



**HAL**  
open science

# Le bassin du Rhône face au changement climatique et des usages de l'eau

Abdlai Khalfaoui

► **To cite this version:**

Abdlai Khalfaoui. Le bassin du Rhône face au changement climatique et des usages de l'eau. Sciences de l'environnement. 2016. hal-02605433

**HAL Id: hal-02605433**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02605433v1>**

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.

**Rapport de stage :**

# **Le bassin du Rhône face au changement climatique et des usages de l'eau**

---

**Amina KHALFAOUI**

*Mars 2016*

*Master I « Hydroprotech » Département de l'hydro-informatique et la gestion de l'eau*

*Polytech'Nice Sophia Antipolis*



Irstea

Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie



Institut national de recherche  
en sciences et technologies  
pour l'environnement et l'agriculture

Groupement de Lyon

05 Rue de la Doua

69626 Villeurbanne -Lyon-

Tél. +33(0)4.78.89.95.95- Fax +33(0)4.72.43.91.55



# Sommaire :

Chapitre I :	6
Introduction	6
1. Contexte et présentation du stage	6
1.1. Présentation de l'entreprise	6
1.2. Présentation du stage	7
1.3. Contexte géographique et description du projet	7
2. Présentation du modèle J2000Rhône	8
2.1. Maillage	9
2.2. Fonctionnement du modèle	9
2.3. Paramètres du modèle	11
3. Eléments bibliographiques	11
3.1. Les nouveaux scénarios RCP « Representatifs Concentration Pathways »	11
3.2. Que projettent les modèles climatiques ?	13
3.3. Projets antérieurs de prospective « Eaux et Territoires »	16
Chapitre II :	19
Données et Méthodes	19
1.1. Données climatique	19
1.2. Données climatiques en période de référence	19
1.2.1. Températures et précipitations	20
1.3. Données de prélèvements d'eau	20
1.3.1. Evapotranspiration	21
1.4. Données climatiques périodes futures	22
1.4.1. Température	23
1.4.2. Précipitation	24
1.5. Modélisation	25
1.5.1. Module d'irrigation	25
Chapitre III :	28
Résultats	28
1. Temps présent et changement climatique	29
1.2. Petits bassins du Val de Saône La Tille à Crécey	32
1.3. Grands bassins à l'aval - le Rhône à Valence	34
2. Irrigation	35

2.1. Indicateur de stress hydrique : « Water Stress Index ».....	38
2.2. Le nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite.....	42
Discussion et conclusion : .....	44
Bibliographie : .....	45

## Table des figures

Figure 1: Les centres IRSTEA (source : irstea.fr) .....	6
Figure 2 : Carte étendu du bassin versant du Rhône .....	8
Figure 3 : Principe de la génération des HRUs (Rapport MDR 2015).....	9
Figure 4 : Représentation schématique de fonctionnement du J2000Rhône .....	10
Figure 5 : Représentation schématique des différents scénarios RCP, d'après IPCC (2013) .....	12
Figure 6 : les RCP comparés aux SRES.....	13
Figure 7 : Changement des températures moyennes de surface (a) et changement des précipitations moyennes (b) basés sur des moyennes de projections multi modèles pour 2081-2100 par rapport à 1986-2005 pour les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite). Les pointillés indiquent les régions où le changement prévu est important par rapport à la variabilité naturelle interne, et où au moins 90% de modèles sont d'accord sur le signe du changement. Le hachurage (lignes diagonales) indique les régions où le changement projeté est à moins d'un écart-type de la variabilité naturelle interne. ....	14
Figure 8 : Jeu de données de référence et anomalie de température moyenne quotidienne : écart entre les périodes futures et la période de référence pour le modèle CNRM-CM3 .....	15
Figure 9 : Jeu de données de référence et anomalie du cumul de précipitations : écart entre les périodes futures et la période de référence pour le modèle CNRM-CM3 .....	15
Figure 10 : Croisement des hypothèses .....	18
Figure 11 : Moyennes interannuelles de températures (à gauche) et de précipitations (à droite) .....	21
Figure 12 : Moyennes interannuelles des évapotranspirations potentielles de référence (SAFRAN et DRIAS) sur la période 1985-2005.....	22
Figure 13 : Cartes des écarts bruts de température interannuelle moyenne .....	23
Figure 14 : Cartes des écarts bruts des cumuls de pluie interannuelle moyenne.....	24
Figure 15 : Prélèvement de l'eau de l'irrigation dans un maillage incluant des sous bassins topographiques et des sous bassins aux stations.....	26
Figure 16 : Réseau hydrométrique du bassin du Rhône .....	28
Figure 17 : (1) Moyenne interannuelle des débits mensuels observés et simulés (avec les forçages climatiques DRIAS en vert et les forçages de la ré-analyse SAFRAN en rouge) sur la période 1985-2005 (2) Moyenne interannuelle des précipitations mensuelles pour la station La Durance à Espinasses - Serre Ponçon - sur la période 1985-2005 (3) Moyenne interannuelle des évapotranspirations réelles mensuelles calculées par J2000Rhône pour la station La Durance à Espinasses - Serre Ponçon - sur la période 1985-2005.....	29
Figure 18 : Ecart précipitations (simulation de future-simulation de présent) .....	30
Figure 19 : Moyenne interannuelle des débits mensuels simulés (avec les forçages climatiques DRIAS) sur la période de référence et les périodes futures pour la station Durance Serre Ponçon .....	31
Figure 20 : Comparaison entre les différents modèles hydrologiques utilisés dans R2D2 des changements mensuels de débits (à gauche) et d'évapotranspiration (à droite) .....	31
Figure 21 : Comparaison entre les différentes simulations de J2000Rhône (selon les scénarios RCP utilisés) des changements mensuels de débits (à gauche) et d'évapotranspiration (à droite).....	32
Figure 22 : (1) Moyenne interannuelle des débits mensuels observés et simulés (avec les forçages climatiques DRIAS en vert et les forçages de la ré-analyse SAFRAN en rouge) sur la période 1985-	

2005 pour la station La Tille à Crécey (2) Moyenne interannuelle des précipitations mensuelles pour la station La Tille à Crécey sur la période 1985-2005 (3) Moyenne interannuelle des évapotranspirations réelles mensuelles calculées par J2000Rhône pour la station La Tille à Crécey sur la période 1985-2005 .....	32
Figure 23 : Moyenne interannuelle des débits mensuels simulés (avec les forçages climatiques DRIAS) sur la période de référence et les périodes futures pour la station : La Tille à Crécey .....	33
Figure 24 : (1) Moyenne interannuelle des débits mensuels observés et simulés (avec les forçages climatiques DRIAS en vert et les forçages de la ré-analyse SAFRAN en rouge) sur la période 1985-2005 pour la station le Rhône à Valence (2) Moyenne interannuelle des précipitations mensuelles pour la station le Rhône à Valence sur la période 1985-2005 (3) Moyenne interannuelle des évapotranspirations réelles mensuelles calculées par J2000Rhône pour la station le Rhône à Valence sur la période 1985-2005 .....	34
Figure 25: Moyenne interannuelle des débits mensuels simulés (avec les forçages climatiques DRIAS) sur la période de référence et les périodes futures pour la station : le Rhône à Valence.....	35
Figure 26 : Comparaison du besoin en eau des plantes (Demande) et de l'irrigation modélisée (Transfert) aux prélèvements de l'Agence de l'eau sur 1970-2005 .....	36
Figure 27 : Comparaison du besoin en eau des plantes (Demande) et de l'irrigation modélisée (Transfert) aux prélèvements de l'Agence de l'eau sur 2030-2065 (à gauche) et 2065-2100 (à droite) ..	37
Figure 28 : Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés sur le sous-bassin de la Saône .....	38
Figure 29 : Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés sur le sous-bassin du Rhône .....	39
Figure 30 : Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés sur le sous-bassin de la durance .....	39
Figure 31: Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés irrigués en aspersion sur le sous-bassin de la Saône .....	40
Figure 32: Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés irrigués en aspersion sur le sous-bassin du Rhône .....	41
Figure 33: Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés irrigués en aspersion sur le sous-bassin de la durance .....	41
Figure 34 : Comparaison du nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé en période de référence au nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé sur la période future (2035-2065).....	42
Figure 35 : Comparaison du nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé en période de référence au nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé sur la période future (2065-2100).....	43
Figure 36 : Comparaison de l'indice de nombre de jours moyenne annuelle où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite des différents scénarios utilisés (RCP2.6- RCP4.5- RCP8.5) à l'indice de la période de référence DRIAS.....	43

# Chapitre I :

## Introduction

### 1. Contexte et présentation du stage :

#### 1.1.Présentation de l'entreprise:

J'ai réalisé mon stage de Master I d'une durée de six mois au sein du Centre National de Recherche en Science et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA ancien Cemagref) au centre de Lyon-Villeurbanne: Unité Hydrologie- Hydraulique (HHLY). C'est un institut de recherche finalisée sur des enjeux identifiés ou émergents liés au développement durable. Ses travaux portent essentiellement sur des systèmes environnementaux continentaux dans la perspective de la gestion durable des eaux et des territoires. Il crée des méthodes et des innovations technologiques pour l'aide à la décision et à la gestion des milieux naturels et des systèmes de production associés.

IRSTEA emploie environ 1350 personnes, dont 900 permanents (la moitié chercheurs et ingénieurs), 200 doctorants, 40 post-doctorants, et 250 stagiaires (niveau master).

Ils sont répartis en 28 unités de recherche, sur 10 sites principaux, présentés sur la figure1.

*Unité Hydrologie- Hydraulique (HHLY),  
centre de Lyon :*

Ses recherches privilégient la connaissance quantitative et qualitative des eaux superficielles à partir de la modélisation couplée des régimes hydrologiques et de l'hydraulique des écoulements en rivières, et d'études expérimentales en laboratoire et *in situ*.

Elles s'intéressent par ailleurs à la modélisation des pluies et des processus hydrologiques à petite échelle pour une représentation spatialisée des transferts d'eaux, de sédiments et de solutés. Les méthodes et les outils élaborés apportent des réponses aux demandes sociales parfois contradictoires, liées aux usages de l'eau, à la protection contre les événements extrêmes et à la qualité des hydrosystèmes.

Les différentes questions traitées concernent la lutte contre les crues, les inondations et sécheresses, le dimensionnement des aménagements, l'entretien et la gestion du lit des rivières, l'impact des activités humaines et du changement climatique sur la quantité et la qualité des ressources en eaux.



Figure 1: Les centres IRSTEA (source : irstea.fr)

## **1.2.Présentation du stage:**

Ce stage encadré par Isabelle GOUTTEVIN -Docteur et Ingénieur de Recherche en Hydrologie à IRSTEA Lyon- s'insère dans le cadre du projet « Modélisation Distribuée du Bassin du Rhône » (MDR) et vise à réaliser des analyses quantifiées de scénarios prospectifs en intégrant le changement du climat et les évolutions possibles de l'agriculture dans le modèle hydrologique J2000Rhône afin d'évaluer leurs impacts sur la ressource en eau de surface du grand bassin du Rhône.

Dans un premier temps le travail a consisté à vérifier et rassembler les données de changement climatique disponible sur le site « DRIAS » de Météo France.

On s'appuie sur trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre: Optimiste (RCP2.6), Médian (RCP4.5) et Pessimiste (RCP8.5) sur l'horizon Proche (2030-2050), Moyen (2041-2070) et Lointain (2071-2100). Les données de ces trois scénarios sont ensuite comparées à des données de référence (1975-2005) aussi issues de simulations réalisées avec le même modèle.

Enfin un forçage du modèle J2000Rhône avec ces données climatiques a été réalisé et qui a été suivi d'une analyse des simulations obtenues sur les différentes périodes afin de caractériser la résilience (ou non) du bassin du Rhône vis-à-vis de l'évolution future de la ressource en eau et de la demande en eau d'irrigation, induite par ces changements climatiques et anthropiques.

## **1.3.Contexte géographique et description du projet :**

Le bassin du Rhône est un bassin versant situé en France et en Suisse (figure 2). Il est alimenté par des cours d'eau des Alpes, du massif central, du Jura et des Vosges. Ce bassin est extrêmement varié, aussi bien du point de vue climatique, topographique, géologique, que du point de vue des activités humaines présentes. Son principal cours d'eau est le Rhône, qui se jette dans la mer Méditerranée par un delta. Jusqu'à présent les ressources en eau qui alimentent ces bassins sont considérées comme abondantes et satisfont les besoins en eau des différents secteurs (industrie, irrigation,...).

**Surface du bassin versant : 96500 km<sup>2</sup>**  
**16,5 % de la superficie de la France**

**Longueur totale : 765 km**  
**Débit à Genève : 250 m<sup>3</sup>/s**

**Débit à l'embouchure : 1700 m<sup>3</sup>/s**  
**Le 48e fleuve du monde par son débit**  
**Crue centennale à Beaucaire : 11300 m<sup>3</sup>/s**

**Étiage : 580 m<sup>3</sup>/s**

**Puissance hydroélectrique installée sur le Rhône : 3100 MW**

**Productivité hydroélectrique annuelle moyenne sur le Rhône : 16400 GWh/an**

**Puissance nucléaire thermique installée : 14800 MW**

**Énergie nucléaire et thermique moyenne : 89200 GWh/an**

**Trafic fluvial : 5,4 M tonnes**

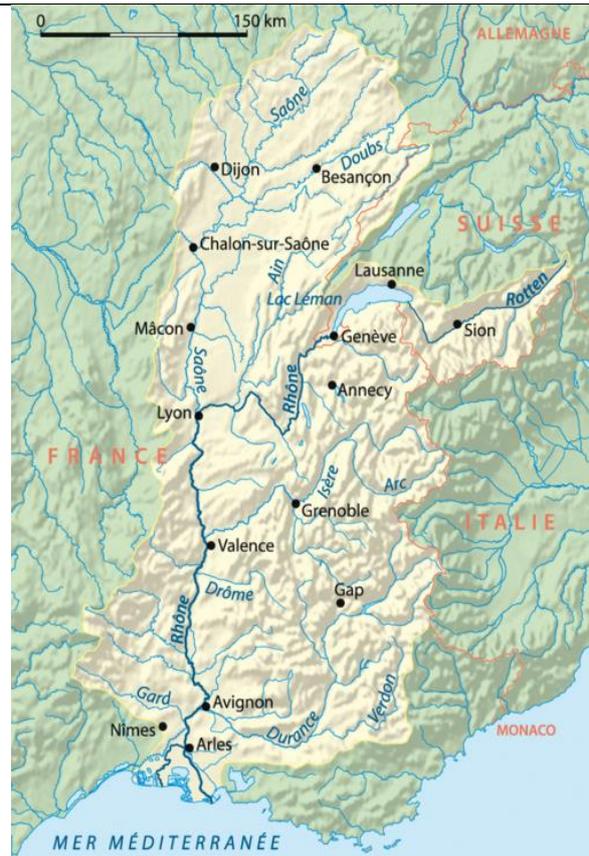


Figure 2 : Carte étendue du bassin versant du Rhône

### ***Projet Modélisation Distribuée du Bassin du Rhône « MDR » :***

C'est un projet cofinancé par l'Agence de l'Eau RM&C, la CNR et les fonds FEDER. Son objectif est de développer un outil de modélisation hydrologique quantitative distribuée et à base physique qui assure une bonne représentation des principaux processus hydrologiques en tout point du bassin, et qui puisse prendre en compte plusieurs usages d'eau (hydro-électricité, irrigation et demande en eau potable) et qui permette aussi de réaliser des tests de scénarios d'évolution des usages dans un contexte changement climatique. Le modèle utilisé pour ce projet est le modèle hydrologique J2000, développé à l'Université de Jena en Allemagne et adapté aux différentes caractéristiques du bassin du Rhône (modèle J2000Rhône).

### **2. Présentation du modèle J2000Rhône :**

Le modèle J2000Rhône est issu du modèle semi-distribué J2000 développé à l'université de Jena en Allemagne, ce dernier est utilisé depuis plusieurs années à l'unité de recherche HHLY - IRSTEA, Centre de Lyon-Villeurbanne-, qui l'a adapté aux différentes caractéristiques du bassin du Rhône. Les paramètres distribués ont été spécifiés pour le territoire ainsi que le type de données que le modèle accepte en entrée.

## 2.1. Maillage :

En termes d'unité spatiale le modèle utilise un maillage irrégulier créé par croisement de différentes informations spatialisées (la pente, l'altitude, la géologie, les sous-bassins hydrologiques...) d'où résultent des unités dites homogènes du point de vue hydrologique qu'on appelle les HRUs (Hydrological Response Units) (figure 3).

