



## Hydrologie de surface

### B1 – Climatologie de la Métropole

Octobre 2012





Le rapport final du lot Hydrologie de Surface du projet Explore 2070 comporte les documents suivants.

---

### **A - Synthèse des travaux**

---

- A0 Note de synthèse de 4 pages
  - A1 Rapport de synthèse
  - A2 Graphiques et Cartes de présentation des résultats
- 

### **B - Rapports thématiques détaillés**

---

#### **B1 Rapport détaillé Climatologie Métropole**

- B2a Rapport détaillé Hydrologie Métropole
- B2b Rapport détaillé Hydrologie Métropole - Zooms
- B3 Rapport détaillé DOM
- B4 Rapport Thermie
- B5 Synthèse Bibliographique

Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Il présente les méthodes mises en œuvre pour la production de projections climatiques sur la métropole. Il présente aussi l'analyse des résultats en termes d'évolutions climatiques possibles à l'horizon 2046-2065 sur la métropole.



# **B1 - RAPPORT DÉTAILLÉ CLIMATOLOGIE MÉTROPOLE**

<b>1. RÉSUMÉ DE SYNTHÈSE DU PRÉSENT RAPPORT.....</b>	<b>1</b>
1.1 Démarche de caractérisation des climats actuel et futur.....	1
1.2 Le climat à l'horizon 2050-2070.....	1
<b>2. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>4</b>
2.1 Objectifs .....	4
2.2 Démarche generale du Lot Hydrologie de Surface.....	4
2.3 Méthodologie generale du Lot Hydrologie de Surface.....	5
2.4 Contenu du présent rapport B1.....	5
<b>3. CARACTÉRISATION DU CLIMAT ACTUEL.....</b>	<b>7</b>
3.1 Méthodologie.....	7
3.2 Synthèse des donnees mises à disposition pour le projet pour caractériser le « climat présent » .....	10
3.3 Analyse du climat actuel .....	11
<b>4. CARACTÉRISATION DES ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070.....</b>	<b>24</b>
4.1 Méthodologie.....	24
4.2 Synthèse des données mises à disposition pour le projet.....	35
4.3 Analyse des evolutions climatiques possibles a l'horizon 2050-2070.....	37
<b>5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES.....</b>	<b>55</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>59</b>
Annexe 1	1
Quelques compléments sur la modélisation climatique.....	61
Annexe 2	2
Compléments sur les méthodes de désagrégation d'échelle : extrait de la Thèse Boé J., 2007.....	71

## Table des illustrations

FIGURES :

<b>FIGURE 1 : PRINCIPE DE LA DÉMARCHE DU LOT HYDROLOGIE DE SURFACE POUR LA SIMULATION DES ÉCOULEMENTS.....</b>	<b>4</b>
<b>FIGURE 2 : VUE GLOBALE DE LA DÉMARCHE ADOPTÉE PAR LE LOT HYDROLOGIE DE SURFACE.....</b>	<b>5</b>
<b>FIGURE 3 : SCHÉMA SIMPLIFIÉ DU FONCTIONNEMENT DU MODÈLE DE SURFACE ISBA, D'APRÈS QUINTANA-SEGUI (2008). LES FLÈCHES MONTRENT LES PRINCIPAUX FLUX D'EAU.....</b>	<b>9</b>
<b>FIGURE 4 : MAILLAGE SAFRAN EN GRIS, ISBA EN ROUGE (9892 POINTS, HORS FRONTIÈRES INCLUS).....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURE 5 : LE CLIMAT DE LA FRANCE, ARLERY R. : DIRECTION DE LA MÉTÉOROLOGIE NATIONALE.....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURE 6 : PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES SUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE –PÉRIODE 1971-2000.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURE 7 : NOMBRE MOYEN ANNUEL DE JOURS DE PRÉCIPITATIONS- PÉRIODE 1971-2000.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURE 8 : TEMPÉRATURE MINIMALE ANNUELLE MOYENNE –PÉRIODE 1971-2000.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURE 9 : NOMBRE MOYEN ANNUEL DE JOURS AVEC GELÉE SOUS ABRI – PÉRIODE 1971-2000.....</b>	<b>12</b>
<b>FIGURE 10 : TEMPÉRATURE MAXIMALE ANNUELLE MOYENNE -MOYENNES 1971-2000.....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURE 11 : CUMUL MOYEN ANNUEL DE LA DURÉE D'INSOLATION – MOYENNES 1971-2000.....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURE 12 : ROSES DES VENTS – PÉRIODE 1981-2000.....</b>	<b>14</b>
<b>FIGURE 13 : VALEUR MOYENNE ANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE QUOTIDIENNE SAFRAN RÉANALYSÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE, POUR LA PÉRIODE 1961-1990. EN °C.....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURE 14 : VALEUR MOYENNE DE LA TEMPÉRATURE QUOTIDIENNE SAFRAN RÉANALYSÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE PAR SAISON, POUR LA PÉRIODE 1961-1990. EN °C.....</b>	<b>17</b>

<b>FIGURE 15 : CUMUL DE PRÉCIPITATIONS SAFRAN RÉANALYSÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE PAR ANNÉE, POUR LA PÉRIODE 1961-1990. EN MM.....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURE 16 : CUMUL DE PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES SAFRAN RÉANALYSÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE PAR SAISON, POUR LA PÉRIODE 1961-1990. EN MM.....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURE 17 : EVOLUTION DE L'INDICATEUR DE TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE SUR LA PÉRIODE 1900-2009... </b>	<b>20</b>
<b>FIGURE 18 : EVOLUTION DE L'INDICATEUR DE CUMUL ANNUEL MOYEN DE PRÉCIPITATIONS EN FRANCE MÉTROPOLITAINE SUR LA PÉRIODE 1959-2010.....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURE 19 : TEST DE SPEARMAN AVEC UNE CONFIANCE À 95 % APPLIQUÉ AUX SÉRIES SÉCULAIRES HOMOGENÉISÉES DE HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS (1901-2000).....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURE 20 : VUE GLOBALE DE LA CHAÎNE DE MODÉLISATION CLIMATIQUE. .</b>	<b>24</b>
<b>FIGURE 21 : SCÉNARIOS D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE DE L'AR4..</b>	<b>26</b>
<b>FIGURE 22 : ÉVOLUTIONS DES CONCENTRATIONS DE CO2 POUR LES DIFFÉRENTS SCENARII UTILISÉS PAR LE GIEC (SOURCE : <a href="http://www.ipcc-data.org">HTTP://WWW.IPCC-DATA.ORG</a>).....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURE 23 : PROCESSUS ET MAILLAGE DES MODÈLES DE CLIMAT.....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURE 24 : SITUATION DES 7 MODÈLES CLIMATIQUES RETENUS POUR EXPLORER 2070 PARMI LA VINGTAINES POSSIBLE.....</b>	<b>29</b>
<b>FIGURE 25 : CHANGEMENTS RELATIFS DE LA FRÉQUENCE D'OCCURRENCE DES 4 RÉGIMES D'HIVER ENTRE LES PÉRIODES 1961-2000 ET 2081-2100 DANS DIFFÉRENTS MODÈLES DU GIEC ET LE MODÈLE ARPEGE-VR (ARP) (SOURCE : BOÉ, 2007).....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURE 26 : LA PROBLÉMATIQUE DE LA DÉSAGRÉGATION. SOURCE CLIMATE RESEARCH UNIT, UNIVERSITY OF EAST ANGLIA.....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURE 27 : EXEMPLE DE RESTITUTION DE RÉSULTAT DE MODÈLE.....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURE 28 : EXEMPLE DE FIGURE MONTRANT LES ÉVOLUTIONS DE TEMPÉRATURE.....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURE 29 : ECARTS DE VALEUR MOYENNE ANNUELLE ET SAISONNIÈRE DE LA TEMPÉRATURE QUOTIDIENNE SAFRAN SIMULÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE ENTRE SIMULATIONS 2046-2065 ET RÉFÉRENCE 1961-1990. INTERVALLE DE CONFIANCE ET VALEURS EXTRÊMES. POUR L'ENSEMBLE DES 7 SIMULATIONS-SCÉNARIO A1B. EN °C.....</b>	<b>40</b>

<b>FIGURE 30 : EVOLUTIONS POSSIBLES DES TEMPÉRATURES SAISONNIÈRES EN FRANCE ENTRE 1961-90 ET 2046-65, RÉSULTATS ISSUS DES SEPT MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE UTILISÉS POUR EXPLORE2070.</b>	<b>.43</b>
<b>FIGURE 31 : EVOLUTIONS POSSIBLES DES TEMPÉRATURES SAISONNIÈRES EN FRANCE ENTRE 1961-90 ET 2046-65 (°C) : RÉSULTATS ISSUS DES SEPT MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE UTILISÉS POUR EXPLORE2070.</b>	<b>.44</b>
<b>FIGURE 32 : EVOLUTIONS POSSIBLES DES TEMPÉRATURES SAISONNIÈRES EN FRANCE ENTRE 1961-90 ET 2040-70 (°C) : RÉSULTATS ISSUS DES SIMULATIONS ARP V4 CORRIGÉES QUANTILE-QUANTILES, POUR LES SCÉNARIO A2, A1B ET B2.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURE 33 : ECARTS DE VALEUR MOYENNE ANNUELLE ET SAISONNIÈRE DU CUMUL DE PRÉCIPITATIONS SAFRAN SIMULÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE ENTRE SIMULATIONS 2046-2065 ET RÉFÉRENCE 1961-1990. INTERVALLE DE CONFIANCE ET VALEURS EXTRÊMES. POUR L'ENSEMBLE DES 7 SIMULATIONS-SCÉNARIO A1B. EN % PAR RAPPORT À LA VALEUR DE RÉFÉRENCE.....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURE 34 : EVOLUTIONS POSSIBLES DES CUMULS DE PRÉCIPITATIONS SAISONNIÈRES EN FRANCE ENTRE 1961-90 ET 2046-65, RÉSULTATS ISSUS DES SEPT MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE UTILISÉS POUR EXPLORE2070.....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURE 35 : EVOLUTIONS POSSIBLES DES CUMULS DE PRÉCIPITATIONS MOYENNES SAISONNIÈRES EN FRANCE ENTRE 1961-90 ET 2046-65 (°C) : RÉSULTATS ISSUS DES SEPT MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE UTILISÉS POUR EXPLORE2070.....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURE 36 : ÉVOLUTIONS POSSIBLES DES PRÉCIPITATION MOYENNES SAISONNIÈRES EN FRANCE ENTRE 1961-90 ET 2046-65 (°C) : RÉSULTATS ISSUS DES SIMULATIONS ARP V4 CORRIGÉES QUANTILE-QUANTILES, POUR LES SCÉNARIO A2, A1B ET B2.....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURE 37 : PROCESSUS ET MAILLAGE DES MODÈLES DE CLIMAT.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURE 38 : LA PROBLÉMATIQUE DE LA DÉSAGRÉGATION. SOURCE CLIMATE RESEARCH UNIT, UNIVERSITY OF EAST ANGLIA.....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURE 39 : POINTS DE GRILLE ARPEGE CLIMAT MAILLE ÉTIRÉE PÔLE MÉDITERRANÉE.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURE 40 : ARPEGE CLIMAT PÔLE MÉDITERRANÉE.....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURE 41 : DIAGRAMME QUANTILE-QUANTILE POUR LES TEMPÉRATURES MINIMALES À PARIS EN HIVER (°C). LES QUANTILES DU MODÈLE SONT EN ABSCISSE ET CEUX DE L'OBSERVATION SONT EN ORDONNÉE.....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURE 42 : EXEMPLE D'ÉVOLUTION D'UNE DISTRIBUTION (EN VERT POUR LE CLIMAT PRÉSENT, EN ROUGE POUR LE CLIMAT FUTUR, EN POINTILLÉ</b>	



**POUR LES VALEURS CORRIGÉES PAR LA MÉTHODE QUANTILE-QUANTILE ET EN TRAIT CONTINU POUR LES SORTIES BRUTES DU MODÈLE).....68**

**FIGURE 43 : 240 POINTS POUR LESQUELS TX, TN ET RR CORRIGÉS PAR LA MÉTHODE QUANTILE-QUANTILE SONT DISPONIBLES.....69**

**FIGURE 44 : LES DIFFÉRENTES ÉTAPES D'UNE ÉTUDE DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....78**

**TABLEAUX :**

**TABLEAU 1 : ECARTS DE TEMPÉRATURE MOYENNE ENTRE PROJECTIONS ET RÉFÉRENCE (EN °C) CALCULÉS PAR LES 7 SIMULATIONS, AVEC LE SCÉNARIO A1B.....2**

**TABLEAU 2 : EVOLUTIONS RELATIVES (EN %) DES PRÉCIPITATIONS CALCULÉES PAR LES 7 SIMULATIONS, AVEC LE SCÉNARIO A1B.....3**

**TABLEAU 3 : CUMULS DE PRÉCIPITATIONS MENSUELLES ET ANNUELLES, EN MM - NORMALES 1971-2000.....15**

**TABLEAU 4 : TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES, EN °C - NORMALES 1971-2000.....15**

**TABLEAU 5 : VALEUR MOYENNE DE LA TEMPÉRATURE QUOTIDIENNE SAFRAN RÉANALYSÉE, POUR LA PÉRIODE 1961-1990, PAR SAISON ET PAR ANNÉE - INTERVALLE DE CONFIANCE POUR LA VALEUR MOYENNE, VALEURS EXTRÊMES ENTRE PARENTHÈSES. EN °C.....16**

**TABLEAU 6 : VALEUR MOYENNE DU CUMUL DE PRÉCIPITATION SAFRAN RÉANALYSÉ, POUR LA PÉRIODE 1961-1990, PAR SAISON ET PAR ANNÉE INTERVALLE DE CONFIANCE POUR LA VALEUR MOYENNE, VALEURS EXTRÊMES ENTRE PARENTHÈSES. EN MM.....18**

**TABLEAU 7 : LISTE DES 7 MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE DONT LES RÉSULTATS ONT ÉTÉ UTILISÉS POUR EXPLORE 2070.....28**

**TABLEAU 8 : 7 SIMULATIONS « AR4 DÉSAGRÉGÉES PAR MÉTHODE CERFACS DSCLIM » FOURNIES AU PROJET EXPLORE 2070.....36**

**TABLEAU 9 : VALEUR MOYENNE DE LA TEMPÉRATURE QUOTIDIENNE SAFRAN SIMULÉE POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE PAR SAISON ET EN MOYENNE ANNUELLE, POUR LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE 1961-1990 ET ÉCARTS ENTRE SIMULATIONS 2046-2065 ET RÉFÉRENCE. INTERVALLE DE CONFIANCE POUR LA VALEUR MOYENNE, VALEURS EXTRÊMES ENTRE PARENTHÈSES. MOYENNÉ POUR L'ENSEMBLE DES 7 SIMULATIONS-SCÉNARIO A1B. EN °C.....40**

**TABLEAU 10 : CUMUL DES PRÉCIPITATIONS QUOTIDIENNES MOYENNES  
SAFRAN SIMULÉ POUR LA FRANCE MÉTROPOLITAINE PAR SAISON ET EN  
CUMUL ANNUEL, POUR LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE 1961-1990 ET  
RAPPORT ENTRE SIMULATIONS 2046-2065 ET RÉFÉRENCE. INTERVALLE  
DE CONFIANCE POUR LA VALEUR MOYENNE, VALEURS EXTRÊMES  
ENTRE PARENTHÈSES. MOYENNÉ POUR L'ENSEMBLE DES 7  
SIMULATIONS-SCÉNARIO A1B. EN MM ET %.....49**

## **LISTE DES PRINCIPAUX ACRONYMES**

AR4 : Fourth Assesment Report  
ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle  
CAGE : Circulation Atmosphérique de Grande Echelle  
CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique  
ECMWF-CEPMMT : Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme  
ETP : Evapotranspiration potentielle  
GES : Gaz à Effet de Serre  
GCM : General Circulation Model  
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat  
IPCC : Intergovernmental panel on climate change  
ISBA : Interactions Soil-Biosphere-Atmosphere  
LAM : Limited Area Model  
MCGA : Modèle de Circulation Générale Atmosphérique  
MCGOA : Modèle de Circulation Générale couplé Océan-Atmosphère  
MCR : Modèle Climatique Régional  
MDS : Modèle de Désagrégation Statistique  
NAO : North Atlantic Oscillation  
NCEP : National Center for Environmental Prediction (dépend de la NOAA)  
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration's  
ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique  
PRODIGE : PROCédures de Détection d'Inhomogénéités Glissées dans un Echantillon  
SIM : SAFRAN-ISBA-MODCOU  
SRES : Special Report on Emission Scenario  
TSO : Température de Surface Océanique  
TSVA : Transfert Sol Végétation Atmosphère  
UTC : Temps Universel Coordonné  
ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale





# 1. RÉSUMÉ DE SYNTHÈSE DU PRÉSENT RAPPORT

## 1.1 DÉMARCHE DE CARACTÉRISATION DES CLIMATS ACTUEL ET FUTUR

### 1.1.1 Méthode

La chaîne de calcul SIM simule les flux d'eau et d'énergie en surface et dans le sol. Son premier modèle, SAFRAN, calcule température, humidité, vent, précipitations et rayonnements sur une grille de 8kmx8km horizontalement et 300m verticalement. Le second, ISBA, utilise ces données dans un bilan de flux entre l'atmosphère, la biosphère et le sol pour en déduire le ruissellement de surface et le drainage profond. Enfin, Modcou calcule l'évolution des nappes et les débits des rivières.

L'ensemble de la réanalyse SIM a été livrée sur la période 1958-59/2008-09. Les résultats des modèles Safran et Isba sont fournis sur la grille Isba de maille 8km sur la France métropolitaine et la Corse. Ils comprennent les précipitations, les évapotranspirations potentielle et réelle, le drainage, le ruissellement et l'équivalent en eau du manteau neigeux. Les débits fournis par le modèle Modcou concernent 907 stations et 256 exutoires.

### 1.1.2 Principaux résultats

Les résultats de la réanalyse montrent une tendance significative à l'augmentation des températures moyennes : +0,55°C par décennie sur la période 1979-2005 en métropole. Il est également relevé que ce réchauffement est de plus en plus rapide depuis le milieu du XXème siècle.

Les variations de hauteur de précipitations et leur significativité sont en revanche dépendantes des régions et des saisons.

## 1.2 LE CLIMAT À L'HORIZON 2050-2070

### 1.2.1 Méthode

A partir des années 1960, des modèles de circulation générale ont réalisé les premières prévisions climatiques. Aujourd'hui, ces modèles prennent en compte un grand nombre de phénomènes impactant le climat.

Les simulations climatiques sont obtenues en faisant varier les concentrations en gaz à effet de serre et des aérosols fournies par les scénarios socio-économiques. Le 4ème rapport d'évaluation du GIEC propose ainsi diverses familles de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, suivant l'importance de l'environnement et du développement durable dans les choix politiques, et les disparités sociales, économiques et technologiques entre les différentes régions du monde.

Les moyens informatiques limitent l'utilisation des modèles à des grilles grossières qui prennent mal en compte les éléments de petite échelle (reliefs, occupation des sols, phénomènes météo localisés, etc.), parfois impliqués dans les événements extrêmes ou nécessaires à des études locales. Des méthodes de désagrégation ou descente d'échelle ont donc été mises au point.

Elles entrent dans deux grandes catégories : les méthodes statistiques et les méthodes dynamiques. La première demande d'utiliser une période de calage suffisamment longue, alors que la seconde est souvent plus coûteuse en temps de calcul.

Parmi les méthodes dynamiques, on distingue celles utilisant une grille à haute résolution sur l'ensemble du globe pour le modèle de circulation générale, celles utilisant une grille « déformée » avec une plus haute résolution spatiale dans la zone d'étude, et celles couvrant seulement une partie du globe.

Les méthodes statistiques tentent de reproduire le climat régional à partir du climat de grande échelle et des caractéristiques régionales par diverses méthodes statistiques.

Dans cette démarche de simulation du climat futur, les incertitudes sont de trois types : les incertitudes sur les paramètres d'entrée, les incertitudes liées à la conception des modèles, et les incertitudes liées à la variabilité chaotique du climat. S'ajoutent aussi les incertitudes liées aux évolutions socio-économiques et celles liées aux facteurs non pris en compte dans ces scénarios.

Météo France a utilisé une approche multi-modèles pour appréhender cette incertitude avec le scénario A1B en France métropolitaine. Par ailleurs, une analyse des résultats du modèle ARPEGE-Climat V4 forcé par les scénarios A1B, A2 et B1 à partir des simulations à maille 50 km sur la métropole est proposée en paragraphe 4.1.2. Ces scénarios n'ayant pas été désagrégés, il n'a pas été possible de les utiliser dans l'étude hydrologique.

## 1.2.2 Principaux résultats

La période 1961-1990 a été choisie pour les simulations de référence. Les projections sont réalisées sur la période 2046-2065.

Le Tableau 1 montre pour les 7 simulations désagrégées forcées avec le scénario A1B :

- ▶ les écarts moyens de température moyenne entre projections et référence (en °C) (moyennes multimodèles),
- ▶ les écarts minimums relevés parmi les 7 modèles,
- ▶ les écarts maximums relevés parmi les 7 modèles.

Dans chaque cas, les bornes de l'intervalle de confiance à 95% sont indiquées.

Tableau 1 : Ecarts de température moyenne entre projections et référence (en °C) calculés par les 7 simulations, avec le scénario A1B

Période	Ecarts moyens (moyenne géographique et multi-modèles)	Ecarts moyens minimaux parmi les modèles (moyenne géographique)	Ecarts moyens maximaux parmi les modèles (moyenne géographique)
Année	2,1/ 2,3	1,4/ 1,9	2,5/ 3,0
DJF	2,0/ 2,4	1,2/ 2,2	2,4/ 3,5
MAM	1,9/ 2,2	0,6/ 1,4	2,3/ 3,4
JJA	2,2/ 2,5	1,2/ 1,9	2,5/ 3,2
SON	2,1/ 2,4	0,9/ 1,7	2,5/ 3,2

DJF :décembre, janvier, février – MAM : mars, avril, mai – JJA : juin, juillet, août – SON : septembre, octobre, novembre.

Les résultats sont variables selon les saisons. L'écart moyen est un peu plus élevé en été sur la moyenne des modèles, et la dispersion entre modèles est plus grande au printemps. Toutefois, tous les modèles vont dans le sens d'un réchauffement compris entre 1,4 et 3,0°C en moyenne annuelle.

Les résultats montrent aussi des différences géographiques. Les augmentations de température calculées sont plus fortes dans le nord-est et décroissent vers le sud-ouest pendant l'hiver, mais la répartition est bien plus homogène en été. A l'automne, l'est présente généralement des écarts un peu plus forts que l'ouest.

L'analyse des températures minimales et maximales journalières moyennée sur la France, calculées par le modèle Arpège pour différents scénarios, révèle des écarts plus marqués des températures maximales que des températures minimales. Une nouvelle fois, ces écarts sont plus forts pendant l'été.

Le Tableau suivant montre les évolutions relatives (en %) des précipitations calculées par les 7 simulations, avec le scénario A1B. Dans chaque cas, les bornes de l'intervalle de confiance à 95% sont indiquées.

Tableau 2 : Evolutions relatives (en %) des précipitations calculées par les 7 simulations, avec le scénario A1B

Période	Evolutions moyennes des précipitations (moyenne géographique et multi-modèles)	Evolutions moyennes des précipitations minimales parmi les modèles (moyenne géographique)	Evolutions moyennes des précipitations maximales parmi les modèles (moyenne géographique)
<b>Année</b>	-8,6/ -4,3	-20,6/ -7,1	-8,3/ 3,6
<b>DJF</b>	-2,2/ 7,5	-26,8/ 3,6	-0,9/ 22,6
<b>MAM</b>	-5,4/ 2,9	-20,3/ 3,9	-7,9/ 19,4
<b>JJA</b>	-23,6/ -15,9	-44,2/ -24,6	-17,6/ 4,9
<b>SON</b>	-12,8/ -4,6	-34,6/ -11,2	-8,1/ 11,3

Pour les précipitations, une tendance à la baisse apparaît sur la moyenne multi-modèles, hormis en hiver où aucune tendance ne se dessine. C'est en été que les précipitations semblent le plus déficitaire avec -23,6% à -15,9% de la valeur moyenne de référence.

Une grande disparité apparaît entre les modèles dans la répartition géographique des ratios de précipitations. L'extrême Sud-ouest est déficitaire dans la majorité des cas.

En revanche, peu de différences apparaissent entre les scénarios A2 et A1B simulés par ARPEGE-Climat V4. L'analyse des variations de précipitations moyennées sur la France montre une tendance au déficit de précipitations à l'horizon 2050-2070 qui apparaît comprise entre -17,4 et -4,9% pour le scénario A2, -16,1 et -4,8% pour le scénario A1B (intervalle de confiance à 95%), en valeur annuelle. Là encore, les déficits les plus forts sont observés en été.

## 2. INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 2.1 OBJECTIFS

#### OBJECTIF PRINCIPAL

La tâche principale attendue du Lot Hydrologie de surface est une évaluation de l'impact possible du changement climatique à l'horizon 2070 sur les ressources en eau superficielles à l'échelle nationale.

Un bassin versant est un système ouvert qui transforme les signaux d'entrée météorologiques en un signal de sortie « écoulement » en intégrant son état de surface, les échanges avec les eaux souterraines, les prélèvements, les rejets et la gestion des ouvrages de transfert et/ou de régulation. La question clé posée au Lot Hydrologie de surface est : **Comment des changements sur les signaux d'entrée (précipitations et températures) liés au changement climatique peuvent ils impacter le signal de sortie « ruissellement » ?**

#### AUTRES OBJECTIFS

Le Lot Hydrologie de surface est également chargé de caractériser, à l'échelle nationale, les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2070 (données d'entrée pour ce Lot) et de participer aux réflexions sur les mesures d'adaptation. Enfin, le Lot s'est vu confier la réalisation de modélisations de la température de l'eau pour estimer son évolution future probable.

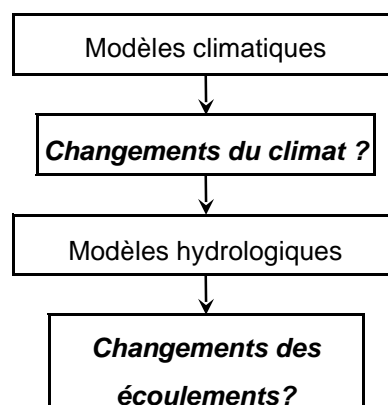
### 2.2 DÉMARCHE GENERALE DU LOT HYDROLOGIE DE SURFACE

Pour répondre à cette question, le lot met en place une chaîne de calcul au droit de **1522 bassins versants en Métropole et 35 bassins versants dans les départements d'Outre-mer**, afin d'établir de **projections de débits à l'horizon 2070**.

