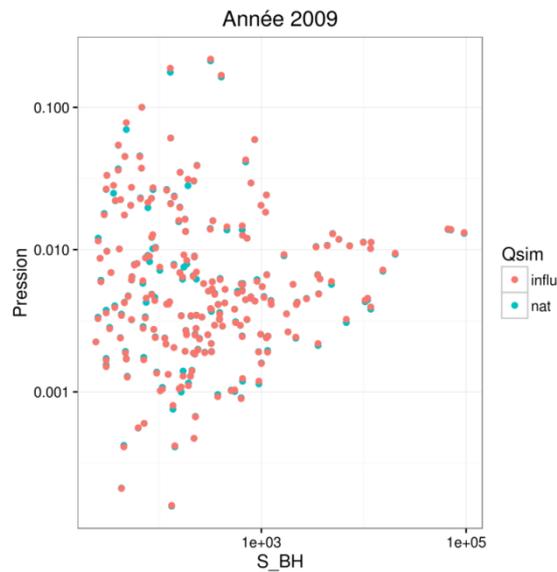


Figure 41 : Pression annuelle sur la ressource (naturelle/influencée) pour l'ensemble des stations de contrôle du bassin du Rhône. Les stations sont ordonnées par surface de bassin versant croissante (échelle logarithmique).

Les résultats du modèle de consommation d'eau potable appliqué à l'ensemble des communes du bassin du Rhône ont été agrégés à l'échelle des sous-bassins et comparés aux débits simulés par J2000-Rhône pour estimer un niveau de pression de l'AEP sur la ressource pour l'année 2009. Ce travail a été fait à la fois pour les débits naturels simulés, et pour les débits influencés simulés (c'est-à-dire en prenant en compte l'effet des barrages et les prélèvements pour l'irrigation). L'indice de pression choisi est le rapport du volume d'eau potable consommé sur le volume de ressource simulé, à l'échelle annuelle ou mensuelle. Les Figure 41, Figure 42 et

Figure 43 présentent les résultats. La pression de la consommation en eau potable sur la ressource est en général faible ; inférieure à 1% pour la plupart des stations (Figure 41). Elle est égale à 1.17% sur l'année sur l'ensemble du bassin versant (station exutoire de Beaucaire). La différence entre la pression sur la ressource naturelle et la ressource influencée est minime. Cela n'est pas surprenant et cohérent avec les résultats précédents sur l'impact de l'irrigation à nos points de contrôle. En effet les prélèvements pour l'irrigation sont réalisés soit dans de grands

cours d'eau, avec donc une influence très limitée, soit à l'inverse dans de tous petits cours d'eau qui sont fortement impactés, mais cela ne se voit pas sur nos stations qui concernent des cours d'eau plus importants.

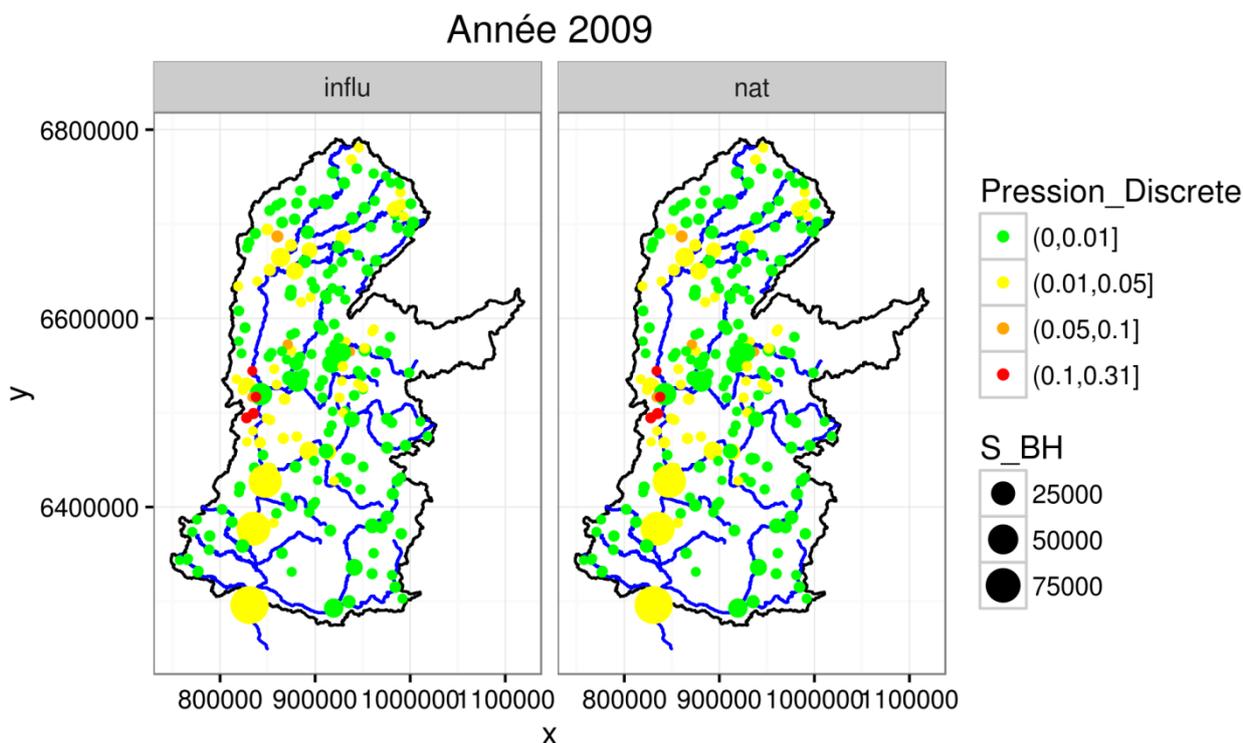


Figure 42 : Pression annuelle eau potable / ressource pour l'année 2009 sur les stations du bassin du Rhône (droite : ressource calculée d'après les débits naturels / gauche : ressource calculée d'après les débits influencés (barrages et irrigation).

Cependant on observe plusieurs cas pour lesquels la pression sur la ressource est supérieure à 10%. La représentation cartographique permet de localiser les stations les plus problématiques (Figure 42). On constate qu'elles correspondent aux plus petits bassins versants, tous situés à proximité ou dans l'agglomération lyonnaise. Cela met en évidence un effet de nos choix de modélisation. En effet nous avons fait l'hypothèse que les prélèvements pour l'eau potable d'une commune étaient réalisés dans le bassin versant où se situe cette commune. C'est évidemment souvent faux, et d'autant plus visible que les bassins versants sont petits. Typiquement, un des bassins apparaissant les plus impactés est celui de l'Yzeron à Francheville. Une partie des communes situées sur ce bassin (les plus peuplées) fait partie de Lyon Métropole et à ce titre bénéficie de l'alimentation en eau potable provenant des champs captants du Rhône, et non de l'Yzeron. Malgré ce biais important, les résultats apportent un éclairage intéressant sur le lien entre population, consommation d'eau potable et ressource locale.

La

Figure 43 montre les pressions mensuelles sur quatre sous-bassins correspondant aux quatre classes de pression montrées sur les cartes, et de tailles contrastées. On peut voir une influence des barrages et/ou de l'irrigation pour tous les bassins sauf l'Ouche à Crimolois. Pour l'Yzeron à Francheville, il s'agit uniquement d'irrigation, qui aggrave légèrement la situation, surtout à la fin du printemps. Pour ces deux stations, le pic de pression a lieu à la fin de l'été et est essentiellement lié à la baisse saisonnière de la ressource. Pour la station de la Durance à Serre-Ponçon, l'influence est uniquement due au barrage et a pour effet de diminuer légèrement la pression en été (ressource plus importante du fait du soutien d'étiage) et de l'augmenter en début d'hiver (ressource plus faible

du fait du stockage dans la retenue ?). Pour cette station, on observe deux pics de pression, qui correspondent à l'activité touristique sports d'hiver en février-mars et estivale en été. Enfin sur l'ensemble du bassin du Rhône (station du Rhône à Beaucaire) on n'observe qu'un seul pic en pression en été. Les barrages et les prélèvements pour l'irrigation contribuent à faire baisser cette pression légèrement en plein été, et à l'augmenter légèrement au printemps. Rappelons toutefois que ces résultats sont spécifiques à l'année 2009, qui n'est pas nécessairement représentative d'un « temps présent » moyen. L'année 2009 a globalement été assez sèche et sans épisode de crue significatif sur le bassin, ce qui conduit à des valeurs d'indicateur de pression qui peuvent paraître artificiellement élevées.

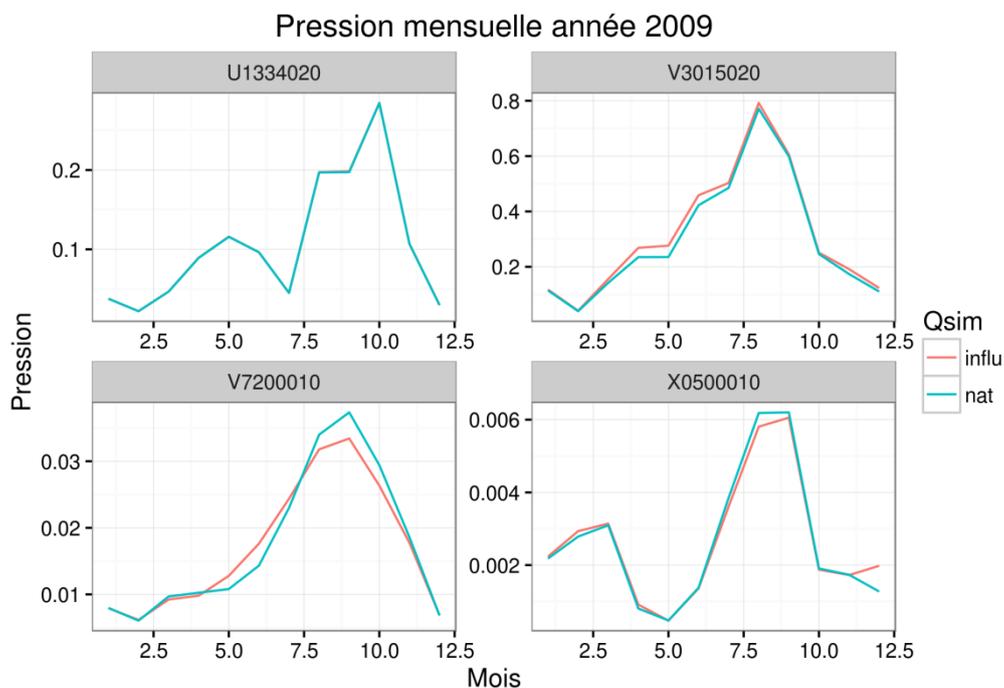


Figure 43 : Zoom sur quatre stations contrastées (dans l'ordre de droite à gauche et de haut en bas) : l'Ouche à Crimolois (860 km²), l'Yzeron à Francheville (129 km²), le Rhône à Beaucaire (exutoire), la Durance à Serre-Ponçon (3580 km²) – pressions mensuelles eau potable / ressource naturelle et influencée

4.3.4 Conclusion et perspectives d'intégration au modèle J2000-Rhône

Le travail réalisé nous a ainsi permis de formaliser un modèle de consommation d'eau potable sur l'ensemble du bassin du Rhône, et de confronter ses résultats avec les simulations hydrologiques réalisées, avec ou sans influence. C'est utile pour avoir une première idée des pressions sur la ressource, qui peuvent être comparées avec les études réalisées par ailleurs (étude quantitative Rhône par exemple).

Du point de vue des perspectives, l'enjeu dans le futur immédiat sera d'intégrer formellement la consommation en eau potable au modèle hydrologique, à l'instar des autres usages. La démarche est déjà bien balisée, et tirera parti de l'expérience sur les autres types d'usage. On pourra ainsi intégrer la consommation en eau potable calculée comme consigne pour le modèle hydrologique. Il faudra transformer cette consommation en prélèvement, en tenant compte du rendement des réseaux, et ajouter un terme de restitution, éventuellement décalé dans le temps. Le point clef, on l'a vu, sera de pouvoir localiser les prélèvements d'une commune donnée, non pas forcément dans le bassin versant où elle est située, mais au lieu de prélèvement réel. On s'appuiera pour cela sur les données disponibles, et on procèdera à des extrapolations dans le cas où cette information n'est pas disponible.

Le modèle de consommation d'eau potable pourra à terme être aussi amélioré, de façon notamment à mieux différencier la consommation dans les petites communes isolées et dans les grandes zones urbaines. Pour cela, il sera souhaitable de disposer de données sur plusieurs communautés urbaines et façon à éviter les biais.

5 Les usages de l'eau aux horizons futurs : déclinaison de quelques scénarios d'évolution et d'adaptation

5.1 Contexte et méthodologie

Une des motivations à construire un modèle hydrologique distribué incluant les principaux usages de l'eau, est son déploiement sur des horizons temporels futurs, comme outil pour estimer la viabilité des pratiques actuelles ou la pertinence de trajectoires modulant la demande en eau dans un cadre de réduction probable de la ressource.

À cette fin, nous avons appliqué notre modélisation sous différents scénarios possibles d'évolution climatique, un scénario 'optimiste' (RCP²⁷ 2.6) et un scénario 'pessimiste' (RCP 8.5) (Figure 44). Ces scénarios se traduisent, par une réduction des débits interannuels simulés sur la plupart de nos stations à moyen (~ horizon 2030-2065) ou long (~horizon 2065-2100) terme. Ces diminutions sont susceptibles d'impacter les usages de l'eau : dans ce chapitre, nous nous intéressons à quantifier ces impacts. Nous posons aussi les bases d'une méthodologie permettant d'évaluer les implications de stratégies destinées à atténuer ces impacts, via des études de sensibilités portant sur différents leviers d'actions.

Projections climatiques

Nous nous appuyons ici sur des projections climatiques réalisées à l'échelle de la France par Météo-France, et gratuitement disponibles sur le portail Drias²⁸ : les sorties du modèle ALADIN corrigées par des méthodes quantile-quantile. Ces projections déclinent, sur la période 2030-2100, trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, respectivement RCP 2.6, RCP 4.5, et RCP 8.5, dont les implications climatiques sont graduellement plus importantes (Figure 45). Parmi ces projections, nous analyserons surtout celles correspondant aux RCP 2.6 et 8.5,

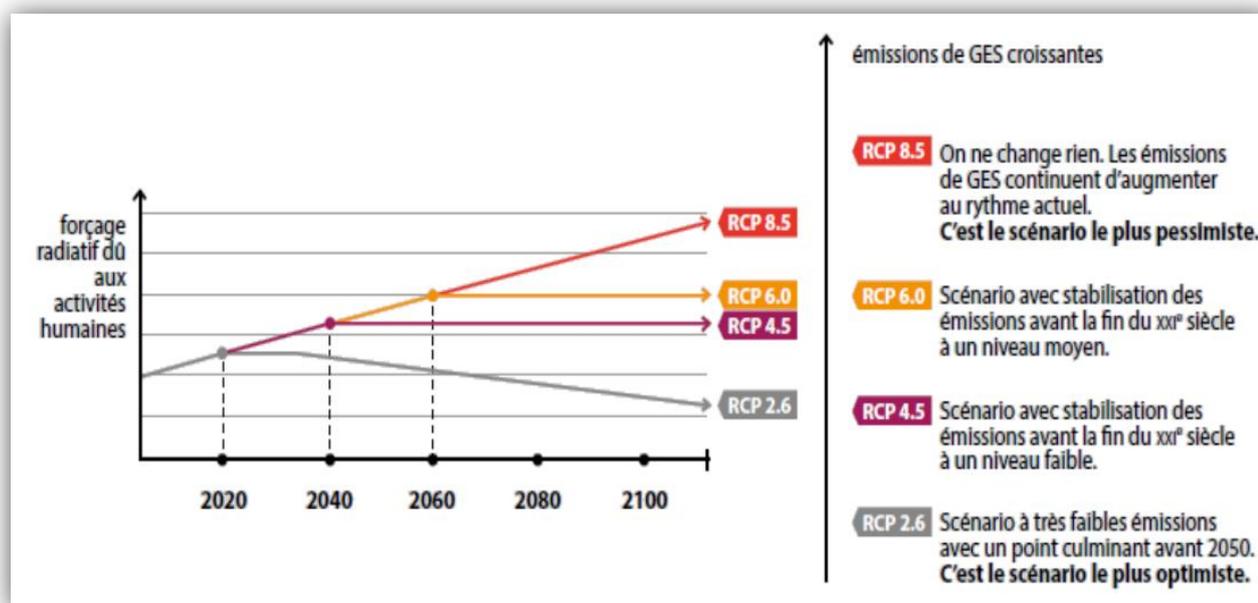


Figure 44 : Explication schématique des RCPs.

²⁷ Representative Concentration Pathway. Chronique de contenu en carbone de l'atmosphère projeté pour les horizons temporels futurs, et porteuses d'implications au plan climatique.

²⁸ <http://www.drias-climat.fr/>

comme indicatrices de bornes respectivement basse et haute d'une gamme d'évolutions climatiques possibles.