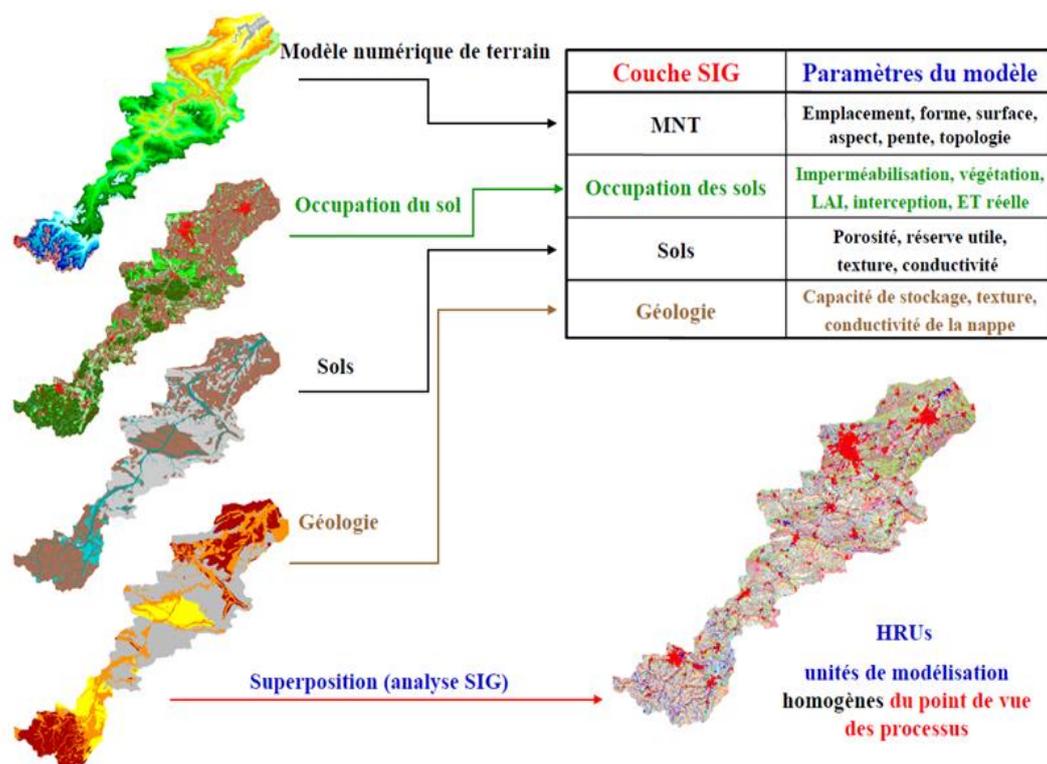


Figure 3 : Principe de la génération des HRUs (Rapport MDR 2015)

Le maillage intègre aussi la direction d'écoulement entre les HRUs, ce qui permet ensuite de lier les HRUs au réseau hydrographique et enfin de positionner les HRUs au sein des bassins versants. Un cours d'eau existe au-delà d'une surface drainée de 20 km<sup>2</sup>.

Le maillage et les caractéristiques physiques de ces HRUs et du réseau hydrographique sont fournis au modèle via des fichiers de paramètres.

## 2.2. Fonctionnement du modèle :

Sur son maillage irrégulier par unité de Réponse Hydrologique, le modèle utilise des représentations simplifiées à base de réservoirs pour simuler les différents processus hydrologiques au pas de temps journalier, principalement la partition pluie/neige des précipitations, l'interception, l'accumulation et la fonte de la neige, le ruissellement de surface, l'infiltration dans le sol, l'évapotranspiration, la percolation vers les nappes et les écoulements dans la nappe et dans le réseau hydrographique.

La figure 3 illustre ces différents processus à l'échelle d'une HRU, avec les différents modules et paramètres, où les boîtes correspondent à des réservoirs du modèle.

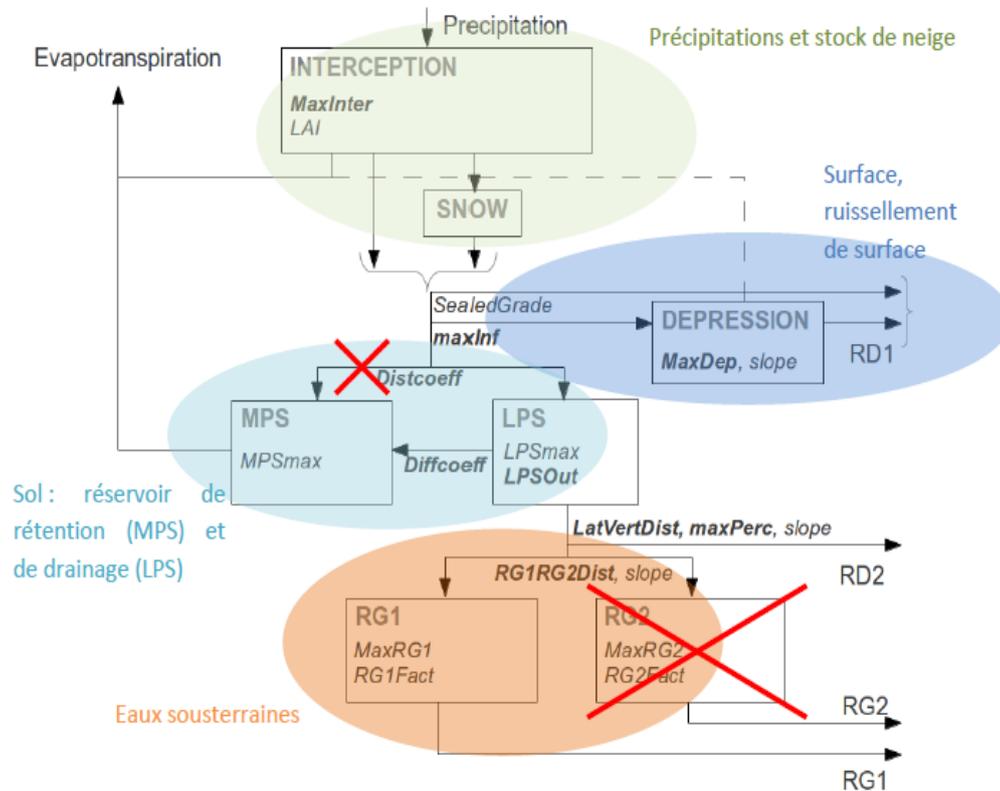


Figure 4 : Représentation schématique de fonctionnement du J2000Rhône

Lors d'un évènement pluvieux, l'eau est partiellement interceptée par le couvert végétal s'il existe, en fonction de son indice foliaire LAI (ratio de la surface totale des feuilles à la surface du sol sur lequel la végétation se développe). Cet indice est issu des données produites CNRM où on a une valeur moyenne par mois.

L'eau qui atteint donc le sol s'infiltre et remplit d'abord un réservoir de macro-pores LPS (Large Pore Space) ou ruissèle et constitue le ruissellement de surface RD1. Le modèle assure aussi que l'eau du sol forme un écoulement de sub-surface (RD2), si la pente est importante ou le substrat peu infiltrant. L'eau non évacuée percole enfin vers un réservoir profond (RG1).

Dans la partie qui s'infiltre, l'eau peut diffuser vers un réservoir plus fin MPS (Medium Pore Space) qui correspond à la capacité au champ. On note que l'évapotranspiration est prélevée sur l'eau interceptée par couvert végétal et sur l'eau disponible dans le sol c'est-à-dire dans le réservoir utile (MPS).

L'évaporation maximale est calculée en utilisant directement les données des séries temporelles d'évapotranspiration de référence  $ET_0$  calculées indépendamment par la formule Penman-Monteith, et modulée selon la nature de la végétation à l'aide d'un coefficient cultural  $K_c$  (méthode FAO) :

$$ET_m = Kc \times ET_0$$

Avec :

$ET_m$  : Evapotranspiration maximale

$ET_0$  : Evapotranspiration potentielle de référence

A chaque HRU le modèle produit donc quatre types de flux :

- Ruissèlement de surface RD1
- Flux de subsurface (interflow) RD2
- Flux souterrain peu profond RG1

Et à chaque pas de temps ces flux sont transférés d'HRU en HRU selon un schéma topologique, jusqu'à atteindre le réseau hydrographique où le transfert d'eau est assuré par un module de routage qui permet d'alimenter un brin de rivière si la HRU sur lequel il est généré est traversée par un tel brin, sinon l'écoulement généré par HRU est transféré à la HRU réceptrice voisine. Cet acheminement est réalisé en utilisant une approche de type onde cinématique simplifiée.

Le modèle J2000Rhône fonctionne dans la plate-forme JAMS (Kralish et al., 2007) et distribué avec une licence open-source.

### 2.3. Paramètres du modèle :

Dans le cadre de cette étude plusieurs séries temporelles journalières de différentes variables ont été récupérées sur le site DRIAS de Météo-France qui met à disposition des projections climatiques régionalisées par les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Nous avons rassemblé les informations des scénarios RCP (issue du dernier rapport du GIEC ; IPCC, 2013) sous forme numérique afin de calculer et mettre sous un format précis trois fichiers : les précipitations Totales, température moyenne et l' $ET_0$  au pas de temps journalier dont le modèle a besoin.

La modélisation nécessite aussi : un fichier *hrus.par* représentant le maillage, un fichier *reach.par* décrivant le réseau hydrographique et son organisation topologique et un fichier *hgeo.par* contenant pour chaque entité hydrogéologique la capacité de stockage et le coefficient de vidange du réservoir RG1.

Douze valeurs d'indice Foliaire de la couverture végétale (LAI) et de coefficient cultural ainsi que la profondeur racinaire moyenne de la végétation et le taux d'imperméabilisation des surfaces sont représentés dans un fichier nommé *landuse.par*.

Un autre fichier d'entrée de modèle *soils.par* contient pour chaque classe de sol la capacité de stockage d'eau du sol répartie en capacité au champ et capacité d'air.

## 3. Eléments bibliographiques :

### 3.1. Les nouveaux scénarios RCP « Representatifs Concentration Pathways » :

Le GIEC dans son cinquième rapport a suivi une démarche différente de celle de l'exercice précédent, où l'analyse s'appuyait sur une logique séquentielle pour définir les différents scénarios prospectifs : les scénarios SRES « *Special Report on Emissions Scenarios* » organisé en quatre familles A1, A2, B1, B2. Ces derniers alimentent une chaîne de modèles pour aboutir

à des projections d'évolution climatique globales ou régionales. Ces scénarios climatiques étaient enfin réinjectés dans des modèles d'impacts permettant de simuler les effets du climat sur les régimes hydrologiques ou les écosystèmes par exemple.

Pour gagner en rapidité et en réactivité, les scientifiques ont défini des profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre (GES), d'ozone et de précurseurs des aérosols représentatifs d'un accroissement du bilan énergétique : *les RCP (Representative Concentration Pathways)*. Ces scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif (le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (9 à 16 km d'altitude) ou de l'atmosphère, dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre) sont définis sur la période 2006-2300 au nombre de quatre. Ces trajectoires englobent un large éventail de possibilités, correspondant à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial (Figure 5).

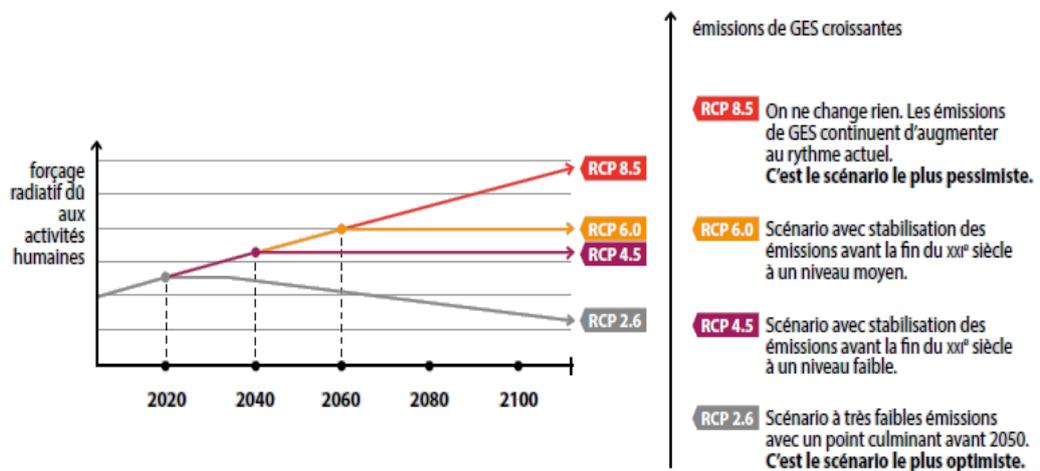


Figure 5 : Représentation schématique des différents scénarios RCP, d'après IPCC (2013)

La figure 6 illustre les différences entre les anciens (SRES) et nouveaux scénarios (RCP). Une simple comparaison montre que le RCP2.6 est le seul profil sans équivalent avec les anciennes propositions du GIEC. Il intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement climatique.

On constate aussi que le RCP8.5 scénario extrême est un peu plus fort que l'ancien scénario SRES dénommé A2, tandis que le RCP 6.0 est proche du SRES A1B et le RCP4.5 est proche du scénario A1.

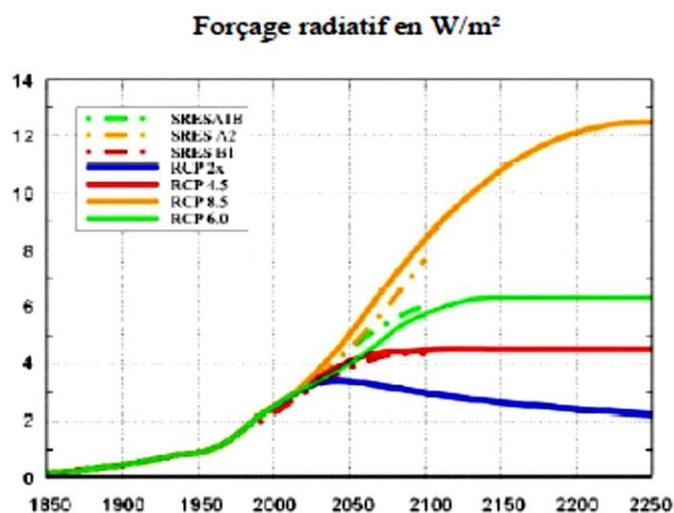


Figure 6 : les RCP comparés aux SRES

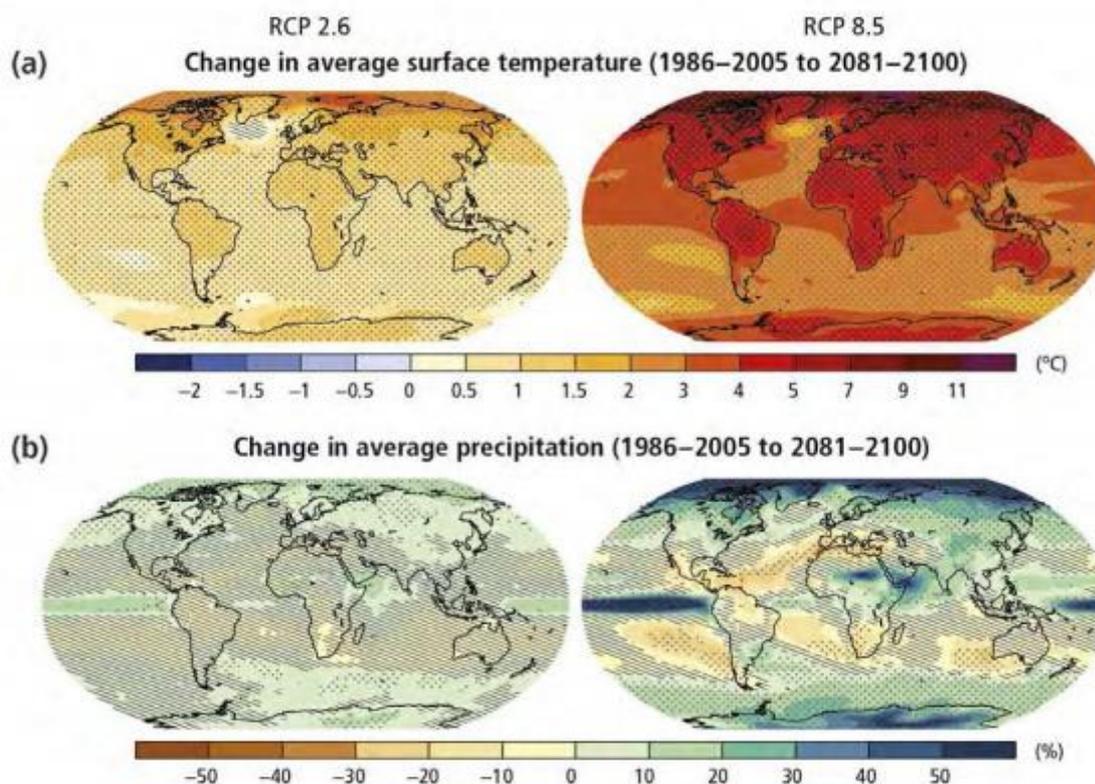
À partir de ces profils de référence, les climatologues produisent des projections climatiques en utilisant les *RCP* comme entrées de modèle. Deux modèles climatiques sont développés et utilisés par la communauté scientifique française : *CNRM-CM5* (Météo-France et CERFACS) - les sorties de ce dernier ont été utilisé dans cette étude- et *IPSL-CM5* (Institut Pierre Simon Laplace). Ce qui a conduit les climatologues français à développer le portail internet « *DRIAS, les futurs du climat* ». Ce service réalisé avec l'appui du programme GIEC et de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) est opérationnel depuis le 24 juillet 2012. *DRIAS, les futurs du climat* permet aussi aux utilisateurs de visualiser les projections et les scénarios climatiques régionalisés sur la France, et de commander les données correspondante.