Cette chaîne de calcul est construite selon l'idée suivante :

- ▶ Des **modèles climatiques** permettent de simuler le climat présent et le climat futur au droit des 1522 points de calcul, sous la forme de signaux de précipitations, températures et évapotranspiration potentielle.
- ▶ Ces signaux sont utilisés en entrée des **modèles hydrologiques** afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des 1522 bassins, et donc **d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points**.

Figure 1 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements





**Cette chaine de calcul fait intervenir plusieurs modèles climatiques et hydrologiques afin de prendre en compte l'incertitude inhérente aux résultats.**

Elle produit et utilise des chroniques simulées de précipitation, évapotranspiration et débit au pas de temps journalier, sur deux périodes : 1961-1991 et 2046-2065. Les différences entre les simulations sur ces deux périodes permettent d'identifier des évolutions climatiques et hydrologiques possibles.

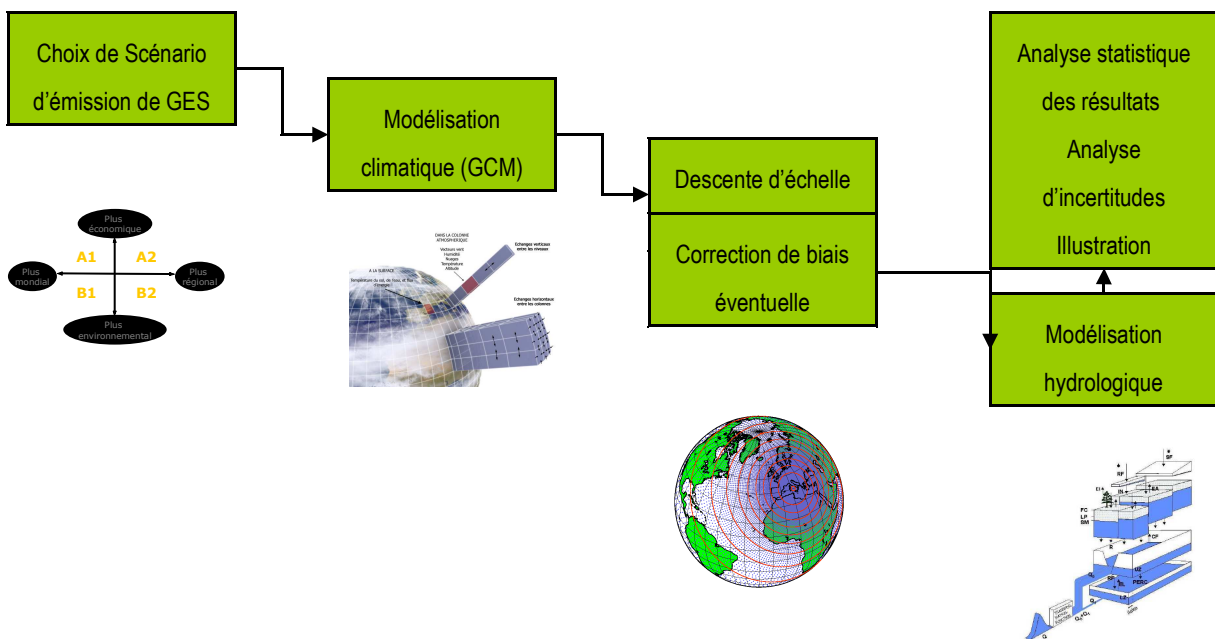
A l'issue de ces simulations, un travail d'analyse statistique de ces simulations fournit des éléments de réponse aux interrogations suivantes : **Quels pourront être les impacts du changement climatique sur la ressource en eau ? sur le risque de crues ?**

**Il est essentiel de garder à l'esprit que de nombreuses incertitudes sont attachées à tous les résultats produits.**

## 2.3 MÉTHODOLOGIE GENERALE DU LOT HYDROLOGIE DE SURFACE

La méthodologie générale adoptée par le lot hydrologie de Surface suit l'organisation schématisée ci-dessous.

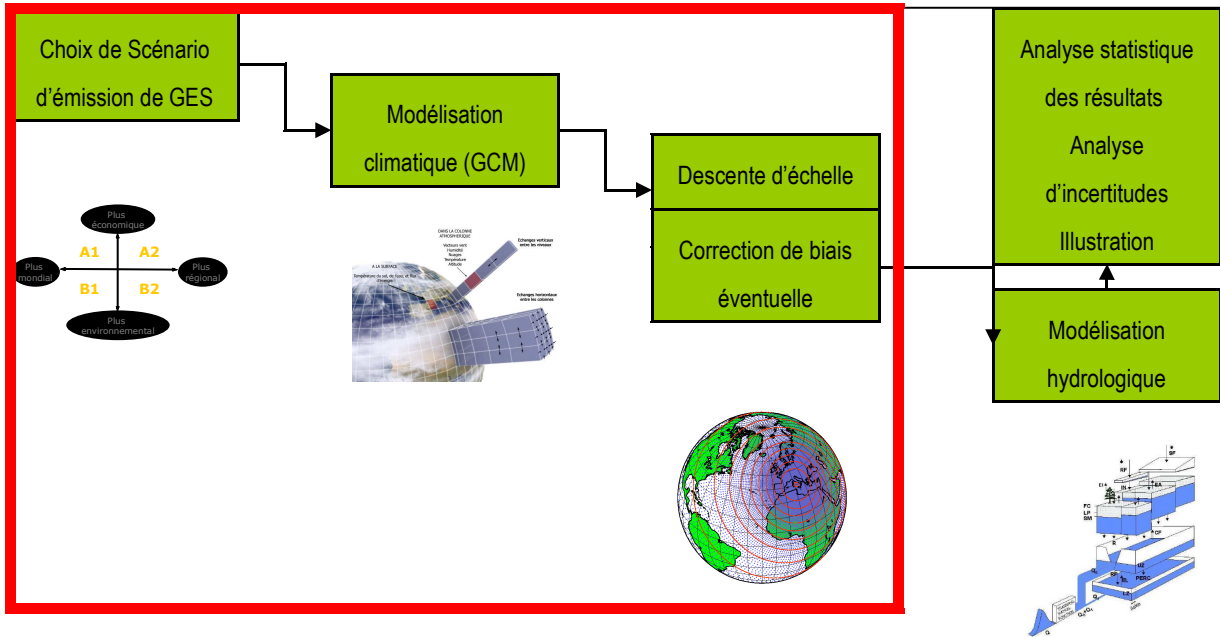
Figure 2 : Vue globale de la démarche adoptée par le lot Hydrologie de Surface



A partir d'une hypothèse d'émission de gaz à effet de serre, on mobilise des modèles climatiques (modèles de circulation générale GCM) qui produisent des simulations de pluie et température sur un large maillage (de l'ordre de 300km). Une méthode de descente d'échelle et un débiasage de ces simulations permet l'obtention de simulations climatiques sur un maillage plus fin (8km x 8km) et donc, après agrégation, à l'échelle des bassins versants étudiés. Ces données servent de données d'entrée aux modèles hydrologiques qui produisent des séries de débits journaliers à partir desquels on réalise des analyses statistiques. Chacune de ces étapes repose sur un ensemble d'hypothèses et de choix méthodologiques importants, qui induisent des incertitudes de différentes natures.

## 2.4 CONTENU DU PRÉSENT RAPPORT B1

Le présent rapport se concentre sur les étapes de simulations climatologiques ...



... et expose les données qui seront injectées dans les étapes ultérieures de simulations hydrologiques. Le rapport expose également les résultats en termes d'évolutions climatiques possibles à l'horizon 2050-70.

Deux grandes catégories de données sont produites et utilisées par le lot Hydrologie de Surface, afin de caractériser les évolutions climatiques probables sur la métropole et ses impacts en termes de changements hydrologiques possibles.

D'une part des données d'observations météorologiques, réanalysées par le modèle Safran, permettent de caractériser le climat sur la période 1961-1990 sur la métropole.

Ces données, fournies sur une grille de 8 km x 8 km, permettent aussi de caler les modèles hydrologiques et de caractériser l'état actuel de la ressource en eau au droit des 1522 bassins versants étudiés dans le projet. Les méthodes mises en œuvre pour produire ces données, et l'analyse du climat actuel qui en résulte sont détaillées au chapitre 3 du présent rapport. Les aspects Hydrologie sont traités dans la composante 4.2A\_Métropole\_Hydrologie du rapport final.

D'autre part des données de simulations climatiques, produites pour la période de référence 1961-90 et la période future 2046-2065. La comparaison des simulations climatiques passées et futures permet de caractériser les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2046-2065 sur la métropole.

De plus, ces données seront utilisées en entrée des modèles hydrologiques afin de produire des simulations de débits passés et futurs : la comparaison des simulations de débits permet de caractériser les évolutions hydrologiques possibles au droit des 1522 bassins.

Pour la production de ces simulations, 7 modèles de circulations générales sont mobilisés, afin de prendre en compte l'incertitude liées à la modélisation climatique. Les simulations globales sont ensuite corrigées et désagrégées à l'échelle d'une grille de 8 km x 8 km, grâce à une méthode de descente d'échelle. Les méthodes mises en œuvre pour la production de ces simulations, et l'analyse des évolutions climatiques possibles qui en résulte seront présentées au chapitre 4. Ces résultats intégreront une évaluation de l'incertitude. Les aspects Hydrologie sont traités dans le document B2a - Rapport détaillé Hydrologie métropole.

### 3. CARACTÉRISATION DU CLIMAT ACTUEL

Pour la caractérisation du climat actuel et les études hydrologiques aval, des données observées et corrigées par la ré-analyse Safran ont été produites sur une grille de 8 km x 8 km sur la métropole. La méthodologie mise en œuvre est détaillée ci-dessous.

#### 3.1 MÉTHODOLOGIE

##### 3.1.1 Séries homogénéisées

Toutes les séries d'observation ne sont pas exploitables pour l'analyse du changement climatique. En effet, l'évolution des conditions de mesure ou de l'emplacement des stations météorologiques peut introduire des hétérogénéités dans les séries, et conduire à des conclusions erronées. Ces ruptures peuvent être du même ordre de grandeur que les phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence. **Il est donc indispensable avant toute analyse d'une série climatologique de s'assurer préalablement de la qualité des données, de rechercher les ruptures d'origine métrologique dans la série et de les corriger.**

Les techniques d'homogénéisation ont pour objectif d'identifier les ruptures d'homogénéité des longues séries de données climatologiques (ruptures générées par les changements de capteurs ou de pratiques d'observation, par le déplacement des sites d'observation, ou par les modifications de leur environnement) et de les corriger. Elles permettent donc d'extraire le signal climatique en supprimant au mieux les effets de poste.

La première étape de ce travail consiste à **choisir les postes de référence** en fonction de la qualité des données, de la période d'ouverture, de la rareté des changements d'emplacement de ceux-ci et du faible taux de données manquantes. L'étape suivante consiste à **détecter et à corriger les ruptures** dues à la modification des conditions de mesure pour ne conserver que le signal de l'évolution climatique. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel **PRODIGE** (PROcédures de Détection d'Inhomogénéités Glissées dans un Echantillon), un outil statistique développé par Météo-France. La méthode utilisée a fait l'objet d'une thèse en 2000 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (Mestre, 2000). Un nombre minimum de séries est nécessaire pour que PRODIGE soit capable de détecter les ruptures et de les corriger. **La constitution de séries homogénéisées est indispensable pour évaluer l'ampleur du réchauffement climatique avec le moins d'ambiguïté possible.**

##### 3.1.2 La réanalyse climatologique SIM

**Des données d'observation de surface, combinées à des données d'analyse des modèles météorologiques, sont traitées par une chaîne de réanalyse-climatologique, la chaîne de calcul Safran-Isba-Modcou. A l'issue de ce traitement, on génère notamment des données de précipitations liquides et solides et de températures, au pas de temps journalier sur une grille de 8kmx8km. La chaîne de calcul Safran-Isba-Modcou est décrite ci-après.**

###### 3.1.2.1 Description de la SIM

**La chaîne de calcul Safran-Isba-Modcou (SIM) a été développée dans le cadre d'une coopération entre le CNRM-GAME de Météo-France et le Centre de Géosciences de Mines ParisTech. Elle simule sur la France les flux d'eau et d'énergie à la surface, ainsi que l'évolution du débit des rivières et des principales nappes.** Ce modèle, porté dans l'environnement opérationnel de Météo-France en 2003, est utilisé dans de nombreuses productions institutionnelles telles que le Bulletin de Situation Hydrologique du MEDDTL tout en bénéficiant de la poursuite des actions de recherche.

La chaîne de calcul SIM est composée de 3 modèles :

- ▶ **SAFRAN/France** est un système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques, notamment la réanalyse ERA du Centre Européen de Prévision (CEPMMT) pour produire les paramètres horaires nécessaires au fonctionnement d'ISBA. Ces paramètres (température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident), sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Pour les questions de validation de la réanalyse Safran, on se référera à l'article de Vidal et al. (2010) ;
- ▶ **ISBA** (Interaction sol-biosphère-atmosphère) est un modèle TSVA (Transfert sol végétation atmosphère) qui simule les échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère. La version utilisée dans la SIM utilise 3 couches de sol (surface, zone racinaire, zone profonde), et deux températures (température de surface globale du continuum sol-végétation et température profonde). ISBA simule l'ensemble des flux d'eau avec l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et avec le sol (ruissellement des précipitations et drainage dans le sol). Isba calcule le bilan de surface et transmet les termes de ruissellement de surface et de drainage profond à Modcou pour routage. Les calculs du modèle Isba sont effectués sur une grille régulière 8x8km. Son pas de temps est de 5 minutes.
- ▶ **MODCOU**, est un modèle hydrogéologique distribué. Il utilise en entrée le ruissellement et drainage d'ISBA pour calculer l'évolution des nappes (il représente actuellement de manière explicite les principales nappes du bassin versant de la Seine-trois nappes-et la nappe alluviale de la Saône et du Rhône) et le débit des rivières (900 points simulés). Modcou utilise une grille de surface variable (de 1x1 à 8x8 km) en fonction de la limite des bassins versants et du réseau hydrographique. Il possède également un maillage rivières représentant le réseau hydrographique, et un maillage souterrain sur une ou plusieurs couches pour la simulation des aquifères. Son pas de temps est de trois heures.

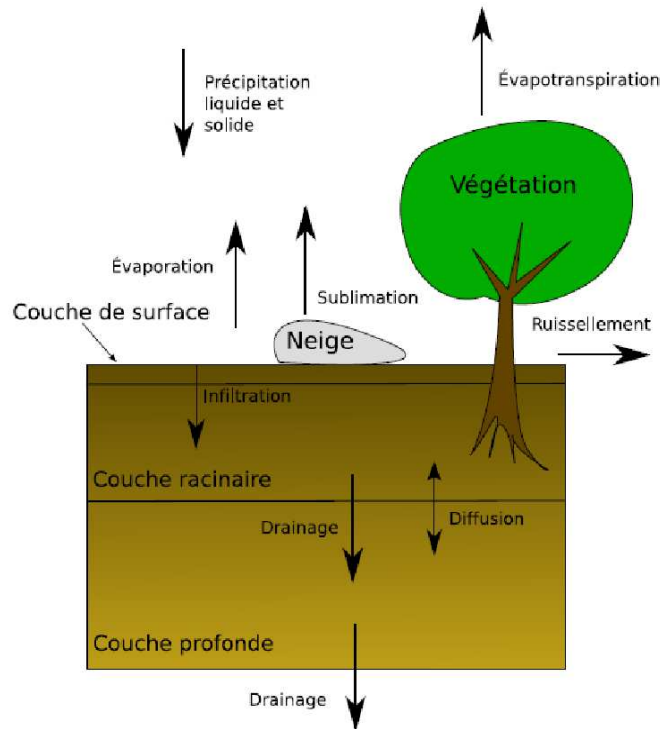
Nous donnons dans ce qui suit des éléments complémentaires sur ISBA, le modèle MODCOU ainsi que les procédures de calage de la de modélisation sont quant à eux détaillés dans le : document *B2a – Rapport détaillé Hydrologie Métropole*.

### **3.1.2.2 Précisions concernant Isba**

ISBA standard (version du modèle utilisée dans les réanalyses et les simulations livrées au projet Explore 2070) utilise un nombre limité de variables pour décrire l'état du sol et les échanges sol-plante-atmosphère. Une seule température de surface caractérise l'ensemble de la maille (végétation et sol nu). Cette température de surface est rappelée vers une température profonde. Du point de vue hydrologique, le sol est représenté par trois couches.

Figure 3 : Schéma simplifié du fonctionnement du modèle de surface *Isba*, d'après Quintana-Segui (2008).

Les flèches montrent les principaux flux d'eau.



Quatre termes entrent dans le bilan hydrique :

- ▶ Évaporation/dépôt de rosée sur sol nu ( $E_g$ )
- ▶ Évaporation/dépôt de rosée du réservoir d'interception des feuilles ( $E_r$ )
- ▶ Transpiration de la plante ( $E_{tr}$ )
- ▶ Sublimation/dépôt solide sur la neige ( $E_n$ )

Le calcul de la transpiration des plantes est basé sur la formule de Jarvis (1976) (sans prise en compte du réservoir d'interception)

$$E_{veg} = \frac{\rho_a}{R_a + R_s} [q_{sat}(T_s) - q_a]$$

Avec

$$R_s = \frac{R_{smin}}{LAI} \times \frac{F_1}{F_2 F_3 F_4}$$

- ▶  $F_1$  : part du rayonnement solaire active pour la photosynthèse
- ▶  $F_2$  : stress hydrique (1 = capacité au champ, 0 = point de flétrissement)
- ▶  $F_3$  : déficit hydrique « atmosphérique » (dépend du type de végétation)
- ▶  $F_4$  : dépendance avec la température (optimum pour 25°C)

### 3.2 SYNTHÈSE DES DONNÉES MISES À DISPOSITION POUR LE PROJET POUR CARACTÉRISER LE « CLIMAT PRÉSENT »

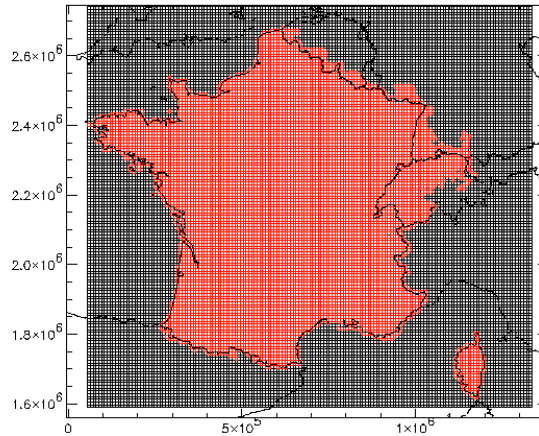
La période initialement prévue pour les réanalyses, 1970/2007, a été prolongée afin d'être cohérente avec la référence des simulations climatiques 1961-1990. Ainsi, en décembre 2010, **l'ensemble de la réanalyse Safran-Isba-Modcou a été livrée au projet Explore 2070 sur la période 1958-59/2008-09**, hormis l'évapotranspiration potentielle Safran pour lesquelles la fin de période est l'année hydrologique 2007-08.

Les réanalyses SIM livrées bénéficient d'une « réanalyse climatologique », c'est à dire du retraitement des années hydrologiques à partir des données du modèle ECMWF (du centre Européen de Météorologie) et des observations de tous les postes disponibles du réseau climatique d'état.

**Les résultats des réanalyses SAFRAN et ISBA sont fournis sur la grille Isba, grille de maille 8 km en coordonnées Lambert II, soit sur 9 892 points.**

**Cette grille couvre la France métropolitaine et la Corse, ainsi que quelques zones hors frontières.**

Figure 4 : Maillage Safran en gris, Isba en rouge (9892 points, hors frontières inclus)



**Des données de précipitations solides, précipitations liquides et température SAFRAN ont été fournies.**

L'évapotranspiration réelle, le drainage, le ruissellement, l'équivalent en eau du manteau neigeux ainsi qu'une **évapotranspiration potentielle recalculée avec la formule de Penman Monteith à partir des réanalyses Safran** ont également été livrés au projet.

### 3.3 ANALYSE DU CLIMAT ACTUEL

Dans ce chapitre, on caractérise le climat actuel sur la France métropolitaine à plusieurs niveaux d'interprétation :

- ▶ une **description générale du climat** et l'analyse des normales de pluies et température dresse un panorama global du climat français ;
- ▶ les **séries issues de la réanalyse Safran** et fournies pour le projet sont analysées en termes de moyenne des précipitations et températures, annuelles et saisonnières ;
- ▶ **l'évolution des indicateurs de précipitations et températures observée durant ces 100 dernières années** est caractérisée.

#### 3.3.1 Description générale du climat

Par rapport aux grands types de climats de la Terre (tropical humide, désertique, tempéré, sub-arctique et polaire), la France métropolitaine occupe une position particulière par sa localisation géographique. D'une part, dans sa tranche de latitude 40°N-50°N, elle est dans une zone privilégiée de circulation des perturbations atmosphériques, avec prédominance de vents d'ouest apportant un air humide. D'autre part, sa position sur la façade ouest du continent euro-asiatique la prémunit d'invasions directes d'air en provenance de l'Arctique, sachant que les trajets de ces invasions froides se situent préférentiellement sur les façades est des continents (cas de la côte est des Etats-Unis, des côtes de la Chine du nord et du Japon). Ainsi la France offre-t-elle une grande variété de climats régionaux.

Figure 5 : Le climat de la France, Arlery R. : Direction de la Météorologie Nationale.



**La France est un pays au climat tempéré mais l'étude des conditions météorologiques les plus fréquemment observées sur nos régions permet de distinguer cinq grands types de climat :**

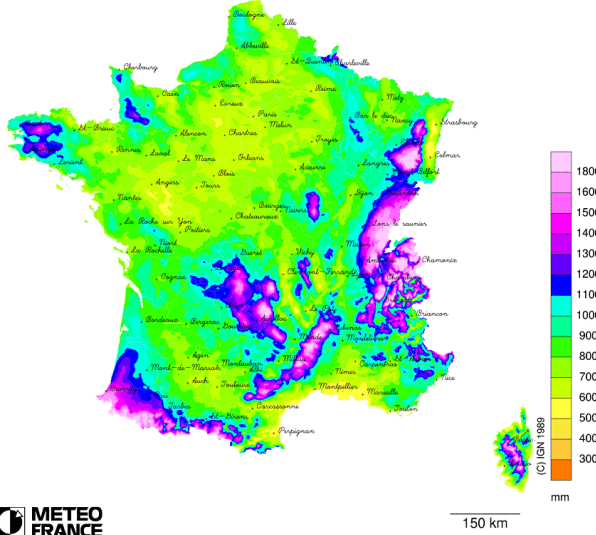
- ▶ Le climat océanique : l'hiver est généralement clément et l'été plutôt frais. Les pluies sont fréquentes en toutes saisons et rarement intenses.
- ▶ Le climat océanique altéré : les écarts annuels de températures sont plus prononcés que dans le premier type et les précipitations moindres.
- ▶ Le climat continental tempéré : les contrastes de températures sont plus importants. Les hivers sont généralement secs et rudes et les étés chauds avec des pluies souvent orageuses.
- ▶ Le climat méditerranéen : il se distingue par des hivers doux, des étés chauds, secs et bien ensoleillés. Les précipitations sont relativement abondantes, souvent sous forme d'averses, excepté sur le littoral.
- ▶ Le climat de montagne : il est caractérisé par des étés frais, des hivers très froids, et d'importantes variations de températures. Les précipitations, pluvieuses et neigeuses, sont essentiellement soumises aux effets du relief local.

### 3.3.2 Analyse des normales 1971-2000

#### 3.3.2.1 Par type de paramètre

**Figure 6 : précipitations moyennes annuelles sur la France métropolitaine -période 1971-2000**

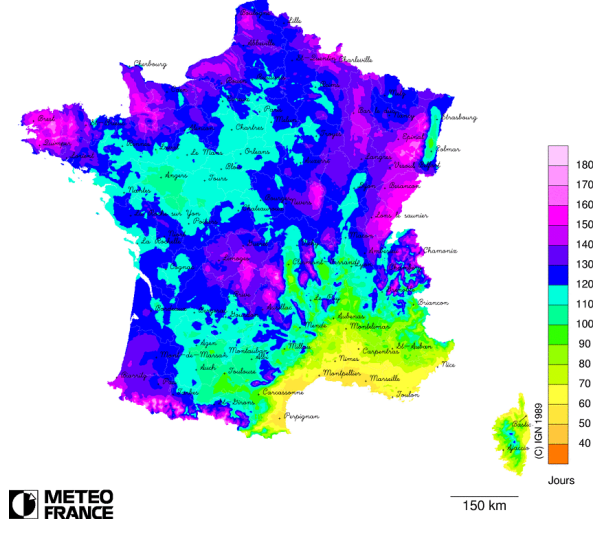
PRECIPITATIONS ANNUELLES (en mm : 1mm=1l/m2)  
MOYENNES 1971-2000



En France, la **hauteur moyenne des précipitations** est de **900 mm par an** (1 mm de pluie représente 1 litre d'eau par mètre carré) mais elle varie de moins de 600 mm en quelques régions (côte méditerranéenne, Beauce...) à plus de 2000 mm en d'autres régions (Mont-Aigoual...).

**Figure 7 : Nombre moyen annuel de jours de précipitations- période 1971-2000**

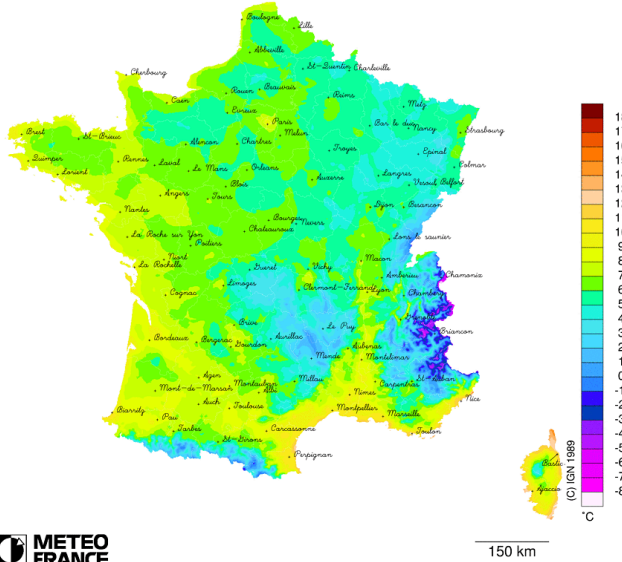
Nombre moyen annuel de jours de précipitations >= 1mm  
Moyennés 1971-2000



Le total moyen annuel de jours avec **des hauteurs de précipitations supérieures** à 1 mm sur la France s'échelonne de moins de 70 jours sur la côte méditerranéenne à plus de 150 jours en Bretagne.