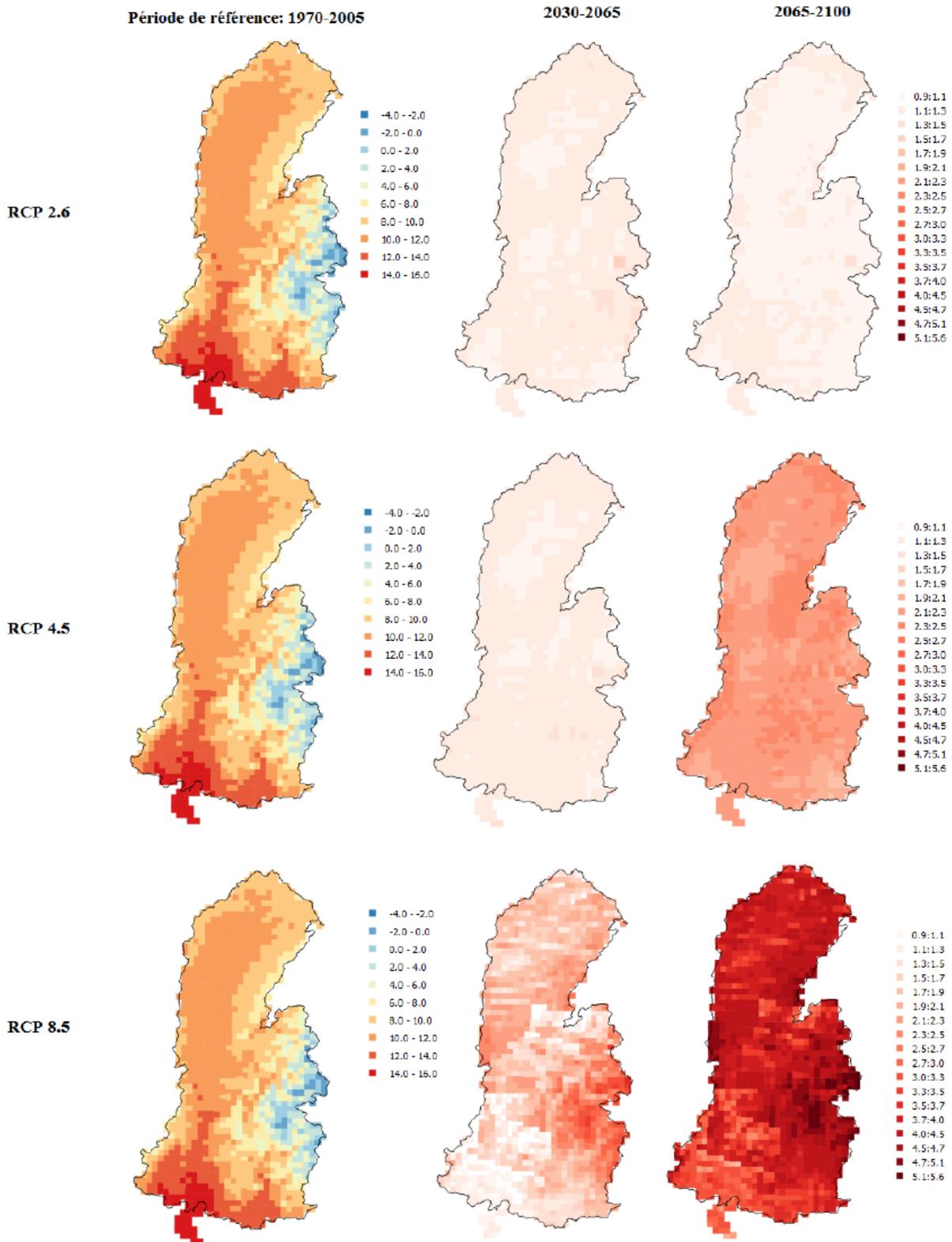


Figure 45 : Températures moyennes interannuelles en période de référence, et écart par rapport à ces températures de référence aux horizons moyens (2030-2065) et lointains (2065-2100), tels que modélisés par Aladin pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5.

Méthodologie Générale

Utiliser un modèle hydrologique pour évaluer les implications d'usages anthropiques et de changements climatiques sur la ressource, suppose déjà une robustesse de la modélisation en hydrologie naturelle sous impacts climatiques seuls. Nous nous sommes donc dans un premier temps attachés à estimer la robustesse de J2000-Rhône dans ce contexte : les résultats (Khalfaoui, 2015) sont satisfaisants, et nous permettent de confronter notre modélisation aux usages de l'eau et à leurs changements possibles aux horizons futurs.

Notre méthodologie consiste dès lors à estimer la tension sur la ressource en eau produite par les usages anthropiques, en contexte temps-présent, et aux horizons temporels moyen et long indiqués précédemment. Dès lors, peuvent être déclinés plusieurs scénarios d'évolution des usages, qui proviennent soit d'extrapolations de tendances actuelles, soit qui correspondent à des leviers actionnables par les pouvoirs publics pour atténuer des impacts des évolutions conjointes des usages et du climat. Les deux types d'évolutions pouvant bien sûr être combinées. Le schéma (Figure 46) illustre cette méthodologie.

Evolutions des actions et/ou actions d'adaptation	Climat	REFERENCE	RCP 2.6		RCP 8.5	
		Temps-Présent	Horizon moyen	Horizon long	Horizon moyen	Horizon long
Ex 1 : évolution tendancielle des usages						
Ex 2 : usages actuels			Indice de tension sur la ressource lié aux usages de l'eau, et régionalisé sur le territoire du bassin du Rhône.			
Ex 3 : politique d'incitation pour l'irrigation en goutte-à-gouttes						
Ex 4 : augmentation du prix de l'eau						

Figure 46 : Méthodologie déployée pour estimer la vulnérabilité des usages de l'eau sous changement climatique, incluant des scénarios simples d'adaptation liés à des leviers d'actions portées par les pouvoirs publics.

Notre objectif ici n'est pas de donner un aperçu exhaustif de tous les devenir possibles de la ressource et des usages : il nécessiterait un recensement exhaustif des leviers d'actions politiques et des trajectoires d'évolutions climatiques et anthropiques possibles, ce qui est bien au-delà du cadre du projet MDR. En revanche, notre objectif est de montrer le potentiel de notre outil dans l'estimation des impacts conjoints de leviers d'actions et de changements climatiques et anthropiques. Cette 'preuve de concept' le positionne comme un outil spatialisé d'aide à la décision sur des questions de gestion de l'eau, en lien notamment avec le test de stratégies d'adaptation pluri-sectorielles (eau potable et irrigation) et intégrées sur le territoire Rhône. Nous nous attacherons aussi à exprimer les limites de nos approches, et notamment leurs échelles de validité.

Quantification et qualification de la tension sur la ressource liée à un usage.

Nous quantifions la vulnérabilité d'un usage de l'eau vis-à-vis de la ressource disponible à travers un indice de tension sur la ressource, le « water stress index » (wsi) explicité ci-dessous :

Il représente le pourcentage de l'eau disponible alloué au besoin en eau pour un usage déterminé, et a été choisi de par son usage fréquent dans la littérature (e.g. Milano et al., 2015). Sur la base de cet indice, le degré de tension sur la ressource est aussi traduit en appréciation qualitative (Tableau 18).

Tableau 18 : Lien entre indice de tension sur la ressource et appréciation qualitative de la tension.

Wsi	Niveau de tension sur la ressource
<20%	Pas de tension
20%<wsi<40%	Tension modérée
40%<wsi<80%	Tension forte
80%<wsi<100%	Tension sévère

5.2 Cas de l'irrigation

Les déterminants de la demande agricole

Appréhender l'irrigation du futur pose à la fois des questions sur :

- Les possibilités d'extension des surfaces agricoles irriguées
- L'évolution des comportements des agriculteurs vis-à-vis des modes d'irrigation, éventuellement en lien avec des incitations politiques et/ou le prix de l'eau
- L'évolution de la qualité des réseaux d'acheminement de l'eau d'irrigation aux cultures, qui peut elle aussi résulter d'un choix politique.

Ces trois déterminants ont émergé d'une réflexion avec les personnels de l'Agence de l'Eau RMC, comme des axes intéressants au travers desquels appréhender l'évolution de la demande en eau agricole pour l'irrigation : en effet, ils correspondent à différents champs d'actions possibles pour les pouvoirs publics dont l'Agence, permettant d'infléchir cette demande en cas de limitations sur la ressource. Ils déclinent ainsi différentes stratégies d'adaptation possibles, et dont l'Agence souhaiterait, à terme, pouvoir comparer les efficacités sur son territoire.

Tension sur la ressource en eau pour l'irrigation : impact climatique seul

Pour l'irrigation, les limites de notre modélisation, évoquées au chapitre précédent, nous ont conduits à cibler notre étude sur des sous-ensembles des cantons irrigués du bassin versant du Rhône (Figure 47) sur lesquels notre modélisation en climat actuel fournissait des résultats particulièrement bon en comparaison des prélèvements recensés par l'Agence de l'eau. Sur ces zones, les figures suivantes montrent l'évolution sous changement climatique (i.e. selon les RCPs) du wsi sur les cours d'eau impactés par l'irrigation, à surfaces et pratiques agricoles actuelles.

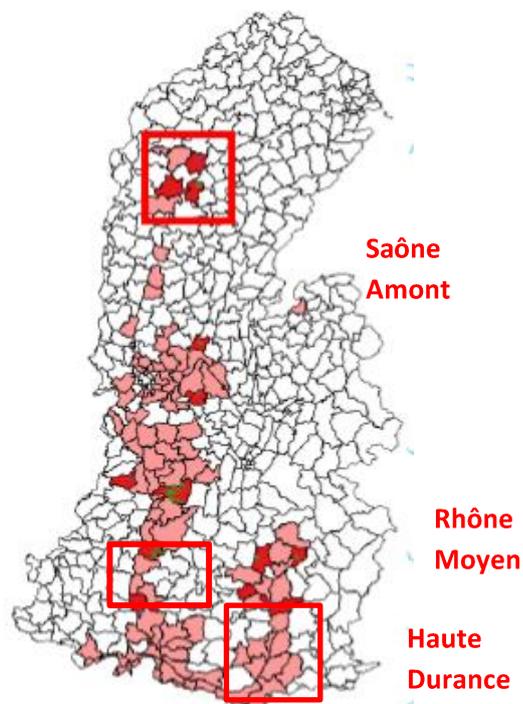


Figure 47 : Zones du bassin versant du Rhône analysées pour l'irrigation en climat futur.

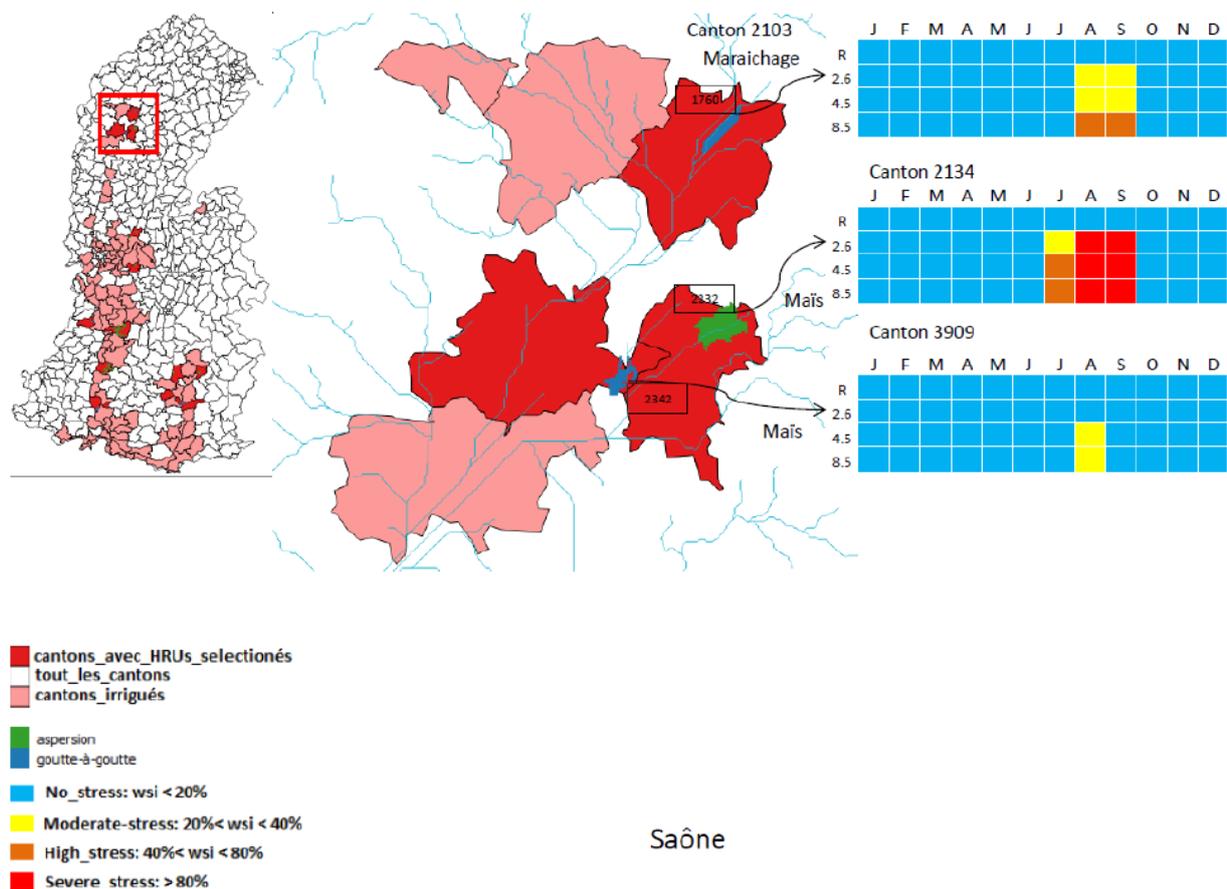


Figure 48 : Evolution du wsi pour l'irrigation sur la zone Saône Amont. Sont représentés (à gauche) les cantons irrigués sur lesquels portent l'analyse (rouge foncé) et le type d'irrigation sur les HRUs irriguées (bleu ou vert pour goutte-à-goutte ou aspersion), et (à droite) sous forme de tableau, l'indice de stress saisonnier sur les cours d'eau impactés par les prélèvements, selon les différents RCPs (R : Référence temps-présent 1970-2005 ; 2.6, 4.5 et 8.5 : les RCPs pour 2030-2100).

On décèle dans ces résultats quelques comportements généraux remarquables :

- En climat présent comme futur, la pression induite par l'irrigation sur la ressource en eau est beaucoup plus importante sur les zones en irrigation par aspersion, que sur celles avec irrigation par goutte-à-goutte. Ces résultats sont cohérents avec les efficacités et fonctionnements respectifs de ces modes d'irrigation : dans notre modélisation ces deux modes ont respectivement des efficacités de 70 et 90%, par ailleurs ils appellent également à un 'arrosage' des sols plus abondant pour l'aspersion.
- Sur les cantons analysés, l'irrigation par aspersion induit de fait une tension de moyenne à sévère sur les mois d'été dans le scénario de changement climatique le plus extrême. A l'opposé, les cantons irrigués en goutte-à-goutte restent dans des niveaux de stress plus faibles.
- L'analyse du wsi sur le Rhône Moyen et la Haute Durance fait ressortir **les limites de notre modélisation** : les HRUs irriguées situées très en amont sur de petits affluents du Rhône ou de la Durance, telle la HRU 8450 (Figure 49), affichent des niveaux de stress intenses, même en climat présent. En pratique, une redistribution de la ressource à l'échelle de ce territoire peut avoir lieu (prélèvement dans des affluents voisins, méthodes alternatives par pompage dans la ressource sous-terrainne par exemple), et les tensions en sont atténuées.
- Nous prévoyons naturellement de faire évoluer notre modélisation pour lui permettre de rendre compte de cette mutualisation de la ressource qui peut opérer au sein d'un territoire : possibilité de prélèvement de

l'eau d'irrigation dans tous les affluents d'un canton voire au-delà, voire possibilité de prélèvements sous-terrain. Une telle représentation suppose une spatialisation des aires de prélèvement en lien avec une connaissance plus approfondie du territoire : elle n'a pas pu être mise en place dans le temps du projet.