### 3.2. Que projettent les modèles climatiques ?

A l'échelle mondiale, les conclusions du GIEC dans son dernier rapport, anticipent un réchauffement maximal sur les terres émergées et dans la plupart des régions des hautes latitudes de l'hémisphère Nord et un réchauffement minimal au-dessus de l'océan Austral et d'une partie de l'Atlantique Nord (figure 7).

Le réchauffement moyen à la surface pour la période 2016-2035 par rapport à 1981-2005 est similaire pour les quatre scénarios RCP et sera vraisemblablement compris entre 0,3 et 0,7 °C. Ceci suppose qu'il n'y aura pas d'éruptions volcaniques majeures, ni des changements dans d'autres sources, ni des changements inattendus de l'éclairement solaire total.

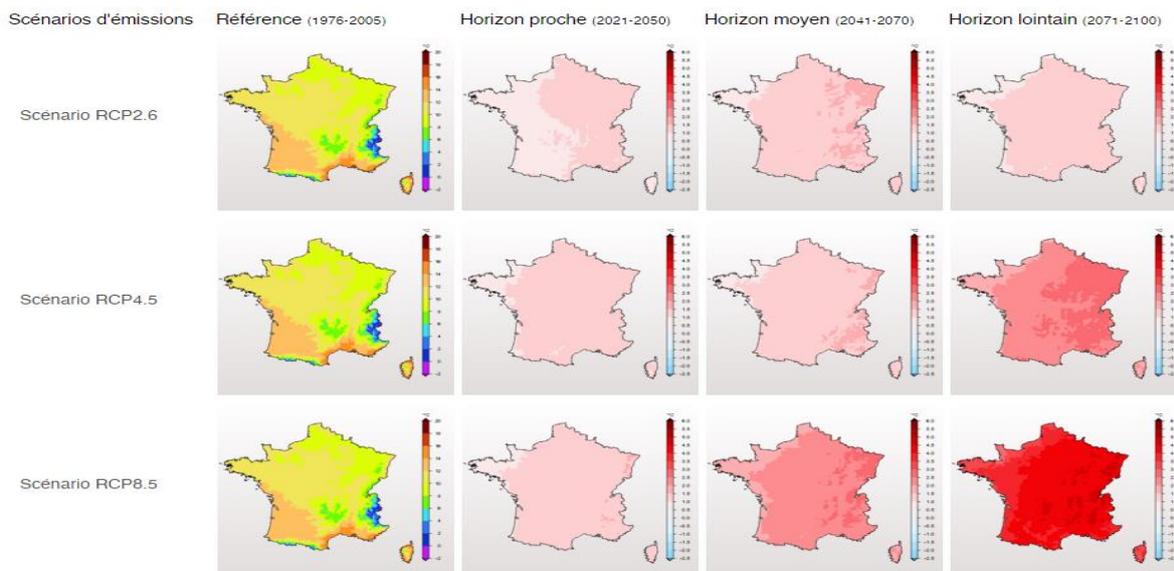
Les changements de précipitations ne seront pas uniformes. En effet les hautes latitudes et le Pacifique équatorial sont susceptibles de connaître une augmentation des moyennes annuelles de précipitations dans le scénario RCP8.5. Dans beaucoup de régions sèches des latitudes moyennes et subtropicales, la moyenne des précipitations diminuera probablement, alors que dans de nombreuses régions humides aux latitudes moyennes, les moyennes des précipitations augmenteront probablement selon le scénario RCP8.5. Les événements de très fortes précipitations deviendront probablement plus intenses et plus fréquents sur la plupart des régions continentales aux moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides.



**Figure 7 : Changement des températures moyennes de surface (a) et changement des précipitations moyennes (b) basés sur des moyennes de projections multi modèles pour 2081-2100 par rapport à 1986-2005 pour les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite). Les pointillés indiquent les régions où le changement prévu est important par rapport à la variabilité naturelle interne, et où au moins 90% de modèles sont d'accord sur le signe du changement. Le hachurage (lignes diagonales) indique les régions où le changement projeté est à moins d'un écart-type de la variabilité naturelle interne.**

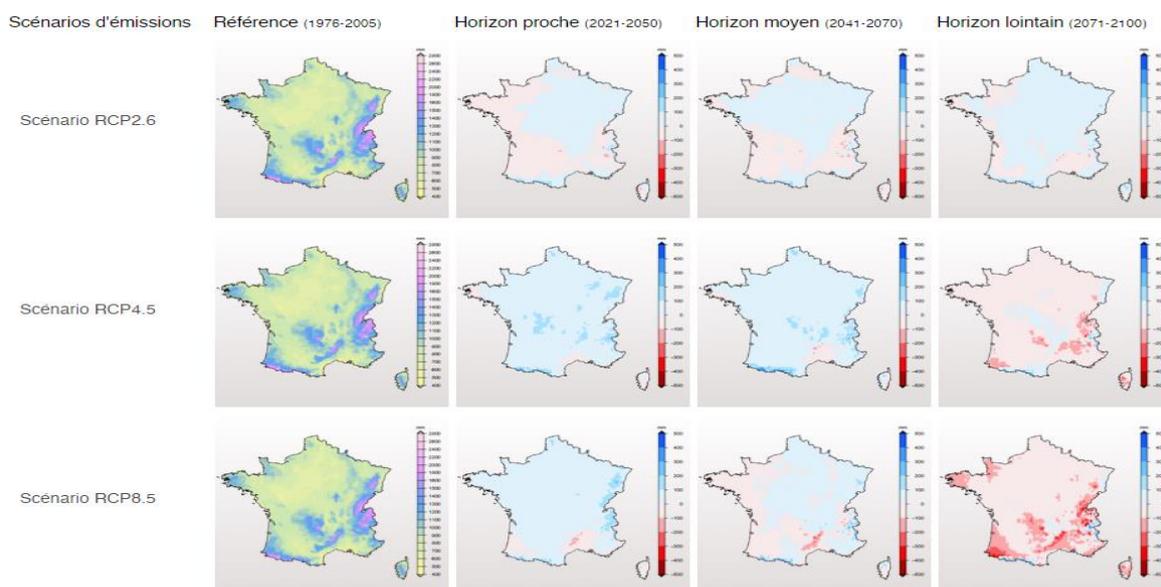
L'évolution de la température moyenne mondiale ainsi que les précipitations qui dépendent fortement du réchauffement climatique, évoluent dans le futur d'une manière très variable selon les quatre scénarios RCP, ce qui nous permet de segmenter notre période future en trois horizons différents : Proche (2021-2050), Moyen (2051-2070) et Lointain (2071-2100).

En France, Les résultats présentés sur la figure 6 mettent en évidence une augmentation de la température moyenne annuelle au cours des prochaines décennies sur le territoire métropolitain, pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 et pour les trois horizons considérés. Il est important de signaler que cette augmentation est monotone pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, mais pas pour le scénario RCP2.6 pour lequel le réchauffement se stabilise, voire diminue en fin de siècle par rapport à l'horizon à moyen terme. L'augmentation moyenne pour l'horizon moyen terme est comprise entre 2 et 3°C pour les territoires continentaux. En ce qui concerne l'horizon lointain, les résultats présentent pour le scénario le plus pessimiste (RCP8.5), donnent une augmentation moyenne annuelle comprise entre 3 et 4°C pour la façade nord-ouest, et entre 4 et 5 °C pour le reste du territoire. On constate ainsi des résultats cohérents entre les différentes simulations, avec des intensités de réchauffement qui varient en fonction du scénario choisi.



**Figure 8 : Jeu de données de référence et anomalie de température moyenne quotidienne : écart entre les périodes futures et la période de référence pour le modèle CNRM-CM3**

Les résultats sur les projections de précipitations varient en fonction de l’horizon et du scénario considéré. Pour la fin du XXIème siècle les résultats des simulations mettent en évidence une diminution des précipitations totales en moyenne annuelle sur le territoire métropolitain. Pour l’horizon moyen terme, cette diminution est moins évidente, notamment pour le scénario RCP4.5 qui présente plutôt une très légère tendance à l’augmentation. Les différences négatives de pluies les plus marquées se situent sur les régions les plus pluvieuses de la période de référence, à savoir les zones montagneuses. Or certaines régions ont des différences relatives marquées.



**Figure 9 : Jeu de données de référence et anomalie du cumul de précipitations : écart entre les périodes futures et la période de référence pour le modèle CNRM-CM3**

### **3.3. Projets antérieurs de prospective « Eaux et Territoires » :**

#### **3.3.1. A l'échelle nationale : le projet « Explore 2070 » :**

Explore 2070 vise à proposer une vision systémique des impacts liés aux évolutions du cycle de l'eau et à construire les stratégies d'adaptation pour la métropole et les départements d'outre-mer, à l'horizon 2070. Ce projet identifie les risques et les coûts associés aux différents scénarios climatiques, démographiques et socio-économiques et évalue la capacité des stratégies d'adaptation à les minimiser. C'est le premier exercice de projections hydrologiques conduit à l'échelle nationale sur des points jaugés.

Une chaîne de modélisation a été mise en place afin de produire des simulations de débits journaliers en temps présent (1962-1991) et en temps futur (2046-2065) au droit de 1522 points de calcul sur le réseau hydrographique de la métropole. Sept modèles climatiques globaux (MCG) ont été forcés par les scénarios d'émission de GES A1B (médian), afin de simuler le climat présent et future.

Les résultats ont été désagrégés par une méthode de descente d'échelle statistique par type de temps. Ces sorties des modèles ont été utilisées en entrée de deux modèles hydrologiques (conceptuel : GR4J et physique : Isba-Modcou).

Les résultats des modèles hydrologiques obtenus dans cette étude montrent que les évolutions climatiques à venir auront des conséquences en termes de diminution des volumes écoulés, au niveau annuel et en période d'étiage. La France doit se préparer à une situation globalement plus sèche, avec des écoulements réduits mais aussi des sols plus secs, plus tôt dans l'année, avec toutes les conséquences agricoles induites. En termes de crues, les résultats établis ne permettent pas d'être aussi tranché et rien ne permet d'affirmer clairement aujourd'hui qu'il faille se préparer, à temps de retour équivalent, à des événements plus intenses à l'échelle nationale. Quelques régions présentent cependant des évolutions plutôt à la hausse.

#### **3.3.2. A l'échelle régionale « Bassin du Rhône » :**

Dans cette étude nous nous sommes intéressés particulièrement aux impacts à prévoir sur la partie française du bassin du Rhône, dans un contexte de changement climatique. Plusieurs études ont déjà été réalisées à l'échelle de ce bassin versant:

##### **3.3.2.1. Projet GICC-Rhône :**

Cette étude réalisée par l'unité de Recherches Hydrologie-Hydraulique du CEMAGREF Lyon (actuel IRSTEA) et datant de 2003, s'est intéressée aux impacts du changement climatique sur le bassin du Rhône sous un scénario d'un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui correspond approximativement à l'échéance 2050. Dans une première étape, le projet a cherché à évaluer le changement climatique globale susceptible d'intervenir sous ce scénario (2×CO<sub>2</sub>) à l'aide des sorties de plusieurs modèles de circulation générales atmosphérique. Les données de différentes variables qui en résultent ont été désagrégées à l'échelle détaillée du bassin versant. Six scénarios de changement climatique ont été construits en combinant des variables du climat observées avec les anomalies simulées pour les températures et les précipitations, et introduits en entrée de cinq modèles hydrologiques différents. Les sorties de ces modèles hydrologiques

sont ensuite comparées entre elles et par rapport au régime hydrologique actuel afin d'évaluer l'effet du changement relatif à l'hydrosystème étudié.

Une analyse des effets du changement climatique sur l'hydrologie naturelle montre que les hauts débits tendent à augmenter, les eaux moyennes et les étiages à diminuer, pour la Soane, l'Ardèche et le Rhône. Pour la Durance, les projections montrent une diminution du pic de fonte au régime nival et un moindre maigre hivernal. L'impact est donc différencié selon les processus dominants dans les bassins.

Selon les résultats des modèles de cultures utilisés, le changement climatique induirait des doses d'arrosage plus élevée et moins variable, ce qui entraîne une perte en rendement de 32% pour le climat future. L'effet de stress peut ainsi être plus accentué suite à l'augmentation de la demande en eau d'irrigation d'environ 14%.

### **3.3.2.2. Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 : le projet « R2D2 » :**

Le projet R2D2 étudie le bassin de la Durance – Verdon, qui est caractérisé par une grande diversité d'usages des eaux (hydroélectricité, agriculture, irrigation, alimentation en eau potable, baignade, industrie). L'objectif de ce projet est d'analyser les conséquences du changement climatique et de l'évolution démographique afin de proposer des stratégies d'adaptation socio-économique pour une gestion intégrée et durable de la ressource. En outre, ce projet a permis de réactualiser l'étude réalisée sur le Rhône (GICC - Rhône).

Les changements à l'horizon 2050 ont été analysés par comparaison aux valeurs du temps présent. Les évolutions climatiques pourraient induire des changements sur le régime hydrologique des cours d'eau, notamment une baisse notable du débit annuel.

Des scénarios socio-économiques pour le futur du territoire ont été construits, réinterprétés dans les modèles utilisés dans l'étude et combinés avec les évolutions climatiques, pour fournir une vision quantifiée des besoins en eau du territoire en 2050.

Des résultats sensiblement différents selon les scénarios socio-économiques étudiés, montrent que la demande en eau sur la Durance à l'horizon 2050 peut être satisfaite pour l'ensemble des usages préleveurs (eau potable et industrielle, irrigation, etc.) en moyenne annuelle et que la réalisation d'économies d'eau par la modernisation des périmètres d'irrigation conduit à une amélioration de la capacité à remplir les besoins pour le tourisme au niveau régional.

### **3.3.2.3. Etude De la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de « Basses eaux » :**

Cette étude réalisée par le BRL Ingénierie suite à une demande de l'agence de l'eau RMC, qui s'interroge sur l'évolution de la capacité du Rhône à satisfaire, en périodes d'étiage, tous ces usages (prélèvement pour l'eau potable, l'industrie ou l'irrigation, production hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, navigation, ...), conjointement avec une garantie du bon état des milieux aquatiques associés.

L'étude comporte six phases, on s'intéresse plutôt à méthodologie utilisée dans la phase 6, qui vise à étudier la sensibilité des étiages du Rhône à des scénarios de changement d'usage ou de la modification de la ressources basé sur des scénarios simplifiés d'évolutions possibles.

La construction de scénarios a été faite par croisement des hypothèses « prélèvements » et des hypothèses « ressources » (figure 10).

Pour les prélèvements on trouve trois hypothèses principales :

- Une situation de référence : prélèvements dans les conditions socio-économiques actuelles.
- Une situation de court-moyen terme (2030) : scénario comportant une augmentation de la population sans diminution de la consommation d'eau ni amélioration des réseaux.
- Une évolution à plus long terme : approcher une limite hausse possible de prélèvement

Concernant le changement de la ressource, la plupart des simulations projettent une baisse de la ressource moyenne annuelle, et vu les résultats très variables d'une projection à l'autre, ils se limitent dans cette étude à quelques chiffres à tester pour l'horizon « 2050-2060 ».

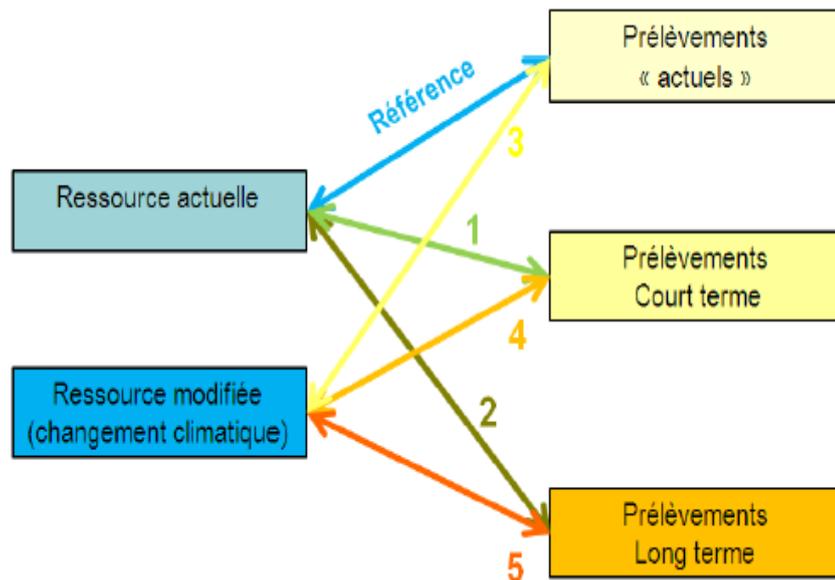


Figure 10 : Croisement des hypothèses

Ces scénarios ont été ensuite injectés dans le modèle utilisé pour cette étude afin d'étudier la sensibilité du système Rhône face à ces changements.