**Figure 8 : température minimale annuelle moyenne - période 1971-2000**

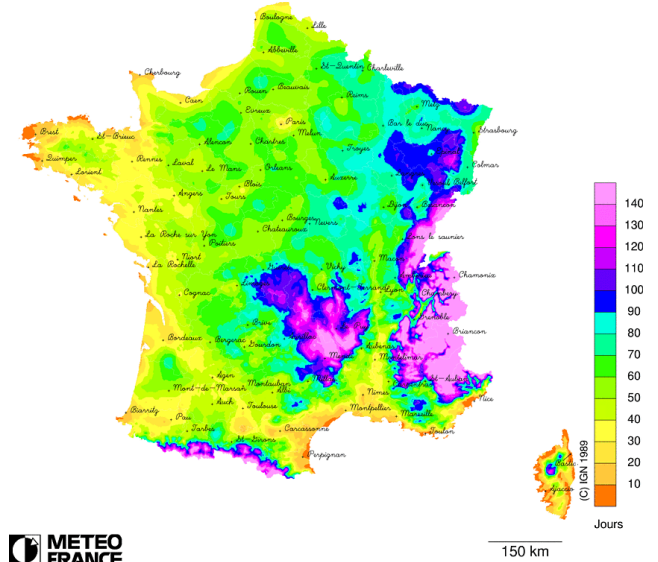
Température minimale moyenne annuelle (en degrés Celsius)  
Moyennes 1971-2000



La **température** varie également avec les saisons, janvier étant le mois le plus froid et juillet le plus chaud.

**Figure 9 : nombre moyen annuel de jours avec gelée sous abri - période 1971-2000**

Nombre moyen annuel de jours avec gelée sous abri  
Moyennes 1971-2000



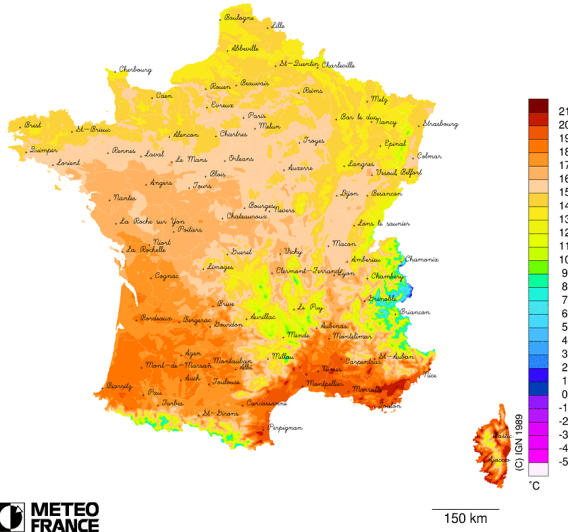
Pour les météorologistes, un jour est considéré comme « **jour avec gelée sous abri** » si, au cours de la journée, la température a atteint ou est descendue en-dessous de 0°C.



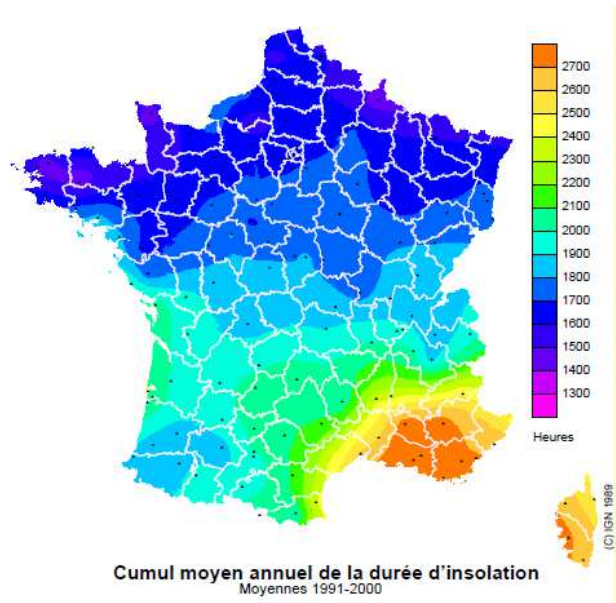


**Figure 10 : température maximale annuelle moyenne -moyennes 1971-2000**

Température maximale moyenne annuelle (en degrés Celsius)  
Moyennes 1971-2000



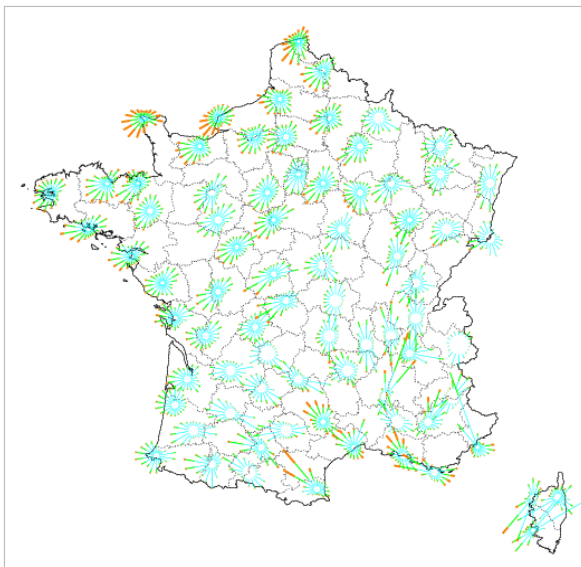
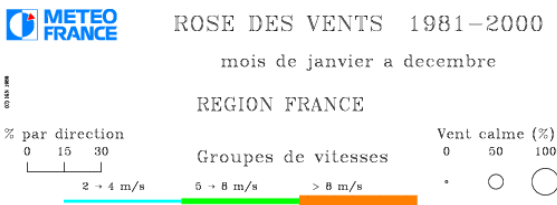
**Figure 11 : cumul moyen annuel de la durée d'insolation - moyennes 1971-2000**



La **température** varie dans le temps et dans l'espace. Au cours de la journée, la température est habituellement plus basse la nuit que le jour, avec une température minimale atteinte peu après l'heure du lever du soleil, et une température maximale environ deux ou trois heures après le passage du soleil au méridien.

La **durée d'insolation** correspond au temps pendant lequel le soleil est visible au-dessus de l'horizon et fournit une énergie supérieure à un certain seuil. La durée d'insolation varie au cours de l'année, elle est minimale en décembre et maximale en juillet. Elle s'accroît également progressivement du nord vers le sud.

**Figure 12 : roses des vents - période 1981-2000**



La direction et la vitesse du **vent** sont le plus souvent déterminées par la position des dépressions (zones de basses pressions atmosphériques) et des anticyclones (zones de hautes pressions atmosphériques) mais le relief et la disposition des vallées peuvent modifier localement les caractéristiques des vents dominants. Les régions les plus exposées aux vents violents sont le Languedoc-Roussillon et la Provence.

Citons quelques **vents régionaux** : **l'Autan**, vent de sud-est assez violent sur l'axe Carcassonne-Toulouse; **la Bise**, vent de nord à nord-est plus fréquent en hiver sur le nord-est du pays; **le Mistral**, vent froid, sec et souvent très violent qui souffle dans la vallée du Rhône, le triangle Valence-Montpellier-Toulon et sur le golfe du Lion; **la Tramontane**, vent de nord-ouest froid sec et violent qui souffle sur le Languedoc-Roussillon.

**3.3.2.2 Cumuls de précipitation et température moyenne par station**

Tableau 3 : Cumuls de précipitations mensuelles et annuelles, en mm - normales 1971-2000

Nom station	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Brest-Guipavas	138.5	115.8	97.5	81.8	72.6	57.0	50.9	60.3	89.2	119.1	121.0	143.0	1146.7
Chamonix	89.4	93.6	80.8	83.2	112.7	130.6	113.1	110.3	105.9	119.9	115.4	105.6	1260.5
Marseille-Marignane	53.6	43.5	40.4	57.9	41.2	25.4	12.6	31.4	60.6	85.4	50.6	52.0	554.6
Paris-Montsouris	53.7	43.7	48.5	53.0	65.0	54.6	63.2	43.0	54.7	59.7	51.9	58.7	649.7
Strasbourg-Entzheim	30.0	35.1	36.1	42.5	78.2	76.9	66.2	57.9	62.1	52.5	49.8	44.6	631.9
Toulouse-Blagnac	51.7	51.3	53.8	66.8	77.2	64.4	45.4	50.5	52.2	52.3	50.7	52.2	668.5

Tableau 4 : Températures moyennes mensuelles et annuelles, en °C - normales 1971-2000

Nom station	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Brest-Guipavas	6.6	6.8	8.0	9.2	12.1	14.4	16.6	16.8	15.1	12.3	9.2	7.6	11.2
Chamonix	-2.3	-0.6	2.7	5.9	10.6	13.5	16.0	15.7	12.4	8.0	2.0	-1.6	6.9
Marseille-Marignane	7.1	8.2	10.7	13.1	17.4	21.1	24.1	23.9	20.4	16.0	10.7	8.0	15.1
Paris-Montsouris	4.7	5.5	8.4	10.8	14.8	17.5	20.0	20.0	16.6	12.5	7.9	5.7	12.0
Strasbourg-Entzheim	1.6	2.8	6.7	9.7	14.3	17.3	19.5	19.3	15.5	10.6	5.3	2.8	10.4
Toulouse-Blagnac	5.8	7.2	9.3	11.4	15.4	18.7	21.6	21.7	18.5	14.3	9.1	6.7	13.3

### 3.3.3 Résultats de la Réanalyse Safran 1961-1990

#### 3.3.3.1 Formalisme de présentation des résultats

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, indiquant l'intervalle de confiance de l'indice, ainsi que les valeurs extrêmes.

On donne un intervalle de confiance pour l'écart moyen à la valeur moyenne correspondant à un **niveau de confiance de 95%**. Un intervalle de confiance propre sur la valeur moyenne est déterminé à partir des valeurs de l'échantillon (30 pour la période 1961-1990) en considérant une distribution normale et l'indépendance de ces valeurs. Selon la loi de Student, cet intervalle de confiance autour de la valeur moyenne de l'indice est estimé de la façon suivante :

$$\left[ \bar{X} - t \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} ; \bar{X} + t \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} \right]$$

avec t issu de la table de Student pour un risque à 5%.

Les valeurs entre parenthèses donnent une indication sur les extrêmes. Elles correspondent aux valeurs minimale et maximale obtenues sur la période considérée parmi l'échantillon de valeurs annuelles.

Les saisons météorologiques métropolitaines sont découpées de la façon suivante : décembre-janvier-février (DJF), mars-avril-mai (MAM), juin-juillet-août (JJA) et septembre-octobre-novembre (SON).

Dans les tableaux ci-dessous sont représentées les valeurs moyennes des températures quotidiennes et des cumuls de précipitation réanalysés par Safran, obtenues en faisant la moyenne des valeurs des 9892 points de la grille..

La période 1961-1990 est choisie afin d'être cohérent avec la période de référence des simulations climatiques.

Les cartes ci-après sont conçues en projetant la valeur moyenne de chaque maille permettant ainsi de visualiser la répartition géographique des températures et précipitations sur le territoire métropolitain, par saison et par année.

### 3.3.3.2 Les températures

Tableau 5 : Valeur moyenne de la température quotidienne Safran réanalysée, pour la période 1961-1990, par saison et par année - Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. En °C

Valeur moyenne	Intervalle de confiance	Min/max	saison
9,9	9,7/ 10,0	( 8,8/ 11,1)	ANNEE
3,1	2,6/ 3,5	( -1,1/ 5,6)	DJF
8,6	8,4/ 8,9	( 7,4/ 10,3)	MAM
17	16,7/ 17,2	( 15,3/ 19,1)	JJA
10,6	10,4/ 10,8	( 8,8/ 11,6)	SON

Figure 13 : Valeur moyenne annuelle de la température quotidienne Safran réanalysée pour la France métropolitaine, pour la période 1961-1990. En °C

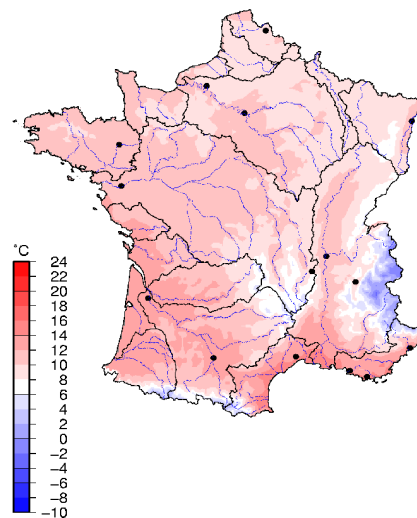
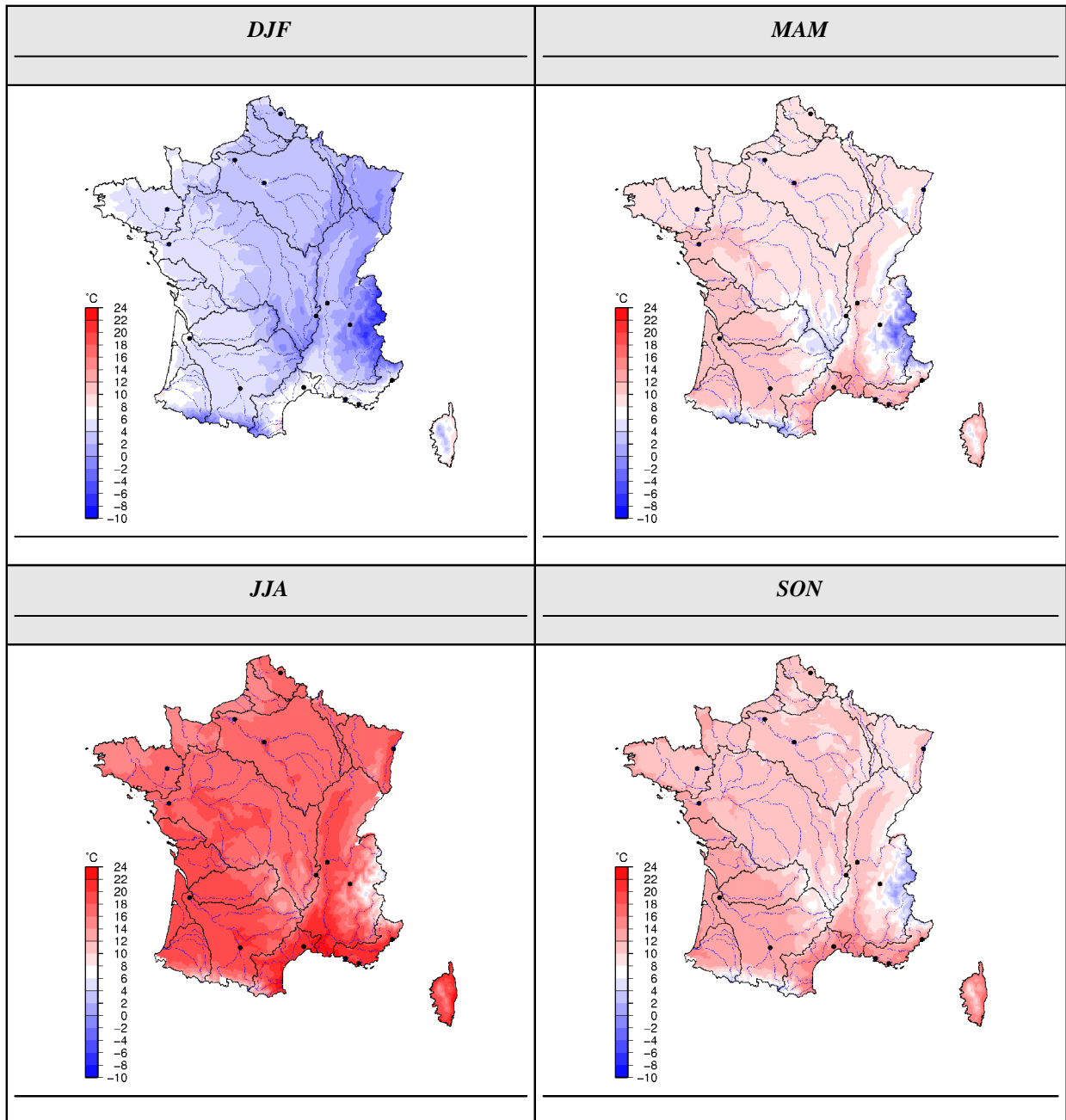


Figure 14 : Valeur moyenne de la température quotidienne Safran réanalysée pour la France métropolitaine par saison, pour la période 1961-1990. En °C



### 3.3.3.3 Les précipitations

Tableau 6 : Valeur moyenne du cumul de précipitation Safran réanalysé, pour la période 1961-1990, par saison et par année Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. En mm.

Valeur moyenne	Intervalle de confiance	Min/max	saison
939,4	899,5/ 979,3	(699,4/ 1212,7)	ANNEE
254,3	233,7/ 275,0	(123,7/ 380,5)	DJF
236,2	220,0/ 252,5	(123,6/ 354,5)	MAM
198,3	184,6/ 212,0	(103,9/ 300,0)	JJA
250,6	229,4/ 271,7	(85,0/ 381,5)	SON

Figure 15 : Cumul de précipitations Safran réanalysée pour la France métropolitaine par année, pour la période 1961-1990. En mm

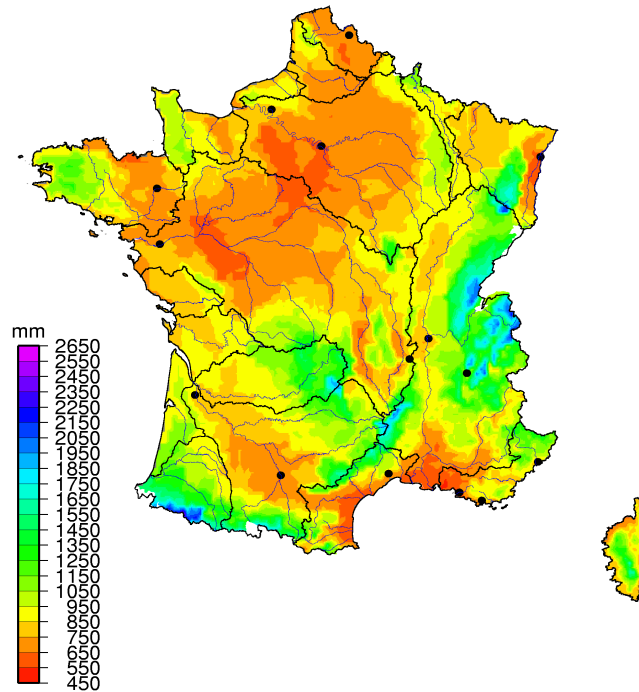
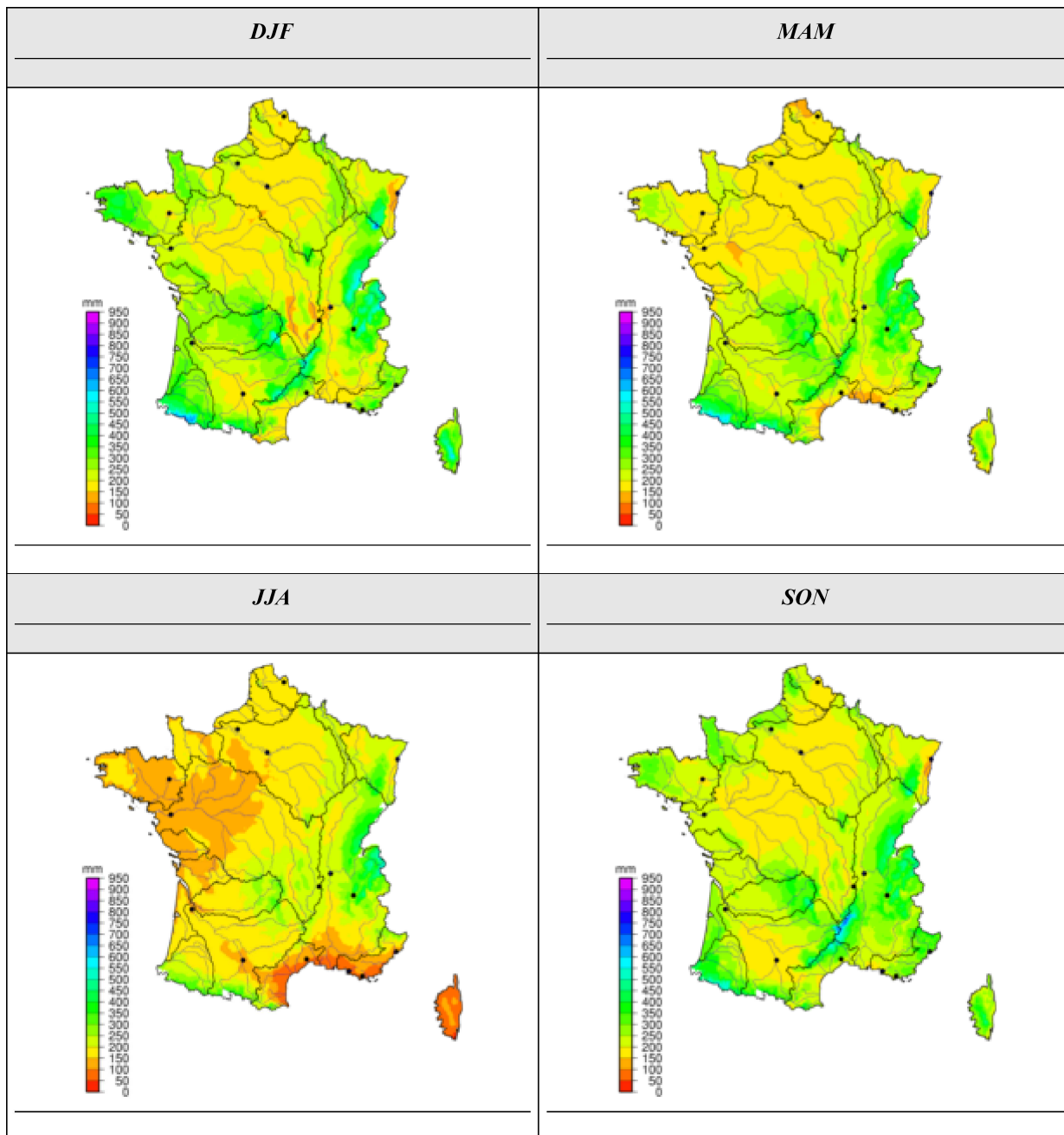


Figure 16 : Cumul de précipitations saisonnières Safran réanalysée pour la France métropolitaine par saison, pour la période 1961-1990. En mm



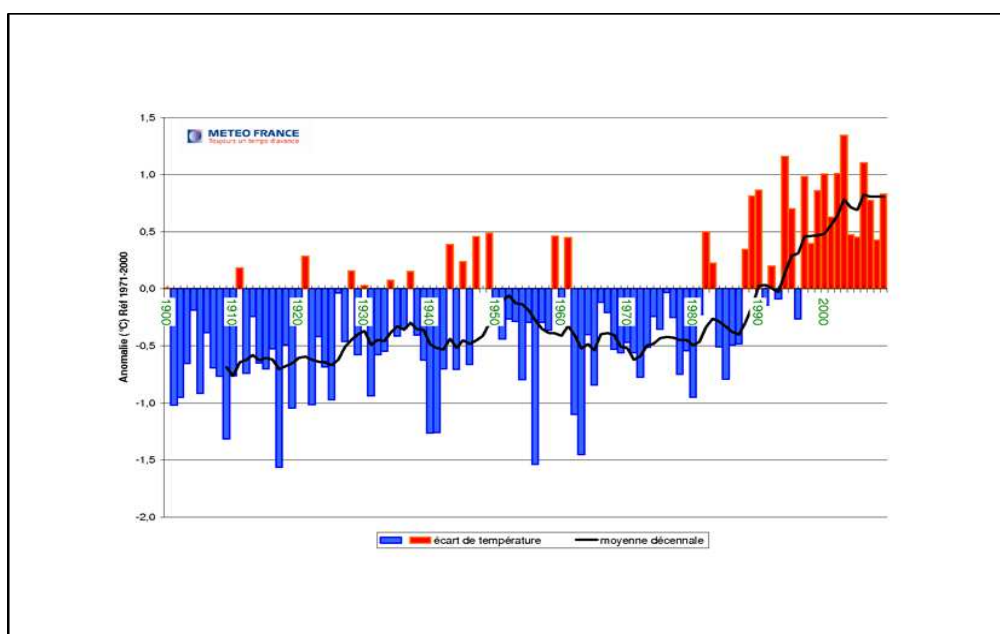
### 3.3.4 Évolution des indicateurs climatiques

#### 3.3.4.1 Évolution rétrospective des températures

Sur la Figure 17, l'indicateur température moyenne annuelle en métropole est élaboré à partir d'une sélection de postes répartis de manière équilibrée sur le territoire. La tendance donne une idée de l'amplitude du changement sur une période donnée. L'utilisation d'un test statistique (test de Mann-Kendall) permet d'examiner si l'évolution est significative ou pas (c'est à dire si elle se distingue ou pas de la variabilité d'une année sur l'autre).

Cet indicateur est disponible sur le site internet de l'ONERC, réactualisé chaque année.

Figure 17 : Evolution de l'indicateur de température moyenne annuelle en France métropolitaine sur la période 1900-2009



L'évolution de la température moyenne annuelle sur la France métropolitaine est représentée sous forme d'écart à la moyenne de la période 1971 à 2000.

- ▶ On retrouve les mêmes caractéristiques que pour l'évolution à l'échelle mondiale : **le réchauffement des températures moyennes est très net.**
- ▶ Jusqu'au milieu des années 1980, l'écart est le plus souvent négatif : la température moyenne annuelle est le plus souvent inférieure à la moyenne de la période 1971-2000.
- ▶ **A partir de la fin des années 80, les températures moyennes augmentent rapidement et l'écart est presque systématiquement positif.**
- ▶ L'année 2003 est l'année la plus chaude de la série. Avec une température moyenne supérieure de 0,8 °C à la moyenne de la période 1971 à 2000, l'année 2009 se situe en France métropolitaine au neuvième rang des années les plus chaudes depuis 1900.