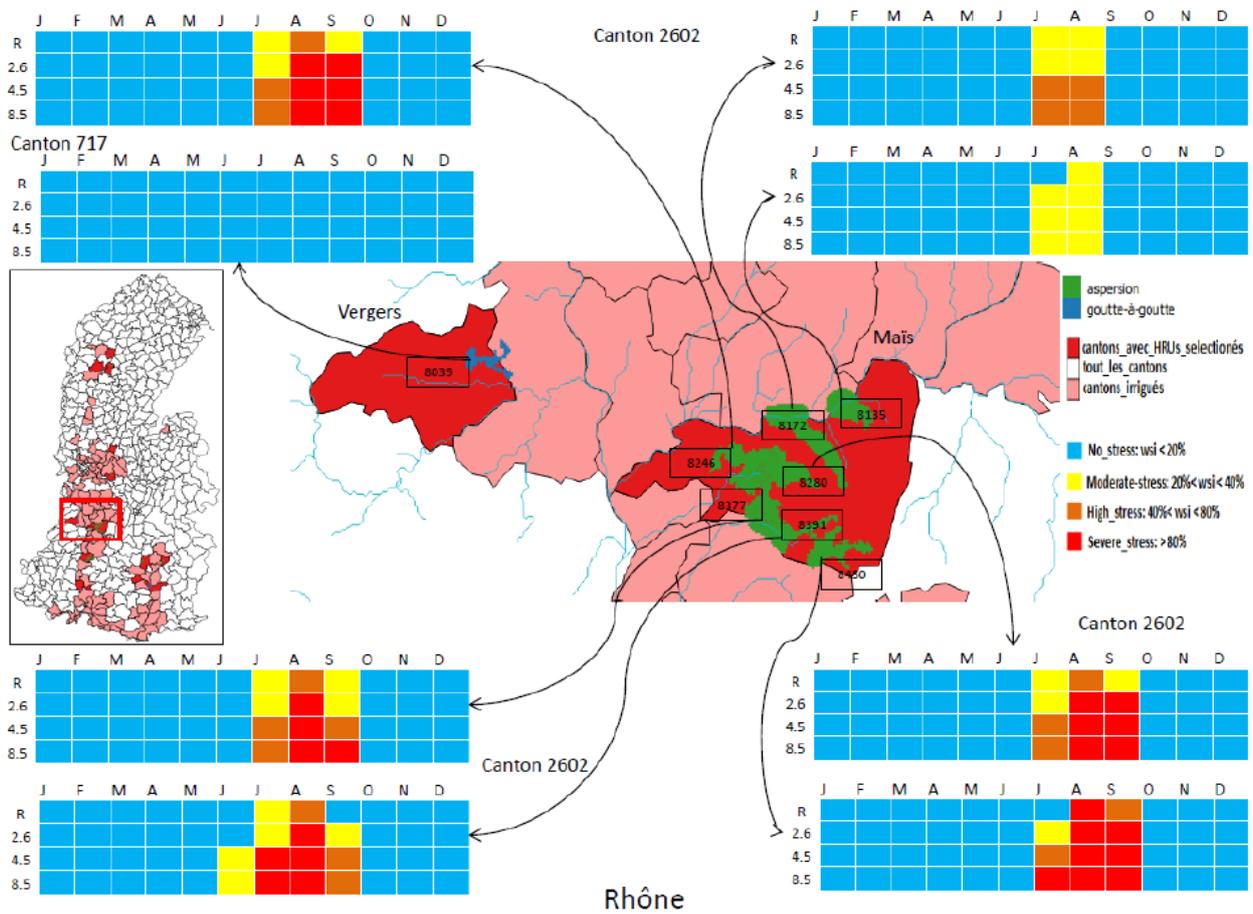
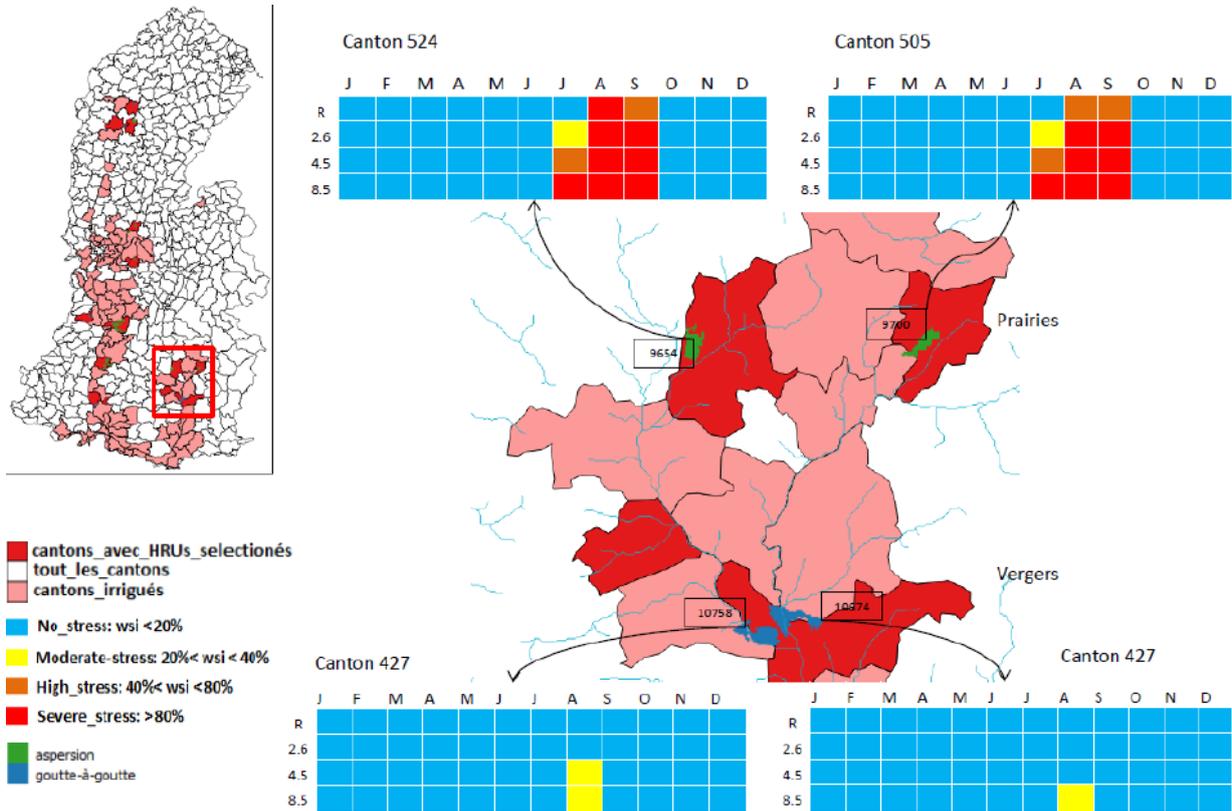


Figure 49 : idem, sur les cantons du Rhône-Moyen.

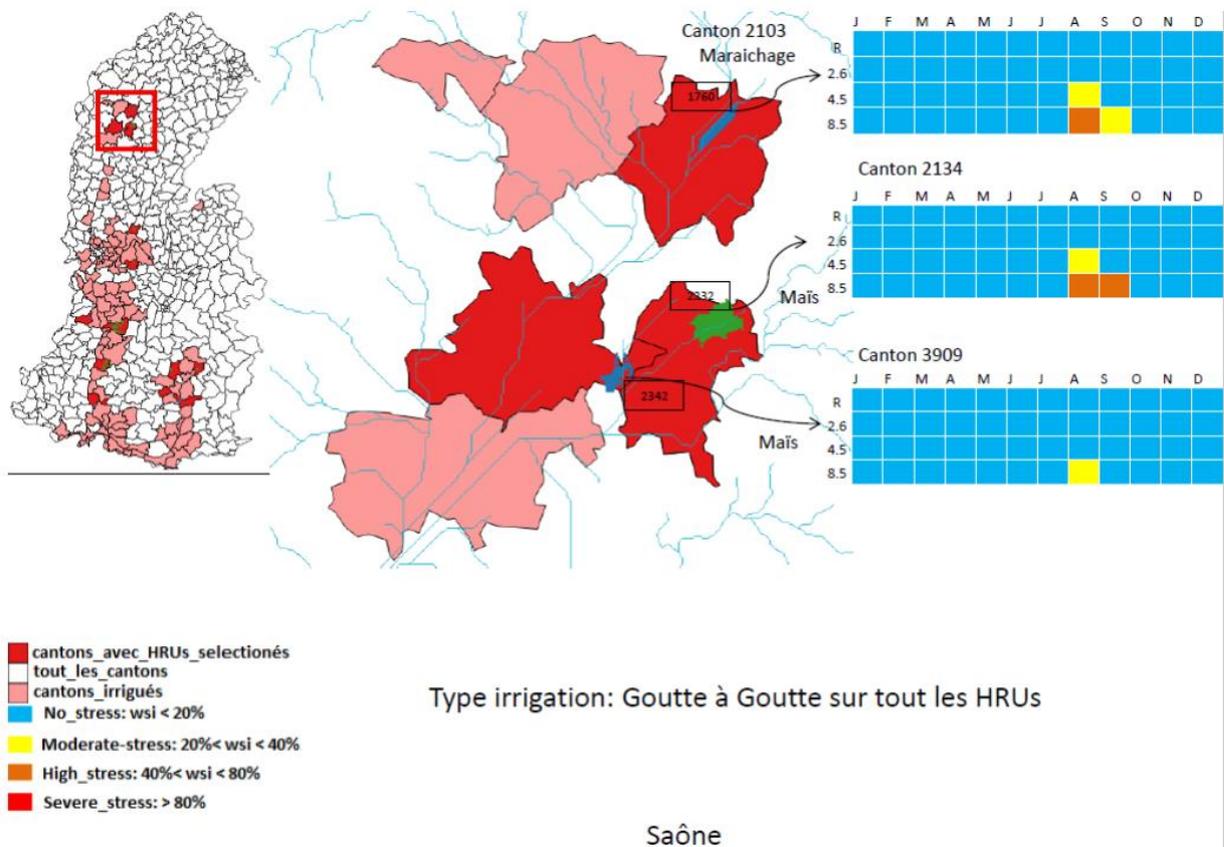
Tension sur la ressource en eau pour l'irrigation : changement climatique et changement de pratiques agricoles

Dans le but d'illustrer le potentiel de J2000-Rhône et ses modules d'usage dans la quantification des impacts de politiques d'adaptation au changement climatique, nous avons réalisé une étude de sensibilité de la tension sur la ressource à un changement de pratiques agricoles. Afin d'obtenir un signal clair, nous avons envisagé **un scénario de bascule généralisée vers une irrigation par goutte-à-goutte sur l'ensemble des cultures irriguées du bassin du Rhône**. Si un tel scénario peut paraître irréaliste (en terme de couts, de réalisation pratique et d'adéquation entre le type d'irrigation et le type d'agriculture), il peut néanmoins être assimilé une borne supérieure des économies d'eau (et donc du degré de soutenabilité) potentiellement accessibles sur ce bassin vis-à-vis de l'irrigation, à types et superficies agricoles équivalents à l'actuel.



Durance

Figure 50 : idem, sur les cantons de la Haute-Durance.



Type irrigation: Goutte à Goutte sur tout les HRUs

Saône

Figure 51 : wsi sur les cantons de Saône Amont sous scénario de bascule généralisée vers du goutte-à-goutte.

La Figure 51 illustre les implications de ce scénario « tout goutte-à-goutte » pour les cantons irrigués de la Saône Amont. Deux phénomènes remarquables sont à noter :

- Le « tout goutte-à-goutte » réduit considérablement le stress sur les espaces autrefois irrigués en aspersion (canton 2134), qui reste en deçà d'un niveau sévère sous le scénario climatique le plus extrême.
- Les répercussions du 'tout goutte-à-goutte' affectent aussi les cantons qui étaient déjà irrigués en goutte-à-goutte dans nos scénarios précédents (ex : canton 2103 Figure 51) : C'est là un effet de la modélisation hydrologique intégrée, qui rend compte, à l'aval, de modifications susceptibles d'affecter la ressource en eau à l'amont (en l'occurrence, moins de prélèvements à l'amont dans le scénario « tout goutte-à-goutte », augmentant la ressource disponible à l'aval). Cet effet révèle la plus-value d'une modélisation intégrée des usages, par rapport à une confrontation ressource-demande incapable de tenir compte finement des répercussions aval de prélèvements amont.

Les implications du scénario « tout goutte-à-goutte » sur le Rhône Moyen et la Haute Durance sont présentés en Annexe 11.1.

5.3 Cas de l'alimentation en eau potable

Dans le cas de l'eau potable, le travail réalisé a permis une prospective assez large selon plusieurs scénarios, prenant en compte des variables telles que la croissance de la population, l'évolution du prix de l'eau etc. Ces scénarios de consommation ont ensuite été confrontés à la ressource future, naturelle et influencée.

5.3.1 Construction des scénarios d'usage

Les scénarios vont chercher à représenter l'impact de différentes tendances sur la consommation annuelle en eau des communes. Cet impact pourra ensuite être discrétisé pour estimer l'évolution de la distribution à un pas de temps plus fin que le pas de temps annuel.

Nous allons simuler l'impact pour deux années de référence, l'année 2032 et l'année 2085. Notons toutefois les limites évidentes de cette approche lorsque l'on se fonde sur des éléments de fonction de demande et d'autres extrapolations démographiques :

- La fonction de demande représente une vision de ce qui s'est déroulé dans le passé avec les seules observations du passé (et ici en l'occurrence l'année 2009) qui étaient disponibles : le coefficient de détermination R^2 indique que l'on n'arrive à ce propos à ne représenter que moins de la moitié de la dispersion observée. Rappelons aussi que cette fonction a été estimée à partir de 338 communes pour lesquelles l'information était disponible. Si la fonction de demande nous paraît robuste, dans le sens où les paramètres qu'elle met en valeur et leurs signes semblent cohérents avec les valeurs communément observées, cette robustesse ne peut être que limitée dans le temps. Estimer des consommations aux horizons considérés ici est donc à prendre avec de grandes précautions, notamment à l'horizon 2085.
- Les prévisions démographiques disponibles auprès de l'INSEE sont très sommaires et disponibles pour l'année 2040. Elles sont déclinées à l'échelle départementale et présentent également qualitativement des tendances : il est ainsi dit que la population aura tendance à se regrouper de plus en plus au sein des aires urbaines.

Ces limites étant exposées, nous indiquons maintenant les trois étapes qui composent cette estimation.

Etape 1. Estimation de la consommation annuelle par habitant au niveau des communes

Notre fonction de demande individuelle comporte différents types de variables, qu'il est important de considérer dans les scénarios.

1. *Des variables climatiques* : température et pluviométrie estivales. Nous nous référons ici pour les scénarios aux projections issues de DRIAS. Remarquons que nous n'avons intégré ici que les données estivales (juin-septembre), car ce sont ces variables qui ressortaient dans les facteurs explicatifs de la demande en eau. Il se pourrait qu'à un horizon lointain, les déterminants climatiques de la consommation évoluent, en particulier par exemple si l'on a une « uniformisation » du temps à l'échelle annuelle : ainsi, si l'on observait aucun changement climatique sur la période estivale, mais uniquement sur le reste de l'année.
2. *Des variables démographiques* : proportion de la population de moins de 15 ans, nombre de personnes par ménage, proportion de propriétaires. La seule variable démographique sur laquelle l'INSEE présente des prévisions au niveau départemental est la première. Ce sera cette variable sur laquelle nous allons faire des simulations.
 - *Proportion de la population de moins de 15 ans*. Nous reprenons les proportions définies à l'échelle départementale de trois des scénarios présentés par l'INSEE à l'échelle départementale (scénario central, bas et haut). Nous calculons des évolutions de proportion de cette population entre 2007 et 2032. Nous appliquons ensuite cette évolution de proportion à l'ensemble des communes situées dans les départements concernés.
3. *Des variables « économiques »* : le revenu fiscal des ménages, le prix de l'eau et le taux de résidences secondaires.
 - *Revenu fiscal*. Nous évaluons l'impact de modifications de revenu de +/- 10%. Il serait possible également d'imaginer une évolution différenciée selon le type de territoire, ce qui n'a pas été fait ici. Nous avons ici considéré que cette évolution de +/- 10% ne s'effectuait qu'une fois (ce n'est pas une évolution de 10% chaque année), soit à l'horizon 2032 soit à l'horizon 2085. Cela a donc un impact assez limité sur l'évolution de la consommation en eau à attendre.
 - *Prix de l'eau*. Un scénario dans lequel un prix de l'eau augmente de 2% annuellement sur la période a été testé, ce qui est une hypothèse haute mais raisonnable au vu de la croissance des prix de l'eau en vigueur depuis 10 ans (cette hypothèse avait d'ailleurs été prise dans le cadre du projet R2D2 2050 pour les communes urbaines, les communes rurales se voyant appliquer une augmentation de 2,5%) (Sauquet et al., 2015). Il correspond au fait que le prix pourrait s'accroître en raison des investissements à réaliser (attention, on raisonne, comme pour l'évolution du revenu, sans considérer le niveau d'inflation). Un scénario sans augmentation est aussi considéré pour tenir compte cette fois-ci des objectifs poursuivis par les collectivités locales d'afficher un prix de l'eau maîtrisé.
 - *Taux de résidences secondaires*. Non modifié dans les simulations présentées.

Etape 2. Estimation de la consommation annuelle à l'échelle de la commune

Cette estimation reprend l'estimation précédente de la consommation annuelle par habitant et la multiplie par l'estimation de la population au pas de temps considéré. Nous reprenons ici les prévisions publiées par l'INSEE de l'évolution de la population à l'horizon 2040 qu'il a discrétisé annuellement et par département. Trois scénarios notamment sont présentés : le scénario central, poursuite des tendances observées précédemment, le scénario bas et le scénario haut. Ces prévisions à l'échelle départementale servent de base (TREND) pour estimer une progression homogène de la population à l'intérieur de ce groupement administratif de communes (Blanpain and Chardon, 2010). Des évolutions de population contrastées sont également modélisées. Nous représentons une évolution contrastée dans laquelle :

- les communes n'appartenant pas aux grandes aires urbaines ne voient pas leur population progresser ;
- les communes appartenant aux grandes aires urbaines se partageant les bénéfices de la progression.²⁹

Cela représente une évolution des territoires observée, en particulier en Rhône-Alpes où l'on constate que ce sont les couronnes périurbaines et les communes multipolarisées des grands pôles urbains qui portent la croissance (Gras and Vallès, 2016).

Etape 3. Estimation de la consommation journalière/mensuelle/... au niveau des communes

La décomposition en consommation annuelle a été réalisée selon les modalités précédemment exposées en 4.3.2.

5.3.2 Résultats et estimation de la pression sur la ressource

Consommation en eau potable seule

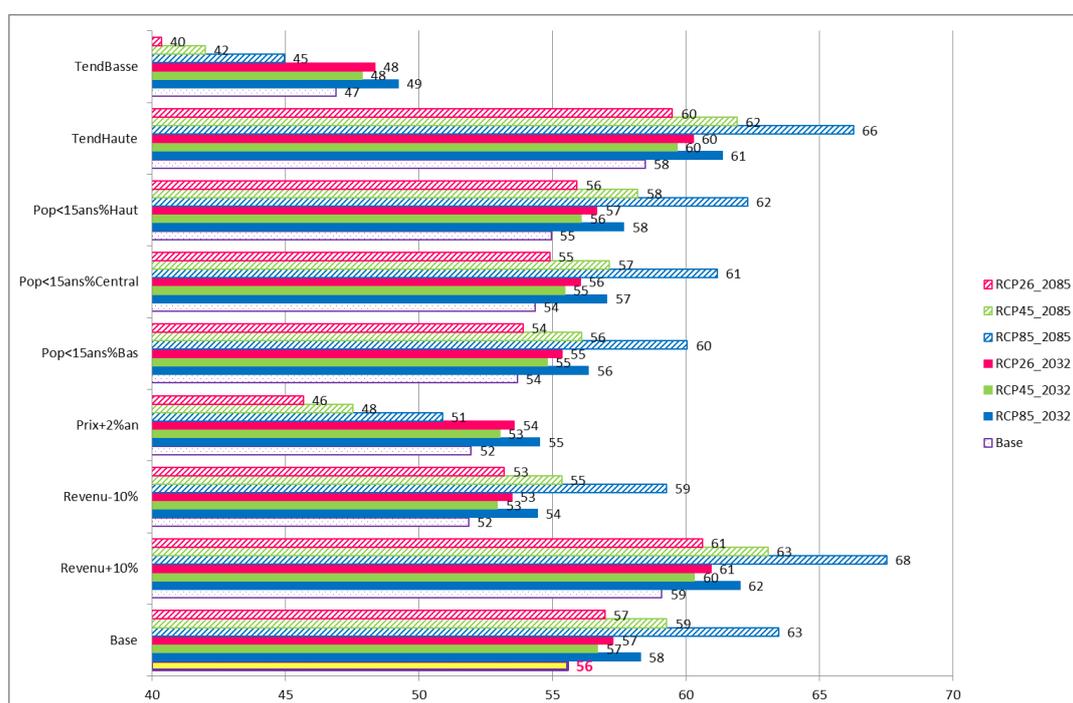


Figure 52 : Consommation en eau moyenne par habitant permanent et par an (m³) selon les différents scénarios climatiques et anthropiques

Le croisement des différents facteurs a conduit à 6 scénarios d'évolution de la consommation d'eau potable (voir Figure 52). Deux scénarios de synthèse supplémentaires (tendance haute et tendance basse) ont été définis comme combinant les scénarios les plus consommateurs d'eau et les moins consommateurs, respectivement (Figure 53). La consommation à l'échelle de la commune a été obtenue en multipliant par les projections de population future. Une différenciation a aussi été réalisée en considérant un accroissement de la population homogène sur un département ou concentrée sur les grandes aires urbaines (scénarios GAU, voir Figure 53). Enfin

²⁹ Nous avons été conduits à modifier cette règle générale du fait de l'observation des données : certains départements perdent des habitants, le département de la Lozère ne possède quasiment pas de grandes aires urbaines, ce qui conduisait à faire porter la totalité de l'augmentation sur un nombre trop réduit de communes (la progression était de l'ordre de +8000%). Dans ces deux configurations, nous n'avons donc pas distingué d'évolution différenciée sur les communes de ces départements.

l'ensemble de ces scénarios a été croisé avec les scénarios climatiques à horizon 2032 et 2085. On arrive donc à une multiplicité de projections. La consommation d'eau potable apparaît assez variable. Le scénario climatique 8.5 à l'horizon 2085 apparaît comme générant la consommation la plus élevée, ce qui correspond à ce qui était attendu. Au niveau des facteurs humains, la proportion de moins de 15 ans dans la population et le revenu semble contrôler l'évolution de la consommation, ce qui était aussi attendu.