La validation des résultats a été faite sur les débits quinquennaux secs mensuels et l'Empreinte des usages sur la ressource au droit de 6 point du bassin versant.

En conclusion une baisse des débits du Rhône aval de 10 à 30% selon les mois et sous modification de la ressource est absolue qui devra être surveillée. Les changements de la ressource sont donc plus impactant que les prélèvements.

# Chapitre II :

## Données et Méthodes

### 1.1. Données climatique :

Le modèle J2000Rhône utilise en entrée, au pas de temps journalier, les forçages météorologiques suivants :

- Température moyenne de l'air à 2m,
- Précipitation totale (pluie + neige)
- Evapotranspiration potentielle de référence

Afin de pouvoir effectuer des simulations sous changement climatique avec le modèle J2000Rhône, et étudier la viabilité des pratiques d'irrigation en climat futur, il nous fallait des projections futures des variables d'entrée du modèle J2000Rhône, susnommées. Dans cette étude nous avons utilisé les fichiers de sorties en climat futur du modèle climatique CNRM-CM3 récupérés disponibles sur le site DRIAS de Météo-France, ces projections climatiques couvrent la période 2030-2100 sous trois scénarios d'intensité croissante de changement climatique : RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Les sorties sont aussi disponibles sur une période temps présent allant de 1970 à 2005.

les sorties de CNRM-CM3 contiennent plusieurs variables atmosphériques à une résolution spatiale de 8km × 8km : les températures minimale et maximale à 2m, la pluie et la neige, l'humidité spécifique à 2m, le rayonnement visible et infrarouge incident à la surface et la vitesse du vent à 2m. Ces variables sont utilisées pour construire les fichiers de forçage météorologique du modèle J2000Rhône.

Avant de conduire ces simulations en temps future on souhaite déjà s'assurer des performances du modèle CNRM-CM3 en climat présent, par comparaison à d'autres produits de référence existant sur la période récent (1970-2005). C'est l'objet de la partie suivante :

### 1.2. Données climatiques en période de référence:

L'objectif de cette partie est de comparer dans un premier temps les moyennes interannuelles des variables climatiques de la période de référence (modélisées par le modèle climatique CNRM-CM3) avec les données de la ré-analyse SAFRAN, mises à disposition par Météo France (température, précipitations), et disponible sur une période similaire.

La ré-analyse SAFRAN est un travail effectué par Météo France. Avec une résolution spatiale de 8km × 8km et au pas de temps horaire, ces données couvrent la France métropolitaine et renseignent sur chaque maille carrée (8×8km) les précipitations solides et liquide en mm, la température (°C), le rayonnement incident visible et infrarouge (w/m<sup>2</sup>), l'indice d'humidité relative et la vitesse du vent. Il est mis à disposition gratuitement pour dans le cadre de projets de recherche.

Une analyse montre que la résolution spatiale de la ré-analyse SAFRAN semble peu adaptée en zone montagneuse en raison du gradient orographique des précipitations. Cependant un autre produit « Spatialisation en Zone Montagneuse : SPAZM » de précipitations spatialisées et adaptée aux régions montagneuses a été développé par EDF sur une partie du territoire français à une résolution de 1km × 1km. L'utilisation de ce produit sur le bassin de la Durance a permis d'obtenir un meilleur bouclage des bilans d'eau.

Le forçage de précipitation utilisé auparavant pour la modélisation est un forçage hybride qui tire le meilleur parti de SAFRAN et SPAZM :

- Utilisation de SPAZM sur le bassin de la Durance agrégé sur la grille SAFRAN
- Utilisation de SAFRAN partout ailleurs

Pour la température et l'évapotranspiration potentielle de référence les données SAFRAN ont été utilisées sur toute la zone d'étude.

Les résultats de la comparaison sont présentés sous forme de cartes des moyennes interannuelles des trois variables : Température, précipitation et évapotranspiration pour la période de référence et des cartes des écarts de pluie et de température pour les périodes futures.

### **1.2.1. Températures et précipitations :**

Les moyennes interannuelles de températures et de précipitations ont été calculées sur la période 1985-2005. Les cartes de précipitations et de température de référence DRIAS et SAFRAN ne présentent pas de différences significatives.

Les précipitations varient de 500 et 2500 mm pour les deux produits (DRIAS et SAFRAN), tandis que les températures présentent une faible différence d'environ 0.6°C où les températures de la ré-analyse Safran varient entre -0.9 et 14.6 °C alors que les températures de référence DRIAS enregistrent une moyenne entre -1.96 et 1°C sur le sud-est de bassin versant et un maximum de 15°C

### **1.3. Données de prélèvements d'eau :**

Les redevances annuelles de prélèvements de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (RMC) sont consultables sur la période 1987 à 2012. Il s'agit d'une base de données pour lesquelles plusieurs prélèvements exprimés en milliers de mètres cube d'eau, sont déclarés par les pouvoirs publics, les industriels ou les agriculteurs. Ils sont majoritairement signalés sur une commune sans être précisément géo-référencés, et couvrent différents usages (irrigation, refroidissement industriel, alimentation en eau potable...).

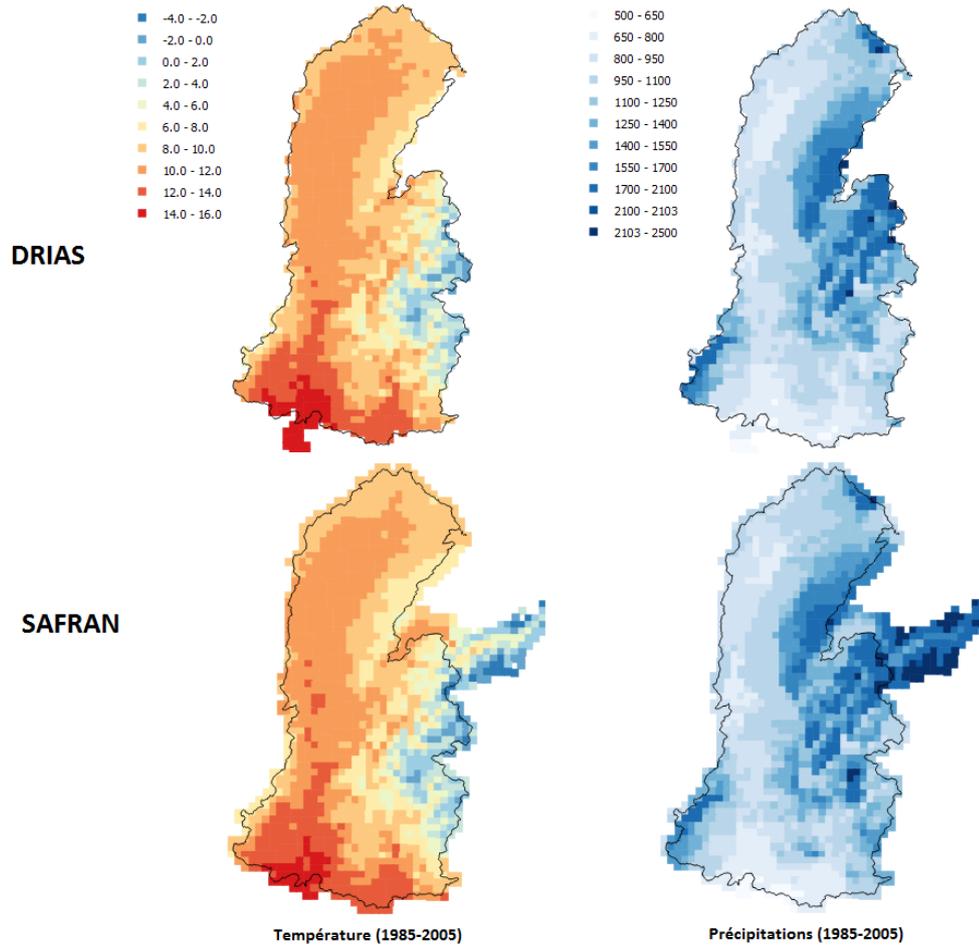


Figure 11 : Moyennes interannuelles de températures (à gauche) et de précipitations (à droite)

### 1.3.1. Evapotranspiration :

Les données des fichiers DRIAS ont été exploitées pour estimer évapotranspiration potentielle de référence  $ET_0$  selon la formule de Penman Monteith déclinée par la FAO en 1998 :

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \frac{(e_w - e)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Avec :

$R_n$  : rayonnement net

$G$  : flux de chaleur du sol

$\rho_a$  : densité moyenne de l'air

$C_p$  : chaleur spécifique d'air

$\lambda$  : chaleur latente de changement d'état (2450KJ/kg)

$e$  : tension de vapeur à la température  $t$

$e_w$  : tension de vapeur saturante à la température  $t$

$\Delta$  : la pente de la courbe de tension de vapeur saturante

$r_a$  : la résistance aérodynamique  
 $r_s$  : la résistance du couvert végétal  
 $\gamma$  : la constante psychrométrique

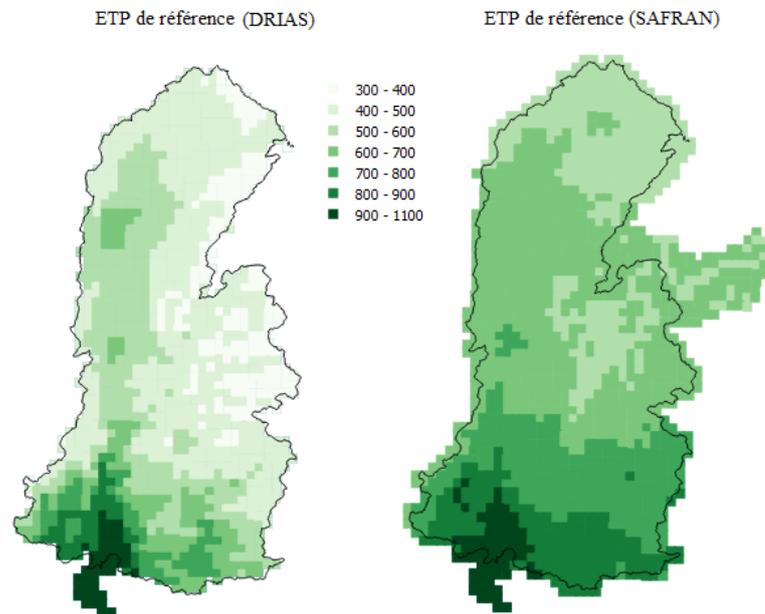


Figure 12 : Moyennes interannuelles des évapotranspirations potentielles de référence (SAFRAN et DRIAS) sur la période 1985-2005.

Les résultats obtenus pour l'évapotranspiration potentielle montrent qu'il existe de différence significative entre les variables modélisées et observées. L'évapotranspiration de référence Safran est plus importante que celle du produit DRAIS.

Sur la période 1985-2005, SAFRAN et DRIAS présentent donc peu de différences sur les variables d'intérêt pour la modélisation dans J2000Rhône. On peut donc considérer le forçage DRIAS comme valide pour notre modélisation en temps présent, nous le considérerons comme REFERENCE.

La modélisation en temps futur utilisera les sorties du même modèle CNRM-CM3, mais pour des horizons temporels compris entre 2030 et 2100, ces sorties seront comparées à la REFERENCE.

#### 1.4. Données climatiques périodes futures :

Le travail sur la période future consiste à déterminer une évolution des variables climatiques. Pour cela il convient de comparer les valeurs simulées dans le futur aux valeurs de la période de référence,

Pour le suivi de l'évolution des paramètres, nous avons choisi de présenter les résultats sous la forme de cartes des écarts de variables pour les différentes périodes étudiées.

### 1.4.1. Température :

Les résultats sont présentés sous forme de cartes des écarts bruts pour les trois scénarios. Pour les périodes futures, les écarts sont représentés à travers un gradient de rouge allant du blanc (faible écarts positifs) au rouge foncé (forts écarts positifs).

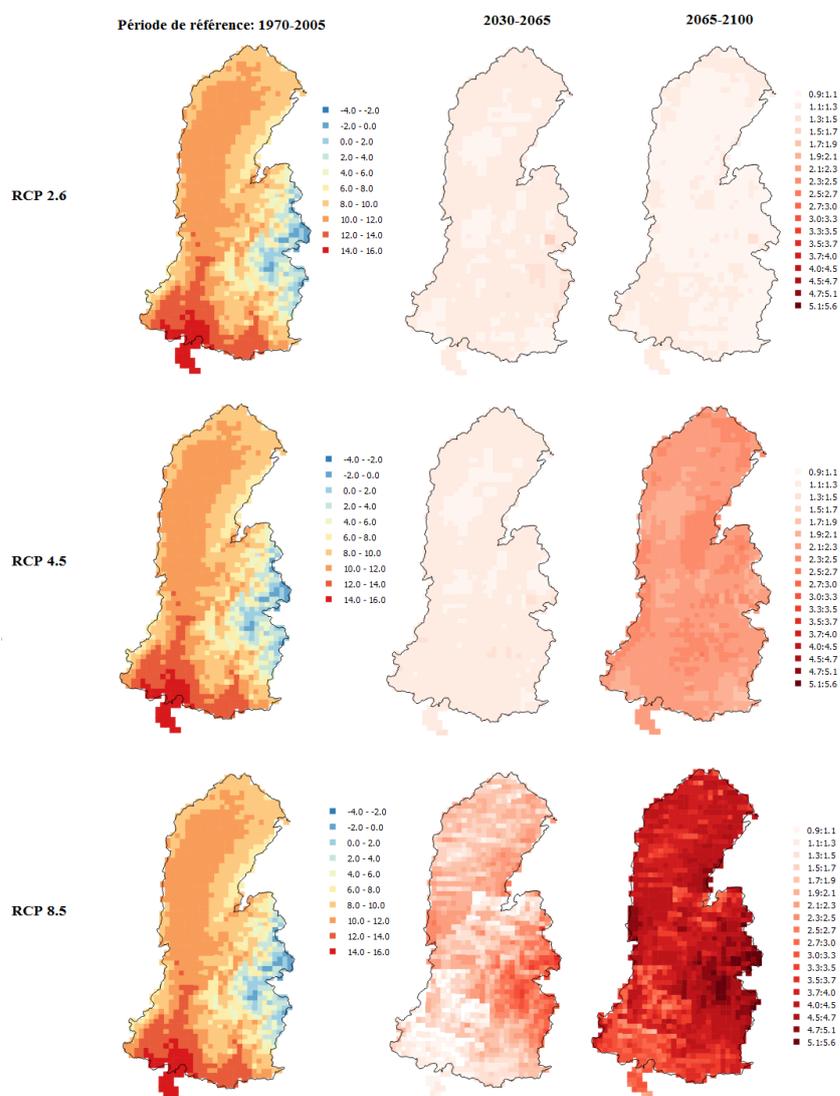


Figure 13 : Cartes des écarts bruts de température interannuelle moyenne

Les cartes de la figure 13 montrent une augmentation des écarts de températures avec une évolution croissante entre la période 2030-2065 et 2065-2100 pour les trois scénarios. Concernant le scénario RCP2.6 pour lequel le réchauffement se stabilise, on observe un écart de 1°C en moyenne, tandis que pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 on constate des écarts allant jusqu'à 4 à 5 °C en zone montagneuses.

### 1.4.2. Précipitation :

Pour les précipitations les couleurs claires représentent un déficit négatif entre les valeurs futures et celles de la période de référence tandis que le bleu foncé représente un écart positif important.

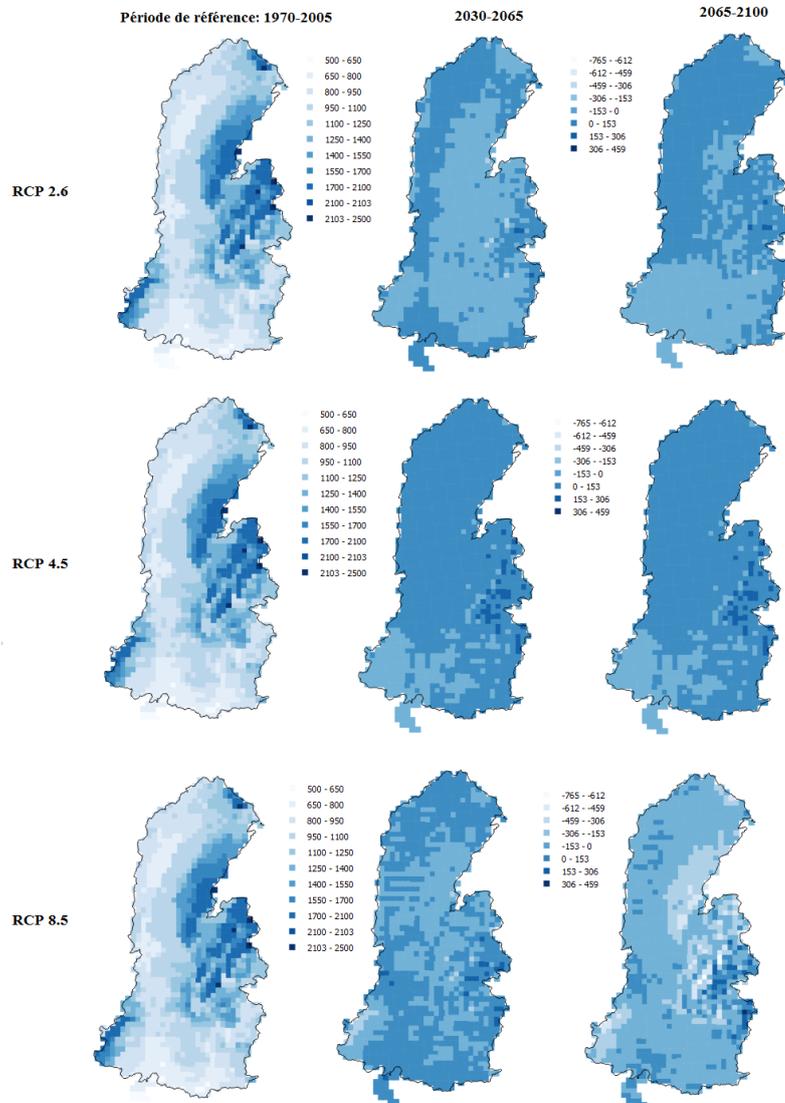


Figure 14 : Cartes des écarts bruts des cumuls de pluie interannuelle moyenne

Les écarts de pluies moyennes interannuelles pour les deux périodes étudiées montrent une diminution des pluies projetées dans le futur. La distribution est assez comparable pour les deux périodes, ainsi que pour les trois scénarios.