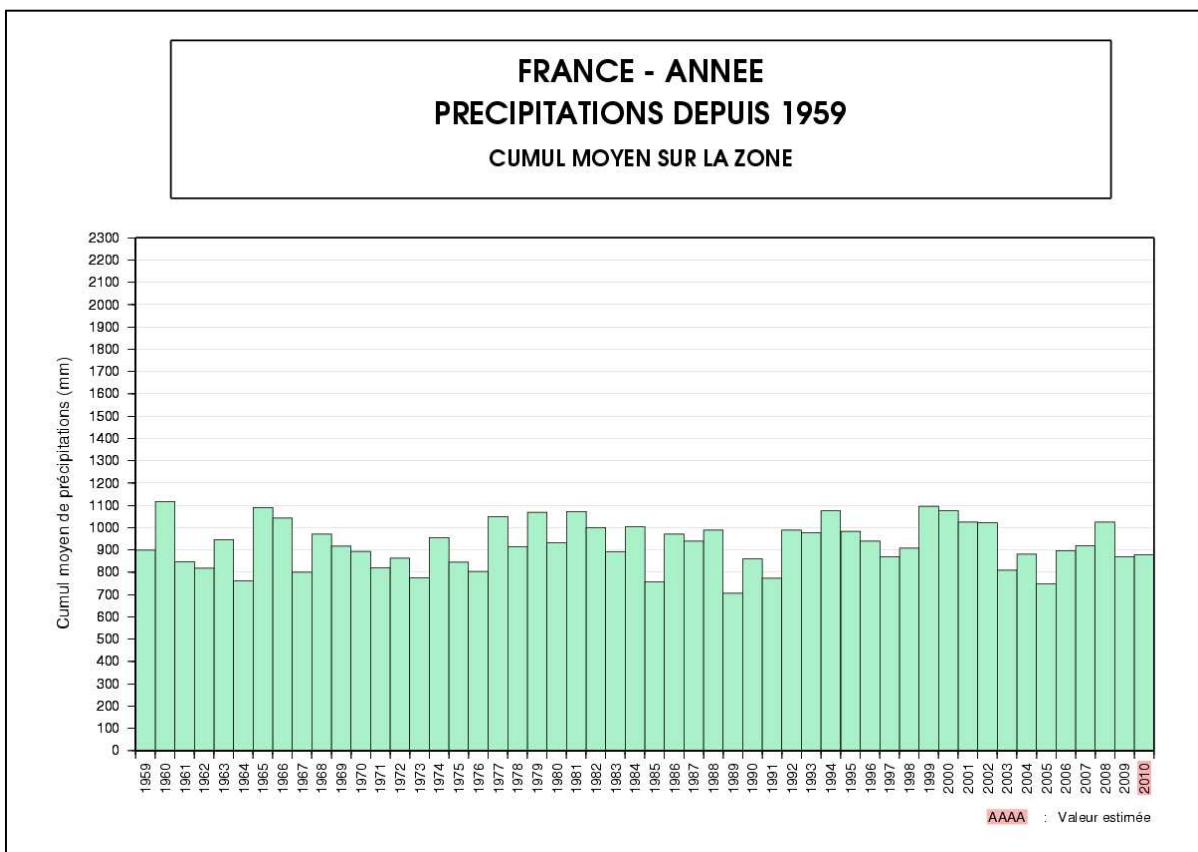


### 3.3.4.2 Évolution rétrospective des précipitations

#### ÉVOLUTION SUR LA PÉRIODE 1959 À 2010

La réanalyse Safran permet de reconstituer un indicateur de précipitations (obtenu par cumul des précipitations quotidiennes, moyenné pour l'ensemble des points Safran) pour la France métropolitaine, représenté ci-après :

Figure 18 : Evolution de l'indicateur de cumul annuel moyen de précipitations en France métropolitaine sur la période 1959-2010



Aucun signal significatif n'est observé sur la période, en cumul annuel moyen de précipitations en France métropolitaine.

## ÉVOLUTION SUR LA PÉRIODE 1901-2000

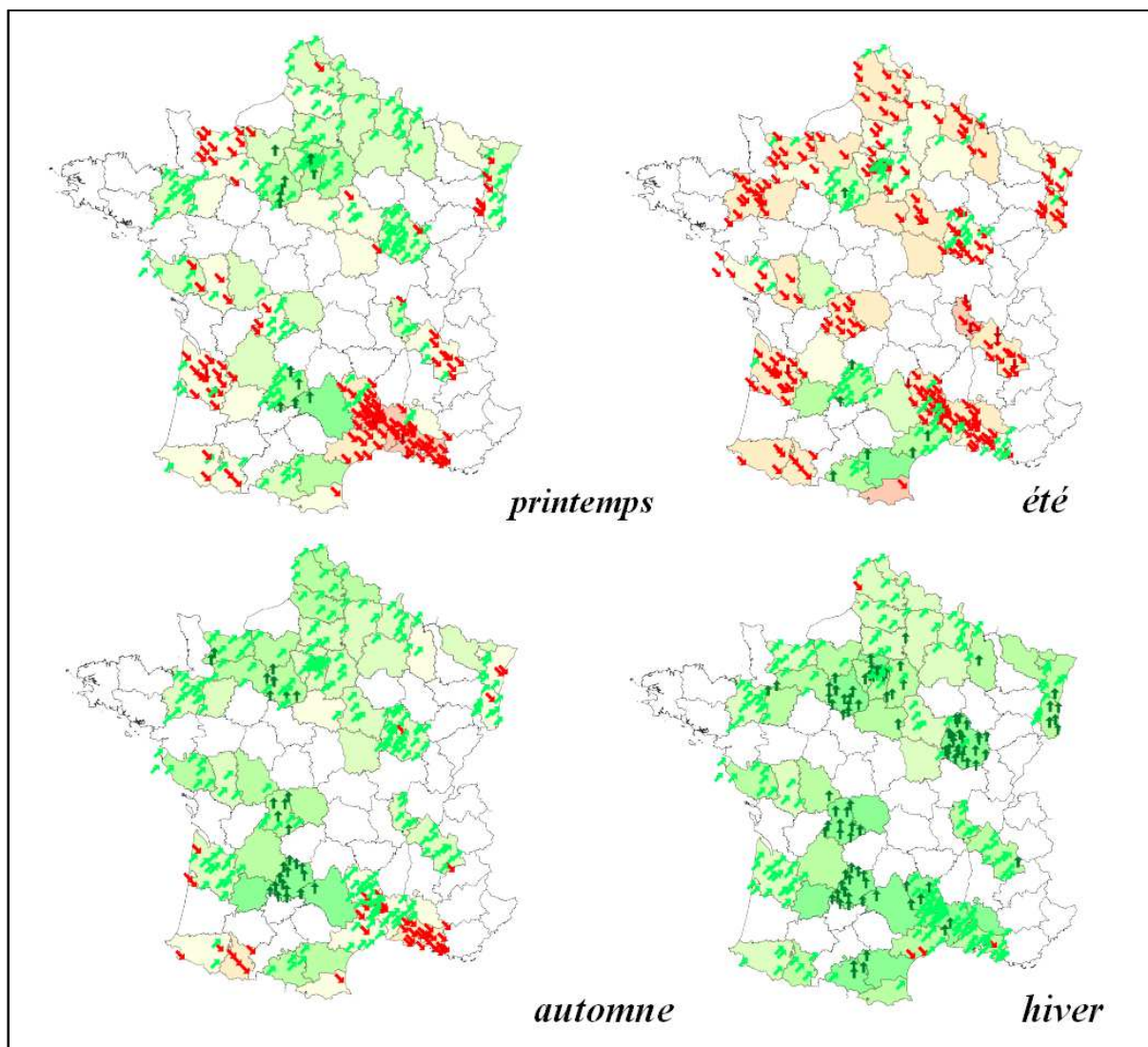
Les cartes ci-dessous présentent les résultats du test de Spearman avec une confiance à 95 % appliqué aux séries séculaires homogénéisées de hauteurs de précipitations (1901-2000).

Les saisons météorologiques sont ici utilisées : mars, avril, mai pour le printemps, juin, juillet, août pour l'été, septembre, octobre, novembre pour l'automne et décembre, janvier, février pour l'hiver.

La légende ces cartes est la suivante :

- ▶ flèche verte verticale : hausse significative,
- ▶ flèche verte inclinée : hausse non significative,
- ▶ flèche rouge inclinée : baisse non significative,
- ▶ flèche rouge verticale : baisse significative.

Figure 19 : Test de Spearman avec une confiance à 95 % appliqué aux séries séculaires homogénéisées de hauteurs de précipitations (1901-2000).



Ces résultats sont présentés dans l'article « *Les changements climatiques en France au XXe siècle - Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations* » (Moisselin et al., La Météorologie n°38-2002) (incluant également une analyse des températures et de l'indice de sécheresse).

L'étude menée par Ribes A, Azaïs J-M, Planton S (2009) « *A method for regional climate change detection using smooth temporal patterns* » aboutit sensiblement aux mêmes résultats par une méthode statistique différente sur les évolutions des températures et précipitations en France, et leur significativité, à partir de longues séries homogénéisées, via des méthodes statistiques différentes.

Parmi les conclusions communes de ces études, on peut citer :

- ▶ un accroissement sur un siècle des températures moyennes en France important ;
- ▶ une augmentation de la température moyenne maximale sur le sud-ouest du territoire ;
- ▶ les séries homogénéisées de précipitations dessinent une pluviométrie plutôt en hausse sur le XXe siècle ;
- ▶ des contrastes nord-sud apparaissent : on trouve quelques cumuls annuels de précipitations en baisse sur le sud du territoire français.

## 4. CARACTÉRISATION DES ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070

Dans ce chapitre sont présentées les chaînes de modélisation mises en œuvre pour la production des simulations climatiques fournies au projet. Ces simulations permettent d'appréhender les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2050-2070 et, à l'issue des modélisations hydrologiques aval, d'appréhender les évolutions hydrologiques possibles. **L'analyse des simulations et la caractérisation des évolutions climatiques possibles est présentée au paragraphe 4.3.**

Pour aller plus loin dans la compréhension et la connaissance des outils de modélisation climatique, le lecteur pourra se référer à l'Annexe 1 du présent rapport.

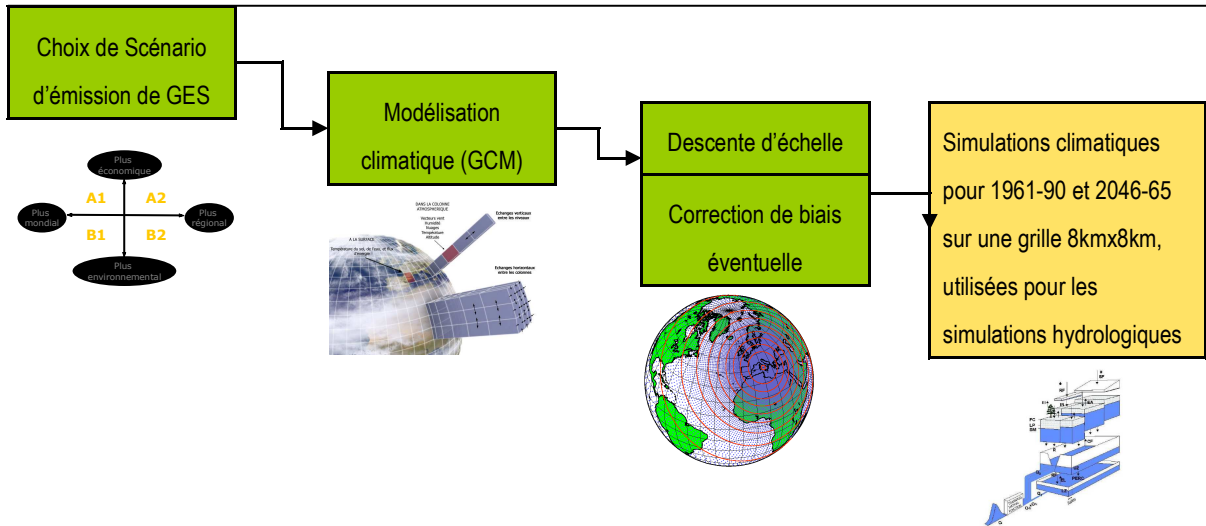
### 4.1 MÉTHODOLOGIE

#### 4.1.1 Démarche générale pour la production de simulations climatiques

La démarche mise en œuvre pour la production de simulations climatiques exploitables par l'étude d'impact sur l'hydrologie de surface mobilise une série d'étapes que l'on peut résumer comme suit :

- ▶ Etape 1 : Construction de scénario d'émission et/ou de concentration en gaz à effet de serre. Ces scénarios sont la résultante de facteurs socio-économiques à considérer à l'échelle du globe : démographie, choix énergétique, croissance économique, politiques agricoles, ...
- ▶ Etape 2 : Modélisation des changements climatiques avec des modèles globaux (planétaires) à large maille. Ces modèles simulent le système global de circulation atmosphérique (avec ses interactions végétation-sols/océans/atmosphère) et l'impact des gaz à effet de serre sur ce système.
- ▶ Etape 3 : Descente d'échelle. Il s'agit d'obtenir, à partir des données de sortie des modèles globaux, par diverses méthodes possibles, des résultats de projections climatiques à un pas d'espace plus fin, compatible avec les objets sur lesquels on va étudier les impacts du changement climatique (en l'occurrence ici des bassins versants).

Figure 20 : Vue globale de la chaîne de modélisation climatique



Pour chaque étape de modélisation, on présente ci-après une vue d'ensemble des outils disponibles d'une part et les choix retenus pour Explore2070 d'autre part. L'Annexe 1 apporte des précisions sur ces outils de modélisation.

#### 4.1.2 Scénario d'émission de gaz à effet de serre

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques. Ils composent, non pas des prévisions, irréalisables à l'échelle de plusieurs décennies, mais des scénarios d'évolution du climat, supposés couvrir un large éventail d'évolutions possibles.

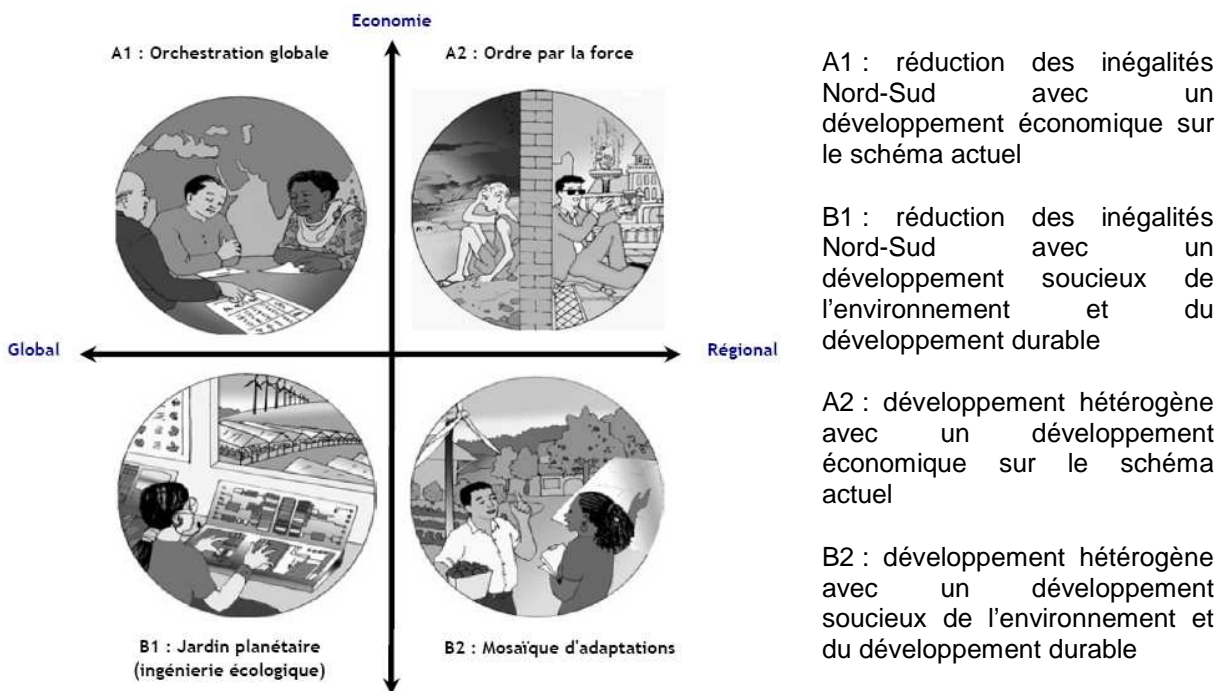
Dans le 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC (IPCC AR4), différentes familles de scénarios d'émissions de GES sont utilisés :

- ▶ La famille de **scénarios A1** décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille de **scénarios A1** se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique :
  - forte intensité de combustibles fossiles (A1FI),
  - sources d'énergie autres que fossiles (A1T),
  - et équilibre entre les sources (A1B) (« équilibre » signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies d'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).
- ▶ La famille de **scénarios A2** décrit un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.
- ▶ La famille de **scénarios B1** décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiative supplémentaires pour gérer le climat.

- La famille de scénarios **B2** décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Le schéma ci-après, qui combine les approches du GIEC et celle du projet Millenium (<http://www.millenniumassessment.org/en/index.html>) illustre les différents scénarios.

Figure 21 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre de l'AR4



d'après <http://www.millenniumassessment.org/en/index.html>

**Pour Explore2070, le scénario d'émission de GES A1B a été sélectionné. Ce choix a été dicté par des raisons de disponibilité de données au moment du démarrage du projet.**

Au moment du démarrage du projet Explore 2070, il s'agissait en effet du seul scénario pour lequel un grand nombre de modèles désagrégés étaient disponibles sur la France avec une finesse de résolution assez fine (8 km) pour les ambitions du projet.

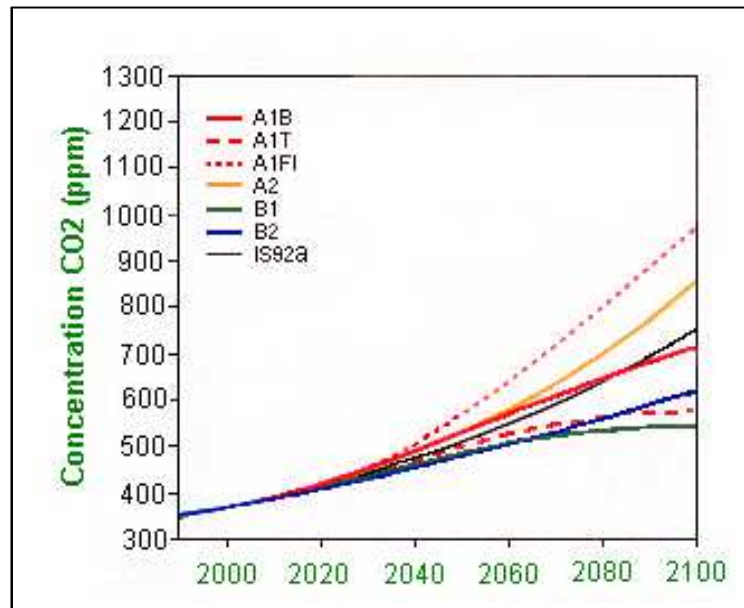
Il s'agit d'un **scénario médian** comme illustré sur le graphe suivant.

**Cependant, l'utilisation d'un unique scénario ne permet pas de rendre compte, dans les résultats du présent projet, des incertitudes liées à l'estimation des concentrations de gaz à effet de serre.**

**Ces incertitudes peuvent être très fortes. Les résultats hydrologiques finaux pourraient être fortement influencés par ce choix de scénario, sans que l'on puisse le mesurer.**

**Les incertitudes induites par le choix du scénario de concentration de gaz à effet de serre sont commentées dans le rapport A1 (rapport de synthèse).**

Figure 22 : évolutions des concentrations de CO<sub>2</sub> pour les différents scénarii utilisés par le GIEC (source : <http://www.ipcc-data.org>)

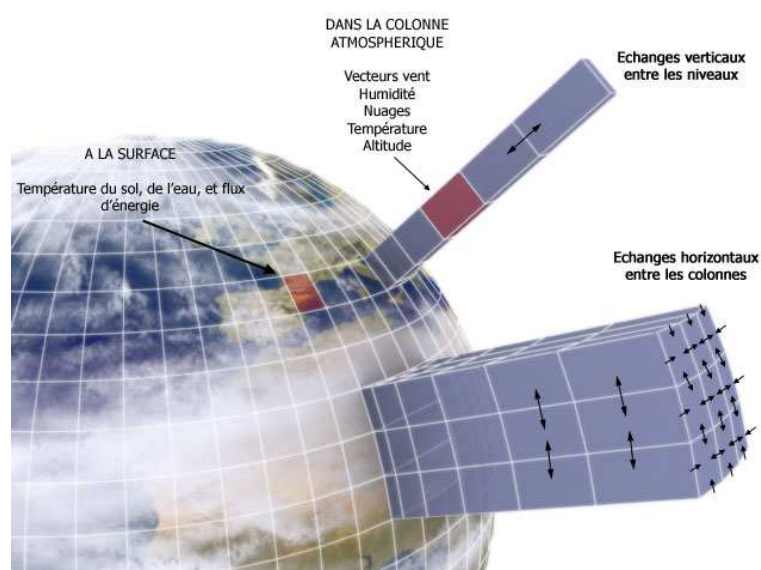


### 4.1.3 Modélisation climatique globale

#### 4.1.3.1 Modèles climatiques globaux ayant généré les simulations climatiques utilisées dans Explore 2070

Les simulations climatiques sont produites par des **modèles de circulation générale (GCM)**. Il s'agit de modèles couplés océan-atmosphère qui modélisent la partie organisée des écoulements atmosphériques et océaniques, responsable du climat.

Figure 23 : Processus et maillage des modèles de climat



Source : [menaceclimatique.free.fr](http://menaceclimatique.free.fr)

**Les différents résultats des modélisations climatiques utilisées dans Explore 2070 sont issus de 7 modèles climatiques globaux.**

**Ces 7 modèles ont été choisis parmi plus de 20 modèles pour lesquels des résultats désagrégés étaient disponibles au pas d'espace 8 km x 8 km.**

Tableau 7 : Liste des 7 modèles de circulation générale dont les résultats ont été utilisés pour Explore 2070

<b>GCM (GIEC)</b>	<b>Nomenclature Explore 2070</b>
<b>CCMA</b>	C1
<b>ECHAM5</b>	C2
<b>ARPV3</b>	C3
<b>GFDL20</b>	C4
<b>GFDL21</b>	C5
<b>GISS</b>	C6
<b>MRI</b>	C7

#### **ANALYSE DE LA DISPERSION DES MODÈLES SÉLECTIONNÉS POUR EXPLORE 2070 (/REXHYSS) PARMIL'ENSEMBLE DES MODÈLES DISPONIBLES**

**Explore 2070 a repris une sélection qui avait été déjà établie dans le cadre du projet Rexhyss** (Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme).

Cette sélection de 7 modèles a été réalisée après analyse des simulations désagrégées issues de la vingtaine de modèles disponibles. Ce travail de désagrégation par la méthode de descente d'échelle DSCLIM (voir ci-après le paragraphe 4.1.4.) a été réalisé par le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) : scénarios dits « SCRATCH08 ».

Les graphiques ci-dessous présentent la dispersion entre les différents scénarios et illustrent la **représentativité des 7 modèles choisis parmi les différentes simulations disponibles.**

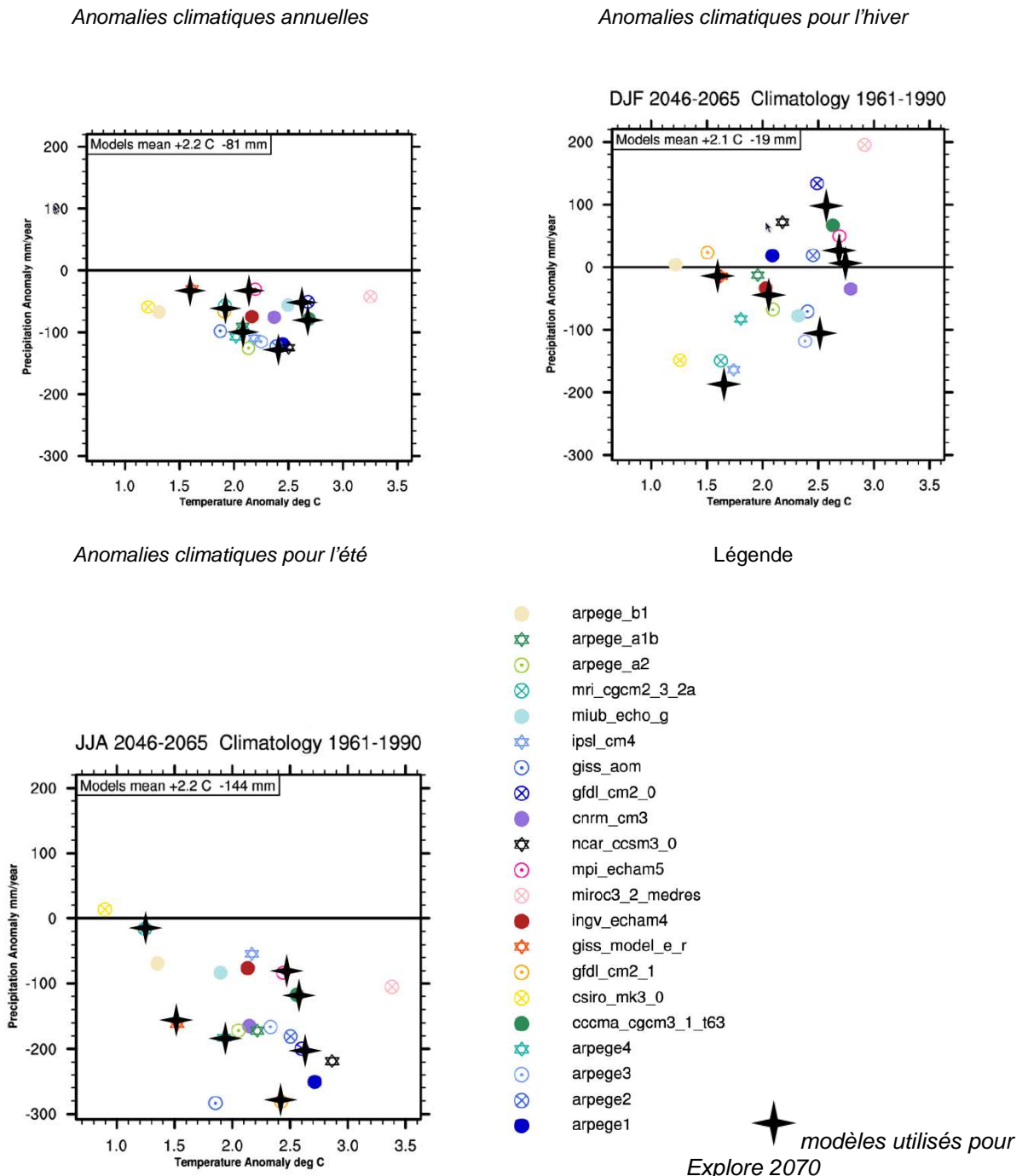
Les données sur les axes « anomalies de températures » et « anomalies de précipitations » représentent les anomalies par rapport à une période de référence (écart entre période future et période de référence, en °C pour les températures et en mm pour les précipitations). Les résultats sont montrés pour deux saisons (hiver : mois de décembre, janvier et février, et été : mois de juin, juillet et août) ainsi que pour la moyenne annuelle. Ces graphiques sont issus du rapport « *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08* » (Pagé, Terray, Boé, 2008). La période de référence est 1961-1990, les anomalies couvrent la période 2046-2065.

Les étoiles marquent les modèles utilisés dans le cadre du projet Rexhyss et dans le cadre du présent projet Explore 2070.