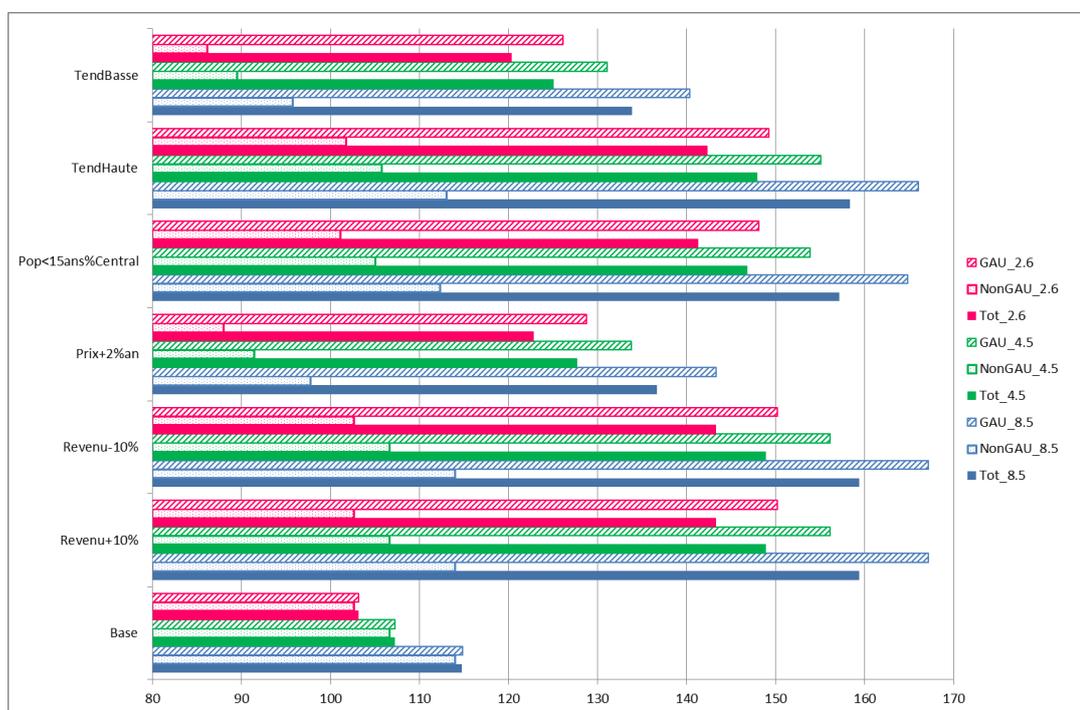


Figure 53 : Evolution de la consommation d'eau moyenne à l'échelle communale (base : consommation sans modification du climat). Année 2085.

Pression sur la ressource – ressource naturelle

Pour estimer la pression sur la ressource, nous avons procédé à une sélection des scénarios de consommation. Nous avons ainsi choisi seulement les scénarios tendance basse et tendance haute (avec les variantes avec et sans grandes aires urbaines) pour encadrer les min et max d'évolution de la consommation. De même pour le climat, nous avons sélectionné uniquement les scénarios extrêmes : RCP 2.6, le plus optimiste, et 8.5, le plus pessimiste.

Comme en 4.3.3, les projections de consommation obtenues à l'échelle communale ont été désagrégées temporellement et agrégées spatialement par sous-bassins pour être comparées aux simulations de J2000 Rhône sur les 216 stations françaises qui nous servent de points de contrôle. Le modèle hydrologique a réalisé une simulation continue jusqu'en 2100. Pour obtenir les projections de débit 2032 et 2085, nous avons moyenné les résultats sur les 10 ans autour de l'année cible, de façon à obtenir une année de débits typique et moins dépendante de la variabilité interannuelle. Nous avons réalisé deux simulations avec le modèle hydrologique, une en hydrologie naturelle (débits simulés naturels) et une en prenant en compte l'impact des barrages et les prélèvements pour l'irrigation (débits simulés influencés). En ce qui concerne les barrages et l'irrigation, nous avons simplement reconduit à l'identique les pratiques actuelles, sans appliquer de scénario d'évolution pour ces usages. Comme pour le temps présent (année 2009, voir partie 4.3.3), la différence entre les simulations en hydrologie naturelle et influencée est assez minime et ne se voit pas sur les cartes. Nous ne présentons et commentons donc ici que les résultats cartographiques pour les débits simulés naturels (Figures Figure 54 à Figure 57). Les résultats pour les débits simulés influencés sont présentés en Annexe 11.4.

On peut voir que la pression pour plusieurs scénarios futurs est moins importante que pour l'année 2009, mais ce n'est pas forcément très étonnant si l'on se réfère aux conditions particulières de cette année-là. Comme attendu, le scénario climatique 2.6 se révèle être plus lâche pour la pression en eau potable, y compris jusqu'en 2085. Seul le scénario d'usage « tendance haute » ramène à une pression d'un niveau comparable à l'année 2009 pour les petites stations. On ne voit pratiquement aucune différence, à l'échelle de nos stations, entre les scénarios avec et sans grandes aires urbaines. Cela n'est pas forcément très étonnant du fait de la localisation des stations. La pression sur la ressource est par contre beaucoup plus importante pour le scénario 8.5, particulièrement à l'horizon 2085. Pour ce scénario climatique, la combinaison avec la tendance haute du scénario d'usage conduit à une pression particulièrement importante sur les sous-bassins de taille petite et moyenne.

Cela est encore plus visible lorsqu'on regarde de plus près la pression mensuelle pour les différents scénarios (station exutoire du Rhône à Beaucaire Figure 58 et station de l'Yzeron à Francheville Figure 59 qui est l'une des plus impactées). On voit que dans le cas du scénario 8.5, il y a réellement un pic de pression estivale significativement plus fort dans le cas du scénario Tendance Haute.

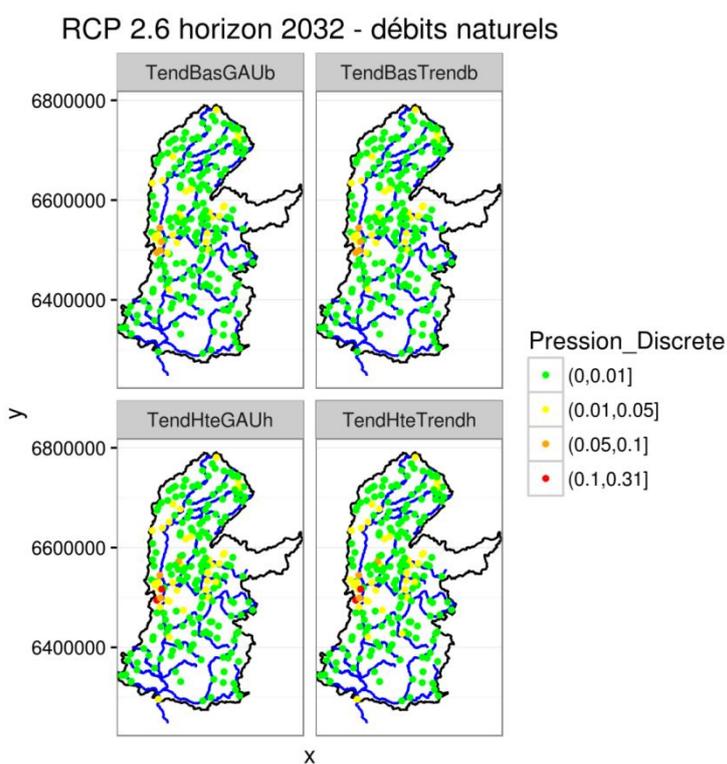


Figure 54 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource naturelle pour le scénario climatique RCP 2.6 à l'horizon 2032

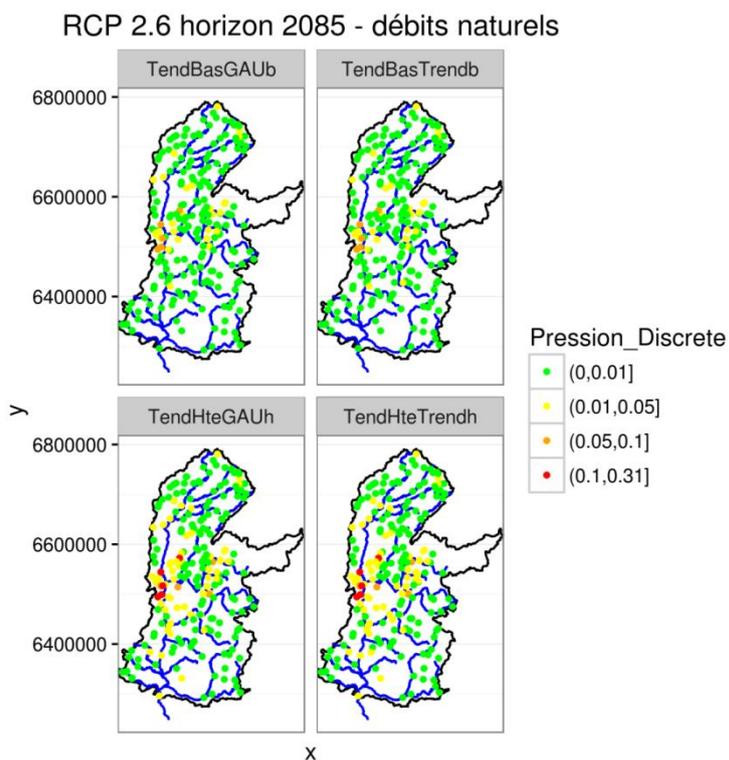


Figure 55 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource naturelle pour le scénario climatique RCP 2.6 à l'horizon 2085

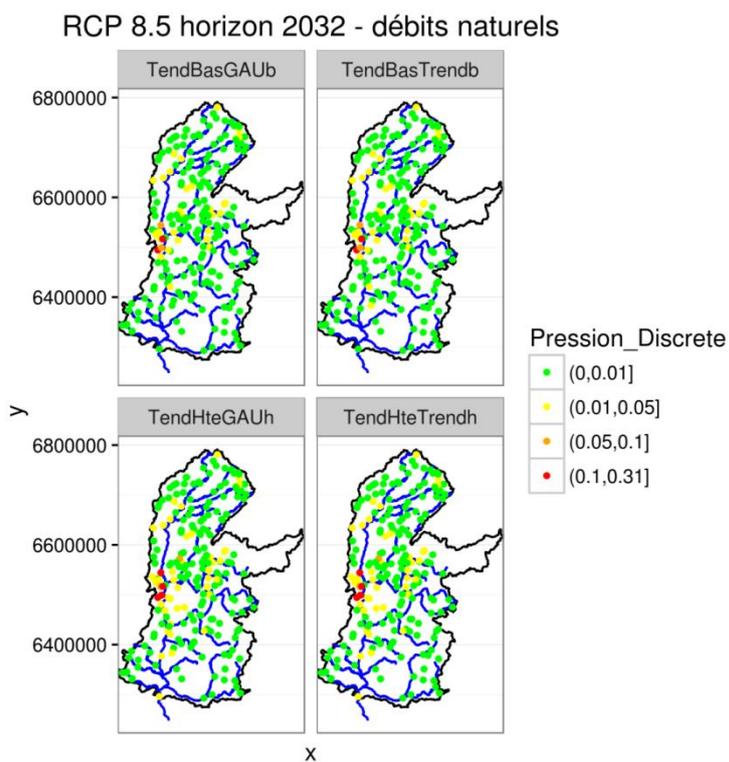


Figure 56 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource naturelle pour le scénario climatique RCP 8.5 à l'horizon 2032

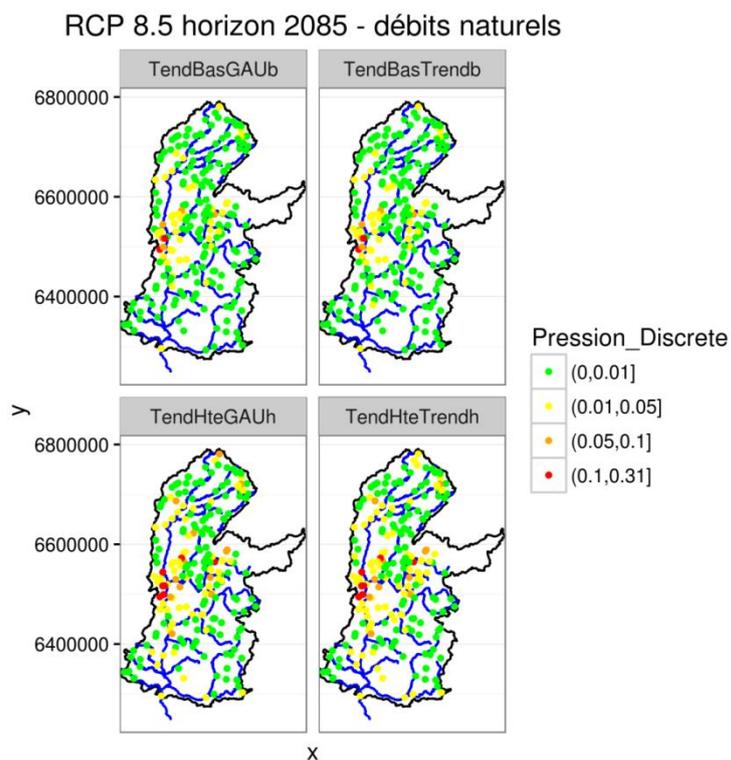


Figure 57 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource naturelle pour le scénario climatique RCP 8.5 à l'horizon 2085

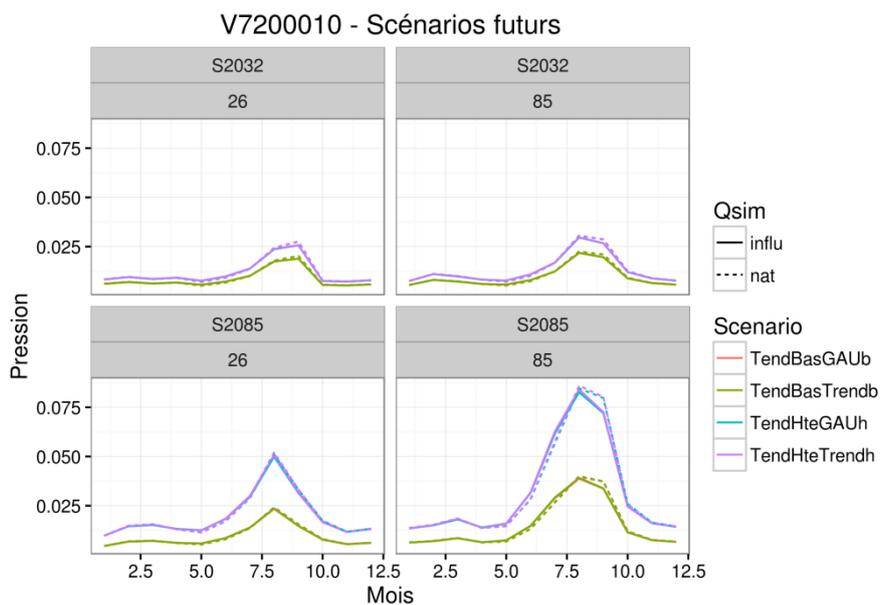


Figure 58 : détail des pressions mensuelles pour les différents scénarios climatiques et de consommation d'eau potable pour la station du Rhône à Beaucaire (exutoire).