Cependant, pour la période 2065-2100, le scénario RCP4.5 présente une très légère tendance à l'augmentation. Les différences négatives de précipitations les plus marquées se situent sur les régions les plus pluvieuses de la période de référence.

## **1.5. Modélisation :**

Dans un premier temps les simulations sont réalisées avec le modèle J2000Rhône sans prendre en considération l'influence anthropique afin d'étudier l'effet du changement climatique sur le régime hydrologique naturel du bassin versant. Les résultats sont présentés dans le chapitre III.

La deuxième étape était de réaliser ces simulations sous changement climatique et en prenant en compte l'irrigation.

### **1.5.1. Module d'irrigation :**

Pour cela l'équipe de l'unité de recherche HHLV-IRSTEA au centre de Lyon-Villeurbanne a implémenté un module de gestion pour le calcul des besoins en eau d'irrigation dans le modèle J2000Rhône, qui repose sur des données du Recensement Général de l'Agriculture 2010 (RGA2010). Ces données indiquent pour chaque cantons le nombre et la surface totale et irriguée des exploitations pour tout type de culture et ces données ont été agrégées à l'échelle de canton et par grand type de culture.

Trois types d'irrigation sont représentés, chacun de ces types représentant une façon différente d'apporter l'eau au sol, que nous avons traduit dans la modélisation :

- Gravitare : 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
- Aspersión : l'eau est projetée sur une partie du feuillage des cultures. Elle est donc ajoutée à la pluie dans notre modélisation, et peut donc être interceptée par le feuillage,
- Goutte-à-goutte : l'eau d'irrigation parvient à la plante directement au niveau racinaire : elle est donc directement ajoutée à la réserve utile du sol dans le module d'irrigation

Le prélèvement en eau pour l'irrigation est destiné à couvrir les besoins en eau des plantes. Dans le modèle J2000-Rhône, un prélèvement effectué dans un brin de rivière irrigue les HRUs du sous bassin versant immédiatement drainé par ce brin (Figure15). Pour ce faire, le besoin en eau des plantes est agrégé par sous bassin dans le modèle. Le prélèvement s'effectue dans la mesure de l'eau disponible dans le brin de rivière.

Les pertes en ligne dans les conduites d'alimentation sont révisées par un coefficient de d'efficacité qui en compte les fuites du réseau et de l'hétérogénéité des rendements (tableau 1)

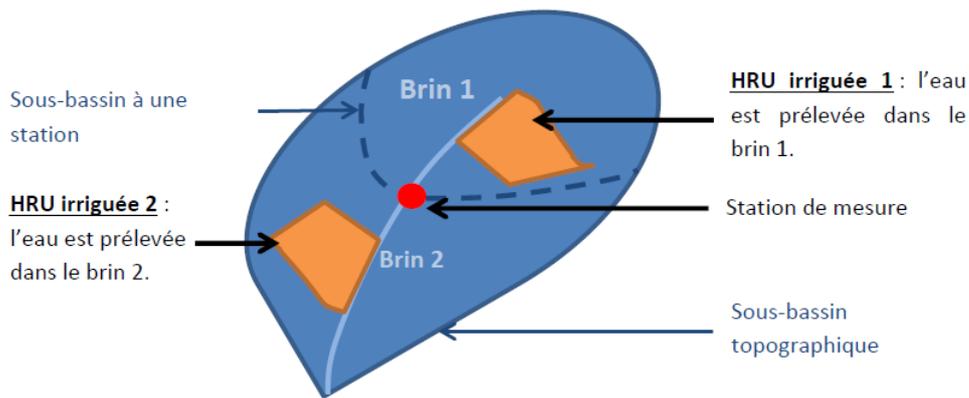


Figure 15 : Prélèvement de l'eau de l'irrigation dans un maillage incluant des sous bassins topographiques et des sous bassins aux stations

Tableau 1 Efficacité des systèmes d'irrigation (Source : [http://www.wikiwater.fr/e52-les-techniques-d-irrigation.html#outil\\_sommaire\\_5](http://www.wikiwater.fr/e52-les-techniques-d-irrigation.html#outil_sommaire_5))

Technique d'irrigation	Efficacité potentielle (%)
Inondation	40-50
Ruissellement	55-70
Arroseur rotatif	65-80
Canon d'arrosage	60-65
Goutteurs	80-95
Micro-aspersion	80-90

Le déclenchement de l'irrigation obéit aux périodes d'irrigation spécifiée pour chaque type de culture du fichier *landuse.par*, et le seuil de déclenchement de l'irrigation est fondé sur le ratio entre l'évapotranspiration réelle calculée par le modèle et l'évapotranspiration maximale.

Sur le bassin du Rhône, les principales cultures irriguées sont :

- Le maïs : dominant dans la vallée du Rhône
- Le maraîchage : principalement en Haute Saône
- Les prairies, vergers et cultures de blé localisées principalement de la haute à la basse vallée de la Durance

### 1.5.1.1. *L'indice de stress hydrique : « Water Stress Index » :*

Cet indice exprime l'intensité des prélèvements d'irrigation appliqué sur la ressource en eau de rivière. Le (wsi) a été calculé sur les HRUs irriguées contenues dans les cantons sélectionnés, on le définit comme le ratio de la demande moyenne mensuelles à la ressource moyenne mensuelle disponible, on considère ici que la demande est le besoin en eau des plantes, et la ressources est le débit simulé des brins de rivière dans lequel l'eau est prélevée plus la quantité d'eau qui s'infiltré dans le réservoir RG1 (ressource souterraine). Plus la demande est supérieure à la ressource disponible plus l'indice est important et plus en est stress hydrique.

$$wsi \% = \frac{\text{la demande}_{\text{simulée}}}{\text{la ressource disponible}_{\text{simulée}}} \times 100$$

### 1.5.1.2. *Le nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite:*

Sur les chroniques journalières des prélèvements d'irrigation simulés par J2000Rhône, on a identifié les jours où le besoin en eau d'irrigation est supérieur à la capacité d'irrigation, puis à partir le nombre de ces jours on calcule le nombre moyen annuel sur toute la période : *nombre de jours en moyenne annuelle où la demande n'est pas satisfaite (Nbj<sub>moy</sub>)*.

L'indice est donc le retio de *Nbj<sub>moy</sub>* au nombre de jours d'irrigation par an spécifique pour chaque type de culture dans le fichier *landuse.par*. Cet indice a été calculé sur la période de référence (1970-2005) ainsi que la période future (2030-2100).

$$ind\% = \frac{Nbj\ moy}{\text{nombre de jours total de l'irrigation par an}} \times 100$$

## Chapitre III :

### Résultats

Comme expliqué dans le chapitre II le modèle est forcé par les différentes variables climatiques : précipitations, température et évapotranspiration de référence issues du modèle climatique CNRM-CM3 de Météo France.

On présente dans cette partie les résultats des simulations effectuées sur la période de référence et les différentes périodes futures pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5

#### *Données de validation hydrologique*

On dispose aussi des chroniques de débits moyens journaliers. Le dispositif de suivi est constitué de 233 stations hydrométriques d'observation (actives et non actives) (figure 16) réparties sur tout le bassin versant et sur une période de mesure de 27 ans (1985-2012).

Les chroniques des débits observés sur les 233 stations hydrométriques proviennent de la Banque HYDRO. Ces chroniques seront ensuite comparées aux valeurs simulées pour valider les résultats obtenus.

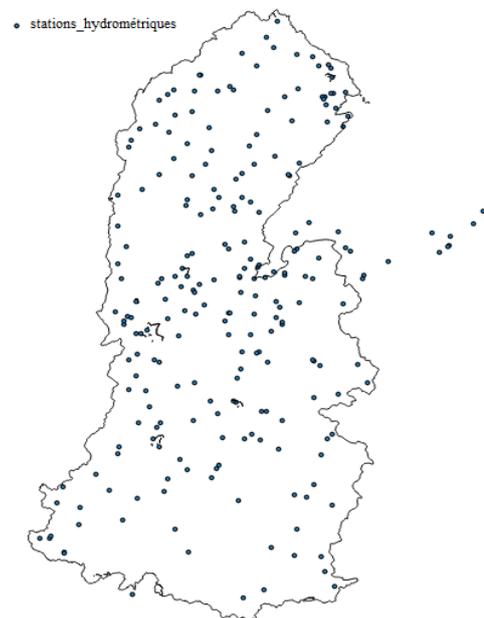


Figure 16 : Réseau hydrométrique du bassin du Rhône

## 1. Temps présent et changement climatique:

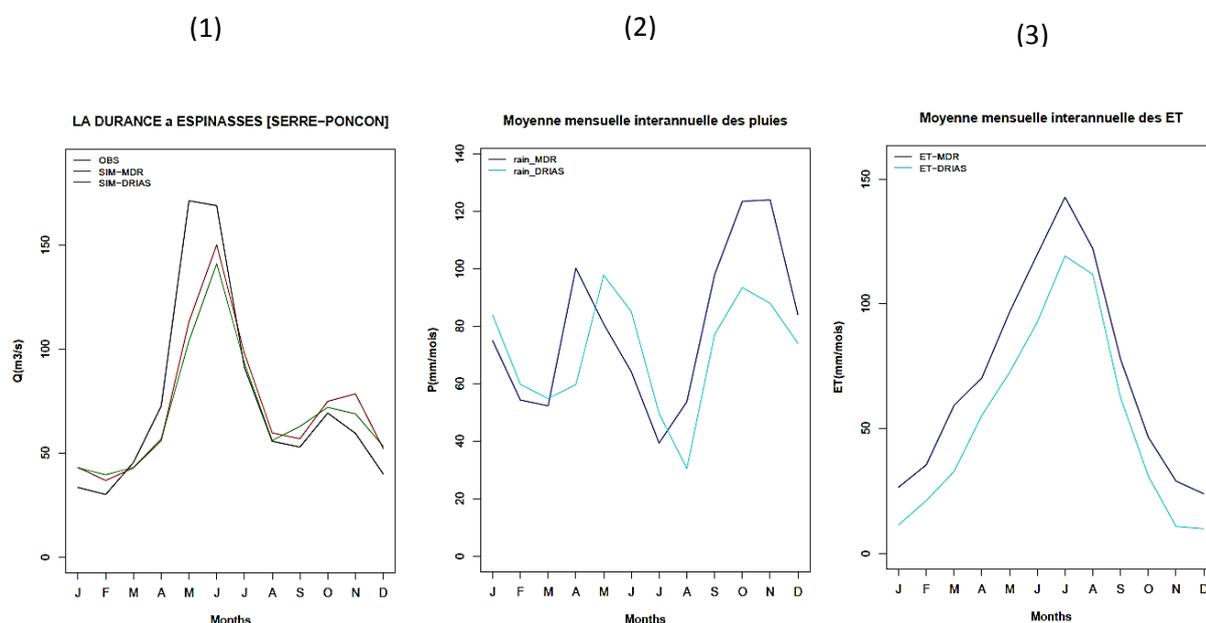
Afin d'étudier la performance du modèle J2000Rhône sous changement climatique, nous tenons à représenter dans cette partie, les résultats de trois stations représentatives de différentes zones du bassin versant:

- La Durance à Espinasses - Serre Ponçon - qui représente les zones montagneuses
- La Tille à Crécey qui représente les petits bassins du Val de Saône
- Le Rhône à Valence qui représente les grands bassins à l'aval.

Dans un premier temps on compare les résultats des simulations réalisées sur la période de référence (1985-2005) avec des forçages climatiques des deux produits (SAFRAN et DRIAS) avec les données observées afin d'évaluer les performances du modèle en terme de débits moyens mensuels et interannuels.

Les données simulées dans les périodes futures seront ensuite comparées avec les simulations de référence DRIAS, pour évaluer l'évolution du régime hydrologique en terme de saisonnalité pour les débits, précipitations et évapotranspirations réelles calculées par le modèle J2000Rhône dans les trois stations sélectionnées.

### 1.1. Zone montagneuse – La Durance à Espinasses - Serre Ponçon - :



**Figure 17 : (1) Moyenne interannuelle des débits mensuels observés et simulés (avec les forçages climatiques DRIAS en vert et les forçages de la ré-analyse SAFRAN en rouge) sur la période 1985-2005 (2) Moyenne interannuelle des précipitations mensuelles pour la station La Durance à Espinasses - Serre Ponçon - sur la période 1985-2005 (3) Moyenne interannuelle des évapotranspirations réelles mensuelles calculées par J2000Rhône pour la station La Durance à Espinasses - Serre Ponçon - sur la période 1985-2005**

Les figures 17 montrent que le modèle reproduit correctement la saisonnalité, les courbes de référence DRIAS suivent les mêmes tendances que la courbe de référence SAFRAN, avec une sous-estimation des pointes de débit qui correspond aux fontes des neiges au printemps et un écart négatif de 20 à 30 m<sup>3</sup>/s. Les précipitations et l'évapotranspiration réelle calculée par le modèle présentent un décalage saisonnier des pics d'un mois. La figure (18) montre que les écarts de précipitations sont alternativement positifs et négatifs selon les mois et le scénario.

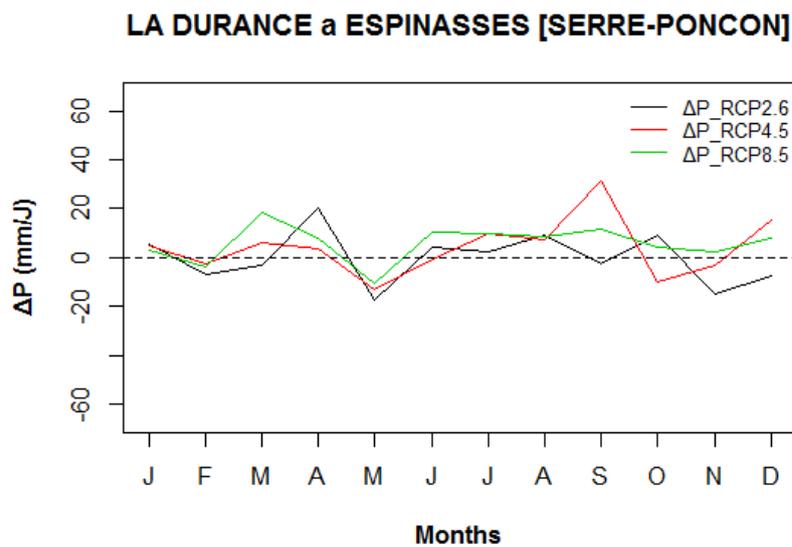


Figure 18 : Ecart précipitations (simulation de future-simulation de présent)

Pour les périodes futures, le modèle J2000Rhône reproduit correctement la dynamique saisonnière pour l'horizon proche (2030-2065) et lointain (2065-2100).

On note que sur la première période le pic de pointe du scénario RCP4.5 s'approche de celui de référence, et il est plus important que les pics des autres scénarios (RCP2.6 et RCP8.5) avec un écart positif de l'ordre 20 à 30 m<sup>3</sup>/s. On rappelle que le RCP4.5 est proche du vieux scénario A1 qui correspond à un équilibre de la ressource (chapitre I section 3).