Le principal aspect qui ressort des figures est que, malgré une dispersion importante au niveau des températures, l'été montre un assèchement marqué au niveau des quantités de précipitations pour la presque totalité des simulations. Les scénarios Rexhyss/Explore2070 balaisent de manière satisfaisante les nuages de points.



Figure 24 : Situation des 7 modèles climatiques retenus pour Explore 2070 parmi la vingtaine possible



Source : « Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénari SCRATCH08 »

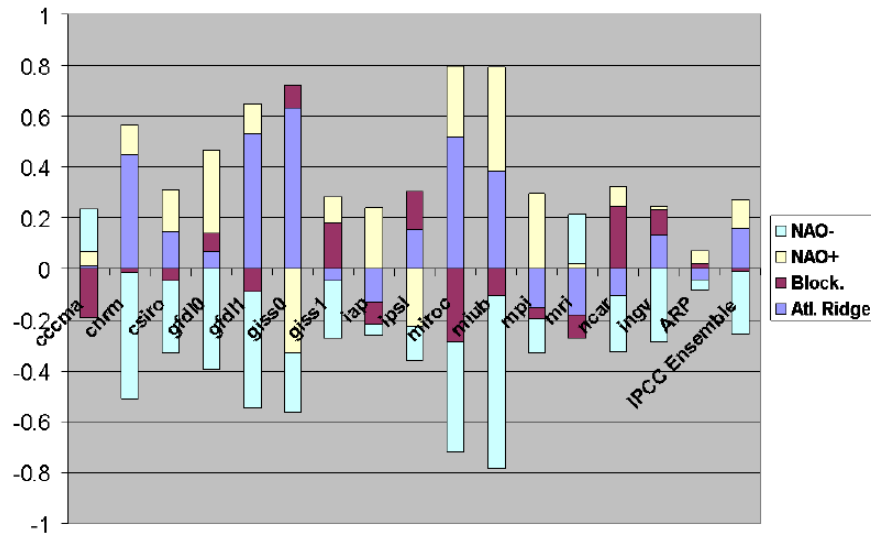
Les graphiques  $\Delta T \Delta P$  présentent les anomalies de température et précipitation pour l'hiver DJF (en haut), l'été JJA (en bas), et la moyenne annuelle (au centre). La période présentée est 2046-2065 avec comme référence 1961-1990, la moyenne spatiale étant calculée sur un domaine couvrant la France entière.

Une analyse complémentaire vient interroger les types de temps<sup>1</sup> générés des différents modèles climatiques. Les modèles présentant des résultats contrastés ont été sélectionnés afin de reproduire au mieux la gamme des possibles générée par l'ensemble des modèles du GIEC.

<sup>1</sup> Cf. thèse Boé

La figure ci-dessous illustre les variations futures versus référence de quatre grands types de régime de temps NAO-, NAO+, Blocage et dorsale Atlantique impactant sur la France en hiver (d'après J. Boé, *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*, Thèse, Université Paul Sabatier 2007.)

Figure 25 : Changements relatifs de la fréquence d'occurrence des 4 régimes d'hiver entre les périodes 1961-2000 et 2081-2100 dans différents modèles du GIEC et le modèle ARPEGE-VR (ARP) (source : Boé, 2007).



L'analyse de ces résultats conjointe à d'autres critères de décision a permis de distinguer les modèles GFDL-CM 2.0, GFDL-CM2.1, GISS-Model ER et ECHAM5-MPI pour leurs répartition des types de temps assez contrastées. CCCMA-CGCM et MRI-CGCM3.2 ont quant à eux été choisis car générant plus de type NAO-, soit des précipitations plus importantes en hiver.

#### 4.1.3.2 Les simulations climatiques utilisées dans Explore 2070

##### PÉRIODE DE RÉFÉRENCE ET PÉRIODE FUTURE

L'utilisation de ces modèles climatiques permet de générer :

- ▶ **des simulations de référence** obtenues sur une période historique en faisant varier les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols selon les valeurs observées. **Pour Explore2070, il s'agit de 1961-1990.**
- ▶ **les simulations climatiques** (parfois appelées scénarios climatiques) : simulations climatiques obtenues en faisant varier les concentrations des gaz à effet de serre (GES) et des aérosols fournies par les scénarios socio-économiques. **Pour Explore2070, la période est 2046-2065.**

**LES MODÈLES NE PRÉVOIENT PAS LE TEMPS QU'IL FERA UN JOUR DONNÉ MAIS GÉNÈRENT DES PROJECTIONS DE CLIMATS FUTURS POSSIBLES**

Il est en effet important de comprendre que les **situations météorologiques simulées sont virtuelles et n'ont pas pour objectif, pour une date de validité donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée).**

#### 4.1.4 Descente d'échelle et correction de biais

##### LES SIMULATIONS ISSUES DES MODÈLES GLOBAUX SONT TROP PEU PRÉCISES POUR DES ÉTUDES D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LA NÉCESSAIRE DESCENTE D'ÉCHELLE

Pour des raisons de limitation de la puissance de calcul des ordinateurs disponibles et de stockage des résultats, **les modèles de circulation générale utilisés pour les simulations climatiques à l'échelle du globe possèdent généralement une résolution de l'ordre de quelques centaines de kilomètres**. En ne décrivant pas - ou en décrivant trop grossièrement - certaines composantes du paysage (îles, montagne, vallées), ces simulations ignorent les effets de ces composantes sur le climat. Par ailleurs, les processus d'échelle inférieure à la maille, tels que par exemple les orages, ne sont pas décrits explicitement.

De même, à cette résolution, ces modèles ne permettent pas de fournir des données assez précises (spatialement) pour toutes les études d'impact du changement climatique, comme par exemple l'impact du changement climatique sur les glaciers, sur un fleuve particulier, sur les maladies tropicales, sur l'océan côtier, ... Ces domaines ont besoin de simulations à plus haute résolution spatiale. **La descente d'échelle est ainsi nécessaire pour Explorer 2070 où les simulations climatiques sont utilisées comme données d'entrée de modèles hydrologiques** qui simulent la transformation de la pluie en débit à l'échelle de bassins versants. Ces bassins peuvent être de petites tailles et il est ainsi fondamental que la maille à laquelle on travaille soit assez réduite.

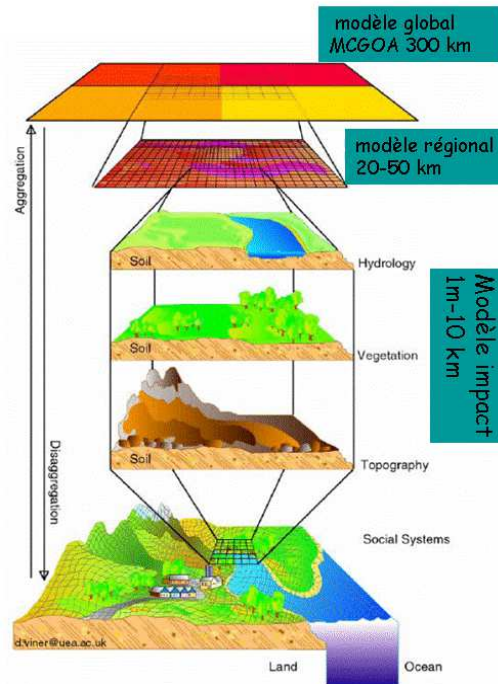
Le dernier inconvénient des modèles à basse résolution est leur faible capacité à simuler les événements extrêmes qui sont souvent liés à des processus ou à des forçages de petites échelles.

Pour ces raisons, la communauté scientifique du climat a développé la notion de **régionalisation climatique** à partir de **méthodes de désagrégation spatiale appelée également descente d'échelle**.

Les principaux objectifs de la régionalisation sont :

- ▶ améliorer la représentation de la variabilité spatiale et temporelle du climat et de son évolution, en particulier les statistiques des événements extrêmes climatiques (vagues de chaleurs, fortes pluies, sécheresses, tempêtes, cyclones, ...)
- ▶ faciliter les études d'impacts du changement climatique sur les différents secteurs socio-économiques (hydrologie, écosystèmes, santé, ...).

Figure 26 : La problématique de la désagrégation. Source Climate Research Unit, University of East Anglia



**Il faut noter que la méthode de descente d'échelle peut induire des incertitudes importantes, qui ne pourront pas être quantifiées en raison du choix de méthode unique.** En particulier, les incertitudes liées à la descente d'échelle peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al. 2007) et sur les débits (Quintana 2010). **Un état de l'art concernant les incertitudes induites par l'étape de descente d'échelle est proposé dans le document A1 - Rapport de synthèse.**

#### PRÉCISIONS SUR LES MÉTHODES DE DESCENTE D'ÉCHELLE

Deux approches complémentaires existent en matière de méthodes de descente d'échelle :

- ▶ **l'approche statistique**, qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les prédicteurs modèles ;
- ▶ **l'approche dynamique**, qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional.

Ces deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (**méthodes statistico-dynamiques**). L'approche dynamique est souvent plus coûteuse en temps de calcul. L'approche statistique quant à elle nécessite de trouver une méthode adaptée au type d'impact que l'on souhaite étudier (paramètres, domaine, ...) et de disposer de données historiques sur une période suffisamment longue (10-20 ans).

On détaille ci-après les méthodes de descente d'échelle statistique, famille à laquelle appartient la méthode qui a été utilisée pour générer les simulations utilisées dans Explore 2070.

Les méthodes de **descente d'échelle statistique** reposent sur la détermination de relations quantitatives entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elles sont basées sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs : le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, l'indice terre/mer, le type de surface, la couverture du sol... Les méthodes statistiques permettent de mettre en évidence des **relations physiquement interprétables** entre les champs de grande échelle et les conditions climatiques de surface mais présentent parfois l'inconvénient d'une **mauvaise représentation de la variance observée ou des phénomènes extrêmes**.

L'information locale ou régionale est obtenue à partir d'un modèle statistique qui relie les variables de grande échelle (prédicteurs) aux variables locales ou régionales (prédicteand). Il existe un grand nombre de méthodes que l'on peut combiner entre elles : régression linéaire multiple, analyse de corrélation canonique, réseau de neurones artificiels, modèles multi-variés auto-régressifs, échantillonnage conditionnel et autres méthodes basées sur les analogues, méthodes basées sur un indice de circulation potentielle de précipitations et de circulations-types critiques, générateur de séries conditionnel, correction à l'échelle locale et descente d'échelle dynamique.

Les méthodes statistiques reposent sur trois hypothèses implicites, qui s'appliquent également partiellement à l'approche dynamique :

- ▶ (H1) Les prédicteurs sont des variables appropriées pour le problème étudié (climat régional/local) et sont simulés de façon réaliste par les modèles climatiques.
- ▶ (H2) Le modèle statistique reste valable pour le climat perturbé (**hypothèse de stationnarité**). Cette hypothèse forte ne peut être vérifiée ou invalidée formellement. Idéalement, les données observées devraient couvrir une large palette de conditions climatiques incluant les modifications futures des prédicteurs climatiques.
- ▶ (H3) Les prédicteurs climatiques doivent être représentatifs du signal du changement climatique.

## LES SIMULATIONS UTILISÉES DANS EXPLORE2070

**Comme déjà évoqué plus haut , un ensemble de scénarios ou projections climatiques réalisés dans le cadre du 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC a été désagrégé à une résolution de 8 km sur une région couvrant la France métropolitaine** (scénarios SCRATCH08). La méthodologie de descente d'échelle utilisée est celle développée par Julien Boé au CERFACS (Boé et al. 2006 ; Boé 2007).

Il s'agit d'une **désagrégation d'échelle statistique multivariée** qui repose sur l'utilisation du **concept de type de temps** et qui est dérivée de la méthode classique des analogues. Les propriétés climatiques régionales sont utilisées afin d'établir des types de temps discriminants pour une variable locale donnée (les précipitations). L'hypothèse principale est que chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de grande échelle, le/les prédicteur(s)) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (par exemple la température et les précipitations à petite échelle, le/les prédicteand(s)). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et/ou réanalyses disponibles.

Les jeux de données utilisés pour construire la fonction de transfert sont d'une part l'analyse météorologique à méso-échelle SAFRAN développée à Météo-France (pour les prédicteands) et d'autre part la réanalyse météorologique du National Center for Environmental Prediction NCEP (pour les prédicteurs).

Une classification multi-variée sur le champ de géopotential à 500 hPa et les précipitations (310 séries quotidiennes de référence), au pas de temps quotidien, est effectuée dans l'espace des composantes principales du champ de précipitations SAFRAN. 8 à 10 régimes de temps sont ainsi retenus. Ces régimes de temps sont discriminants pour les précipitations quotidiennes. On conserve ensuite uniquement la partie grande échelle (fournie par le géopotential à 500 hPa, Z500) pour définir les types de temps.

Une régression entre les précipitations issues de SAFRAN sur une grille 8km et la distance aux types de temps est calculée. Un ré-échantillonnage conditionnel permet de déterminer des analogues. Un index de température sur l'Europe (DJ –DJmodèle) permet d'estimer les températures (correction uniforme de la température par rapport à celle fournie par l'analogue). La descente d'échelle est ainsi effectuée sur la grille SAFRAN (maille de 8 km.).

La méthode repose sur trois hypothèses principales déjà décrites plus haut dans l'exposé général sur les méthodes statistiques :

- ▶ les prédicteurs ont un lien fort avec le climat local et sont simulés correctement par le modèle ;
- ▶ hypothèse de stationnarité : les relations statistiques sont valides également dans le climat perturbé ;
- ▶ les prédicteurs réagissent au signal du changement climatique.

**Cette méthode de désagrégation, appelée DSCLIM** (Outil de désagrégation statistique pour les études d'impact du changement climatique sur la France), est l'objet d'un logiciel libre développé par le Centre Européen de Recherche et de Formations Avancées en Calcul Scientifique (CERFACS). On se réfèrera à la page internet du logiciel : pour toute description du logiciel et des scénarios utilisés (scénarios SCRATCH08).

## RECOMMANDATIONS

**La méthode a été mise au point pour les précipitations pour des applications hydrologiques.**

**Les projections climatiques SCRATCH08 ne sont pas des prévisions et aucune échelle de probabilité ne leur est attachée.** Elles représentent a priori des évolutions plausibles du climat de la France sur le 21ème siècle basées sur nos connaissances actuelles. **Elles seront amenées à évoluer dans les prochaines années avec les améliorations anticipées sur la compréhension et la modélisation du système climatique et de son évolution.**

**Il est important de souligner que certaines des sources d'incertitude ne sont pas représentées au sein des scénarii SCRATCH08. De plus, il est impossible de dire si la dispersion des projections SCRATCH08 représente une limite haute ou basse des sources d'incertitude prises en compte. La considération de l'ensemble des scénarii SCRATCH08 permet néanmoins une première approche simple pour l'estimation de l'incertitude structurelle de grande échelle liée à la représentation des processus physiques dans les modèles.**

Cette méthode présente également des limitations liées au fait que les types de temps rencontrés dans le futur peuvent ne pas être représentés de manière satisfaisante dans la base de référence dans le climat présent.

### 4.1.5 Prise en compte des incertitudes

Les **sources d'incertitude** sont multiples mais elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- ▶ Il s'agit d'abord des **incertitudes sur les paramètres d'entrée des modèles incluant l'état initial et ceux qui interviennent dans les paramétrisations (dont les scénarios socio-économiques, la chimie atmosphérique)**.  
Le scénario A1Ba a été utilisé ici, en premier lieu car des données désagrégées le concernant étaient disponibles. Mais notons que c'est le scénario qui a été le plus étudié par la communauté scientifique et qui est le mieux documenté. Il s'agit d'un scénario « médian », ce qui ne signifie pas qu'il est le plus probable. L'incertitude liée au scénario est en général masquée par les autres incertitudes jusqu'au milieu du siècle. Elle devient importante à la fin du siècle. Mais pour certains scénarios extrêmes (A1FI par exemple), elle peut être visible dès 2050.
- ▶ Il s'agit ensuite des **incertitudes liées à la conception même des modèles qui proviennent des équations utilisées ou du traitement numérique de ces équations**. Il convient aussi d'y inclure **l'absence de représentation de certains processus qu'ils soient négligés ou mal connus** (comme la fonte plus ou moins accélérée des calottes groënlandaise et ouest-Antarctique, rétroaction des surfaces continentales dont couverture végétale, cycles du carbone et de l'azote...).
- ▶ Enfin, **une troisième source d'incertitude est le caractère en partie chaotique du climat du fait de sa variabilité naturelle, qui se traduit par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques très proches calcule deux évolutions climatiques qui peuvent être notablement différentes.**

A celles-ci s'ajoutent **d'autres sources d'incertitude non quantifiables** pour l'instant (crises, guerres, épidémie végétales et animales, éruptions volcaniques, tremblement de terre, etc...).

Toutefois, ce résultat a été obtenu sans considérer les incertitudes liées à la descente d'échelle, qui peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al., 2007) et in-fine sur les débits (Quintana, 2010). Ces incertitudes invitent donc à la prudence dans l'analyse des résultats.

## 4.2 SYNTHÈSE DES DONNÉES MISES À DISPOSITION POUR LE PROJET

### DONNÉES UTILISÉES DANS LES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES

**Période de référence :** la période de référence **1961-1990** (climat « relativement » stable) a été privilégiée conformément aux recommandations de l'OMM.

**Période future :** Les simulations AR4 désagrégées par la méthode CERFACS DSCLIM couvrent uniquement l'horizon **2046-2065**, très proche de la période visée. C'est donc cette période qui sera proposée pour les résultats.

#### Les simulations fournies pour Explore2070 mobilisent :

- ▶ un scénario d'émission de gaz à effet de serre : le scénario **A1B**
- ▶ sept modèles de circulation générale du GIEC AR4 : CCMA, ECHAM5, ARPV3, GFDL20, GFDL21, GISS, MRI (voir détail dans le tableau ci-dessous).
- ▶ une méthode de descente d'échelle : **CERFACS DSCLIM**

**A l'issue de cette chaîne de modélisation, on dispose donc de 7 simulations sur la période de référence (1961-1990) et 7 simulations sur la période future (2046-2065), pour les précipitations liquide et solide, les températures et l'évapotranspiration potentielle, au pas de temps journalier, et sur une grille de 8kmx8km sur la métropole.**

Le tableau ci-dessous synthétise ces 7 simulations.

Tableau 8 : 7 simulations « AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim » fournies au projet Explore 2070

Scénario	Nom Modèle et Nomenclature Explore 2070		Nom de la simulation	Centre climatique	Période fournie : (années hydrologiques comprises entre)
A1B	CCCMA_CGCM3	C1	A1B_CCCMA-CGCM3	CCCMA (Canada)	1961-1991 2046-2065
A1B	ECHAM5/MPI	C2	A1B_ECHAM5-MPI	MPI (Allemagne)	1961-1991 2046-2065
A1B	ARPEGE V3+	C3	A1B-ARPV3	Météo-France	1961-1991 2046-2065
A1B	GFDL-CM2.0	C4	A1B_GFDL-CM2.0	GFDL (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	GFDL-CM2.1	C5	A1B_GFDL-CM2.1	GFDL (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	GISS_MODEL_ER	C6	A1B_GISS-MODEL-ER	GISS (USA)	1961-1991 2046-2065
A1B	MRI-CGCM2.3.2	C7	A1B_MRI-CGCM2.3.2	MRI (Japon)	1961-1991 2046-2065

#### DONNÉES COMPLÉMENTAIRES

**En complément des données précédentes, des simulations désagrégées et corrigées grâce à la méthode Arpège Climat V4 – quantile-quantile ont aussi été fournies dans le cadre d'Explore 2070.** Elles sont calculées à partir des scénarios d'émission de gaz à effet de serre **A2, A1B et B1**.

Ces simulations sont disponibles sur une grille de 50 x 50 km, et n'ont pas pu être utilisées pour les travaux de simulations hydrologiques. **Elles seront donc exploitées uniquement dans la partie "Analyse des évolutions climatiques possibles à l'horizon 2050-2070" du présent rapport.** Ces simulations mobilisent une méthode de descente d'échelle différente et plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre, et sont donc intéressantes pour la **prise en compte des incertitudes** liées à ces choix en termes de résultats climatiques. La description de la méthodologie mise en œuvre pour la production de ces simulations est donnée en **Annexe A**, paragraphe 1.3.2.2.



## 4.3 ANALYSE DES EVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLES A L'HORIZON 2050-2070

### 4.3.1 Formalisme de présentation des résultats

#### TABLEAUX INDIQUANT L'INTERVALLE DE CONFIANCE ET ÉCARTS MINIMUM/MAXIMUM

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux indiquant la valeur de l'indice pour la période de référence (sans correction), et les écarts à cette période de référence pour chacune des simulations pour l'horizon indiqué.

L'intervalle d'incertitude est donné pour l'écart moyen à la valeur de référence correspondant à un niveau de confiance de 95%.

Pour la référence et le scénario, un intervalle de confiance propre sur la valeur moyenne est déterminé à partir des 19, 30 ou 31 valeurs de l'échantillon en considérant une distribution normale et l'indépendance de ces valeurs. Selon la loi de Student, cet intervalle de confiance autour de la valeur moyenne de l'indice est estimé de la façon suivante :

$$\left[ \bar{X} - t \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} ; \bar{X} + t \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} \right]$$

avec t issu de la table de Student pour P=95%.

L'incertitude totale sur l'écart scénario-référence est finalement déduite en combinant les deux incertitudes. Cet intervalle permet d'estimer l'incertitude liée à la variabilité naturelle du climat, mais ne prend en compte ni l'incertitude liée au scénario d'émission utilisé, ni celle liée aux limites des modèles climatiques.

Afin de présenter l'éventail des possibles dû à ces incertitudes, les résultats sont montrés indépendamment pour chacun des modèles (et éventuellement des scénarios). Les valeurs entre parenthèses donnent une indication sur les extrêmes simulés par les modèles. Elles correspondent aux valeurs minimale et maximale obtenues sur la période considérée parmi l'échantillon de valeurs annuelles.

A titre d'exemple, la figure ci-dessous explicite ce que l'on lit dans l'extrait de tableau suivant :

Figure 27 : Exemple de restitution de résultat de modèle

Écart entre la valeur moyenne de l'indice sur 2046-2065 et la valeur de référence (intervalle d'incertitude correspondant à un niveau de confiance de +95%)

température quotidienne moyenne- en °C-1961-1990	Intervalle de confiance (confiance 95%) de l'écart entre simulations 2046-2065 et référence	Min/max de l'écart entre simulations 2046-2065 et référence	saison
10,4	1,4/ 1,9	(0,9/ 2,5)	ANNEE
3,7	1,2/ 2,2	(0,1/ 3,3)	DJF

Valeur de référence

Lecture de la première ligne du tableau : L'indice (en l'occurrence la température moyenne annuelle) vaut 10,4°C en moyenne sur la période de référence 1961-1990. Sa valeur moyenne sur la période 2046-2065 est susceptible d'augmenter d'une quantité comprise entre 1,4°C et 1,9°C (avec un niveau de confiance de 95%). La fonction de répartition est calculée sur les moyennes annuelles simulées (2046 à 2065) prises comme autant de réalisations du même processus aléatoire. Sur la période 2046-2065, la valeur moyenne de l'année la plus « fraîche » de la simulation est plus chaude de 0,9°C par rapport à la référence, l'année la plus chaude s'écartant quant à elle de 2,5°C de cette référence.

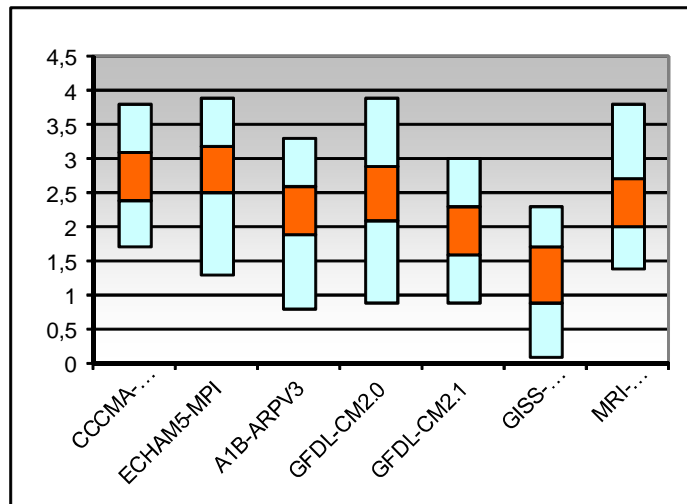
Lecture de la deuxième ligne du tableau : L'indice (en l'occurrence la température moyenne de la période Décembre-Janvier-Février) vaut 3,7°C en moyenne sur la période de référence 1961-1990. Sa valeur moyenne sur la période 2046-2065 est susceptible d'augmenter d'une quantité comprise entre 1,2°C et 2,2 °C (avec un niveau de confiance de 95%). La fonction de répartition est calculée sur les moyennes simulées (2046 à 2065) prises comme autant de réalisations du même processus aléatoire. Sur la période 2046-2065, la valeur moyenne de la période DJF la plus « fraîche » de la simulation est plus chaude de 0,1°C par rapport à la référence, la période DJF la plus chaude s'écartant quant à elle de 3,3°C de cette référence.

#### REPRÉSENTATION SOUS FORME D'HISTOGRAMMES

Dans l'exemple de la Figure 28, indiquant les « écarts de valeur moyenne de la température quotidienne Safran simulée pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 pour les mois de septembre-octobre-novembre. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B. En °C », la partie en orange correspond à l'intervalle de confiance : ex 2,4 à 3,1°C pour le modèle CCCMA-CGCM3.

La partie bleue indique l'écart minimum-maximum décrit en paragraphe 4.3.1 : 1,7 à 3,8°C pour le modèle CCCMA-CGCM3. Attention les échelles varient pour chaque figure.

Figure 28 : Exemple de figure montrant les évolutions de température



## 4.3.2 Températures

### 4.3.2.1 Résultats des simulations utilisées pour les études hydrologiques dans Explore 2070 (résultats des 7 MCG AR4 désagrégés par la méthode DSCLIM)

Les saisons météorologiques sont découpées de la façon suivante : décembre-janvier-février (DJF), mars-avril-mai (MAM), juin-juillet-août (JJA) et septembre-octobre-novembre (SON).

Dans les figures ci-dessous, sont représentées **les valeurs moyennes de la température quotidienne simulée pour la France métropolitaine**<sup>2</sup> (obtenues en faisant la moyenne des valeurs des 9892 points de sorties Safran pour 24 températures horaires à 2m au dessus du sol moyennées sur la journée de 01 UTC à 24 UTC inclus en °C) **par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990**. Les résultats sont donnés pour l'ensemble des modèles, sous formes de tableaux, graphiques et cartes ci-dessous.