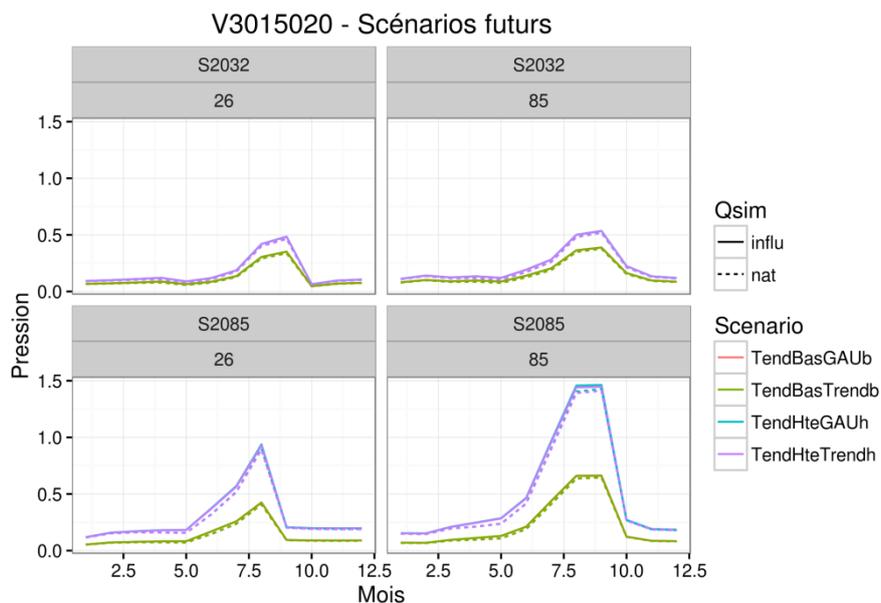


Figure 59 : détail des pressions mensuelles pour les différents scénarios climatiques et de consommation d'eau potable pour la station de l'Yzeron à Francheville.

5.4 Conclusions et perspectives

Les résultats présentés ici correspondent à quelques exemples de scénarios futurs, volontairement grossiers (sauf peut-être pour l'eau potable pour laquelle le travail de définition des scénarios futurs d'usage a été plus poussé). Notamment, le fait de n'avoir utilisé qu'une seule projection climatique présente un biais important car cela ne permet pas de prendre en compte les incertitudes sur les projections.

L'exercice présenté ici n'a donc pas valeur prédictive particulière. Un résultat néanmoins intéressant, et qui mériterait d'être confirmé ou infirmé par des études ultérieures, est qu'en matière de pression sur la ressource dans le futur, les usages et donc la gestion de l'eau semblent avoir plus de poids que l'aléa climatique lui-même. Cette question mériterait d'être approfondie avec une approche adaptée.

Par ailleurs, cet exercice de prospective permet de mettre en valeur le potentiel de l'outil J2000-Rhône pour réaliser ce type d'étude de façon intégrée et spatialisée sur l'ensemble du bassin versant.

6 Maillage du modèle : les améliorations techniques et ergonomiques

La création du maillage des HRU sur le bassin versant du Rhône est effectuée par le logiciel HRU-delin. C'est un ensemble de programmes adapté de GRASS-HRU de l'université de Jena qui a fait l'objet d'une refonte pour intégrer les évolutions nécessaires au projet. Nous détaillons ici les améliorations de HRU-delin qui ont contribué (i) à faciliter le déploiement de l'outil et limitant les pré- et post-traitements et le temps de calcul et (ii) à intégrer les implications, pour le maillage, de la représentation des usages anthropiques.

6.1 Relocalisation automatique des stations

Les couches de base pour la génération des HRUs sont les sous-bassins topographiques et les sous-bassins aux stations. Ces derniers sont calculés à partir du MNT et du réseau des stations de jaugeage. Il se peut que les stations ne se retrouvent pas sur le réseau hydrographique dérivé du Modèle Numérique de Terrain pour 2 raisons :

- c'est un réseau calculé qui peut différer du réseau réel en raison des imprécisions du MNT ou de sa résolution ;
- les données sur la position ou la surface drainée dans le fichier des stations sont erronées.

Avant de générer les sous-bassins aux stations il faut donc repositionner les stations sur le réseau. Cette opération extrêmement fastidieuse si elle est exécutée manuellement a été automatisée et intégrée à HRU-delin. Le remplacement (ou non) d'une station s'appuie sur la surface drainée. L'utilisateur peut paramétrer sa stratégie de relocalisation en fonction de sa connaissance des données, en indiquant des tolérances sur le rayon de recherche et la surface drainée. Certains cas restant indécidables par le programme, il reste une part – très réduite – de traitement manuel.

6.2 Découpage des brins aux stations

Afin d'avoir des débits simulés aux stations, les cours d'eau doivent être découpés à ces emplacements. L'automatisation de cette opération a été intégrée dans HRU-delin avant la génération de la topologie. Au final, le réseau hydrographique est segmenté en fonction des stations et des confluences. À chaque segment correspond une ligne du fichier des paramètres des cours d'eau (**reach.par**) avec ses caractéristiques : longueur, pente, rugosité et connexion.

6.3 Barrages

La prise en compte des barrages dans la modélisation induit les mêmes traitements que pour les stations : relocalisation sur le réseau et découpage des cours d'eau aux ouvrages. La solution retenue est celle d'une seule couche SIG regroupant les 2 types d'installation. C'est la solution la plus légère en termes d'adaptation du code logiciel. Pour distinguer les barrages des stations, leur identifiant est compris entre 1000 et 2000. On peut ainsi repérer leurs sous-bassins dans le fichier paramètre (colonne subbasin du fichier **hrus.par**).

6.4 Irrigation

La Surface Agricole Utile (SAU) irriguée est fournie par le Recensement Général de l'Agriculture (RGA) de 2010. Elle est connue à l'échelle cantonale alors que les HRU sont construits en fonction des caractéristiques physiques du terrain, ce qui a 2 conséquences :

1. Lorsqu'une HRU couvre plusieurs cantons, elle est rattachée au canton avec lequel elle partage la plus grande surface en commun.
2. Seules les HRUs de type agricole dont au moins 50% de leurs surfaces occupent le canton irrigué auquel elles sont rattachées sont considérées comme irriguées

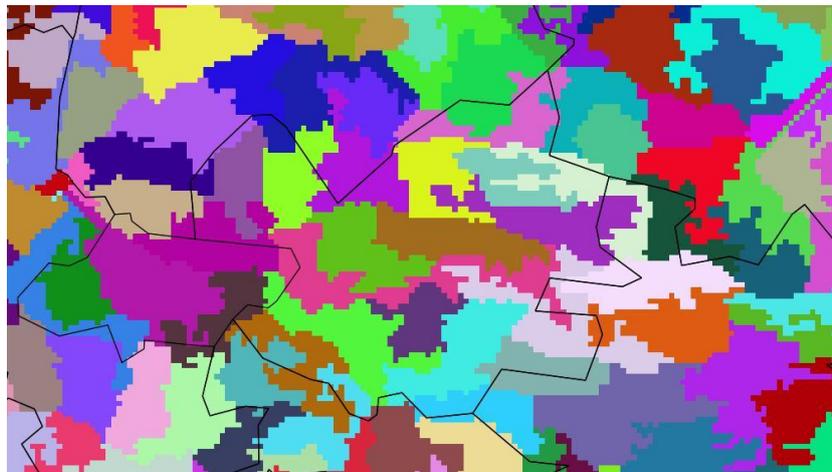


Figure 60 : Croisement entre cantons et HRUs pour l'irrigation.

L'information apparaît dans le fichier paramètre (*hrus.par*) pour le modèle J2000, sous une forme binaire : 0 pour un HRU non irrigué, 1 si le HRU est irrigué (Figure 61).

# hru,par created Mon, 14 Sep 2015, 16:18:44 by HRU-DELIN_BATCH														
ID	area	elevation	slope	aspect	x	y	watershec	subbasin	hgeoID	landuseID	soilID	to_poly	to_reach	irrigation
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
999999	9999999	10000	90	360	9999999	9999999	999999	999999	9999	9999	9999	999999	999999	1
n/a	m2	m	deg	deg	m	m	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
14	6480000	1778	26,601	73	952000	6417300	457	10	2	5	2	0	1001	0
15	8600000	2700	26,057	277	963000	6415300	450	18	2	6	3	19	0	0
17	9840000	2294	26,23	169	954100	6413700	456	10	2	5	4	14	0	1
18	5960000	2088	30,021	259	960100	6412700	450	18	2	6	3	24	0	1
19	5920000	2126	26,231	199	963900	6412900	450	18	2	6	3	20	0	0
20	8120000	2296	30,331	93	963900	6412100	450	18	2	6	3	0	1802	1

Figure 61 : Extrait du fichier paramètre *hrus.par* pour l'irrigation.

Le type d'irrigation – aspersion, goutte à goutte ou gravitaire – est pour l'instant difficile à extraire des bases de données. Deux sources sont possibles :

- à partir de la base de données « Redevances annuelles des prélèvements » de l'AERMC : le code « type d'usage » prend la valeur 81 pour irrigation gravitaire et 82 pour non gravitaire. Cette donnée est liée à un point de prélèvement géolocalisé. Le croisement avec le RGA a montré que les informations sont globalement cohérentes,
- à partir du RGA : en déterminant pour chaque culture un type d'irrigation (grande culture = aspersion) et en assignant au HRU le type d'irrigation de sa culture principale.

C'est cette deuxième solution qui a été retenue.

6.5 Adaptations techniques

Sur le plan informatique, le code a été optimisé autant que possible dans l'étape de construction des HRUs, ce qui a permis de réduire le temps d'exécution du process d'environ 1/3 pour le maillage sur tout le bassin du Rhône. La création de la topologie nécessite en revanche une réécriture du code pour réduire le temps de traitement qui reste très long (~ 40 heures). Tous les modules ont été convertis en PYTHON 3.

Le SIG GRASS utilisé pour les manipulations des couches géographiques et des calculs associés a fait l'objet d'évolutions majeures dans sa version 7. Aujourd'hui il n'y a pas encore de package stable PYTHON-GRASS7. Les modifications à apporter dans HRU-delin pour une prochaine mise à niveau ont été recensées et seront à appliquer prochainement.

6.6 Perspectives

6.6.1 Délimitation des HRUs

L'algorithme actuel de construction des HRUs est couteux en temps et donne des résultats peu satisfaisants sur certaines zones où la variabilité des caractéristiques physiques est importante, particulièrement en terrain de montagne. Une approche basée sur une addition des couches et une classification de la couche résultante pourrait être étudiée car il existe aujourd'hui des solutions open source à ce type de problématique.

6.6.2 Etape de génération de la topologie

1. La génération de la topologie (connexions entre les HRUs) est fiable mais son implémentation pourrait évoluer pour réduire un temps de traitement très long : 40 h pour la topologie du bassin du Rhône.
2. Après la construction de la topologie, un module détecte les éventuels cycles qui peuvent s'y trouver. On entend par cycle un enchaînement de connexions entre HRU qui forme une boucle (Figure 62). Il s'agit d'un module développé en java par l'université de Jena et dont nous n'avons pas le code source.



Figure 62 : Schéma d'un cycle.

Une réécriture de ce module (indépendant du point 1) permettrait :

- d'avoir la maîtrise du code
- de s'affranchir de l'environnement java
- de corriger un bug ancien : pour éliminer un cycle l'une des connexions est redirigée vers le cours d'eau - auquel il n'est peut-être pas géographiquement connecté - du sous-bassin topographique

6.6.3 Ergonomie

Le développement d'une interface graphique a été mis à l'étude mais pas n'a pas été mené à son terme faute de temps.

7 Valorisation de données hydrologiques historiques

7.1 Enjeux et méthodes

Aujourd'hui, la connaissance des débits en France s'appuie principalement sur le réseau hydrométrique qui alimente la banque de données HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>). La majorité des séries hydrologiques bancarisées (près de 85%) débutent dans les années 1960 et les débits mesurés sont pour la plupart influencés par des actions humaines (ouvrage de stockage, prélèvement, transfert, rejet...). Les modèles hydrologiques ont besoin de données représentatives de la ressource naturelle et une manière de répondre à ces besoins est d'exhumer des données anciennes mesurées dans un contexte supposé moins « artificialisé ».

Certaines d'entre elles sont renseignées dans des rapports techniques des services hydrométriques ou des retours d'expérience post-événements. Les Annuaire Hydrologiques de la Société Hydrotechnique de France font partie de ces sources archivées, peu accessibles par la communauté hydrologique. Edités de 1939 à 1969 par la Société Hydrotechnique de France (SHF), ils fournissent entre autres une synthèse de l'année écoulée au travers notamment de tableaux de débits journaliers et d'hydrographes annuels observés ou reconstitués sur un jeu de stations hydrométriques en fonctionnement. Ces annuaires n'étaient pas jusqu'à ce jour sur support informatique. Dans le cadre du projet, Irstea (centre Lyon-Villeurbanne) et la SHF ont réalisé la numérisation de leur contenu, pour porter ces documents à la connaissance de la communauté hydrologique, et en extraire les séries numériques qu'ils contiennent.

Les annuaires de 1939 à 1969 ont donc été numérisés et sont désormais accessibles (http://www.shf-hydro.org/annuaires_hydrologiques-73.html). Outre les données pour chaque année, des contributions libres de différents auteurs apportent des éléments d'expertise utile pour les hydrologues. Les séries ont été extraites via un procédé d'OCR (pour plus de détail, consulter (Le Gros et *al.*, 2015)). Cette opération a requis une phase de contrôle longue et fastidieuse et nous avons pu exhumer un ensemble de 56 stations vraisemblablement inédites ou apportant des compléments possibles de chroniques pour des stations partiellement bancarisées en France (un équivalent de près de 600 années stations), soit près de 50% des 120 stations décrites dans les annuaires. Parmi les 120 stations, trois d'entre elles sont implantées en Suisse (Rhin à Rheinfelden, Doubs à Ocourt, Arve au Pont de Carouge). Les données associées sont mise à disposition pour la période 1993-2015 sur le site de l'Office fédéral de l'environnement OFEV³⁰. Les données du Rhône à Penay et à Chancy (Aux Ripes) sont bancarisées en France et en Suisse.

La Figure 63 fait apparaître l'ensemble des stations pour lesquelles les débits sont disponibles dans les annuaires. Sans surprise elles sont situées majoritairement dans les secteurs à enjeu énergétique. Finalement, 15 points de mesure semblent correspondre à des stations inédites, non présentes dans la banque HYDRO, et 41 séries portent des données complémentaires à des stations de la banque HYDRO (Figure 63). Un total de près de 600 années stations inédites ont été exhumées (209 sont associées aux stations inédites). Cinq stations « inédites » ont été identifiées dans le bassin du Rhône (Tableau 19). La qualité des données est inconnue (absence de qualification par le gestionnaire de la station). Dans la partie suivante nous confrontons les données aux stations inédites du bassin du Rhône aux résultats de la modélisation hydrologique à ces points.

³⁰ <http://www.hydrodaten.admin.ch/fr>

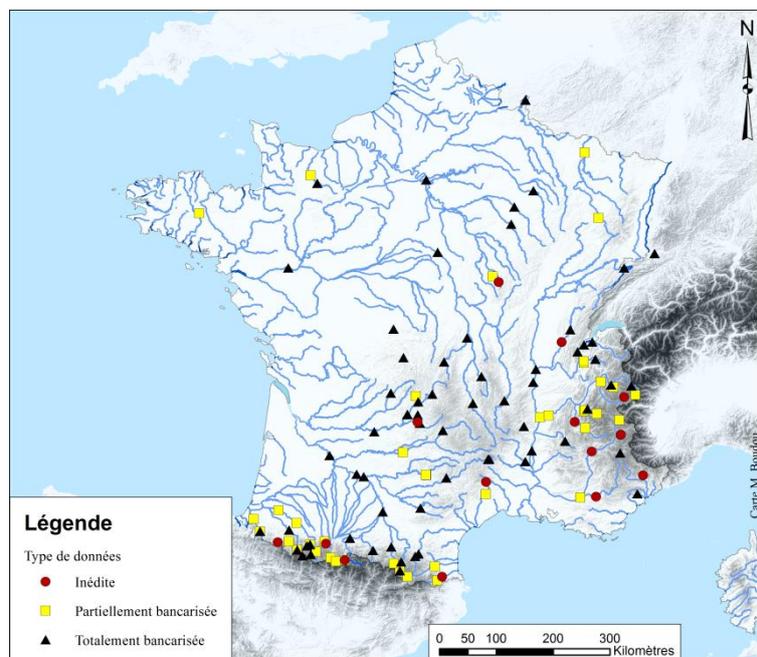


Figure 63 : Carte des stations présentées dans les annuaires de la SHF selon leur statut vis-à-vis des stations de la banque HYDRO.

Tableau 19 : Descriptif des stations inédites.

N° (jusqu'en 1956)	N° (à partir de 1957)	Nom (annuaire)	Surface (km ²)	Date de mise en service	Chronique disponible
44	44	L'AIN A CIZE-BOLOZON	2560	1923	1939-1969
56		L'ARC A TERMIGNON	359	1924	1939
58		LE DRAC A AVIGNONET	1968/2006.7	1904	1939-1954
63	63	LA DURANCE A VENTAVON	4215	1912	1939-1969
65		LE GUIL A PONT-LA-PIERRE	475	1914	1939-1948 ; 1952
65bis	65-1	LE GUIL A LA MAISON DU ROY	580		1953-1958 ; 1960-1969
67	67	LE VERDON A QUINSON	1661	1906	1939-1969

7.2 Valorisation pour la modélisation hydrologique

Les résultats des simulations obtenues en deux stations « inédites » sont présentés en Figure 64. Ils reflètent les biais déjà constatés sur des précédentes stations (sous estimation des précipitations SAFRAN sur les reliefs ; problème de routage). Il faut noter ici que la comparaison n'est pas parfaite : les données anciennes devraient être réajustées climatiquement à la période de simulation 1987-2012 pour s'affranchir des spécificités climatiques des données anciennes. Néanmoins, les données anciennes utilisées telles quelles permettent de vérifier la dynamique et les ordres de grandeurs reconstitués.