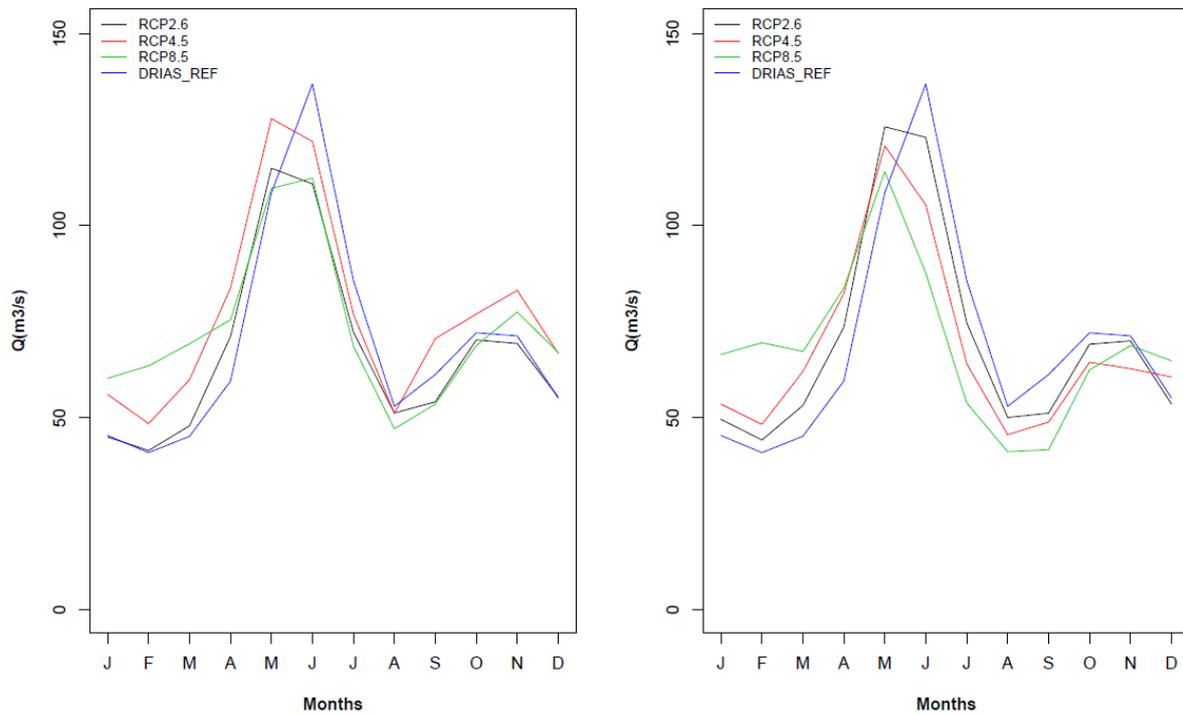


Figure 19 : Moyenne interannuelle des débits mensuels simulés (avec les forçages climatiques DRIAS) sur la période de référence et les périodes futures pour la station Durance Serre Ponçon

Pour mieux comprendre l'évolution future, nous avons à notre disposition les résultats des simulations futures effectuées sur cette station dans le rapport R2D2 (chapitre I, section 3).

Des écarts de l'évapotranspiration réelle ont été calculés sur la période 2030-2065 (même période future que R2D2), les résultats de comparaison sont représentés sur la figure (20) (pour R2D2) et la figure (21) (pour J2000Rhône)

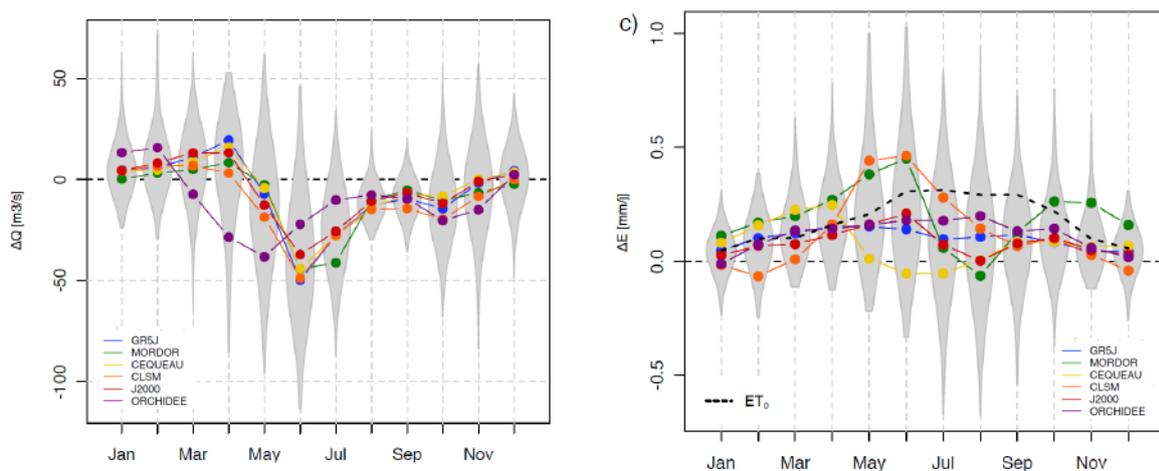


Figure 20 : Comparaison entre les différents modèles hydrologiques utilisés dans R2D2 des changements mensuels de débits (à gauche) et d'évapotranspiration (à droite)

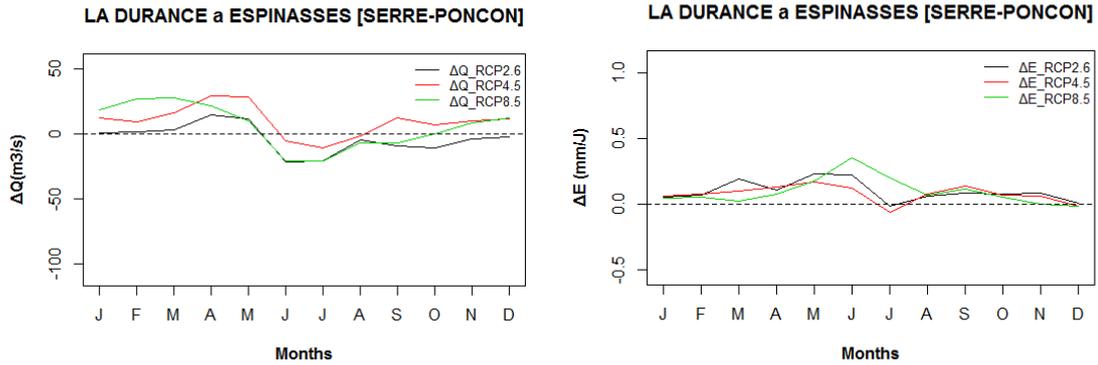


Figure 21 : Comparaison entre les différentes simulations de J2000Rhône (selon les scénarios RCP utilisés) des changements mensuels de débits (à gauche) et d'évapotranspiration (à droite)

Ces écarts ont le même ordre de grandeur pour les deux études.

Au pas de temps mensuel, l'effet du changement climatique se traduit sur la Durance à Serre-Ponçon par une baisse des débits mensuels de mai à décembre et une hausse de janvier à avril, ainsi qu'une augmentation des évapotranspirations pour les trois scénarios (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5).

## 1.2. Petits bassins du Val de Saône La Tille à Crécey:

Pour le cycle saisonnier un écart positif entre les deux simulations est ainsi observé et une surestimation des débits sur tous les mois de l'année. Un décalage saisonnier des pics est aussi observé sur les graphiques de précipitations moyennes interannuelles

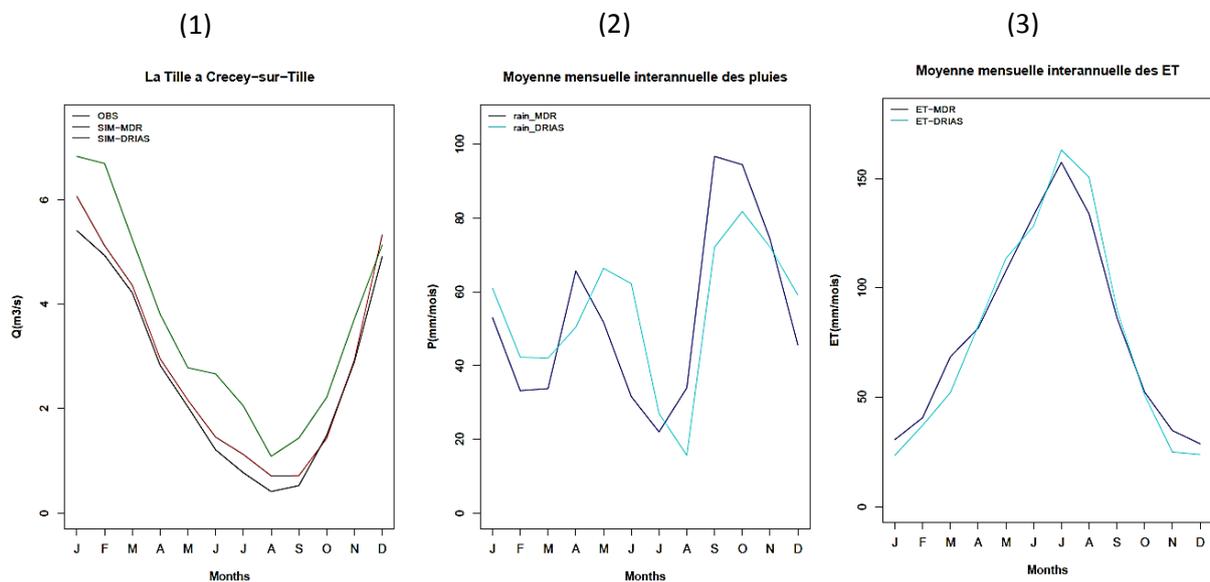
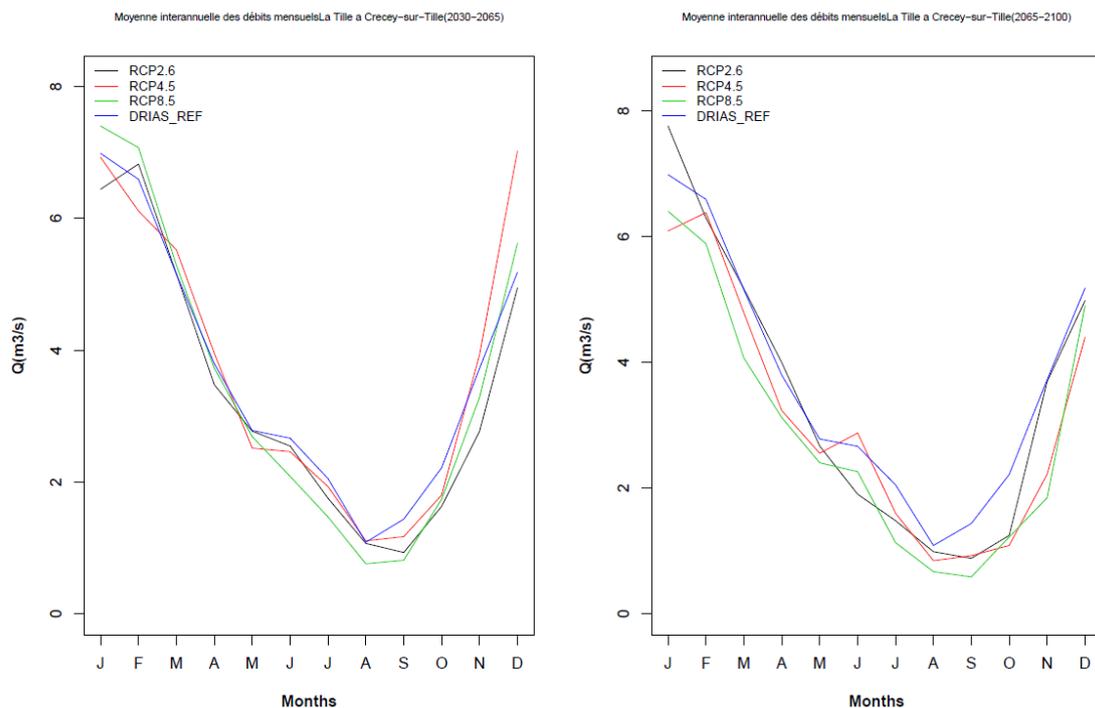


Figure 22 : (1) Moyenne interannuelle des débits mensuels observés et simulés (avec les forçages climatiques DRIAS en vert et les forçages de la ré-analyse SAFRAN en rouge) sur la période 1985-2005 pour la station La Tille à Crécey (2) Moyenne interannuelle des précipitations mensuelles pour la station La Tille à Crécey sur la période 1985-2005 (3) Moyenne interannuelle des évapotranspirations réelles mensuelles calculées par J2000Rhône pour la station La Tille à Crécey sur la période 1985-2005

Les résultats de la première période future 2030-2065 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**(figure23) montrent que :

- Pour le scénario RCP2.6 qui représente le scénario le plus pessimiste on a le même ordre de grandeurs que pour la période de référence de février jusqu'à août puis une baisse des débits sur le reste de l'année.
- Pour le scénario extrême RCP8.5 le plus pessimiste, on observe un étiage plus important que pour les autres scénarios.

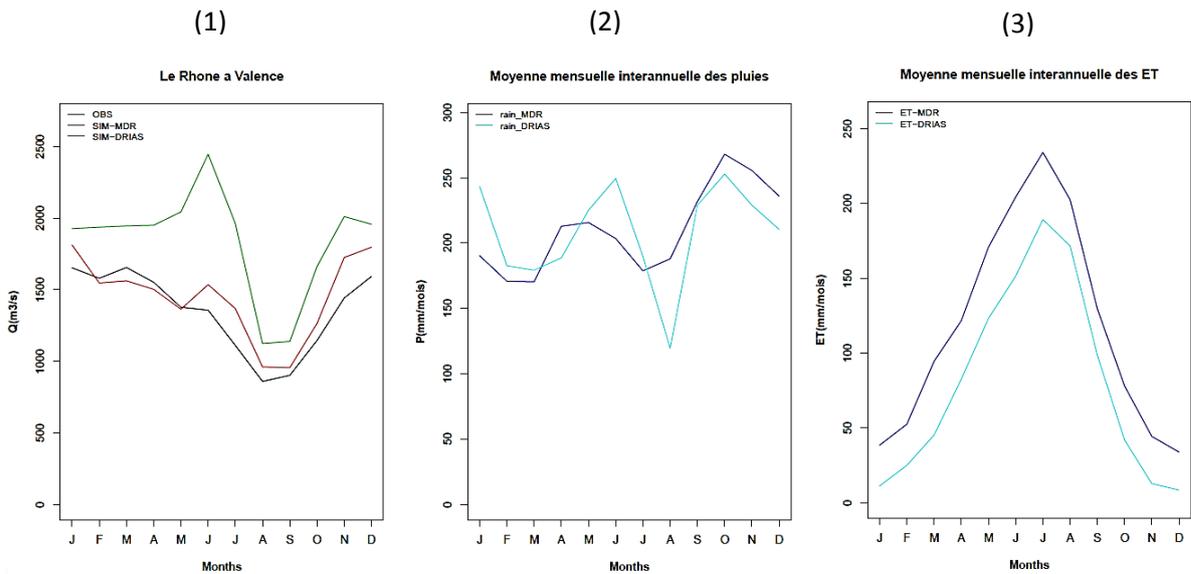
Sur la deuxième période future 2065-2100 on constate des étiages plus au moins importants selon les scénarios (du plus optimiste -RCP2.6- au plus pessimiste -RCP4.5-).



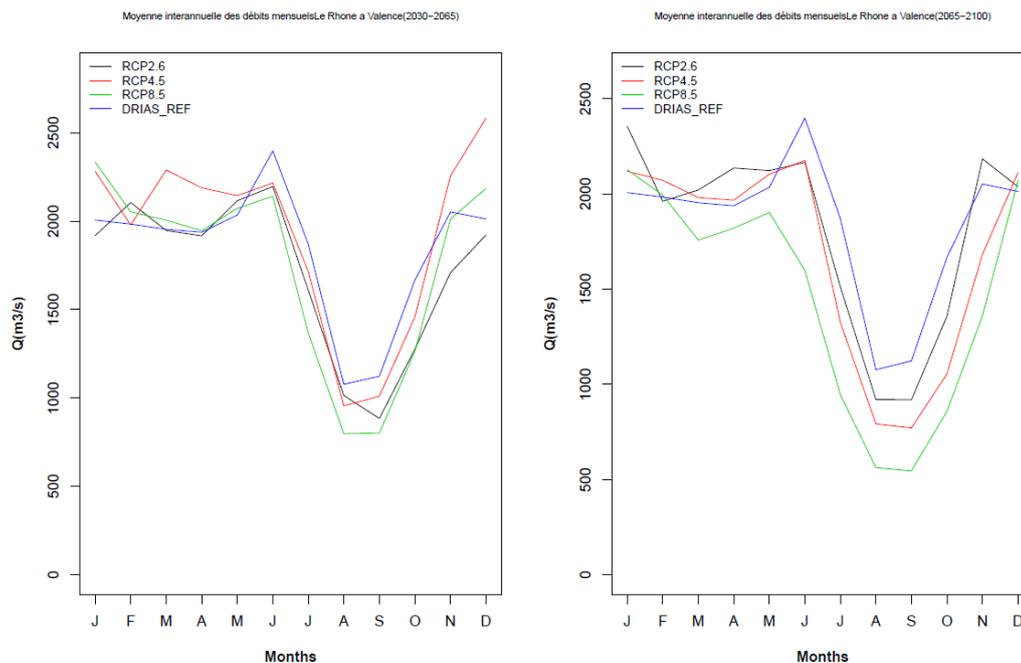
**Figure 23 : Moyenne interannuelle des débits mensuels simulés (avec les forçages climatiques DRIAS) sur la période de référence et les périodes futures pour la station : La Tille à Crécey**

### 1.3. Grands bassins à l'aval - le Rhône à Valence :

La saisonnalité des débits est aussi surestimée sur tous les mois de l'année (figure 24). Le décalage d'un mois des précipitations et l'écart négatif des évapotranspirations réelles calculées par le modèle J2000Rhône avec les forçages DRIAS est ainsi observé sur ce bassin.