#### MOYENNES MULTIMODÈLES

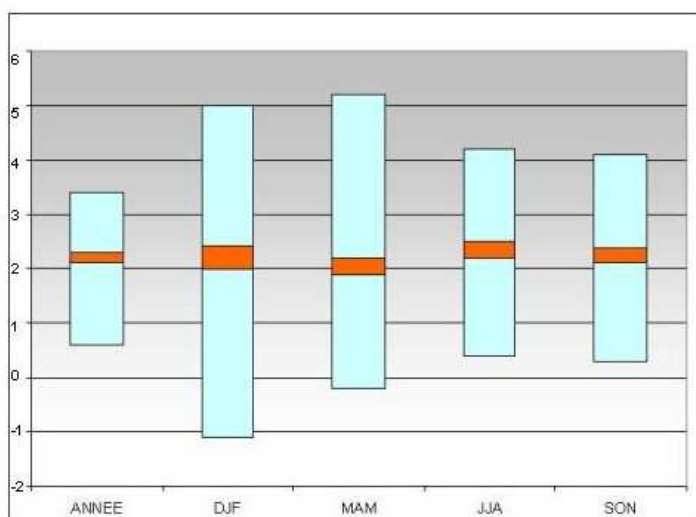
Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous sont obtenues à partir des valeurs moyennes annuelles de température des 7 simulations pour lesquelles les intervalles de confiance et les valeurs minimales et maximales des écarts ont été calculés.

<sup>2</sup> la température quotidienne correspond à la moyenne des 24 températures horaires à 2m au-dessus du sol sur la journée de 01 UTC à 24 UTC inclus en °C.

Tableau 9 : Valeur moyenne de la température quotidienne Safran simulée pour la France métropolitaine par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2046-2065 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Moyenné pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B. En °C

température quotidienne moyenne-en °C-1961-1990	Intervalle de confiance (confiance 95%) de l'écart entre simulations 2046-2065 et référence	Min/max de l'écart entre simulations 2046-2065 et référence	saison
10,2	2,1/ 2,3	(0,6/ 3,4)	ANNEE
3,5	2,0/ 2,4	(-1,1/ 5,0)	DJF
9,1	1,9/ 2,2	(-0,2/5,2)	MAM
17,6	2,2/ 2,5	( 0,4/ 4,2)	JJA
10,5	2,1/ 2,4	( 0,3/ 4,1)	SON

Figure 29 : Ecart de valeur moyenne annuelle et saisonnière de la température quotidienne Safran simulée pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B. En °C



**En hiver et au printemps, la dispersion entre modèles est plus grande.** L'écart de température en juin juillet août est un peu plus élevé de 2,2 à 2,5°C.

Pour mémoire, le rapport « Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08 » (Pagé, Terray, Boé, 2008) mentionnait les résultats suivant :

**Au niveau des températures, les résultats montrent une réponse assez uniforme, autant l'hiver que l'été. On note une augmentation de la température de l'ordre de 2,0 à 2,5 C de l'ouest vers l'est l'hiver, tandis qu'en été la répartition de l'augmentation est plutôt uniforme sur le territoire, avec un maximum sur les Alpes et un minimum sur la pointe bretonne.**

Ces résultats ont été obtenus par l'analyse de 15 modèles du GIEC. L'analyse des cartes à suivre aboutit sensiblement aux mêmes conclusions, bien que ne traitant qu'un sous-ensemble de modèles mentionnés dans le rapport.

## RÉSULTATS DES 7 SIMULATIONS

Les figures ci-après présentent les évolutions possibles de température entre 1961-90 et 2046-65 simulées grâce aux sept modèles climatiques.

---

**Tous les modèles vont dans le sens d'un réchauffement compris entre 1, 4 et 3°C en moyenne annuelle.**

Les écarts de température d'ECHAM5-MPI et GFDL CM2.1 en mars-avril-mai sont assez nettement plus faibles que pour les 6 autres modèles.

En hiver, les écarts les plus forts sont dans le Nord-Est et s'affaiblissent en allant vers le Sud-Ouest.

La répartition est plus homogène en été.

A l'automne, l'est présente des écarts un peu plus forts que l'ouest.



Figure 30 : Evolutions possibles des températures saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65, résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore2070

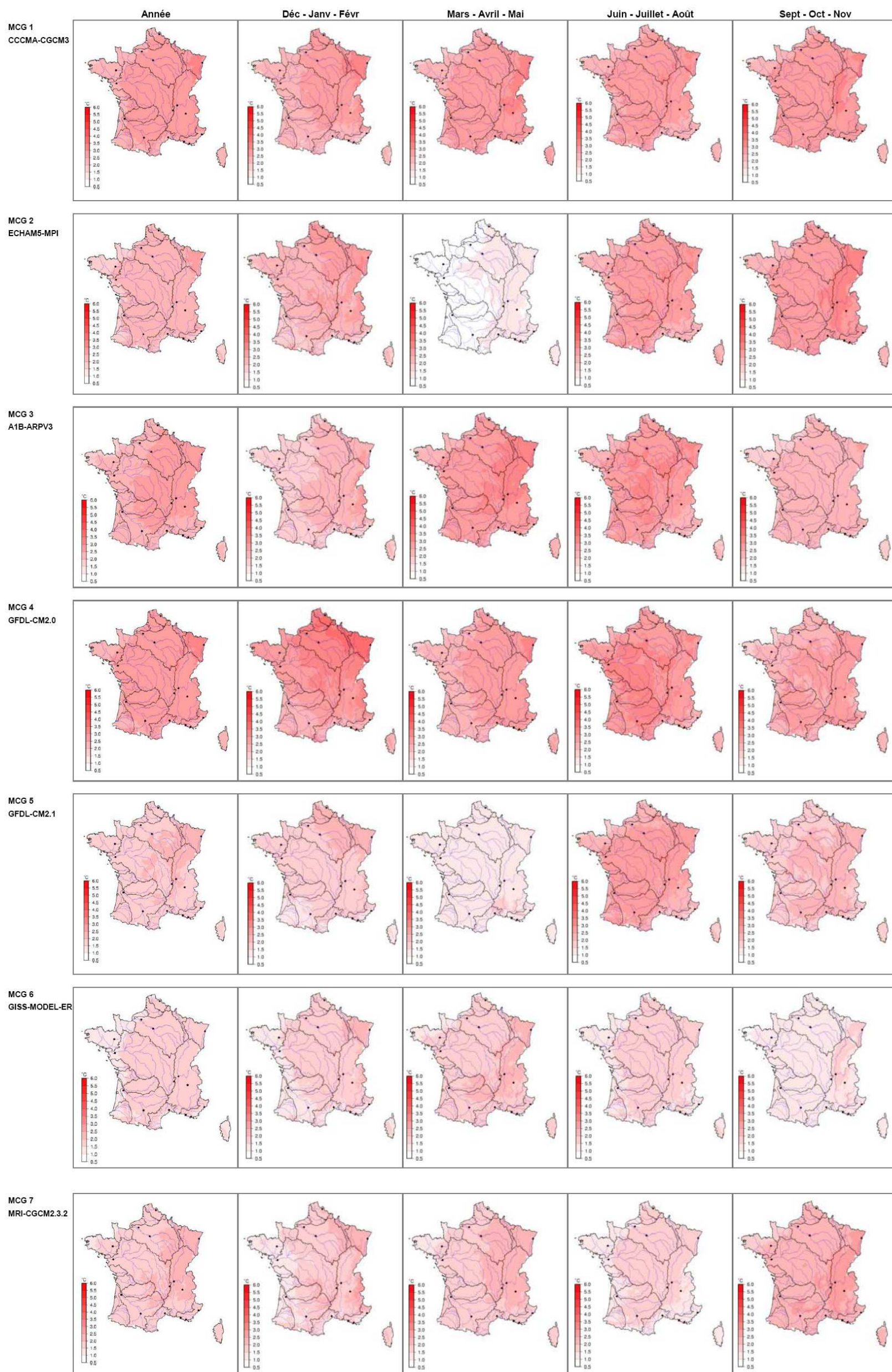
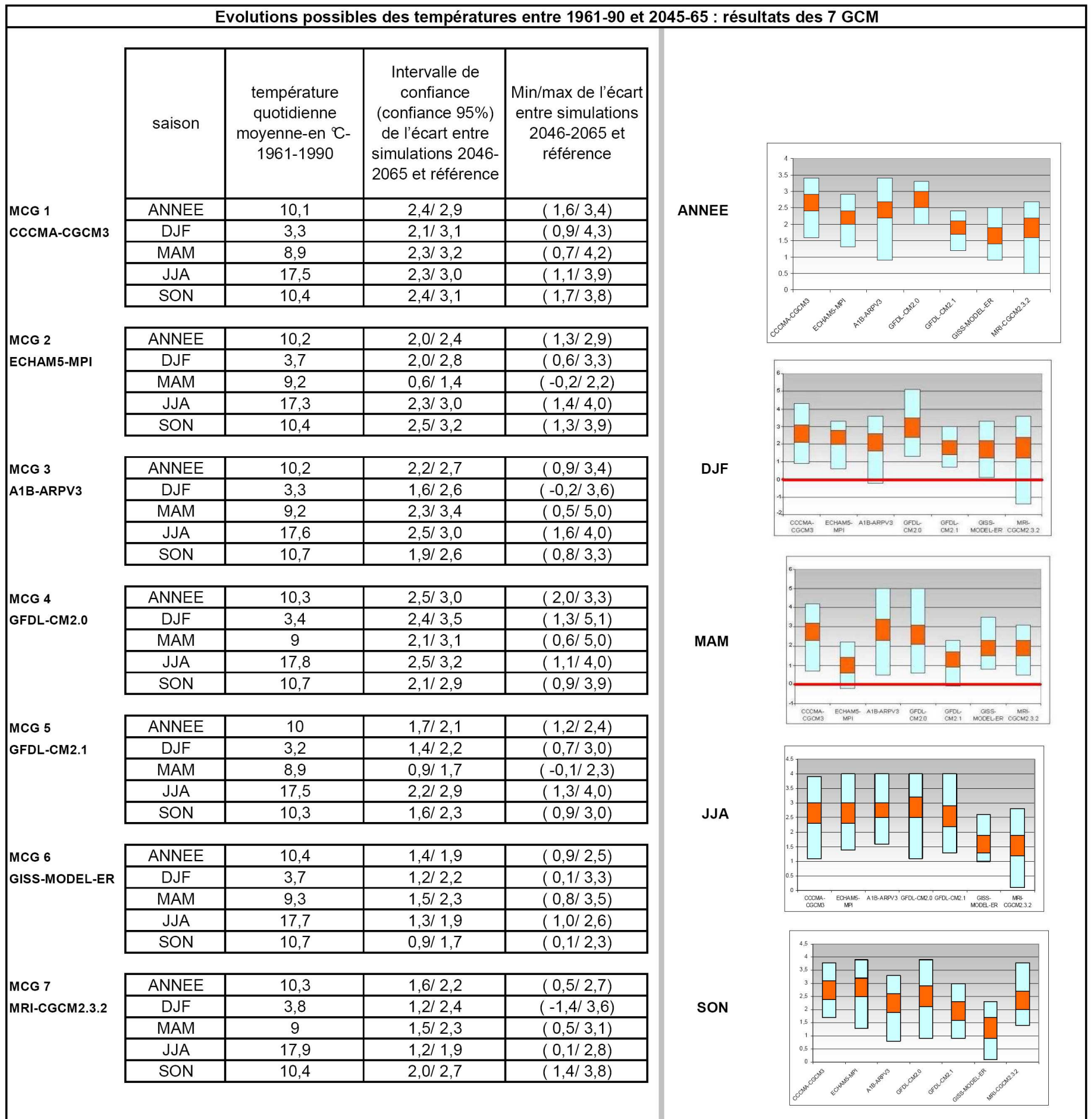


Figure 31 : Evolutions possibles des températures saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65 (°C) : résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore2070

Les tableaux et graphes indiquent la valeur moyenne de la température quotidienne Safran simulée pour la France métropolitaine par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2046-65 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses.





### **4.3.2.2 Résultats des simulations complémentaires (ARP V4 corrigées quantile-quantile)**

Dans les figures ci-dessous, sont représentées les valeurs moyennes de la température maximale et minimale quotidienne simulée pour la France métropolitaine (obtenues en faisant la moyenne des valeurs des 240 valeurs des points de simulation sur la France) par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990 pour 3 scénarios A2, A1B et B1.

Les écarts sur les températures maximales sont en moyenne plus élevés que sur les températures minimales. Les scénarios désagrégés Scampei récemment publiés vont dans ce sens pour l'horizon 2080.

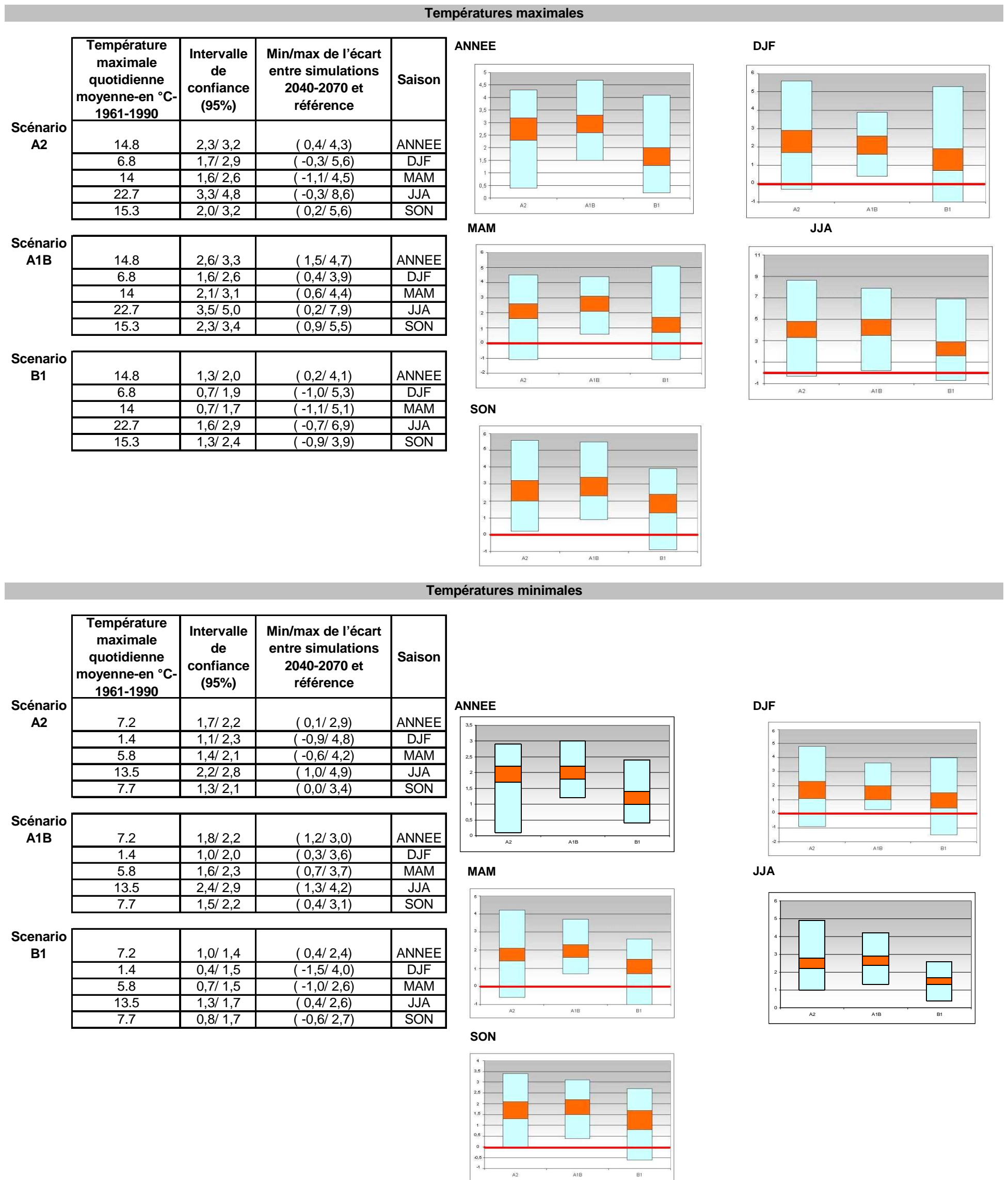
Pour les températures minimales et maximales, les écarts les plus forts sont relevés en été.

Les simulations forcées par les scénarios A2 et A1B indiquent des écarts assez similaires sur les températures maximales et minimales.



Figure 32 : Evolutions possibles des températures saisonnières en France entre 1961-90 et 2040-70 (°C) : résultats issus des simulations ARP V4 corrigées quantile-quantiles, pour les scénario A2, A1B et B2.

Les tableaux et graphes indiquent la valeur de la température maximale et minimale quotidienne Safran simulée pour la France métropolitaine par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2046-2065 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses.





### 4.3.3 Précipitations

#### 4.3.3.1 Résultats des simulations utilisées pour les études hydrologiques dans Explore 2070 (résultats des 7 MCG AR4 désagrégés par la méthode DSCLIM)

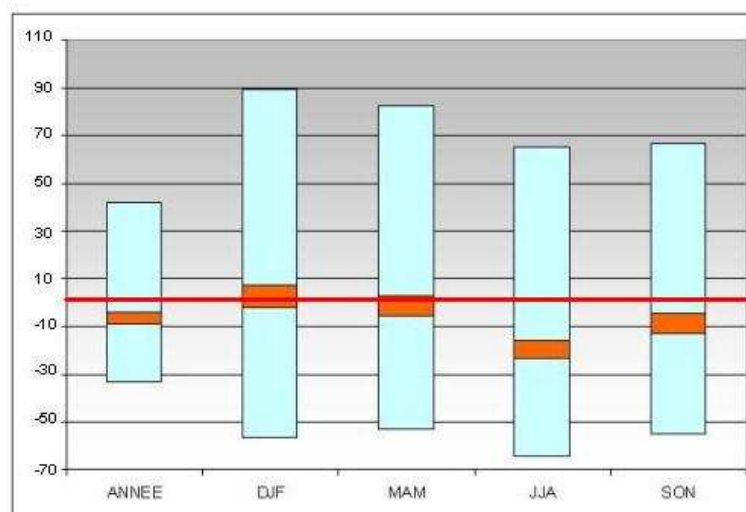
##### MOYENNES MULTIMODÈLES

Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous sont obtenues à partir des cumuls annuels de précipitations des 7 simulations pour lesquels les intervalles de confiance et les valeurs minimales et maximales des écarts ont été calculés.

Tableau 10 : Cumul des précipitations quotidiennes moyennes Safran simulé pour la France métropolitaine par saison et en cumul annuel, pour la période de référence 1961-1990 et rapport entre simulations 2046-2065 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Moyenné pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B. En mm et %

Cumul moyen de précipitations -en mm-1961-1990	Intervalle de confiance (confiance 95%) du rapport normalisé entre simulations 2046-2065 et référence en %	Min/max du rapport normalisé entre simulations 2046-2065 et référence en %	Saison
950,1	-8,6/ -4,3	( -33,6/ 42,1)	ANNEE
239,9	-2,2/ 7,5	( -56,4/ 89,8)	DJF
231,0	-5,4/ 2,9	( -53,0/ 82,6)	MAM
207,3	-23,6/ -15,9	( -64,0/ 64,8)	JJA
271,9	-12,8/ -4,6	( -55,0/ 66,4)	SON

Figure 33 : Ecarts de valeur moyenne annuelle et saisonnière du cumul de précipitations Safran simulée pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B. En % par rapport à la valeur de référence.



**Une tendance à la baisse apparaît sur la moyenne multimodèles, hormis en hiver où aucune tendance ne se dessine. Au printemps la baisse apparaît peu significative à l'échelle du territoire. C'est en été que les précipitations semblent le plus déficitaires avec -23,6% à -15,9% de la valeur moyenne de référence.**

Pour mémoire, le rapport « Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08 » (Pagé, Terray, Boé, 2008) mentionnait les résultats suivants :

- ▶ Au niveau des précipitations, les résultats de la moyenne multi-modèles de la désagrégation montrent, en hiver, une augmentation des précipitations sur le relief méditerranéen, le Massif Central ainsi que sur les Pyrénées orientales, et un assèchement sur le pays Basque et la pointe bretonne.
- ▶ La période estivale montre un tout autre portrait, soit une diminution des précipitations sur pratiquement tout le territoire, et de façon plus marquée sur le relief des Alpes, du Massif Central, et des Pyrénées. On remarquera également la dépendance forte par rapport à la topographie.

Ces résultats ont été obtenus par l'analyse de 15 modèles du GIEC. Pour leur majeure partie, l'analyse des cartes à suivre aboutit sensiblement aux mêmes conclusions, bien que ne traitant qu'un sous-ensemble de modèles mentionnés dans le rapport.

### RÉSULTATS DES 7 SIMULATIONS

Les figures ci-après présentent les évolutions possibles des cumuls de précipitations entre 1961-90 et 2046-65 simulées grâce aux sept modèles climatiques.

- ▶ **Une grande disparité apparaît entre les modèles dans la répartition géographique des ratios de précipitations.**
- ▶ **L'extrême Sud-Ouest est déficitaire dans la majorité des cas.**

Figure 34 : Evolutions possibles des cumuls de précipitations saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65, résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore2070

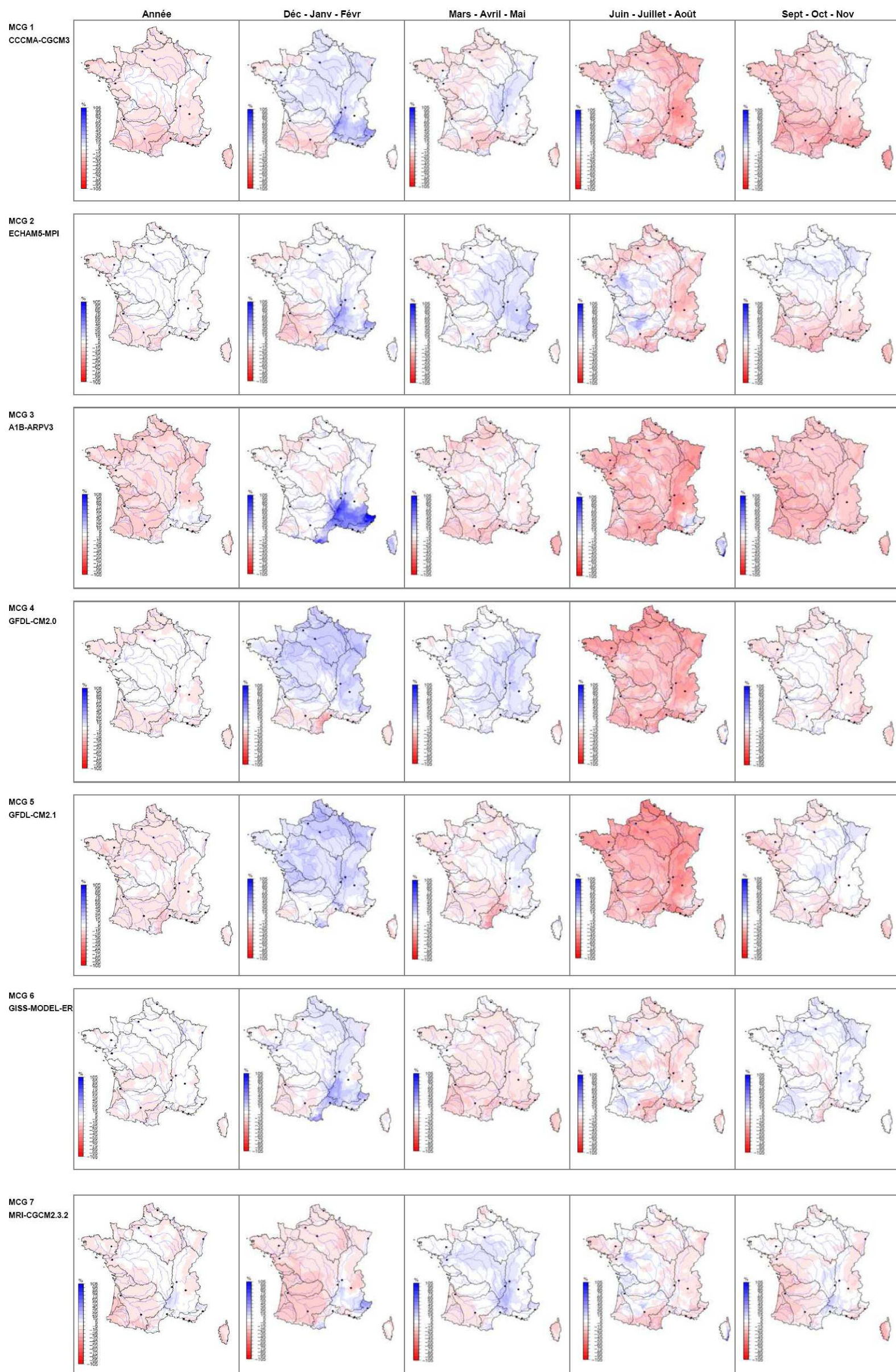
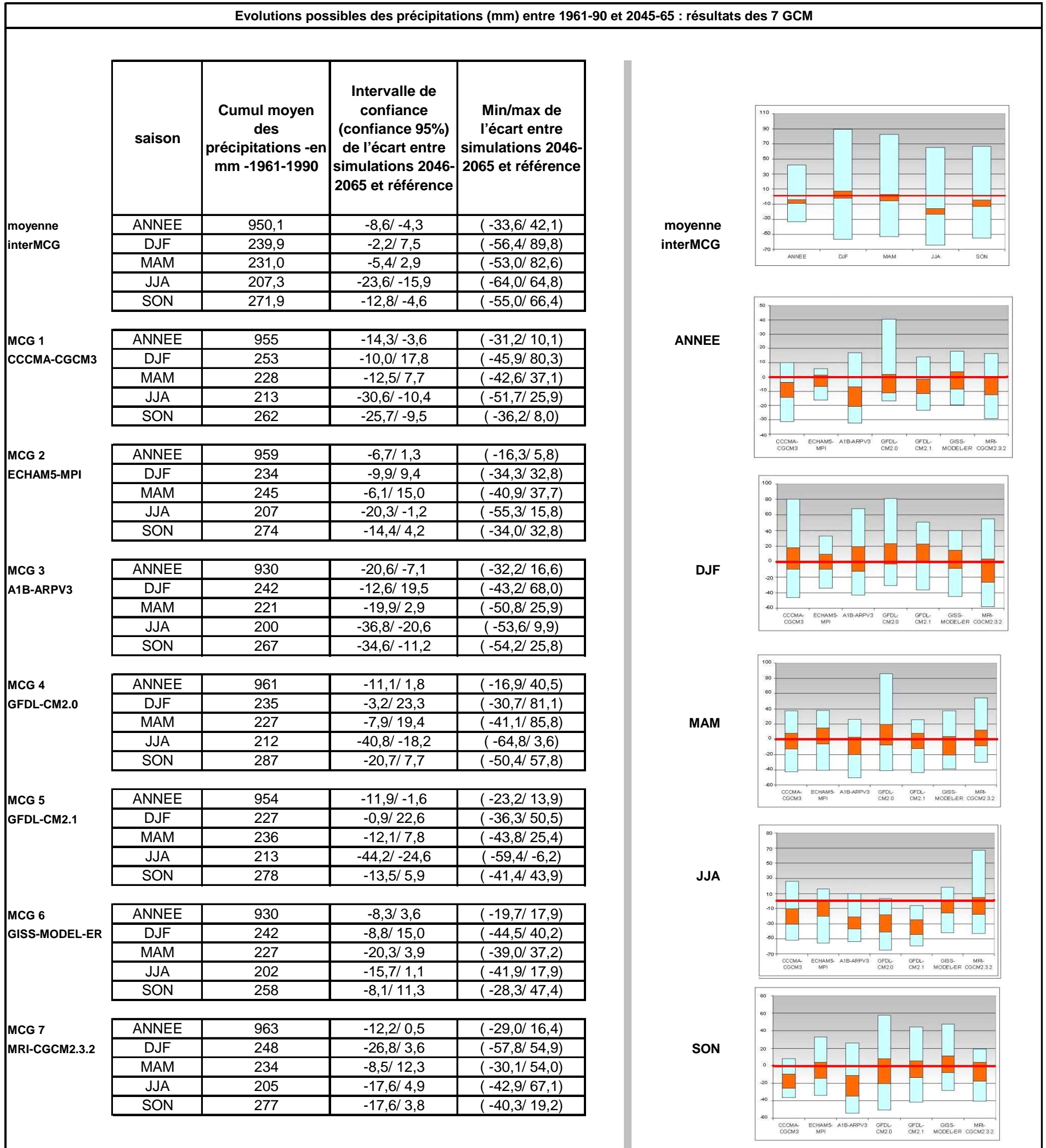


Figure 35 : Evolutions possibles des cumuls de précipitations moyennes saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65 (°C) : résultats issus des sept modèles de circulation générale utilisés pour Explore2070

Les tableaux et graphes indiquent le cumul des précipitations quotidiennes moyennes Safran pour la France métropolitaine par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2046-2065 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses.