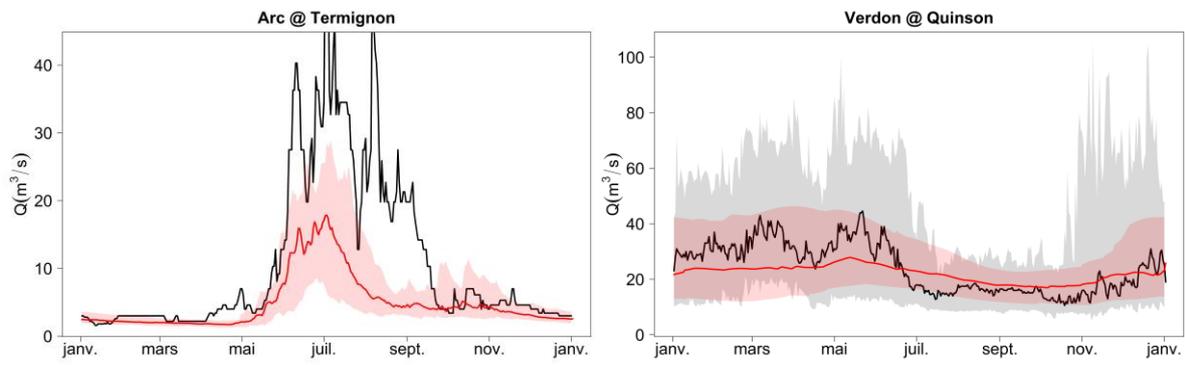


Figure 64 : Médiane et quantiles 10% et 90% des débits journaliers (en rouge : simulation ; en noir : données anciennes)

8 Vers une modélisation intégrée pluie et hydrologie

Avant d'engager des exercices de modélisations sous changement climatique, nous avons testé la robustesse de J2000-Rhône au climat actuel. Cette opération est désormais de pratique courante dans les études de changement climatique : on teste la capacité de modèles hydrologiques alimentés par des sorties des modèles climatiques désagrégés sur le XXe siècle à restituer les principales caractéristiques du régime hydrologique. Ici, ce travail s'est appuyé ici sur l'outil de simulation spatio-temporelle de pluies baptisé SAMPO (Leblois et Creutin, 2013 ; Pons, 2016) développé au sein de l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique d'Irstea (centre Lyon-Villeurbanne). Les champs de pluies obtenus résultent d'une simulation libre, reproduisant le climat présent et sa variabilité sans référence à la réalisation particulière que représente le détail de la réalité historique.

8.1 Principe de SAMPO

L'approche utilise les outils de la géostatistique, branche des statistiques que l'on peut caractériser comme s'intéressant aux données que l'on sait organisées dans l'espace et dans le temps (corrélées entre elles du fait de leur plus ou moins grande proximité dans l'espace et dans le temps). Outre les distributions ponctuelles, comme dans les statistiques usuelles (moyenne, écart-type, variance), on y traite de covariances ou de variogrammes spatiaux et temporels, outils usuels de description de la structure de fonctions aléatoires se déployant dans l'espace et dans le temps – ici, la pluie.

La simulation de pluie adoptée dans SAMPO requiert une analyse préalable des données de pluies locales, pour en déduire un modèle de nature probabiliste. Les données de base sont des données pluviométriques historiques, localisées en des points connus. Toutes les séries pluviométriques sont considérées sur une période commune – en prenant soin de gérer les problèmes de lacune - et analysées sur un pas de temps commun. Dans le cas du projet MDR, la base de données exploitée est SAFRAN, dans sa présentation standard à maille de 8 km et à la résolution horaire (même si à une échelle inférieure infra-journalière, la confiance dans les valeurs est réduite). Le travail est effectué en France entière, même si seuls les résultats relatifs au Rhône au pas de temps journalier seront uniquement exploités.

La France et même le bassin du Rhône sont de fait des entités climatiques hétérogènes. L'hétérogénéité étant plus délicate à représenter, il a été décidé de procéder à des simulations sur des territoires géographiques limités supposés homogènes, puis de recomposer les champs en prenant soin des continuités/discontinuités existantes aux frontières.

L'étape première consiste à fragmenter le domaine simulé en sous-domaines qui formeront une zone de simulation élémentaire. Les options envisageables pour réaliser le découpage sont l'utilisation :

- d'un découpage ad-hoc, basé sur la variabilité observée des pluies ;
- d'un découpage prescrit, de nature hydrologique ; exemple : partition du domaine d'étude en sous-bassins, à un niveau de détail adapté ; en principe moins pertinent que le précédent pour ce qui est de décrire les pluies, ce choix pourrait se révéler le plus adapté pour les applications hydrologiques ;
- d'un découpage prescrit, de nature géométrique (maillage) ou administrative (départements) ; ce choix peut être imposé par le contexte partenarial mais scientifiquement discutable.

Dans tous les cas, les zones doivent contenir chacune suffisamment de mailles SAFRAN pour qu'il soit possible d'y bâtir un modèle spatialisé des pluies.

Sur chaque zone sous-domaine, la stratégie de simulation s'appuie une représentation simplifiée, et peut-être discutable, selon laquelle :

1. la pluie se déploie dans l'espace et dans le temps selon un type particulier ;
2. elle se cumule au sol au cours du temps au rythme de types de pluie qui se succèdent ;
3. elle est souvent véhiculée par le vent (advectée) ;
4. elle est intermittente ;
5. elle présente parfois des intensités très fortes.

Plus précisément, et afin de parvenir à un schéma suffisamment précis pour que les formalismes mathématiques puissent s'exprimer, le jeu d'hypothèses formant la base du paramétrage est le suivant :

1. homogénéité spatio-temporelle du processus, au moins temporaire. On entend par là qu'au-dessus de la zone d'étude fixée, à tout instant ne se présente qu'un type de pluie ;
2. dynamique temporelle. À un type de pluie en succèdera au bout d'un certain temps un autre, l'alternance entre les différents types de pluie devra donc être décrite. Les paramètres de cette alternance porteront la variabilité saisonnière ; les paramètres des types de pluie, eux, sont constants quelle que soit la saison.
3. advection. Les nuages générateurs des pluies sont soumis à une advection par le vent, qui se superpose à leur variabilité temporelle propre. L'effet de l'advection sera d'étendre les pluies générées sur de plus vastes territoires, tout en diminuant la valeur des cumuls locaux les plus forts.
4. intermittence. Au sein d'un même type de pluie se présentent des zones pluvieuses et non pluvieuses, qui se combinent pour former un composite. La représentation des pluies nulles et des pluies non-nulles est réputée indépendante.
5. intensité. Il est d'évidence empirique que les pluies locales présentent occasionnellement des valeurs très fortes ; ceci oriente vers des distributions des pluies non nulles non gaussiennes et asymétriques.

Ces hypothèses permettent une description formalisée et opératoire des pluies, insérée dans SAMPO (Leblois et Creutin, 2013). Un des préambules est d'établir les types de pluie (cf. 1.). Dans SAMPO, ils sont issus d'une classification de Kohonen des champs de pluie, qui répartit les champs dans un espace de classes ordonné, en privilégiant une forme de continuité entre classes voisines. Les pluies étant regroupées par types, il convient ensuite de décrire statistiquement chaque type (cf. 5. calage de distributions ponctuelles et fonctions de structure sur les données, non sans expertise et savoir-faire). Pour décrire le séquençement entre les différents types de pluie (cf. 2.), on a recours à une chaîne de Markov, outil standard d'analyse de successions de types qualitatifs.

La Figure 65 montre l'allure des types de pluies identifiés sur le département du Rhône. Un champ horaire de chaque type de pluie, rangés de 1 à 25 dans l'ordre usuel de lecture. On discerne clairement des types plus couvrants que d'autre. Le niveau de gris varie par vignette. Dans le cas du département du Rhône, pour une simulation d'une année (Figure 66), on notera que les intensités horaires ne dépassent guère 2 mm/h, ceci est cohérent avec les intensités présentes dans SAFRAN, mais semblent trop faibles par rapport à une connaissance de terrain.

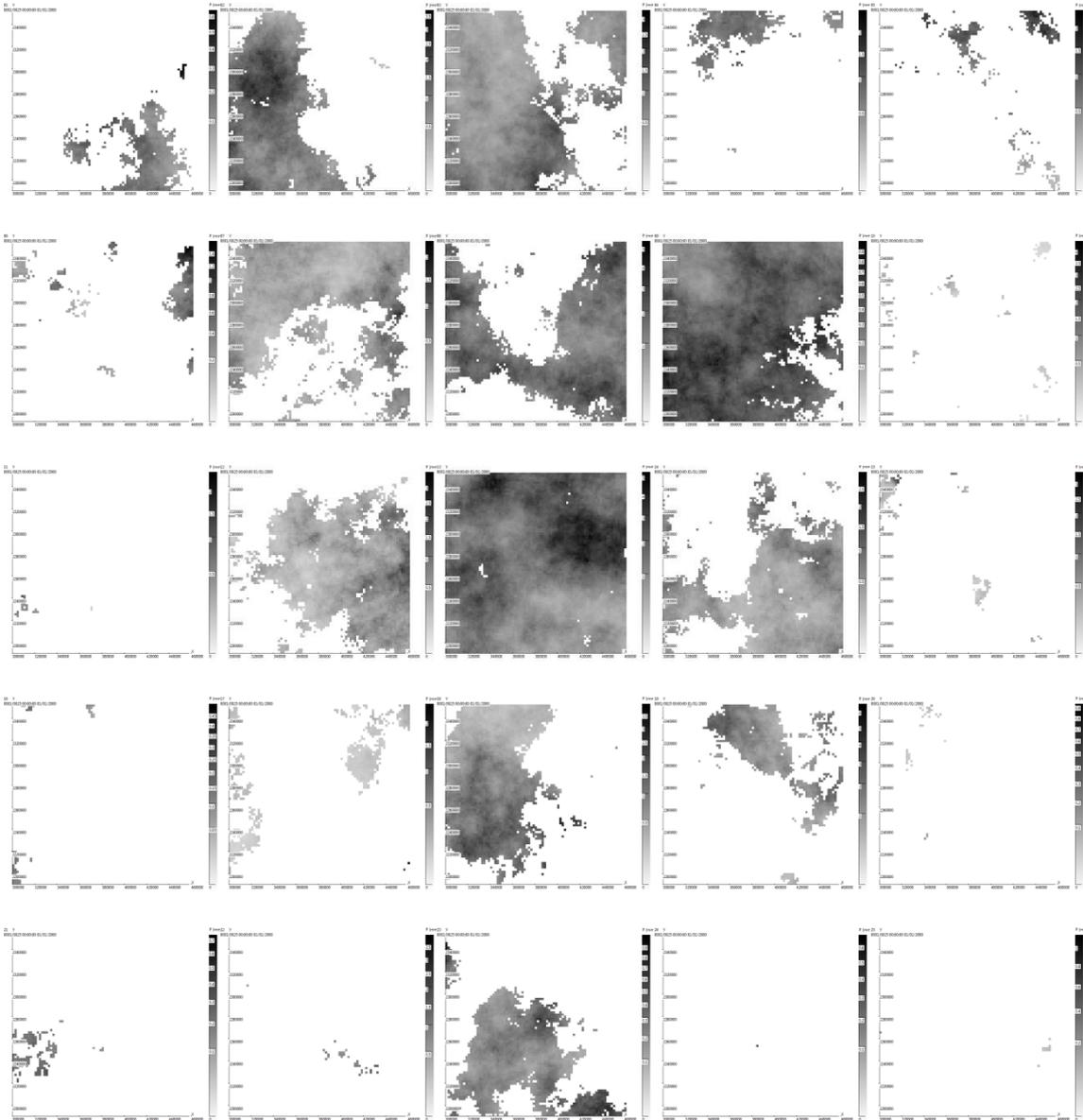


Figure 65 : Variété des types de pluie simulés (exemple du département du Rhône).

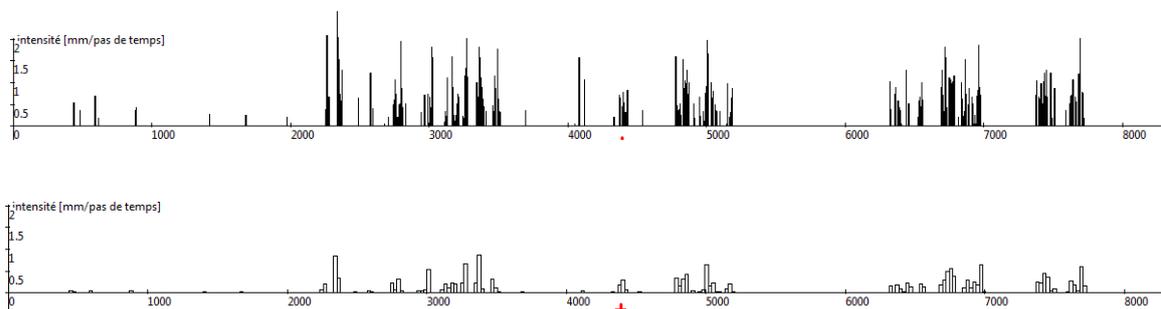


Figure 66 : Une année de pluies simulées en un point du département du Rhône ; agrégations horaires et journalières (intensité en mm/h).

La variabilité des pluies simulées à l'intérieur d'une zone homogène de simulation est celle du modèle établi pour cette zone ; la variabilité des pluies à l'échelle de l'ensemble du domaine étudié dépendra aussi, et éventuellement de façon prépondérante, de la qualité de la coordination établie entre les zones.

La coordination entre les zones doit résoudre une certaine contradiction :

1. préserver autant que possible chaque simulation locale,
2. assurer une bonne coordination entre les zones de façon que les événements étendus soient effectivement présents dans la simulation (pluies très fortes intéressant une partie significative du territoire ; périodes de temps sec généralisées et longues).

L'hypothèse est faite que la coordination peut être réalisée non pas au niveau des valeurs de pluies simulées, problème difficile, mais plus simplement en liant entre elles les séquences pilotant les types de pluie. Ce choix a l'immense avantage de bien circonscrire la question scientifique, les propositions de réponse et l'analyse de leur performance en un lieu précis de la modélisation. Ce choix est aussi « économique », car tout le matériau définissant les modèles de pluie par zone individuelle est respecté et directement réutilisable. Une fois les types de pluie fixés, la simulation se poursuit indépendamment dans chaque zone.

Le choix de l'ordre des regroupements des zones est basé sur un critère de proximité entre leur classement (mesure d'information mutuelle entre les classements des zones considérées deux à deux). En Figure 67 est présenté le regroupement retenu dans le cas des départements, les segments les moins épais identifient les premiers regroupements :

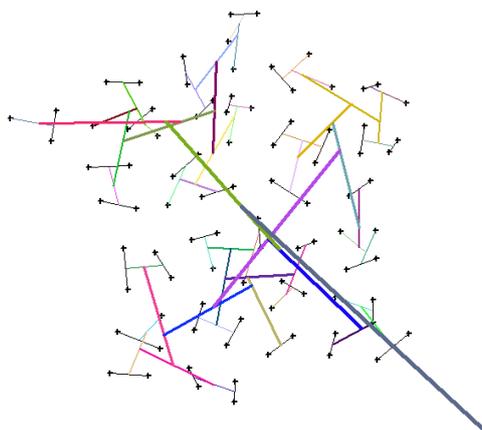


Figure 67 : Coordination des départements pour une simulation France entière ; aspect géographique.

Si on considère le calendrier historique des types de pluies pour deux zones que l'on a décidé de fusionner, on constatera que certains motifs apparaissent plus fréquemment que d'autres ; par exemple, dans l'extrait fictif suivant le motif « type A en zone#1 et type C en zone #2 » domine :

Pas de temps	Zone #1	Zone #2
1	A	C
2	A	C
3	A	E
4	A	C
5	A	C
6	D	C

Ce motif fréquent doit donc être préservé prioritairement par la coordination (« prioritairement », car on ne pourra pas tout préserver). On donne donc à chaque zone locale la possibilité de regrouper les « demandes » temporellement proches portant sur un même type de pluie afin de respecter la durée moyenne de chaque type de pluie dans son exécution. Ce principe d'autonomie d'exécution a été développé ici de manière sommaire.

L'algorithme idéal reste à établir mathématiquement, analyser et optimiser dans le cadre d'une thèse en cours (S. Chen, 2014-2017).

8.2 Résultats

La simulation de pluie obtenue est une simulation libre (c'est-à-dire sans volonté de représenter les séquences historiques observées mais reproduisant le climat présent et sa variabilité). Une simulation libre a été proposée au modèle J2000-Rhône afin d'examiner les débits qui en résultent, et de vérifier si on retrouverait les régimes hydrologiques tels que reconstitués par le modèle.

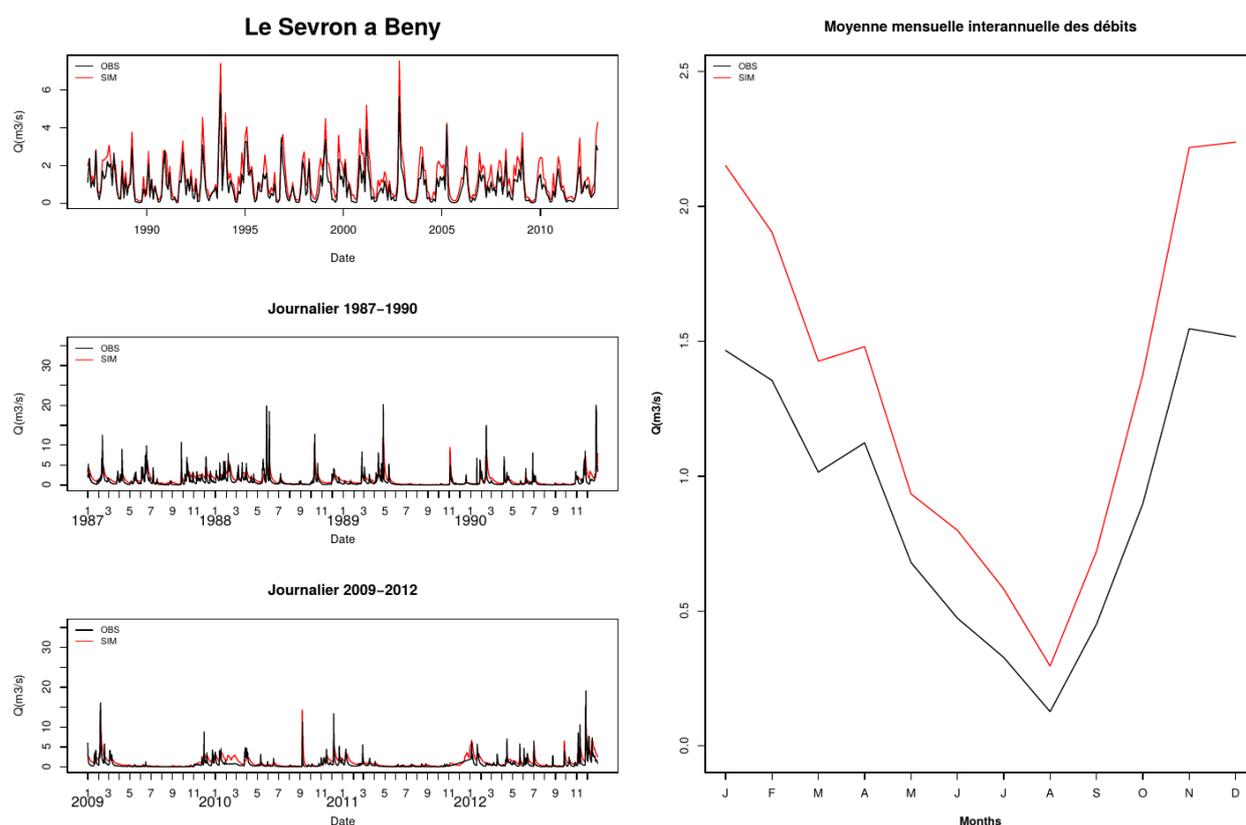


Figure 68 : Exemple de modélisation des débits en une station, les pluies historiques [SAFRAN] étant traitées par J2000-Rhône ; Les débits reconstitués sont en rouge, les débits observés en noir ; débits journaliers à gauche, éléments de régime hydrologique à droite.