**Figure 24 : (1) Moyenne interannuelle des débits mensuels observés et simulés (avec les forçages climatiques DRIAS en vert et les forçages de la ré-analyse SAFRAN en rouge) sur la période 1985-2005 pour la station le Rhône à Valence (2) Moyenne interannuelle des précipitations mensuelles pour la station le Rhône à Valence sur la période 1985-2005 (3) Moyenne interannuelle des évapotranspirations réelles mensuelles calculées par J2000Rhône pour la station le Rhône à Valence sur la période 1985-2005**



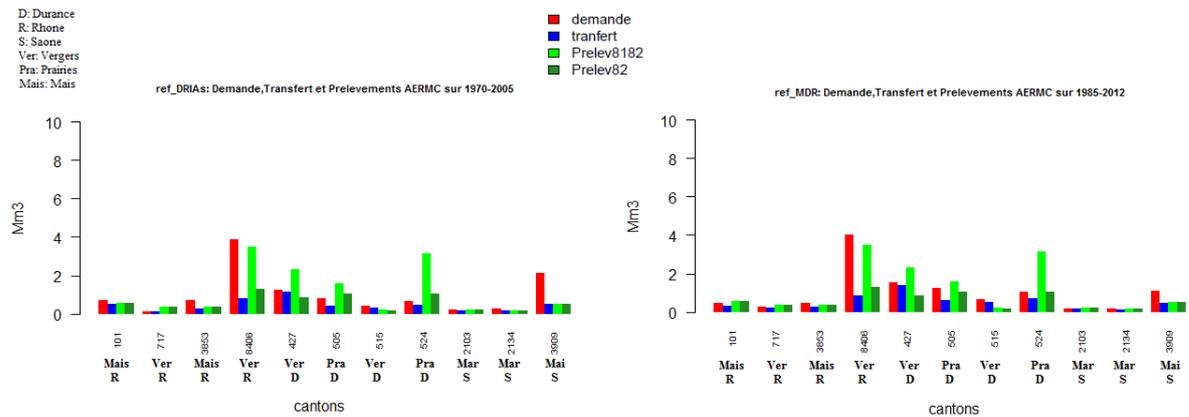
**Figure 25: Moyenne interannuelle des débits mensuels simulés (avec les forçages climatiques DRIAS) sur la période de référence et les périodes futures pour la station : le Rhône à Valence**

## 2. Irrigation :

Nous comparons dans cette section, la demande et les transferts d'eau pour l'irrigation simulés par le modèle J2000Rhône avec les forçages climatiques DRIAS aux prélèvements comptabilisés par l'Agence de l'eau. La demande et le transfert sont respectivement le besoin en *eau des plantes* majoré pour palier à une efficacité des réseaux inférieure à 1, et *l'irrigation modélisée*.

Les résultats de comparaison des moyennes interannuelles sur la période de référence sont présentés sur la figure (26) pour les deux produits (DRIAS et SAFRAN). Nous avons choisi de représenter les cantons où la demande et le transfert simulés à partir des forçages climatiques SAFRAN ont des moyennes interannuelles proches et inférieures aux prélèvements de l'agence de l'eau : de telles valeurs laissent espérer une modélisation correcte de l'irrigation sur ces cantons. On représente au total, 4 cantons sur le sous-bassin du Rhône, 4 cantons sur le sous-bassin de la Durance et 3 sur le sous-bassin de la Saône. Le type de culture de chaque canton est mentionné sur les graphiques.

Les résultats obtenus pour la période de référence (forçages SAFRAN et DRIAS), sont très proches. On a constaté que les cantons où les prélèvements simulés sont de beaucoup supérieurs aux prélèvements calculés (cantons 3909 et 8406 par exemple) prélèvent l'eau sur des petits affluents.



**Figure 26 : Comparaison du besoin en eau des plantes (Demande) et de l'irrigation modélisée (Transfert) aux prélèvements de l'Agence de l'eau sur 1970-2005**

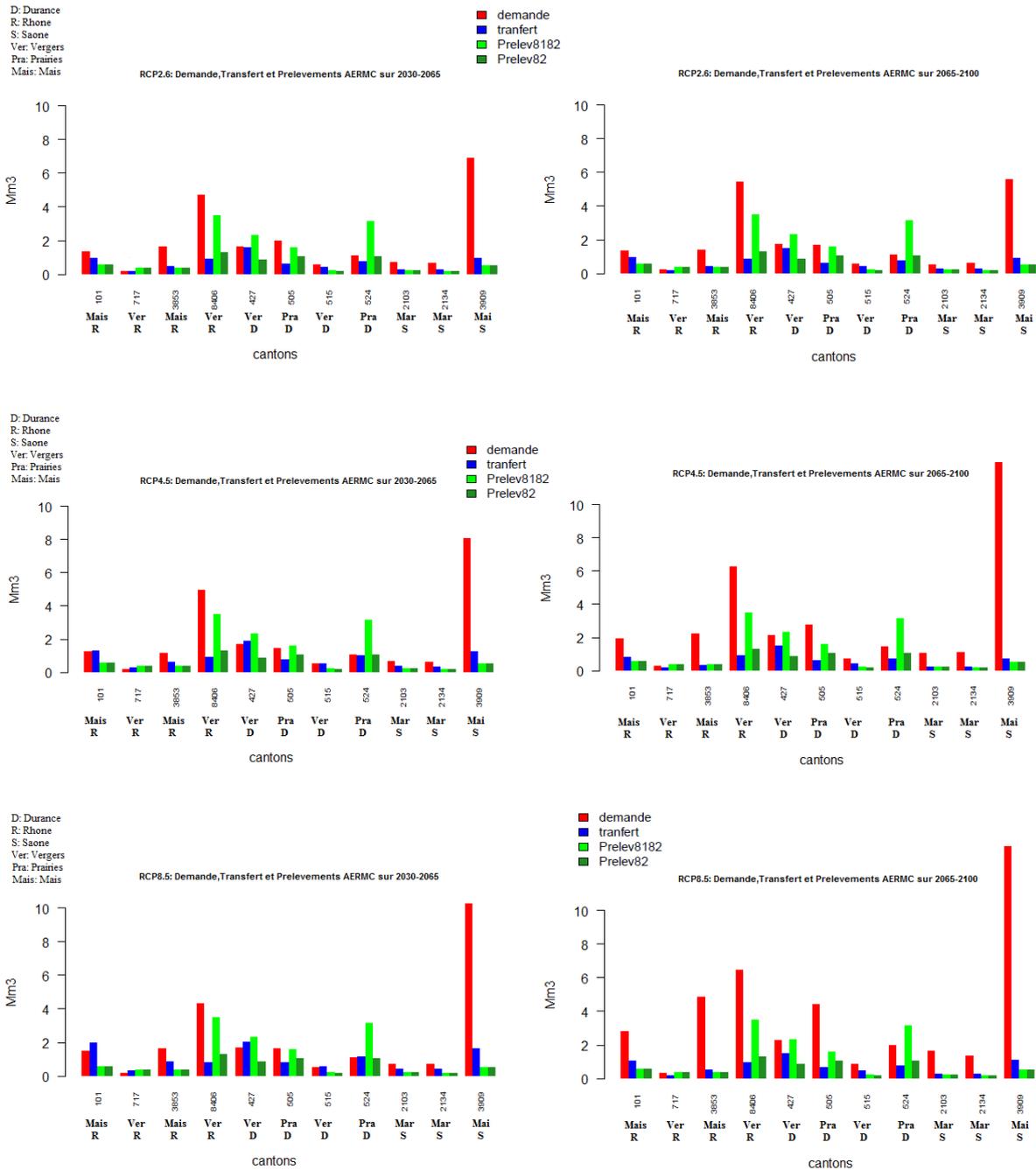


Figure 27 : Comparaison du besoin en eau des plantes (Demande) et de l'irrigation modélisée (Transfert) aux prélèvements de l'Agence de l'eau sur 2030-2065 (à gauche) et 2065-2100 (à droite)

Les prélèvements simulés ont été calculés sur deux périodes futures (2030-2065) et (2065-2100). On constate que :

- les prélèvements sont plus importants sur l'horizon lointain (2065-2100)
- ils sont de plus en plus forts en allant du scénario le plus optimiste (RCP2.6) au plus pessimiste (RCP8.5)

Afin de simplifier et mieux comprendre les résultats des simulations d'irrigation, les deux indices représentés dans le chapitre II section 2.2 (wsi et ind) ont été calculés, les résultats obtenus sont représentés ci-dessous :

## 2.1. Indicateur de stress hydrique : « Water Stress Index » :

On a choisi de représenter les résultats de cette partie sur des cartes pour localiser les HRUs où on a constaté un stress hydrique.

Les couleurs sur les barres, nous renseignent sur le degré de stress sur chaque HRU. La couleur rouge désigne un stress sévère tandis que la couleur bleu désigne une absence de stress calculé sur le moi.

On observe sur la même HRU, qu'on n'a pas de stress sur la période actuelle, et que la tension augmente on allant du scénario le plus optimiste (RCP2.6) au plus pessimiste (RCP8.5).

La période de stress hydrique est toujours entre Mai et Septembre, ce qui correspond au période de l'irrigation dans l'année.

On observe qu'on a plus de tension sur les HRUs situés en amont des petits affluents (exemple : HRU 2332 sur le sous-bassin de la Saône figure (28) et HRU8246 sur le sous-bassin du Rhône figure (29)).

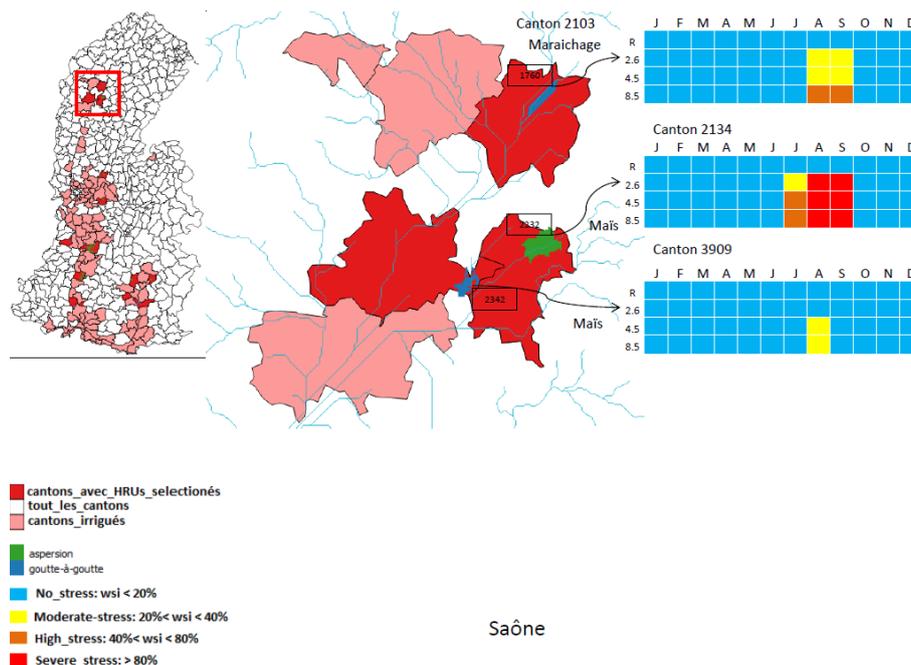


Figure 28 : Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés sur le sous-bassin de la Saône

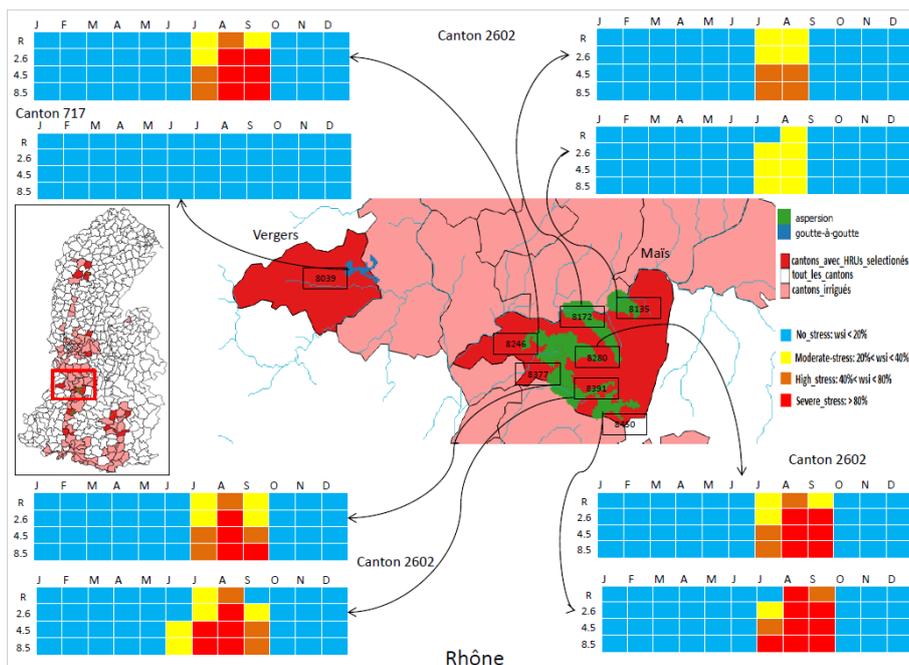


Figure 29 : Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés sur le sous-bassin du Rhône

Sur un exemple sur le sous-bassin de la Durance (figure 30), on constate que le type d'irrigation influence le degré de stress, la tension est plus importante sur les HRUs irrigués en aspersion (HRUs : 9700 et 9654).

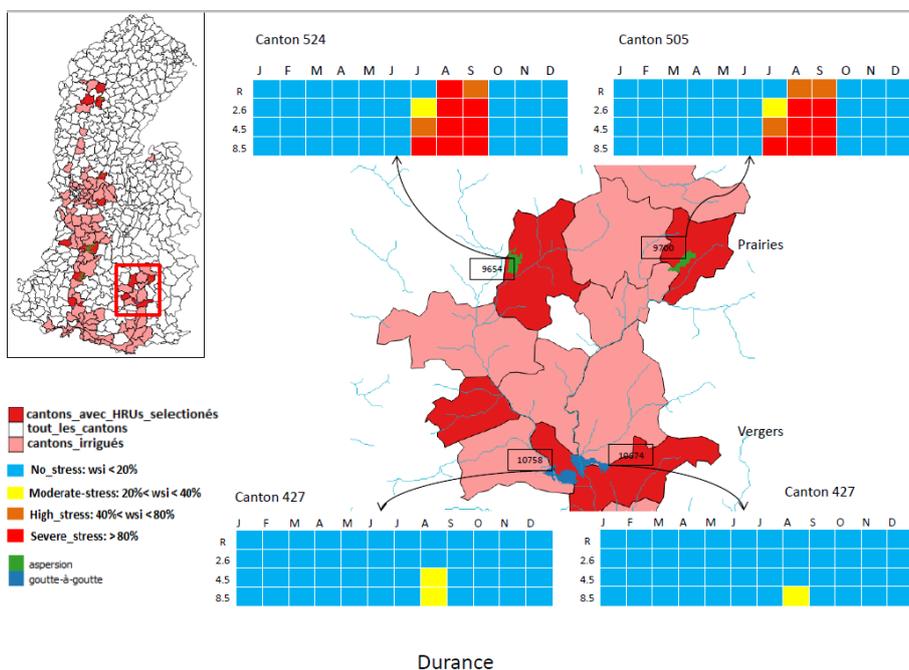


Figure 30 : Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés sur le sous-bassin de la durance

Ce qu'il nous a conduit à refaire les simulations en changeant le type d'irrigation en goutte à goutte sur les HRUs sélectionnés. Les résultats (figure 31, 32, 33) de ces simulations montrent globalement :

- Une disparition de la tension hydrique sur les simulations de scénario RCP2.6
- Une diminution de stress sur les simulations des scénarios RCP4.5 et RCP8.5