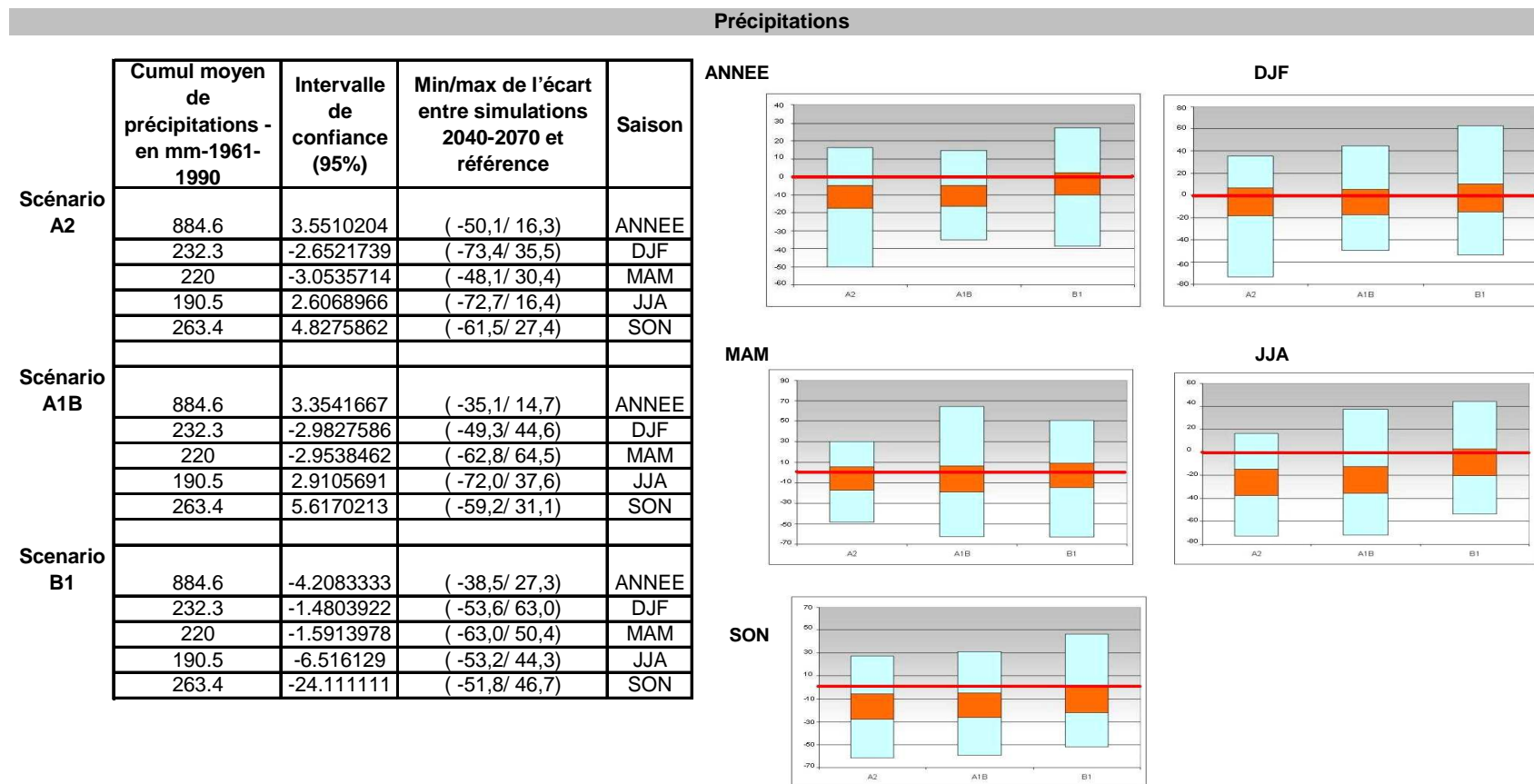
#### **4.3.3.2 Résultats des simulations complémentaires (ARP V4 corrigées quantile-quantile)**

Les rapports montrent peu de disparité entre les scénarios A2 et A1B simulés par ARPEGE V4. Une tendance au déficit de précipitations à l'horizon 2040-2070 apparaît comprise entre -17,4 et -4,9% pour le scénario A2, -16,1 et -4,8% pour le scénario A1B (intervalle de confiance à 95%), en valeur annuelle.

Les déficits les plus forts sont observés en été.

Figure 36 : Évolutions possibles des précipitation moyennes saisonnières en France entre 1961-90 et 2046-65 (°C) : résultats issus des simulations ARP V4 corrigées quantile-quantiles, pour les scénario A2, A1B et B2.

Les tableaux et graphes indiquent le cumul des précipitations quotidiennes moyennes Safran pour la France métropolitaine par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2046-2065 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses.



## 5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES

### HOMOGÉNÉISATION DES SÉRIES CLIMATIQUES

Mestre O., 2000 : Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques –thèse de l'Université Paul Sabatier.

### SAFRAN ISBA MODCOU

Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Seguí F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot (2008) : The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research D : Atmospheres* 113, D06113 (2008) 18

### SAFRAN

Caballero, Y.; Voirin-Morel, S.; Habets, F.; Noilhan, J.; Le Moigne, P.; Lehenaff, A. & Boone, A., 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change *WATER RESOURCES RESEARCH*, 43, 19.

Canellas, L. Franchistéguy, and S. Morel, 2008 : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.

Dümenil, E., Todini, L., 1992. A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model. In: O'Kane, J.P. (Ed.). *Advances in Theoretical Hydrology, a tribute to James Dooge*, McGraw-Hill, New-York, pp. 462

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) : "A meteorological estimation of relevant parameters for snow models", *Annals of Glaciol.*, Vol 18, 65-71.

Habets, F., J. Noilhan, C. Golaz, J. P. Goutorbe, P. Lacarrere, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, C. Ottle, and D. Vidal-Madjar (1999b), The Isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. part I: Model and database, *J. Hydrol.*, 217, 75–96.

Habets, F., J. Noilhan, C. Golaz, J. P. Goutorbe, P. Lacarrere, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, C. Ottle, and D. Vidal-Madjar (1999c), The Isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. part I: Simulation of streamflows and annual water budget, *J. Hydrol.*, 217, 97–118.

Masson, V.; Champeaux, J.-L.; Chauvin, F.; Meriguet, C. & Lacaze, R., 2003. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models *Journal of Climate*, 16, 1261-1282

Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Vidal J.-P., Martin É., Baillon M., Franchistéguy L. and Soubeyroux J.-M. (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, vol. 30, n° 11, p. 1627-1644. doi: 10.1002/joc.2003

**ISBA**

Boone A., J.C. Calvet and J. Noilhan, 1999 : Inclusion of a third layer in a land surface scheme using the force restore. *J. Appl Meteor*, 38(11), 1611-1630.

Mahfouf, J.-F., Manzi, O., Noilhan, J., Giordani, H., Déqué, M. (1995) : The land surface scheme ISBA within the Météo-France climate model ARPEGE. Part I : Implementation and preliminary results. *J. Climate*, 8, 2039-2057.

Noilhan, J. and S. Planton, 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 536-549.

Noilhan, J. and J.-F. Mahfouf, 1996 : The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Planetary Change*, 13, 145-159.

**CONNAISSANCE DU BILAN DE SURFACE À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE**

Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Seguí F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot (2008) : The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research D : Atmospheres* 113, D06113 (2008) 18

Quintana Seguí, P.; Martin, E.; Habets, F. & Noilhan, J., 2009. Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over France *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 163-181

**IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE DÉBIT DES RIVIÈRES ET LES NAPPES**

Boé, J., Terray L., Martin E., Habets F. (2009) : Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.*, 45, W08426, doi:10.1029/2008WR007437

Quintana Seguí P. , A. Ribes, E. Martin, F. Habets, J. Boe, Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, *Journal of Hydrology*, 383, 111,124.

**SUIVI OPÉRATIONNEL DU BILAN HYDRIQUE**

Soubeyroux J.-M., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Noilhan J., Baillon M., Regimbeau F., Vidal J.-Ph., Le Moigne P., Morel S. (2008) L'application Safran - Isba - Modcou (SIM), un outil pour la production opérationnelle et les études hydrométéorologiques, *La Météorologie*, 8, 63, Novembre 2008, 40-45.

**ÉTUDES BASÉES SUR LA RÉANALYSE SAFRAN**

Soubeyroux J.-M., Vidal J.-P, Baillon M., Blanchard M., Céron J.-P., Franchistéguy L., Regimbeau F., Martin E. and Vincendon, J.-C. (2010) Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la hydrométéorologie Safran-Isba-Modcou (Characterizing and forecasting droughts and low-flows in France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite, in French). *La Houille Blanche*, n°5, p. 30-39. doi: 10.1051/lhb/2010051

Vidal J.-P, Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Blanchard M., Soubeyroux J.-M. and Baillon M. (2010) Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, n° 5, p. 6455-6501. doi: 10.5194/hess-14-459-2010

**DÉSAGRÉGATION SCENARIOS CERFACS**

Boé J. Terray L. Habets F. Martin E., 2006 : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, D23106

Boé J Terray L Habets F. Martin E., 2007 : Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *Int. J. Climatol.* 27 : 1643-1655 (2007),

Boé J., 2007 : Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. PhD thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007

Pagé C, Terray L, Boé J, 2008 : Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08, CERFACS

Pagé C., L. Terray et J. Boé, 2009: dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Technical Report TR/CMGC/09/21, CERFACS

**GIEC**

GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de ~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

**MÉTHODE DE CORRECTION QUANTILE-QUANTILE :**

ARPEGE-climat

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26

Déqué 2009 : Méthode de désagrégation quantile/quantile conditionnelle, rapport final RexHySS, [http://www.sisyphe.upmc.fr/~agnes/rexhyss/DOCS/annexes/aV1a.quantile\\_quantile.pdf](http://www.sisyphe.upmc.fr/~agnes/rexhyss/DOCS/annexes/aV1a.quantile_quantile.pdf).

**ETUDES SUR LE CLIMAT :**

Moisselin JM, Schneider M, Canellas C et Mestre O, 2002 : Les changements climatiques en France au XXe siècle - Étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations (La météorologie n°38).

Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion (Météo-France Direction Interrégionale de l'île de La Réunion, 2009)

Ribes A, Azaïs J-M, Planton S (2009) A method for regional climate change detection using smooth temporal patterns, *Climate Dynamics* (2010) 35:391–406 DOI 10.1007/s00382-009-0670-0

**CYCLONES :**

OMM-WMO, Statement on Tropical Cyclones and Climate Change, 2006

**MISSIONS MINISTÈRE :**

Peings Y., Jamous M ; Planton S., Le Treut H., 2010 : scénarios climatique : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM- Mission confiée à Jean Jouzel- publié sur [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/onerc\\_rapport\\_mission\\_jouzel\\_25janv2011\\_complet\\_8Mo.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/onerc_rapport_mission_jouzel_25janv2011_complet_8Mo.pdf)

**SOURCES INTERNET :**

Météo-France : <http://meteofrance.com/>

Météo-France Antilles-Guyane : <http://www.meteo.gp>

Météo-France île de la Réunion <http://www.meteo.re>

Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique <http://www.onerc.org/>

Projet Scampeï : <http://www.cnrm.meteo.fr/scampeï/index.php>

**Modcou** : <http://www.geosciences.mines-paristech.fr/laboratoires/numerique/hydrogeologie>

**Modèles de surface et hydrologiques du CNRM GAME :**

<http://www.cnrm-game.fr/spip.php?rubrique74>

**Informations et développements des scénarii SCRATCH :**

<http://www.cerfacs.fr/~page/work/scratch/>

# ANNEXES






---

# **Annexe 1**

## **Quelques compléments sur la modélisation climatique**



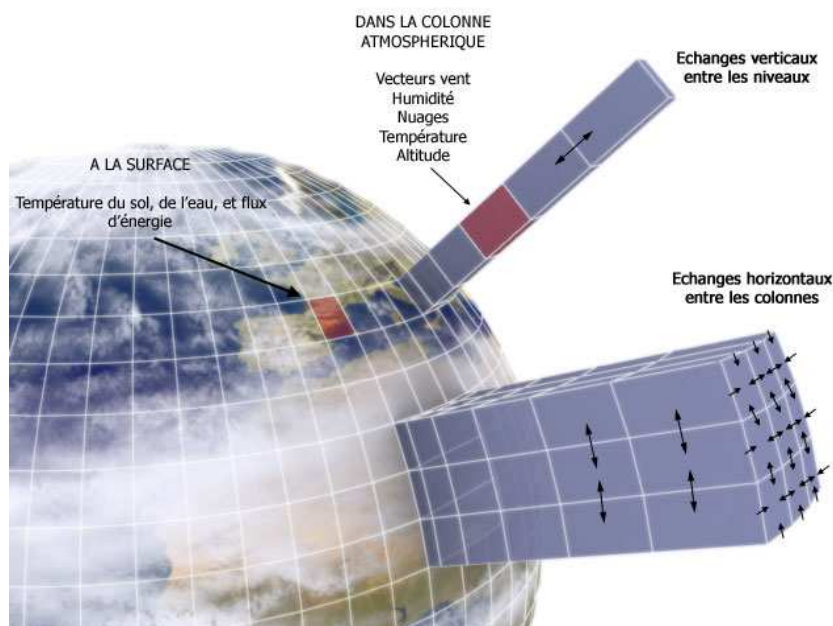
## RAPPEL SUR LES GRANDS PRINCIPES DE LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

Les modèles climatiques ont progressé en même temps que la puissance des ordinateurs. Sur le premier ordinateur programmable existant, le mathématicien John Von Neumann a conçu en 1950, avec d'autres scientifiques, un modèle de prévision météorologique. En 1956, Norman Phillips et son équipe ont développé au Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, à Princeton, aux États-Unis, le premier modèle que l'on peut qualifier de climatique, car il a permis la simulation de la variabilité de l'atmosphère de l'hémisphère Nord sur une période de 31 jours. Ce modèle, dit de circulation générale (MCG), ne présentait aucune différence conceptuelle avec ses prédécesseurs appliqués à la prévision météorologique.

Plus tard, vers la fin des années 1960, sont apparus les premiers **modèles couplant l'évolution de l'atmosphère et celle de l'océan**.

L'utilisation de ce type de modèle se généralisa, notamment pour les besoins des études du changement climatique. Les océans jouent en effet un rôle essentiel dans la distribution géographique et le temps de mise à l'équilibre du système climatique. Cela est dû à la fois à leur grande inertie thermique comparée à celle de l'atmosphère, et à la lenteur des processus de mélange vertical et de transport des eaux de surface vers l'océan profond. Les climatologues ont progressivement introduit dans leurs modèles de nouveaux phénomènes. Aujourd'hui, ils considèrent l'atmosphère, les océans, les sols et la végétation, les banquises, les aérosols sulfatés, et dans certains cas l'hydrologie continentale, le cycle du carbone incluant la biosphère et les écosystèmes marins, ou encore l'ozone stratosphérique...

Figure 37 : Processus et maillage des modèles de climat



Source : site internet [menaceclimatique.free.fr](http://menaceclimatique.free.fr)

## LES SIMULATIONS CLIMATIQUES

Il s'agit de simulations dans lesquelles on fait varier les concentrations de gaz à effet serre (GES) et aérosols de la façon la plus réaliste possible en faisant diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement.

Il est important de comprendre que les situations météorologiques simulées sont virtuelles et n'ont pas pour objectif, pour une date de validité donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée).

Pour des raisons de limitation de la puissance de calcul des ordinateurs disponibles et de stockage des résultats, les modèles de circulation générale utilisés pour les simulations climatiques possèdent généralement une **résolution de l'ordre de quelques centaines de kilomètres**. En ne décrivant pas -ou en décrivant trop grossièrement- certaines composantes du paysage (îles, montagne, vallées), ces simulations ignorent les effets de ces composantes sur le climat. Par ailleurs les processus d'échelle inférieure à la maille, tels que par exemple les orages, ne sont pas décrits explicitement.

De même, à cette résolution, ces modèles ne permettent pas de fournir des données assez précises (spatialement) pour toutes les études d'impact du changement climatique, comme par exemple l'impact du changement climatique sur les glaciers, sur un fleuve particulier, sur les maladies tropicales, sur l'océan côtier, ... Ces domaines ont besoin de simulations à plus haute résolution spatiale. Le dernier inconvénient des modèles à basse résolution est leur **faible capacité à simuler les événements extrêmes** qui sont souvent liés à des processus ou à des forçages de petites échelles. Pour ces raisons, la communauté scientifique du climat a développé la notion de **régionalisation climatique** à partir de méthodes de désagrégation spatiale appelée également **descente d'échelle**, ou encore **downscaling**.

## LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE OU DESCENTE D'ÉCHELLE

Pour étudier l'évolution du climat sous forçage anthropique, les données climatiques brutes produites par les modèles couplés océan-atmosphère (MCGOA) ne sont pas suffisantes pour conduire une étude d'impact à échelle fine sur le territoire étudié et une étape supplémentaire est nécessaire : la régionalisation des données climatiques.

Ainsi, les principaux objectifs de la régionalisation sont :

- d'améliorer la représentation de la variabilité spatiale et temporelle du climat et de son évolution, en particulier les statistiques des événements extrêmes climatiques (vagues de chaleurs, fortes pluies, sécheresses, tempêtes, cyclones, ...).
- de faciliter les études d'impacts du changement climatique sur les différents secteurs socio-économiques (hydrologie, écosystèmes, santé, ...)

Deux approches complémentaires existent en matière de méthodes de descente d'échelle :

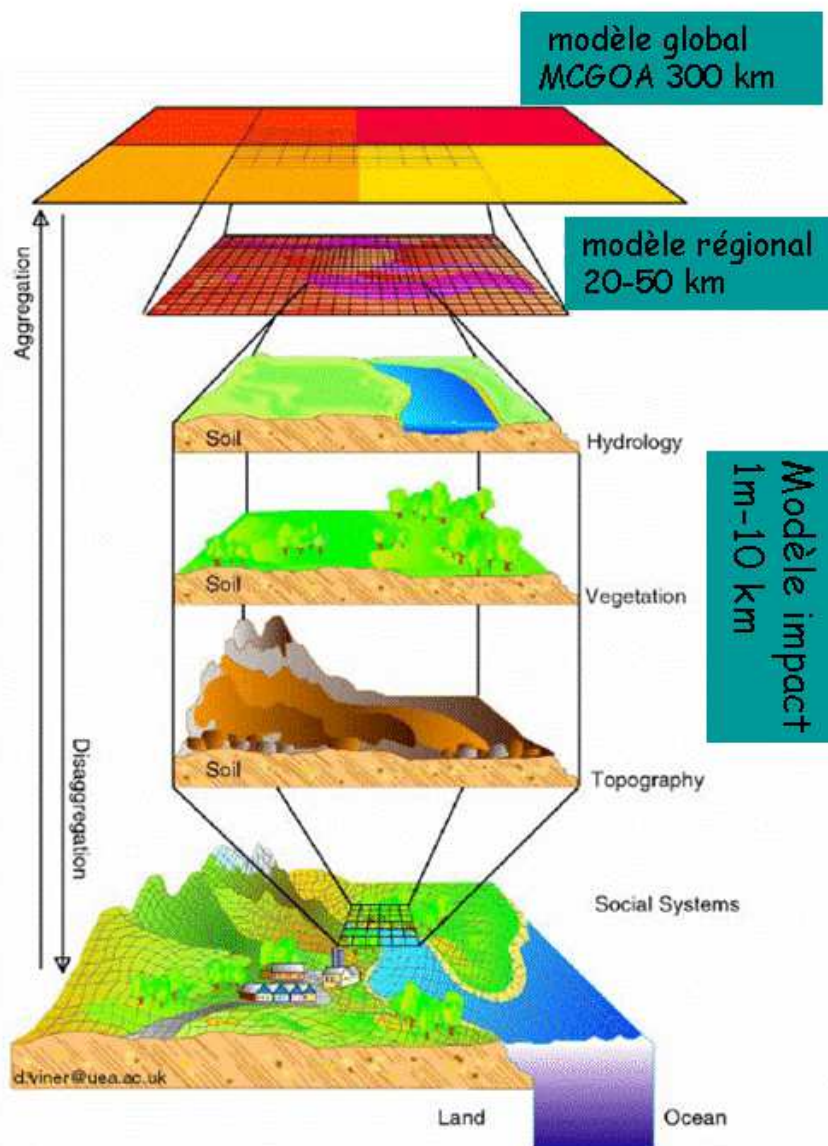
- L'approche statistique qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les prédicteurs modèles ;
- L'approche dynamique qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional.

Ces deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (**méthodes statistico-dynamiques**). Une telle combinaison peut se faire de deux façons :

- utilisation des sorties d'un modèle à méso-échelle pour développer les modèles statistiques
- identification de périodes d'intérêt par des méthodes statistiques (types de temps correspondant à des phénomènes extrêmes déterminés à partir d'indicateur de grande échelle) pour réaliser des simulations à haute résolution ou à résolution variable, afin d'obtenir des détails spatiaux sur ces périodes d'intérêt.

L'approche dynamique est souvent plus coûteuse en temps de calcul. L'approche statistique quant à elle nécessite de trouver une méthode adaptée au type d'impact que l'on souhaite étudier (paramètres, domaine, ...) et de disposer de données historiques sur une période suffisamment longue (10-20 ans).

Figure 38 : la problématique de la désagrégation. Source Climate Research Unit, University of East Anglia



Mettre en œuvre deux méthodes de descente d'échelle pour un même problème est un moyen de quantifier une partie de l'incertitude.

### L'approche statistique

Cette approche est détaillée dans le rapport principal et des compléments sont apportés dans l'annexe B.

### L'approche dynamique

Cette approche est détaillée ci-après et des compléments sont également apportés dans l'annexe B.

#### **Généralités**

Les méthodes de descente d'échelle dynamique consistent à utiliser un modèle atmosphérique à très haute résolution ou à maille variable ou un modèle à aire limitée forcé par un modèle de grande échelle.

Il existe 3 méthodes distinctes pour faire de la régionalisation climatique par une approche dynamique :

- ▶ La première méthode consiste à utiliser un GCM à très haute résolution et couvrant l'ensemble du globe. Des expériences ont été réalisées à Météo-France avec ARPEGE-Climat à une résolution uniforme de 50 km. D'abord réduites à une vingtaine d'années, ces expériences couvrent maintenant l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle.

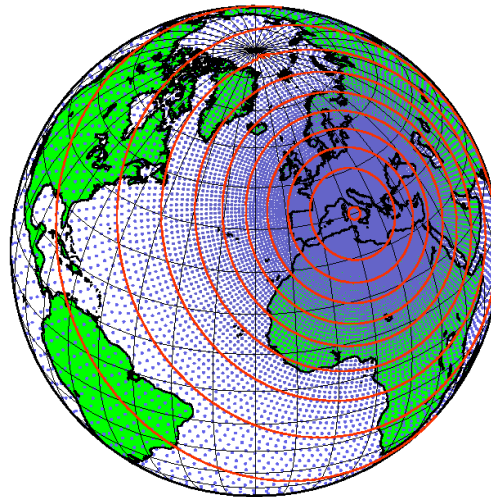
Ce type de données est utilisé par le projet Explore 2070 pour les départements d'outremer : voir le document *B3 – Rapport détaillé DOM*.

- ▶ La deuxième solution est l'utilisation de modèles globaux dont la grille peut être basculée et étirée pour renforcer la résolution spatiale dans la zone que l'on veut étudier. ARPEGE-Climat possède cette capacité de zoom. Cet outil permet des simulations plus longues, de l'ordre de la centaine d'années. Le modèle ARPEGE-Climat étiré a tout d'abord été utilisé dans sa version "Medias" avec un pôle d'étirement en mer Méditerranée.

Ce type de données est utilisé par le projet Explore 2070 :

- pour la France métropolitaine ce sont les données décrites plus haut : Simulations dynamiques à la base des résultats complémentaires fournis dans Explore 2070 : simulations ARPV4 pôle Méditerranée et la correction Quantile-Quantile,
- pour les départements d'outremer : voir le document *B3 – Rapport détaillé DOM*.

Figure 39 : Points de grille ARPEGE climat maille étirée pôle Méditerranée



- La troisième solution est l'utilisation de modèles à aire limitée (LAM: Limited Area Model en anglais). Ces modèles couvrent seulement une partie du globe, l'Europe par exemple, et sont forcés aux bords par des modèles de plus faible résolution (GCM, réanalyses, ...). A Météo-France, le modèle ALADIN-Climat, version climatique du LAM ALADIN, a été développé, permettant des simulations plus rapides qu'avec ARPEGE-Climat en version étirée. Les simulations climatiques effectuées avec ALADIN-Climat sont fournies actuellement uniquement dans le cadre de projet de recherche. Plusieurs modèles peuvent être imbriqués.