En Figure 68, sont présentés les résultats de simulations obtenus avec SAFRAN : les débits produits s'écartent légèrement des données observées quel que soit le pas de temps. En Figure 69, sont présentés les résultats obtenus avec J2000-Rhône alimentés par les sorties de SAMPO. Les débits calendaires simulés (bleu) ne correspondent plus du tout aux débits historiques (noir) (colonne de gauche) ; cependant leur « allure » (leur distribution et leur variabilité) est la même ; le régime hydrologique (colonne de droite) est raisonnablement reconstitué. L'ordre de grandeur des débits, leur régime saisonnier et l'allure des chroniques journalières sont tout à fait réalistes dans de nombreux cas. On est donc rassuré sur la capacité du modèle à restituer le comportement hydrologique.

Il est difficile d'affirmer si les écarts entre régimes observé, reconstitué et simulé sont significatifs, ni d'identifier quelle est la part de l'écart entre régime reconstitué et simulé due à une mauvaise simulation des pluies (aspect/paramètre de SAMPO à rediscuter/réexaminer pour obtenir une meilleure utilisation en hydrologie).

Ce travail exploratoire montre la bonne cohérence des représentations engagées ; il rassure quant à la robustesse du paramétrage de J2000-Rhône (ce paramétrage n'est pas « tenu » par certains épisodes observés puisque leur absence dans la simulation de SAMPO n'engendre pas un régime hydrologique éloigné des observations).

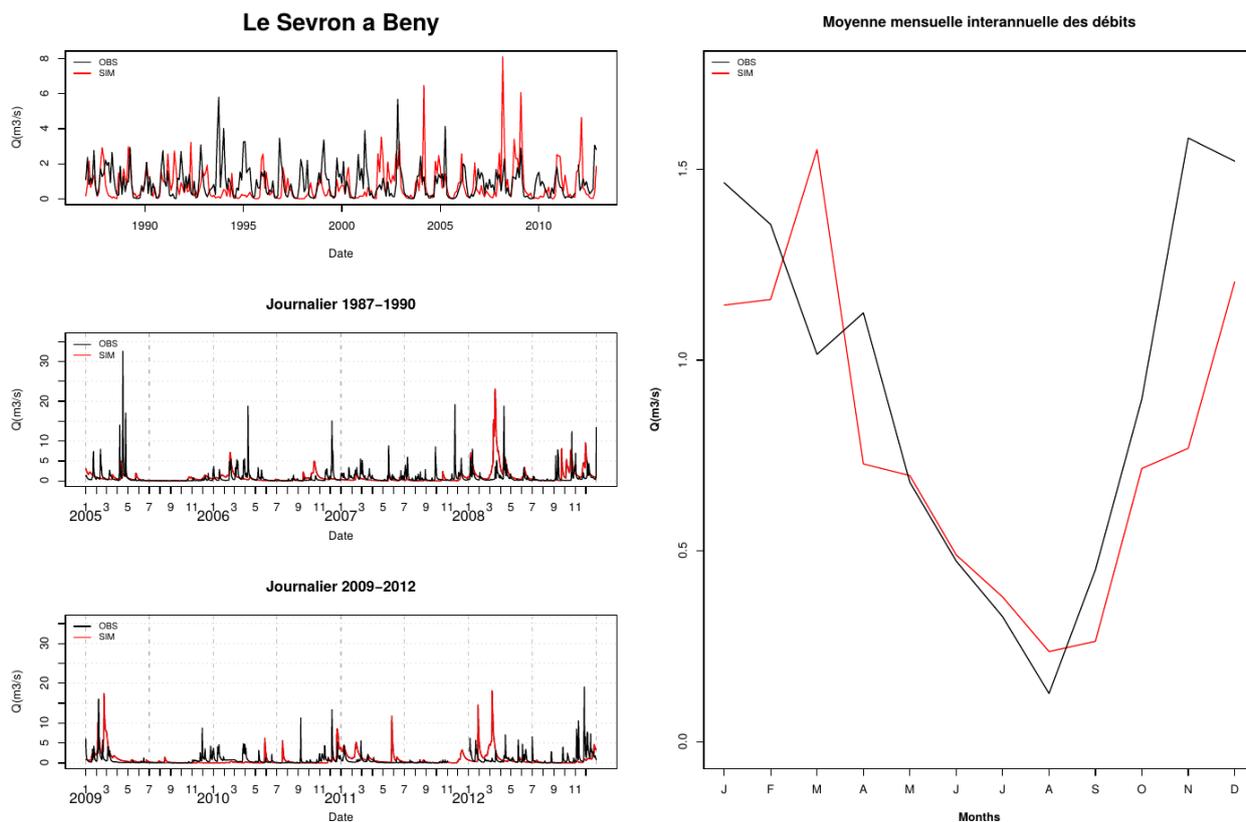


Figure 69 : Exemple de simulation avec les pluies simulées traitées par J2000-Rhône.

9 Conclusion et Perspectives

À l'issue des trois ans et demi du projet MDR, nous avons donc pu construire l'outil de simulation hydrologique spatialisée J2000-Rhône et développer des outils de support nécessaires à sa mise en œuvre (hru-delin), et déployer l'ensemble sur tout le bassin versant du Rhône. L'année 2016 a permis de finaliser le développement du module d'irrigation, de travailler sur le modèle de consommation d'eau potable, et de réaliser de premiers exercices de prospective future. Les résultats montrent que les modules développés permettent de reproduire correctement les ordres de grandeur observés. A ce stade, les exercices de prospective sont plutôt une démonstration de faisabilité et de l'intérêt de notre approche. J2000-Rhône se révèle être un outil plutôt intéressant pour comparer in fine différentes solutions d'adaptation.

Les perspectives sont bien sûr nombreuses. Tout d'abord, le modèle hydrologique en lui-même est encore largement perfectible. Nous visons notamment à atteindre une meilleure robustesse et justification scientifique de la paramétrisation. Ce sera l'objet d'une thèse qui démarrera en janvier 2017 et s'attachera à développer une méthodologie de diagnostic s'appuyant sur des signatures hydrologiques, et qui sera en premier lieu appliquée au modèle J2000-Rhône. Ce travail pourra également être complété par un projet commun avec le BRGM en cours de maturation et qui se devrait plus précisément se focaliser sur le compartiment souterrain et la recharge. Nous avons également identifié des faiblesses dans certains modules ou compartiments (routage dans le réseau hydrographique, neige), qui devraient être améliorés dans un futur proche.

En ce qui concerne la modélisation des usages, la priorité sera l'intégration dans J2000-Rhône d'un véritable module de prélèvement pour l'eau potable, pour lequel on se propose de reprendre le schéma déjà utilisé pour l'impact des retenues et dérivations. Des améliorations doivent également être apportées aux autres modules d'usage, notamment pour permettre une localisation des prélèvements décalée par rapport à la localisation des HRUs concernées (irrigation, eau potable), même si cela nécessitera de disposer de données supplémentaires. Enfin, on peut envisager peu à peu d'aller vers des représentations plus intégrées de la demande en eau pour les différents usages, en intégrant des comportements d'acteurs et des variables économiques. C'est l'objet d'un projet et d'une thèse actuellement en cours de montage entre Irstea Lyon et Irstea Montpellier.

Enfin, on pourra étoffer les exercices de prospective en construisant des scénarios plus nombreux et plus réalistes, ce qui devrait également nous permettre d'aborder la problématique des incertitudes sur les projections futures.

N'oublions pas que l'outil J2000-Rhône est open-source et sera mis à la disposition des gestionnaires ou de tout autre acteur du domaine de l'eau qui pourrait y trouver une utilité.

10 Références

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evaporation - Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and drainage paper 56, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Bahl, N., 2016. Dérivation de paramètres caractéristiques du sol pour la modélisation hydrologique sur la région Rhône-Alpes. Analyse de sensibilité de la modélisation à la description du sol sur le bassin de l'Ardèche, ENGEES, Strasbourg, 86 pp.
- Blanpain, N., Chardon, O., 2010. Projections de population 2007-2060 pour la France métropolitaine : méthode et principaux résultats. INSEE - Direction des Statistiques Démographiques et Sociales, F1008, 137 p.
- Bonnet S., 2012. Cartographie des zones potentielles de production ou d'accumulation du ruissellement de surface en région cévenole. Master 2 « Eau et ressources », Université de Montpellier 2, 98 pp.
- Braud, I., 2000. SiSPAT User's Manual Version 3.0, Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble (France), 106 pages.
- Braud, I., 2002. SiSPAT User's Manual Update, Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble (France), 13 pages.
- Braud, I., Tilmant, F., Samie, R., Le Goff, I., 2013. Assessment of the SiSPAT SVAT model for irrigation estimation in south-east France. In : International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes, 19-20 juin 2013, Naples, Italie, Procedia Environmental Sciences, 19, 747-756. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.083.
- BRLi, 2014. Etude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de « basses eaux » phase 1- caractérisation du territoire du fleuve Rhône et bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles. Document B-Rapport thématique sur l'irrigation dans le bassin du Rhône. Rapport d'étude, octobre 2014, 139 pages.
- Chandesris, A., Pella, H., 2006. Constitution d'une base d'information spatialisée « barrages, retenues et plans d'eau » au niveau national en vue d'évaluer les modifications hydro-morphologiques In: Appui scientifique à la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau. Lyon, Cemagref, BEA/LHQ, 11 page.
- Chérel, J., 2010. Les besoins agricoles des cultures en zone méditerranéenne, SupAgro Montpellier, 55 p
- Chopart, J.L., Mezino, M., Le Mezo, L., Fusillier, J.L., 2007. FIVE-CORE: a simple model for farm irrigation volume estimates according to constraints and requirements. Application to sugarcane in La Réunion (France). Proceedings of the International Sugar Cane Technology 26, 490-493.
- Cipriani, T., Sauquet, E., 2014. Altération des étiages et du régime hydrologique des cours d'eaux français par des ouvrages hydrauliques. Rapport d'étude, Irstea, Onema, décembre 2014, 199 pages.
- Gottardi, F., 2009. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG).
- Gras, D., Vallès, V., 2016. Une croissance démographique soutenue en région Auvergne - Rhône-Alpes. 1, 4 p.

Habets F., Etchevers, P., Golaz, C., Leblois, E., Ledoux E., Martin, E., Noilhan, J., Ottlé, C., 1999. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 104, D24, 31, 145-31,172, DOI: 10.1029/1999JD901008.

Khalfaoui, A., 2015. Le Bassin du Rhône face aux changements climatiques et des usages de l'eau . Rapport de stage Polytech'Nice Sophia-Antipolis, Irstea, 46 pages

Krause, P., 2002. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model, *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, 663-673.

Krause, P., *et al.*, 2006, Multiscale investigations in a mesoscale catchment – hydrological modelling in the Gera catchment, *Adv. Geosci.*, 9, 53–61.

Krause, P., Hanisch, S., 2009. Simulation and analysis of the impact of projected climate change on the spatially distributed waterbalance in Thuringia, Germany, *Adv. Geosci.*, 21, 33–48.

Le Gros, C., Sauquet, E., Lang, M., Achard, A.-L., Leblois, E., Bitton, B., 2015. Les Annuaire Hydrologiques de la Société Hydrotechnique De France : Une source d'information patrimoniale pour la connaissance de l'hydrologie en France. *La Houille Blanche*, 4, 66-77 doi: 10.1051/lhb/20150048.

Leblois E., 2002. Evaluation of the possible impacts of climatic change by distributed models (Gewex-Rhône et Gicc-Rhône projects), *La Houille Blanche*, 8, 78– 83.

Leblois, E., Creutin, J.D., 2013. Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field: Adaptation of the turning band method, *Water Resources Research*, 49, 3375–3387, doi:10.1002/wrcr.20190.

Milano, M., Reynard, E., Köplin, N., & Weingartner, R., 2015. Climatic and anthropogenic changes in Western Switzerland: Impacts on water stress. *Science of the Total Environment*, 536, 12-24.

Pons, M., 2016. Simulation de pluie spatio-temporelle et utilité pour l'ingénierie. Rapport de stage ENTPE, Irstea, 89 pages.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E.B., Ward, T.J. eds. (Ed.), *Watershed Management in the eighties*. ASCE, Denver, April 30-May 1, 293-299.

Sauquet E., Dupeyrat A., Hendrickx F., Perrin C., Samie R., Vidal J.-P., 2010. Imagine2030 – Climat et aménagement de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030? Programme RDT, volet 2, Rapport de fin de contrat, Cemagref, 2010 ;149 pages, <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00028876>.

Sauquet, E., *et al.*, 2015. Projet R²D² 2050 - Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050, MEDDE, Rapport final, convention 10-GCMOT-GICC-3-CVS-102, 2015, <http://cemadoc.irstea.fr/cemoa/PUB00044634>.

Tilmant, F., Braud, I., 2012. Analyse de la base de données sol Référentiel Régional Pédologique PACA. Les différentes étapes réalisées. Note de travail du projet R²D² 2050, Irstea, Mars 2012, 6 pages.

Tilmant, F., Cipriani, T., Le Gros, C., Barachet, C., Branger, F., Sauquet, E., Braud, I., Leblois, E., Gouttevin, I. , 2014. Modélisation Hydrologique Distribuée du Rhône : rapport d'avancement année 2013, Irstea Lyon, 2014.

Vannier, O., *et al.*, 2013. Regional estimation of catchment-scale soil properties by means of streamflow recession analysis for use in distributed hydrological models, *Hydrological Processes*, doi 10.1002/hyp.10101.

Vidal, J-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30, 11, 1627–1644.

11 Annexes

11.1 Rapports et documents rédigés dans le cadre du projet MDR

Rapports d'étude

Branger, F., Gouttevin, I., Tilmant, F., Cipriani, T., Barachet, C., Montginoul, M., Le Gros, C., Sauquet, E., Braud, I., Leblois, E., 2016. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône. Rapport de fin de projet, Irstea, novembre 2016, 110 pages.

Cipriani, T., Sauquet, E., 2014. Altération des étiages et du régime hydrologique des cours d'eaux français par des ouvrages hydrauliques. Rapport d'étude, Irstea, Onema, décembre 2014, 199 pages.

Cipriani, T.; Tilmant, F.; Le Gros, C.; Barachet, C.; Branger, F.; Sauquet, E.; Braud, I.; Leblois, E. & Gouttevin, I. (2015), 'Modélisation hydrologique distribuée du Rhône - rapport d'avancement année 2014', Technical report, Irstea.

Le Gros, C. ; Sauquet, E. ; Leblois, E. ; Achard, A.L., 2015. Recueil des données des annuaires hydrologiques 1939-1969 de la Société Hydrotechnique de France - Contribution au projet « Modélisation hydrologique distribuée du Rhône », Irstea

Tilmant, F., Cipriani, T., Le Gros, C., Barachet, C., Branger, F., Sauquet, E., Braud, I., Leblois, E., Gouttevin, I. , 2014. Modélisation Hydrologique Distribuée du Rhône : rapport d'avancement année 2013, Irstea Lyon.

Tilmant, F., Gouttevin, I., Barachet, C., Montginoul, M., Branger, F., Leblois, E., Sauquet, E., Braud, I., Le Gros, C. , 2015. Modélisation Hydrologique Distribuée du Rhône : rapport d'avancement année 2015, Irstea Lyon, 2015.

Thèses et stages

Adamovic, M. (2014), 'Development of a data-driven distributed hydrological model for regional scale catchments prone to Mediterranean flash floods. Application to the Ardèche catchment, France.', PhD thesis, Université de Grenoble.

Bahl, N., 2016. Dérivation de paramètres caractéristiques du sol pour la modélisation hydrologique sur la région Rhône-Alpes. Analyse de sensibilité de la modélisation à la description du sol sur le bassin de l'Ardèche, ENGEES, Strasbourg, 86 pp.

Khalfaoui, A., 2015. Le Bassin du Rhône face aux changements climatiques et des usages de l'eau. Rapport de stage Polytech'Nice Sophia-Antipolis, Irstea, 46 pages

Labbas, M. (2015), 'Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales. Application au bassin de l'Yzeron (130 km²).', PhD thesis, Université de Grenoble.

Noël, D. (2015), 'Estimation d'une fonction de demande en eau potable dans le bassin versant du Rhône', Master's thesis, Master II Risque et Environnement (RISE) - Université de Lyon.

Communications et articles

Braud, I., 2015. Quels impacts du changement climatique et des usages sur la ressource en eau dans les bassins de la Durance et du Rhône?, 3ème séminaire annuel du LabeX DRIIHM, 8-10 Juin 2015, Aix-en-Provence.