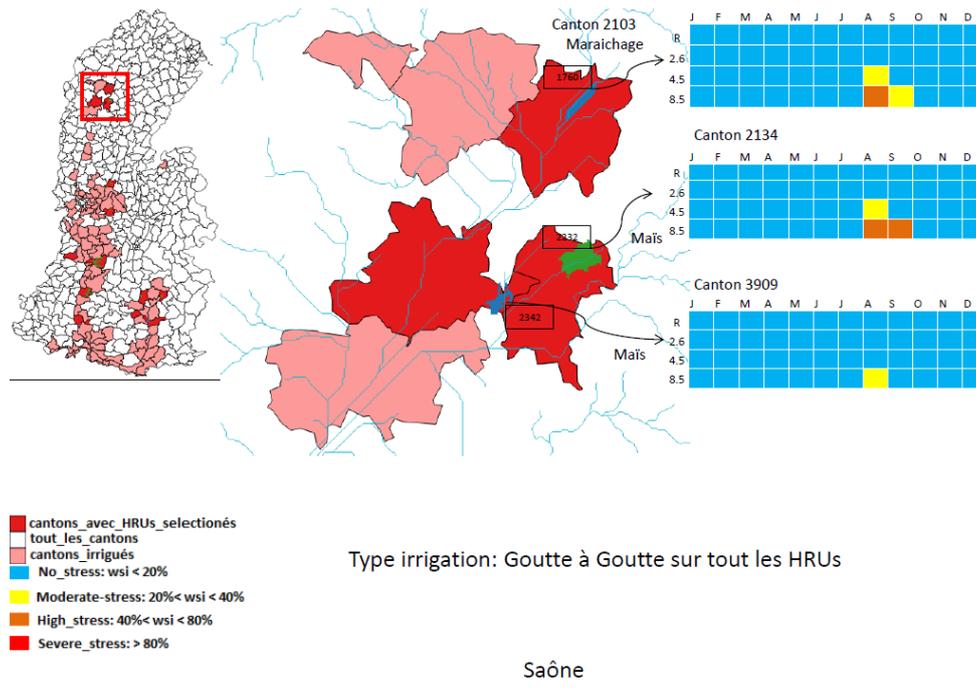


Figure 31: Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés irrigués en aspersion sur le sous-bassin de la Saône

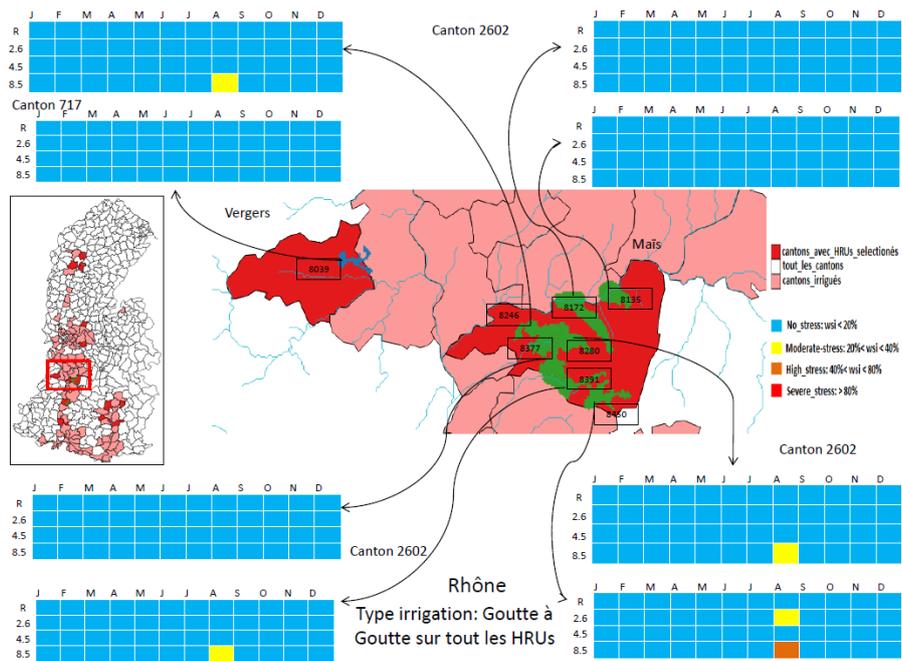


Figure 32: Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés irrigués en aspersion sur le sous-bassin du Rhône

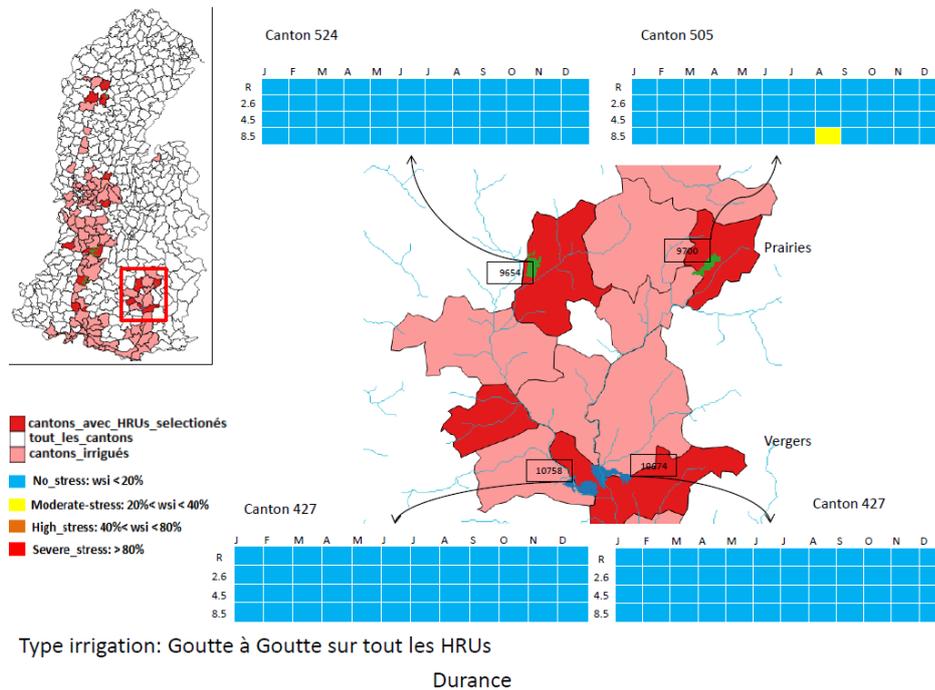


Figure 33: Stress hydrique actuel (1970-2005) et évolutions futures (2030-2100) avec localisation des HRUs sélectionnés irrigués en aspersion sur le sous-bassin de la Durance

## 2.2. Le nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite:

Les résultats de calculs de nombre de jours où la demande n'est pas satisfaite sont représentés sur des graphiques de comparaisons entre les résultats de période de référence (1970-2005) et les deux périodes futures (2035-2065) et (2065-2100).

Globalement le nombre de jours où la demande n'est pas satisfaite est plus important sur les HRUs qui prélèvent l'eau sur des petits affluents. Sur ces derniers le nombre de jours où la demande n'est pas satisfaite calculés sur les chroniques des simulations de scénario RCP2.6 est supérieur ou égal au le nombre de jours où la demande n'est pas satisfaite calculés sur les chroniques des simulations des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 à l'horizon proche (2035-2065).

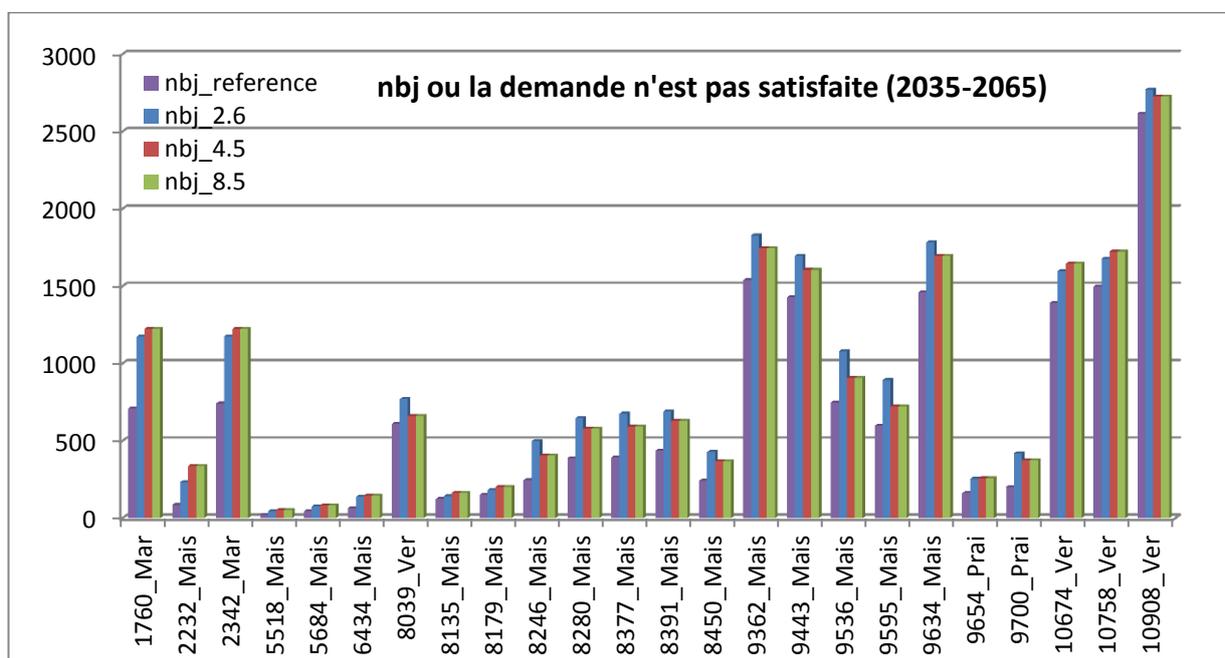


Figure 34 : Comparaison du nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé en période de référence au nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé sur la période future (2035-2065)

A l'horizon lointain ce nombre de jours est plus élevé pour les simulations des scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

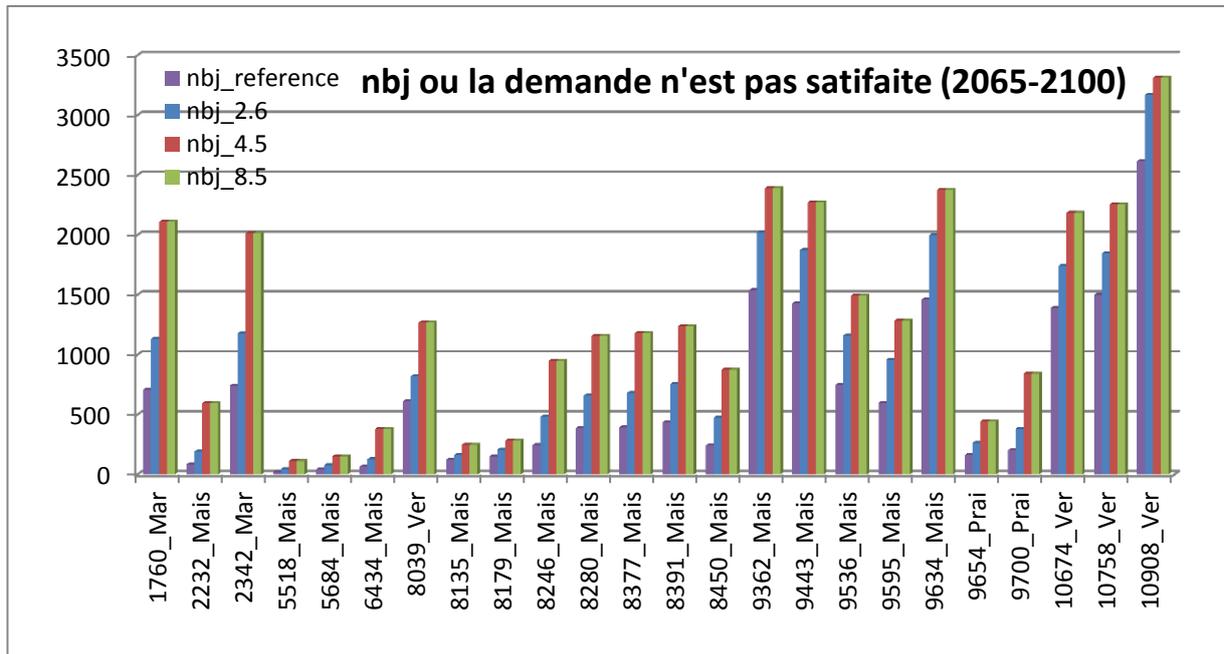


Figure 35 : Comparaison du nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé en période de référence au nombre de jours où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite calculé sur la période future (2065-2100)

La figure (36) représente l'indice calculé à partir de la moyenne annuelle de nombre de jours où la demande n'est pas satisfaite par rapport au nombre de jours de l'irrigation dans l'année.

On constate que cet indice est plus élevé pour les cultures de Maïs (tupe de culture irrigué en aspersion) et Vergers (situé généralement sur le sous-bassin de la Durance où la besoin en eau d'irrigation est plus important).

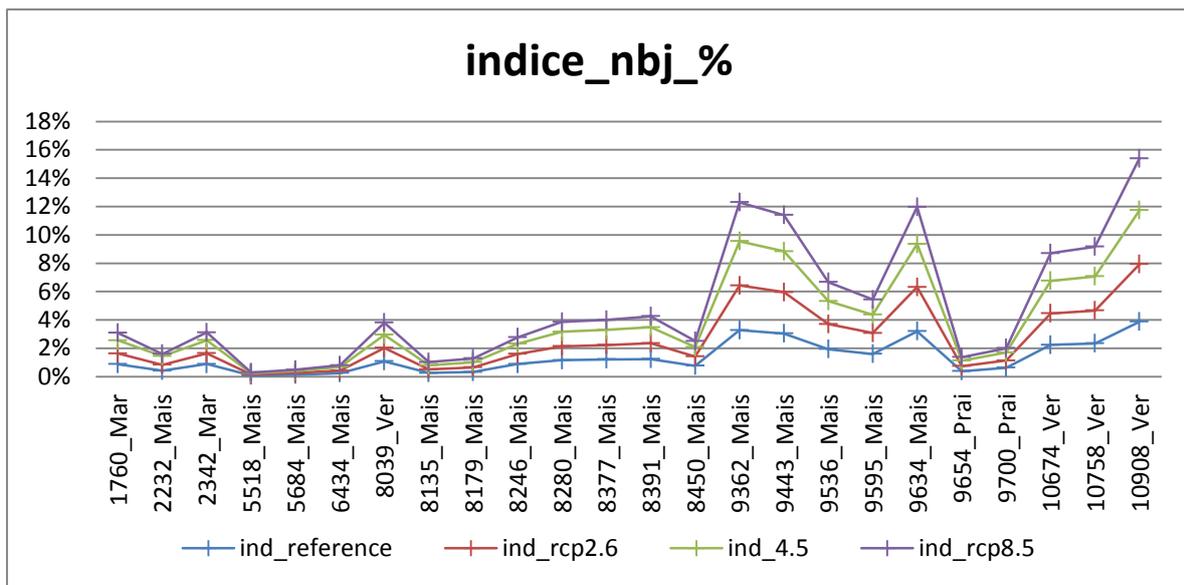


Figure 36 : Comparaison de l'indice de nombre de jours moyen annuelle où la demande (le besoin en eau des plantes) n'est pas satisfaite des différents scénarios utilisés (RCP2.6- RCP4.5- RCP8.5) à l'indice de la période de référence DRIAS

## **Discussion et conclusion :**

En premier lieu, le stage a permis d'estimer la cohérence des débits modélisés avec différents forçage et sous changement climatique.

La comparaison des données rassemblées de site DRIAS de Météo France aux données de la ré-analyse SAFRAN utilisé habituellement par le modèle J2000Rhône sur la période de référence 1985-2005 a montré que les données deux produits ne sont pas tout à fait similaire.

Par conséquent le modèle ne parvient pas à simuler les pointes des débits ainsi que les étiages, cependant il simule correctement les tendances des saisonnalités. Il est possible que J2000Rhône ait été sur-calibré pour le forçage SAFRAN.

Concernant l'influence du changement climatique sur le régime hydrologique, globalement les évolutions de changement climatiques induisent une baisse des débits de plus en plus importante selon en allant du scénario le plus optimiste RCP2.6 au plus pessimiste RCP8.5.

La dernière partie de ce rapport a été consacré aux tensions actuelle et future sur la ressource en eau. Pour l'irrigation actuellement sur la ressource en eau est faible, cependant l'analyse a montré que dans les périodes futures les HRUs qui prélèvent l'eau des petits affluents présentent un stress plus important en période d'irrigation. Cela est peut-être dû au fait que la paramétrisation du modèle J2000Rhône implique que les HRUs prélèvent l'eau dans le brin de rivière le plus proche même s'ils sont situé sur un canton où il existe de grandes rivières. En revanche ça serai plus intéressant de calculer l'indice à l'échelle du canton, afin de prendre en considération toute la ressource disponible qui pourrai alimenter les HRUs

## **Bibliographie :**

Agence de l'Eau Adour-Garonne (2014) Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau à l'échelle du bassin de la Garonne.

Bates, B., Z. W. Kundzewicz, S. Wu & J. Palutikof (2008) Le changement climatique et l'eau. *Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, éd.*

Irstea (2015) Modélisation hydrologique distribuée du Rhône, Rapport d'avancement n°3

Lacaze, X. de (2013) Quelles stratégies d'adaptation dans le domaine de l'eau ?, Explore 2070, Ministère de l'Ecologie.

Milano, M., E. Reynard, N. Bosshard & R. Weingartner (2015) Simulating future trends in hydrological regimes in Western Switzerland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 748-761.

Milano, M., Reynard, E., Köplin, N., Weingartner, R. (2015) In light of seasonal climatic and anthropogenic changes, is the vaud canton (switzerland) vulnerable to water stress by the medium-term?, Congrès SHF.

Ministère de l'Écologie du développement durable et de l'Énergie (2013) Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC.

Sauquet, E. (2014) Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050, Rapport de fin de contrat, Projet R2D2 2050