Gouttevin, I., the R2D2-2050-Team, M. Turko, 2016. Modelling efforts to asses changes in hydrology and the sustainability of water uses in Alpine regions. 2nd INARCH workshop, Grenoble, Octobre 2016.

Gouttevin, I., Khalfaoui, A., Branger, F., Sauquet, E., Braud, I., Tilmant, F. and Montginoul, M., 2016. Combined hydrological and water use modelling: a tool for water management sustainability. Nordic Hydrological Conference 2016, Kaunas, August 2016.

Le Gros, C., Sauquet, E., Lang, M., Achard, A.-L., Leblois, E., Bitton, B., 2015. Les Annuaire Hydrologiques de la Société Hydrotechnique De France : Une source d'information patrimoniale pour la connaissance de l'hydrologie en France. La Houille Blanche, 4, 66-77 doi: 10.1051/lhb/20150048.

Sauquet, E. & Branger, F. (2014), Un nouvel outil pour modéliser l'hydrologie du Rhône et préparer l'avenir, Séminaire Agence de l'Eau RM&C, 18 novembre 2014 « Connaissances et Fleuve Rhône ».

Tilmant, F.; Branger, F.; Gouttevin, I. & Kralisch, S. (2015), 'Modélisation hydrologique distribuée sur le Rhône'Séminaire modélisation Irstea, Clermont-Ferrand, 2 juin 2015'.

11.2 Synthèse des sources de données pour la paramétrisation de J2000_Rhône

Donnée	Origine	Statut	Utilisation dans J2000-Rhône
Modèle numérique de terrain à 30 m ASTER	NASA	Public – gratuit	Détermination des HRUs et paramètres d'altitude, pente etc
Carte d'occupation des sols	Corine Land Cover 2006	Public - gratuit	Regroupement en 8 classes et utilisation dans hru-delin pour la détermination des HRUs
Carte Pédologique 1/1000000ème	Soil European Database	Public – gratuit	Regroupement en 4 classes de profondeur de sol et utilisation dans hru-delin pour la détermination des HRUs. Paramétrage du réservoir sol.
Base de données sol et carte pédologique au 1/250000ème	IGCS – Région Paca	Obtenues sur convention pour travail de recherche (projet R2D2)	Dérivation des valeurs de paramètres de sol sur le bassin de la Durance qui ont été reprises pour les zones « montagne »
Base de données sol et carte pédologique au 1/250000ème	Région Rhône-Alpes et département de la Haute-Marne	Obtenues par convention de recherche	Exploité dans le stage de N. Bahl (2016)
Carte géologique 1/250000ème	BRGM	Issue de cartes papier vectorisées – usage interne Irstea	Regroupement en 8 classes et utilisation dans hru-delin pour la détermination des HRUs
Base ECOCLIMAP	Météo France	Accès spécifique recherche	Paramètres de végétation : LAI, profondeur racinaire
Base FAO	FAO	Public - gratuit	Paramètres de végétation : coefficient cultural
Réanalyse SAFRAN	Météo France	Convention spécifique Irstea	Précipitation hors Durance, température, variables climatiques pour le calcul de l'ET0
Réanalyse SPAZM	EDF	Convention spécifique Irstea	Précipitation sur la Durance et calcul de l'ET0 (DuO)
Base de données SIOUH	Data.gouv.fr	Public – gratuit	Localisation et capacité maximale des principaux barrages et dérivations – module barrages
RGA 2010	Ministère de l'Agriculture	Accès restreint (convention)	Recensement des surfaces irriguées et des types de cultures à

			l'échelle cantonale : identification des HRUs irriguées et paramétrisation du module irrigation
SISPEA	ONEMA	Public – gratuit	Consommation en eau potable : développement du modèle de consommation en fonction de données INSEE
Séries hydrologiques	BANQUE HYDRO	Accès spécifique recherche	Localisation des stations utilisées dans hru-delin ; Séries de débit pour évaluation du modèle
Projections climatiques modèle ALADIN	Météo France Portail DRIAS	Public - gratuit	Projections climatiques pour tests de scénarios

11.3 Implications du scénario « tout goutte-à-goutte » pour le Rhône Moyen et la Haute Durance

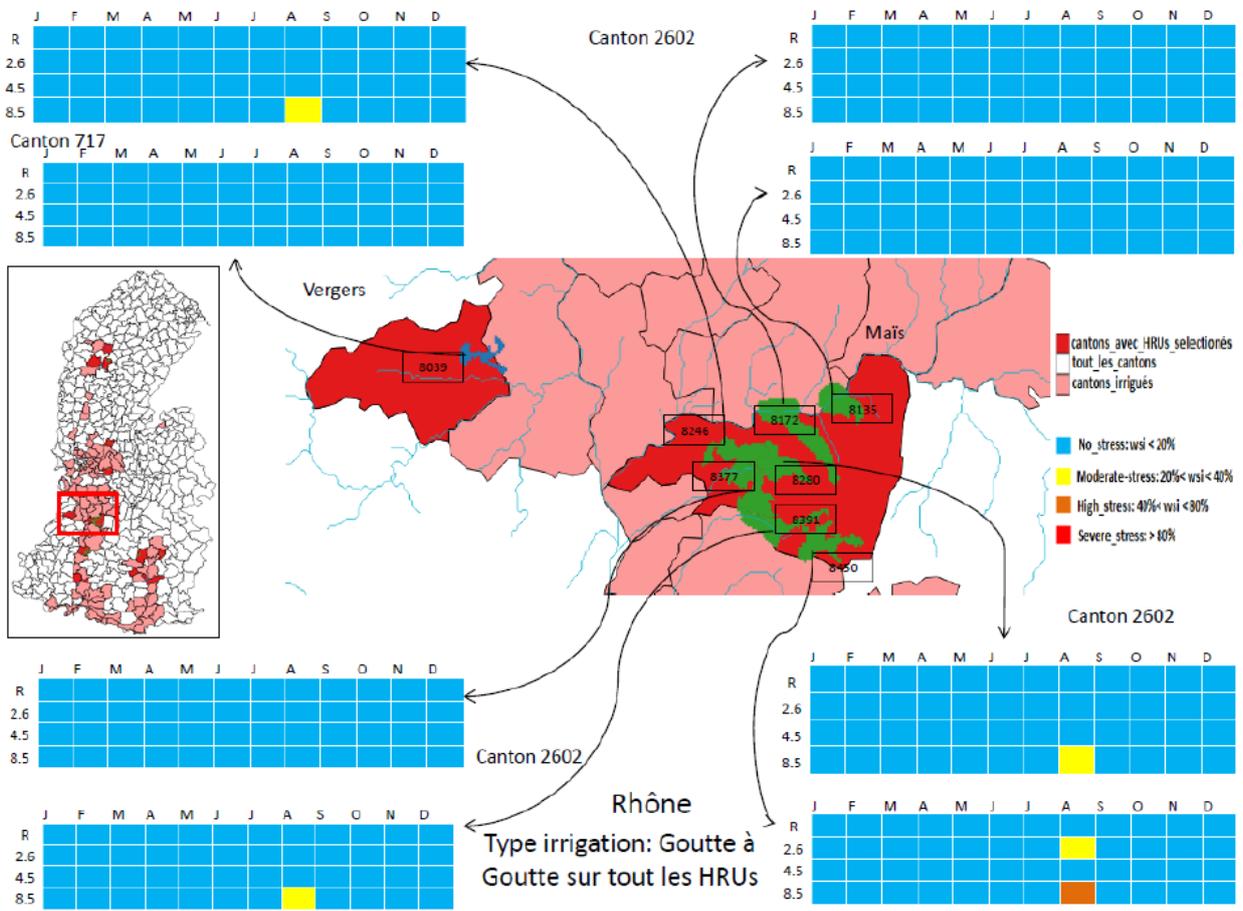
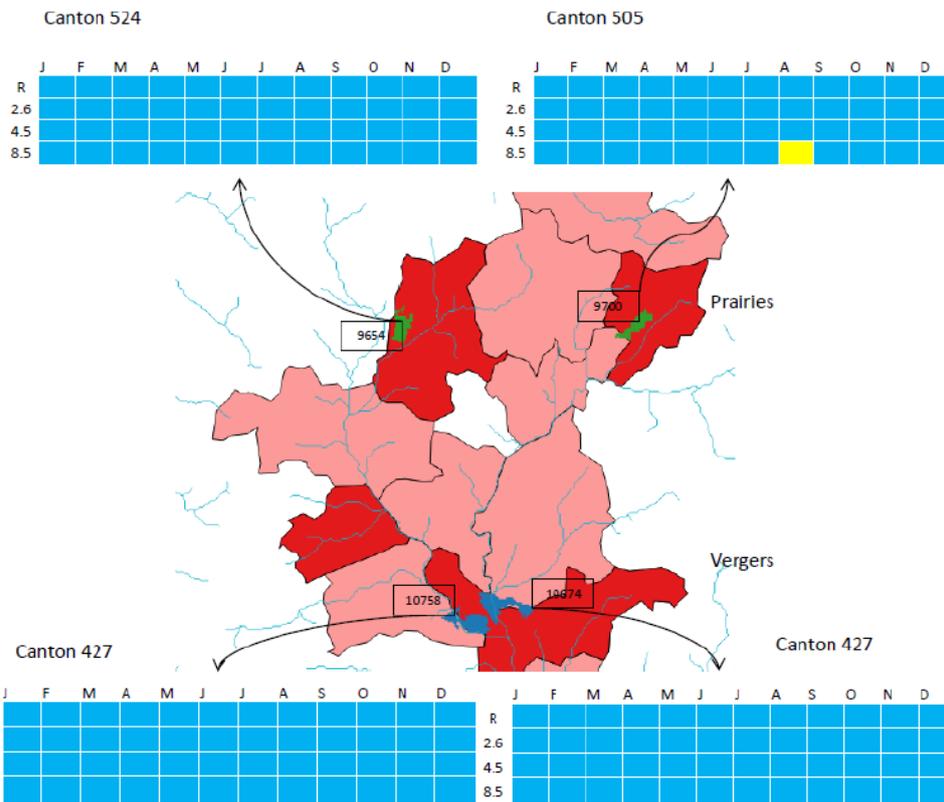
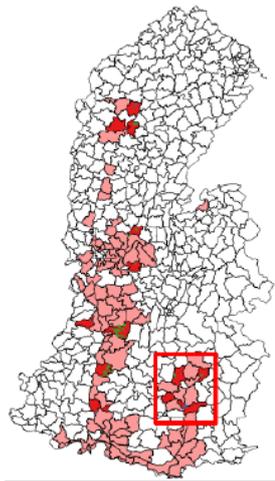


Figure 70 : wsi sur les cantons du Rhône Moyen sous scénario de bascule généralisée vers du goutte-à-goutte.



- cantons_avec_HRUs_selectionés
- tout_les_cantons
- cantons_irrigués
- No_stress: wsi < 20%
- Moderate_stress: 20% < wsi < 40%
- High_stress: 40% < wsi < 80%
- Severe_stress: > 80%

Type irrigation: Goutte à Goutte sur tout les HRUs

Figure 71 : wsi sur les cantons de la Haute Durance sous scénario de bascule généralisée vers du goutte-à-goutte

11.4 Pression sur la ressource pour les différents scénarios prospectifs d'eau potable (débits influencés)

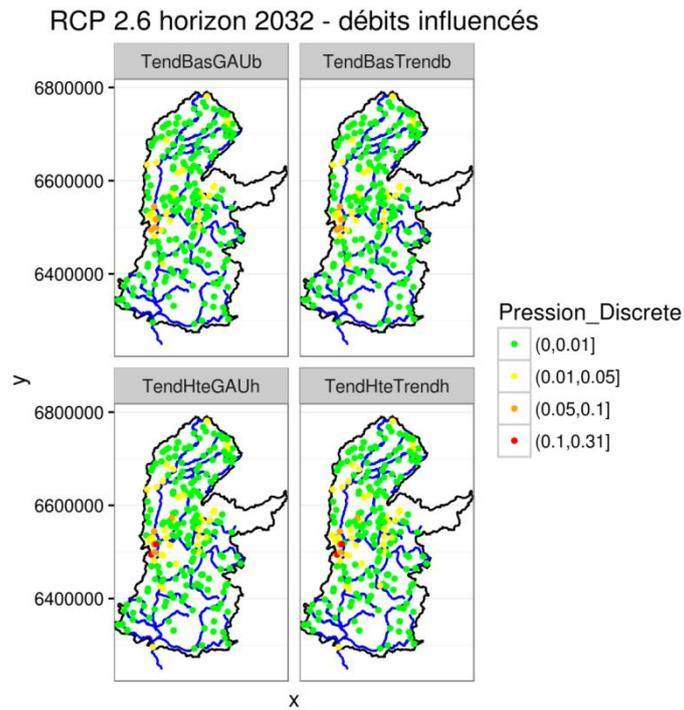


Figure 72 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource influencée pour le scénario climatique RCP 2.6 à l'horizon 2032.

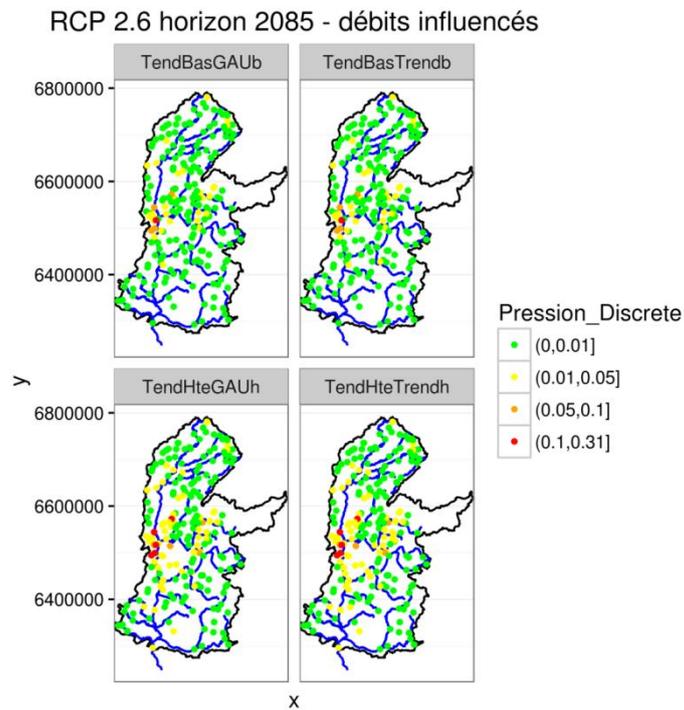


Figure 73 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource influencée pour le scénario climatique RCP 2.6 à l'horizon 2085.

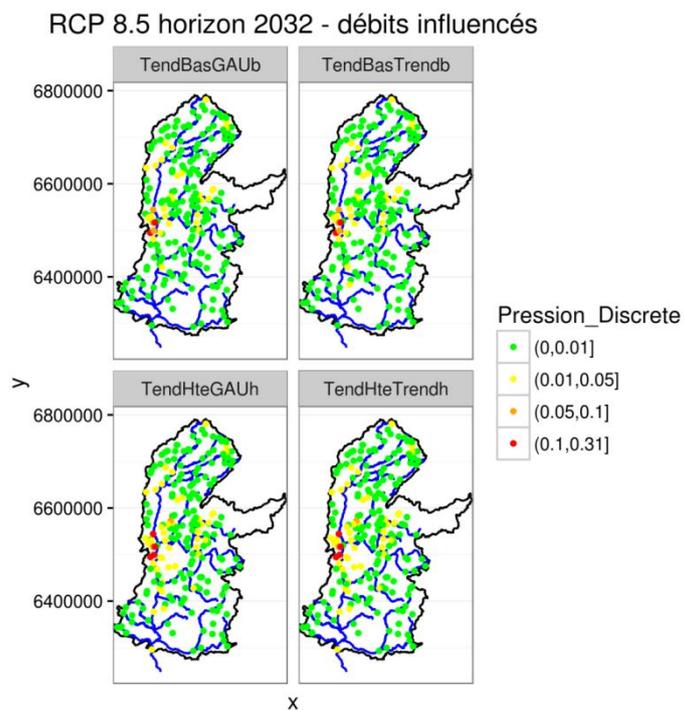


Figure 74 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource influencée pour le scénario climatique RCP 8.5 à l'horizon 2032.

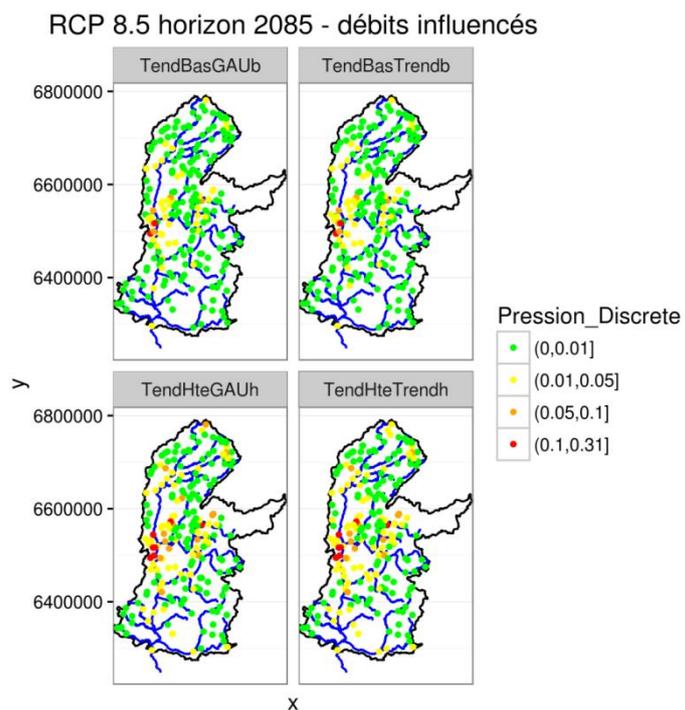


Figure 75 : Représentation cartographique de la pression AEP sur la ressource influencée pour le scénario climatique RCP 8.5 à l'horizon 2085.