***Simulations dynamiques à la base des résultats complémentaires fournis dans Explore 2070 : simulations ARPV4 pôle Méditerranée et la correction Quantile-Quantile***

Le modèle climatique de Météo-France : ARPEGE Climat

Développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), ARPEGE Climat est l'un des 23 modèles qui ont servi de support à la rédaction du 4<sup>ième</sup> rapport du GIEC. Il s'agit d'une version du modèle de prévision météorologique spécifiquement adaptée pour les études climatiques. Pour prendre en compte toutes les composantes de la machine climatique, il est couplé, d'une part, à un modèle de surface continentale qui inclut une représentation de la végétation et, d'autre part, à un modèle océanique qui gère aussi l'évolution de la glace de mer.

Une particularité du modèle est sa configuration « grille étirée ». Près du pôle d'étirement, la résolution du modèle atteint 50x50 km<sup>2</sup> puis augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce pôle. Cette grille variable permet d'obtenir des données à haute résolution près du pôle d'étirement tout en réduisant les coûts de calcul.

Une configuration ARPEGE climat grille étirée avec un pôle d'étirement sur la mer Tyrrhénienne a été élaborée à Météo-France dans les années 90 et bénéficie d'améliorations constantes.

D'autre part, en 2008, des simulations avec un pôle d'étirement sur les États-Unis ont été effectuées avec les forçages des émissions de gaz à effet de serre du scénario A1B.

En 2007 et 2009, des simulations à haute résolution d'ARPEGE-CLIMAT ont été mises à disposition sur l'ensemble du globe avec une maille de 50x50 km<sup>2</sup> avec les forçages des émissions de gaz à effet de serre du scénario A2 puis A1B.

### Description des simulations

Pour mieux appréhender les incertitudes liées aux scénarios d'émission de gaz à effet de serre, Météo-France a fourni au projet les simulations ARPV4 pôle Méditerranée corrigées par la méthode Quantile-Quantile pour les 3 scénarios A2, A1B et B1.

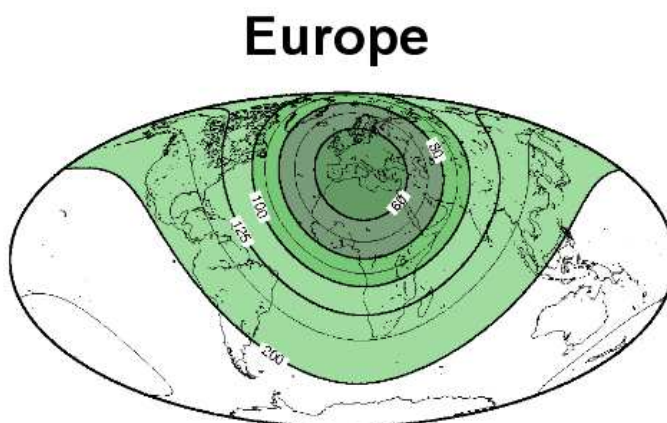
La maille, de 50 à 60 km sur la France, ne permet pas le même type d'applications que les données issues des simulations désagrégées précédemment écrites, notamment pour les modèles d'hydrologie qui nécessitent une information à résolution fine.

Dans cette version du modèle le pôle est placé en mer Tyrrhénienne avec un facteur d'étirement de 2.5 et une résolution horizontale de l'ordre de 50 km dans la zone Europe-Méditerranée-Afrique du Nord (voir Figure 40). Du fait de contraintes de modélisation, le pôle n'est pas situé directement au centre du domaine d'intérêt, par exemple de la France ou de l'Europe, mais sur une zone dépourvue de relief. Les données des scénarios climatiques sont stockées sur la grille étirée d'ARPEGE Climat qui n'est donc pas une grille régulière en latitude et longitude.

La période de référence de ces simulations est : 1950-2000

Les simulations climat futur portent sur 2000-2100 pour 3 scénarios A2, A1B et B1.

Figure 40 : ARPEGE climat pôle Méditerranée

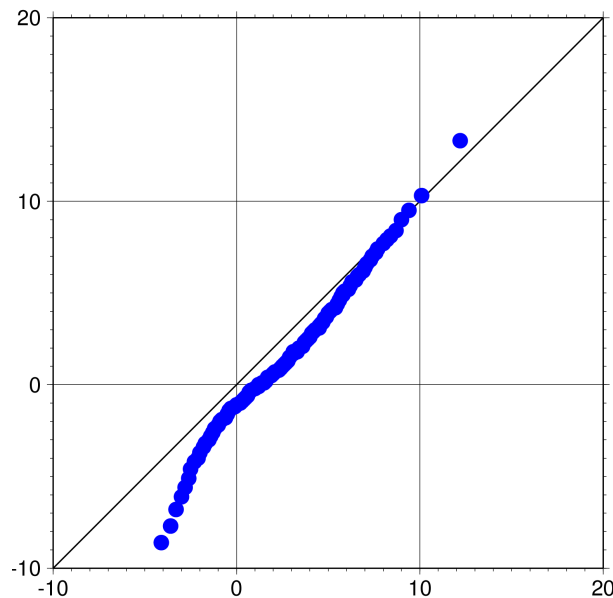


### Description de la méthode de correction quantile-quantile

Cette méthode permet de corriger les plus gros défauts du modèle notamment en termes d'intensité des phénomènes extrêmes ou de fréquence de jours pluvieux.

Elle consiste à comparer les fonctions de densité probabiliste pour chaque saison et variable. Le diagramme quantile-quantile (Figure 41) est à la fois un outil d'analyse et une méthode de correction (Déqué, 2007).

Figure 41 : Diagramme quantile-quantile pour les températures minimales à Paris en hiver (°C). Les quantiles du modèle sont en abscisse et ceux de l'observation sont en ordonnée



Il s'agit d'une méthode non-linéaire qui consiste à corriger les valeurs des quantiles du modèle par ceux calculés à partir des observations. En chaque point du modèle, pour chaque variable météorologique on calcule les 99 centiles des séries quotidiennes. On calcule de même les 99 centiles des séries observées. Chaque variable est corrigée indépendamment et au pas de temps quotidien.

Cette correction repose sur le principe suivant : le modèle et la réalité ont chacun leur propre échelle de valeur. On suppose que la transformation global-régional est transposable telle quelle du climat actuel au climat futur.

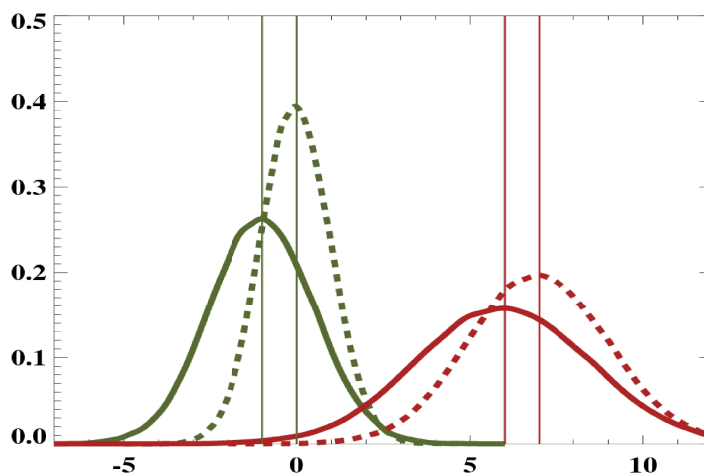
La fonction de correction consiste à associer chaque centile du modèle au centile observé. Pour toute valeur du modèle située entre deux centiles, on fait une interpolation linéaire. Au delà du 99ème et en deçà du 1er, on applique une correction constante estimée sur le centile extrême correspondant.

Dans un climat modifié, on suppose que l'échelle de valeurs du modèle, caractérisée par les 99 centiles d'une série de référence reste la même, ce qui implique que les extrapolations de valeurs extrêmes, qui ont lieu dans 1% des cas pour le climat de référence, peuvent avoir lieu plus fréquemment et concerner des incréments plus élevés.

Aucune méthode de correction ne peut se passer d'une hypothèse sur le comportement du modèle dans le climat futur. Il existe des variantes de la méthode quantile-quantile. Nous avons utilisé ici la plus simple et la plus robuste.

Le graphique de la Figure 42 présente un exemple d'évolution d'une distribution : la méthode quantile-quantile permet de tenir compte d'une modification de la fréquence des maxima ainsi que d'une modification des maxima eux-mêmes.

Figure 42 : Exemple d'évolution d'une distribution (en vert pour le climat présent, en rouge pour le climat futur, en pointillé pour les valeurs corrigées par la méthode quantile-quantile et en trait continu pour les sorties brutes du modèle)



Cette méthode offre la possibilité d'utiliser les observations de plusieurs stations à l'intérieur d'une zone ou d'une maille du modèle, ce qui permet d'augmenter la taille de l'échantillon et de prendre en compte la variabilité sous-maille (utilisation des analyses Safran 8 km par exemple). Elle est adaptée pour l'étude des extrêmes et présente l'avantage de présenter une bonne cohérence temporelle permettant, par exemple, l'étude de périodes de sécheresse ou de nombre de jours consécutifs de fortes précipitations ou de fortes/faibles températures.

Dans le cas des données fournies au projet Explore 2070, la correction a été réalisée avec les séries quotidiennes (en fait horaires) Safran pour les températures et précipitations.

En chaque point du modèle sur la France et pour chaque variable météorologique (température, précipitations) les 99 centiles des séries quotidiennes ont été calculés **en traitant séparément les quatre saisons**.

Les 99 centiles des séries observées sont calculés en utilisant tous les points de SAFRAN voisins d'un point du modèle (ce qui multiplie par environ 40 la longueur des séries). La fonction de correction consiste à associer chaque centile du modèle au centile de SAFRAN correspondant. Pour toute valeur du modèle située entre deux centiles, on fait une interpolation linéaire. Au delà du 99ème et en deçà du 1er, une correction constante estimée sur le centile extrême correspondant est appliquée.

Les valeurs des Tmin, Tmax et précipitations corrigées par la méthode quantile-quantile sont ainsi calculées sur 240 points que l'on peut visualiser sur la figure suivante.

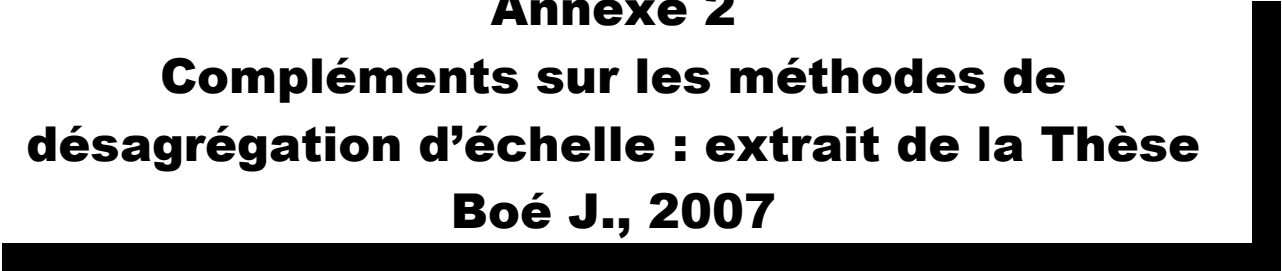


Figure 43 : 240 points pour lesquels Tx, Tn et RR corrigés par la méthode quantile-quantile sont disponibles





**Annexe 2**  
**Compléments sur les méthodes de**  
**désagrégation d'échelle : extrait de la Thèse**  
**Boé J., 2007**





Ce paragraphe est extrait de la thèse de Julien Boé : **Boé J., 2007** : *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. PhD thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007.

## PROBLÉMATIQUE

L'outil premier pour étudier l'évolution du climat sous forçage anthropique est le MCGOA (modèle couplé océan-atmosphère), couplant à l'heure actuelle le plus souvent un modèle d'atmosphère, de sol, d'océan et de banquise. Ce type de système, très complexe et coûteux en temps de calcul ne peut actuellement tourner qu'à des résolutions spatiales limitées. Alors qu'à l'heure actuelle, la résolution typique de la composante atmosphérique d'un MCGOA est de l'ordre de 250 km, les modèles d'impact nécessitent la plupart du temps des informations climatiques d'entrée à une échelle spatiale très fine, souvent inférieure à la dizaine de kilomètres, des informations ponctuelles pouvant même s'avérer parfois nécessaires(...).

La faible résolution des MCGOA comparée à celle nécessaire aux modèles d'impact pose plusieurs problèmes. Tout d'abord, une variable considérée sur une maille de 250 km de côté ou en un point (résultant d'une observation par exemple), sont deux entités physiques différentes, n'ayant pas forcément les mêmes propriétés. De façon plus problématique, les phénomènes physiques se déroulant à une échelle spatiale inférieure à la maille du modèle ne peuvent pas être physiquement résolus selon les lois fondamentales de la physique : ils doivent être paramétrisés. La représentation imparfaite de ces phénomènes par les paramétrisations peut résulter en des biais importants, en particulier à l'échelle régionale : par exemple, la convection implique des échelles spatiales très fines et joue un rôle important sur les précipitations.

Le dernier problème est probablement le plus important. Le climat régional peut être vu schématiquement comme résultant de l'interaction d'un état atmosphérique de grande échelle et de contraintes physiographiques locales (von Storch, 1995, 1999). Or, un MCGOA ne peut pas actuellement décrire finement les caractéristiques physiographiques locales (...).

Une étape déterminante de la plupart des études d'impact du changement climatique consiste donc à utiliser l'information climatique contenue dans les scénarios globaux à basse résolution pour dériver les scénarios régionaux à haute résolution nécessaires pour forcer le modèle d'impact. On parle aussi de désagrégation.

(...)La France a des caractéristiques physiographiques particulièrement complexes, avec de nombreux reliefs et régions côtières. Les précipitations, variables majeures du cycle hydrologique, sont parmi les variables les plus difficiles à modéliser et donc les plus biaisées, les paramétrisations et la représentation du relief ayant un fort impact sur elles. Pour finir, simuler correctement les débits d'un cours d'eau de l'échelle relativement petite des rivières et fleuves français (la problématique serait peut être différente si on étudiait l'Amazonie, le Nil ou le Yangtsé) nécessite une représentation à une échelle spatiale fine des variables météorologiques.

Une étude des impacts du changement climatique débute souvent par le choix d'une méthode de désagrégation. Une vaste "zoologie" de méthodes existe, dont nous allons maintenant brosser le rapide tableau. Les méthodes de désagrégation sont traditionnellement classées en deux grande familles : désagrégation dynamique et désagrégation statistique (Mearns et al. , 1999). Nous reprendrons dans un premier temps ce classement, même si, comme nous le verrons par la suite, cette distinction est parfois artificielle.

## DÉSAGRÉGATION STATISTIQUE

La désagrégation statistique repose sur trois grandes hypothèses qu'il est important de garder en mémoire :

Les prédicteurs sont des variables appropriées pour le problème étudié (climat régional/local), leur lien avec le climat régional est fort, la zone sur laquelle on les considère est pertinente. Les prédicteurs sont simulés de façon réaliste par les modèles climatiques à l'échelle où on les considère. Cette dernière hypothèse est très importante : l'utilisation d'un grand nombre de prédicteurs élaborés est tentante car cela permet souvent d'augmenter les performances du modèle de désagrégation statistique (MDS) sur la période d'apprentissage. Néanmoins, au final, si ces prédicteurs, tels que simulés par un modèle climatique, ne sont pas fiables, les projections climatiques régionales seront faussées.

Le modèle statistique entre variable(s) prédictive(s) et prédite(s) établi et validé pour le climat présent, donc dans les bornes du climat observé, reste valable dans le climat perturbé par les forçages anthropiques. Cette hypothèse de stationnarité constitue le talon d'Achille de la désagrégation statistique car elle ne peut pas être vérifiée ou invalidée formellement (pas avant en tout cas que la période simulée ait réellement eu lieu, c'est à dire souvent à une échéance de 50 à 100 ans ...). Idéalement, les données observées devraient couvrir une large palette de conditions climatiques incluant les modifications futures des prédicteurs climatiques. En pratique, la période où l'on peut disposer d'observations de qualité suffisante dans le passé est trop courte pour que cela soit réalisé. Parallèlement, il est aussi utile de valider la méthode de désagrégation sur la reproduction de la variabilité basse fréquence observée car cette dernière peut être vue comme une sorte de « changement climatique naturel » (Zorita et von Storch, 1999). Pour finir, il est certain qu'utiliser une méthode de désagrégation statistique qui repose sur une bonne compréhension physique des phénomènes en jeu est un grand avantage pour pouvoir justifier l'hypothèse de stationnarité.

Les prédicteurs doivent représenter le signal du changement climatique. Par exemple pour le climat présent la circulation atmosphérique peut être un bon et suffisant prédicteur de la température de surface régionale. Néanmoins dans le climat futur, le changement de température ne sera selon toute vraisemblance pas dominé par les changements associés à la dynamique, mais plutôt par les changements radiatifs liés à l'augmentation de la concentration en GES. En l'absence de prédicteurs portant ce signal radiatif, le MDS ne sera donc pas adapté au climat futur.

## Les méthodes de désagrégation statistique

Un grand nombre de méthodes de downscaling statistique existent, que l'on peut néanmoins grossièrement classer en trois grandes familles. Nous nous inspirons ici largement de la revue de Wilby et al. (2004), sans entrer dans les détails. Nous insisterons ici plus particulièrement sur le premier type de méthode (classification en type de temps analogues) car c'est celui-là que nous utiliserons par la suite.

### Classification en type de temps - Analogues

La méthode des analogues est probablement la méthode de désagrégation statistique la plus intuitive. Elle se base sur l'idée que les mêmes causes (en termes de circulation atmosphérique de grande échelle CAGE) produisent les mêmes effets (pour le climat régional). Pour connaître la valeur de la variable à prédire pour un jour donné connaissant la CAGE associée, on recherche dans une archive climatique le jour avec le pattern de circulation atmosphérique le plus proche (...).

Une autre possibilité consiste à regrouper les jours observés en un nombre fini de types de temps discrets, selon la similarité de leur situation synoptique. Des outils de classification automatique comme l'algorithme du k-means sont en général utilisés pour définir les types de temps (Michelangeli et al., 1995 ; Zhang et al., 1997 ; Corte-Real et al., 1999). Ensuite, les propriétés du climat régional sont assignées en fonction de l'appartenance de la circulation d'un jour donné à tel ou tel type de temps, par rééchantillonnage par exemple.

Une troisième approche consiste à classifier l'occurrence spatiale des précipitations en utilisant un modèle de Markov caché (Hughes et al., 1999). Ce type de modèle implique un double processus stochastique : un processus stochastique représentant la séquence des observations (comme l'occurrence des précipitations dans un réseau spatial) est conditionné par un processus stochastique caché (celui des types de temps, non connu). Les états atmosphériques évoluent selon une de Markov à l'ordre un. Dans le cadre du changement climatique, on utilise des modèles de Markov cachés non-homogènes dans lesquels les probabilités de transition entre les états atmosphériques cachés sont conditionnées par des prédictors atmosphériques et donc varient dans le temps. On peut ainsi prendre en compte la variabilité basse fréquence due aux forçages atmosphériques externes.

L'avantage des méthodes basées sur les types de temps, c'est leur puissance explicative, car les types de temps traduisent simplement les liens physiques existants entre la CAGE et le climat sensible régional. Elles peuvent être utilisées dans de nombreuses applications différentes, et peuvent la plupart du temps traiter simplement les problèmes multivariés et spatiaux. Par contre, elles nécessitent une tâche de classification supplémentaire, pouvant être complexe. De plus, si une méthode basée sur des types de temps utilise uniquement des prédictors dynamiques, elle risque d'être partiellement insensible au signal du changement climatique. Il peut aussi y avoir des changements dynamiques à l'intérieur même des types de temps : il est donc souvent nécessaire de les prendre en compte (Wilby et al., 2004).

### Régression

Etablir un modèle de régression (au sens large) est un moyen simple de relier linéairement ou non-linéairement les variables locales aux prédictors de grande échelle. De nombreuses méthodes de ce type sont décrites dans la littérature : régression linéaire multiple (Murphy, 1999), analyse des corrélations canoniques (von Storch et al., 1993) pour les méthodes linéaires, réseau de neurones (Crane et Hewitson, 1998) ou algorithme génétique (Liu et al., 2007) par exemple pour des approches non-linéaires.

Les méthodes de désagrégation basées sur la régression permettent souvent d'obtenir les meilleures corrélations entre variables observées et reconstituées (en mode validation), mais sous-estiment en général la variance temporelle. Des méthodes d'inflation de la variance consistant à multiplier la série reconstituée par un facteur ad-hoc afin de lui donner la même variance que la série originale observée, tout en maintenant la corrélation, sont souvent utilisées (Huth, 1999). Néanmoins cette approche n'est pas satisfaisante (von Storch, 1999). Von Storch propose à la place une méthode alternative, conceptuellement juste, de "randomization", consistant à obtenir la variance manquante dans les séries reconstruites en ajoutant du bruit. Cette méthode fait chuter les corrélations entre variables observées et reconstituées et elle reste peu utilisée.

Des difficultés existent avec les méthodes de régression pour maintenir la cohérence entre de multiples variables climatiques locales. Les méthodes de régression pures sont, de fait, rarement utilisées dans le cadre de problèmes de désagrégation multi-variés.

### Générateur de temps

Un générateur de temps est un modèle statistique visant à produire des séries temporelles respectant les propriétés statistiques de la variable climatique locale considérée, sans chercher néanmoins à en reproduire la séquence observée (Wilks et Wilby, 1999). L'occurrence des précipitations est représentée à l'aide de processus markoviens. Les variables secondaires comme la quantité de pluie, la température sont en général modélisées comme étant conditionnées par l'occurrence des précipitations. Dans le cadre de la désagrégation statistique, les générateurs de temps sont en plus conditionnés par des prédictors atmosphériques de grande échelle.

Le principal problème des générateurs de temps est qu'ils sous-estiment généralement la variabilité temporelle à basse fréquence des précipitations (Mearns et al., 1996), ce problème venant d'un "conditionnement" insuffisant du générateur à l'état climatique de grande échelle. De plus, dans le cas où de nombreuses variables spatialement distribuées doivent être désagrégées, l'approche par générateur de temps devient très complexe en raison de la modélisation des dépendances statistiques spatiales et inter-variables. Les générateurs de temps se révèlent par contre très utiles pour faire de la désagrégation temporelle, de précipitations mensuelles vers des précipitations journalières ou de précipitations journalières vers des échelles de temps plus courtes (Kilsby et al., 1998).

## DÉSAGRÉGATION DYNAMIQUE

La désagrégation des forçages climatiques s'avère nécessaire pour étudier les impacts du changement climatique en raison de la faible résolution des modèles climatiques couplés, découlant du coût numérique de ces modèles. Un moyen de résoudre ce problème est d'augmenter la résolution du modèle atmosphérique, en l'utilisant seul, sans couplage avec un modèle d'océan. Le modèle atmosphérique est alors forcé par les TSO provenant d'un MCGOA. Cette approche est encore très coûteuse en temps de calcul. Pour faire face à ce problème, il est possible d'augmenter la résolution du modèle atmosphérique uniquement sur la zone d'intérêt et de la dégrader progressivement à mesure qu'on s'en éloigne. On parle de modèle à résolution variable (Gibelin et Déqué, 2003). La dernière possibilité consiste à utiliser un modèle atmosphérique à haute résolution sur une zone unique, géographiquement limitée. Il doit alors être forcé à ses frontières (atmosphériques sur toute la verticale et océaniques) par les sorties d'un modèle climatique couplé basse résolution (Giorgi et al., 1990). On parle de modèles à aire limitée. Parmi les trois approches mentionnées, cette dernière est la plus utilisée en raison de son plus faible coût numérique, même si elle est plus compliquée à mettre en place en raison du forçage par les conditions aux limites latérales (...)

D'autre part, l'augmentation de la résolution du modèle ne résout pas tous les problèmes. Notamment, les problèmes liés aux paramétrisations existent encore, et des biais importants à l'échelle régionale subsistent, notamment pour les précipitations. Si le modèle d'impact a un comportement linéaire, les biais résultant du forçage atmosphérique vont s'annuler lorsqu'on fera la différence [futur-présent] des simulations d'impact. L'hypothèse de linéarité du modèle d'impact est en général difficile à accepter. Ainsi, corriger les biais des MCRs est une étape indispensable pour étudier les impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique (Wood et al., 2004). Une fonction de correction est ainsi construite pour le climat présent en comparant variables simulées et observées, puis utilisée pour corriger le scénario climatique régional. Différentes méthodes de correction de biais, plus ou moins complexes existent. Déqué (2007) présente une classification des différentes méthodes possibles que nous reprenons ici.

## La méthode de la confiance

La méthode consiste à ne pas appliquer de correction, soit que le MCR soit considéré comme non biaisé, soit que le modèle d'impact ait un comportement linéaire. Cette méthode n'est pas satisfaisante pour étudier le cycle hydrologique : les biais des MCR sont en général importants pour les variables d'intérêt, et les processus du cycle hydrologique ne sont pas linéaires.



### **La méthode du delta**

La méthode consiste à superposer le changement climatologique moyen simulé par un MCR aux observations. Les observations doivent donc être au pas de temps et à la résolution spatiale nécessaire au modèle d'impact. En pratique, la résolution du modèle climatique n'a pas besoin d'être proche de celle du modèle d'impact et un modèle basse résolution peut même suffire. Ce n'est néanmoins guère satisfaisant d'un point de vue théorique. Cette méthode suppose implicitement que la variabilité et la distribution statistique restent inchangées dans le climat futur et donc que le changement climatique se traduit uniquement par un décalage de la moyenne. Cette méthode ne permet pas d'étudier les impacts liés au changement de variabilité, qui peuvent pourtant être très importants. De plus, un changement de moyenne des variables d'impact peut très bien résulter du simple changement de variabilité des variables de forçage dans un modèle d'impact non linéaire. Cette méthode à la fois simple à mettre en œuvre et robuste est la plus utilisée à l'heure actuelle.

### **La méthode du débiaisage**

Elle consiste à calculer le biais moyen du MCR en comparant une simulation de référence aux observations, puis à le retrancher au scénario climatique. Cette méthode ne nécessite pas d'observations à haute fréquence temporelle : une climatologie suffit. Par contre, les sorties du MCR doivent ensuite être amenées à la résolution du modèle d'impact. Cette méthode prend en compte le changement de variabilité dans le climat futur, mais fait l'hypothèse implicite que la variabilité et la distribution statistique venant du MCR sont non-biaisées.

### **Les méthodes de correction fonctionnelles**

Ces méthodes généralisent la méthode précédente.

Une fonction de correction plus ou moins complexe est construite en se basant sur les observations, puis appliquée aux scénarios climatiques. Les méthodes de régression, d'analyse en corrélation canonique dont on a parlé dans la partie sur la désagrégation statistique peuvent être incluses dans cette catégorie. Nous considérerons par la suite le cas particulier de la correction quantile/quantile (transformation empirique de Panofsky et Brier, 1968) : il s'agit de corriger toute la distribution statistique de la variable quantile par quantile étant donné le biais pour chaque quantile établi sur le climat présent. Wood et al. (2004) l'utilisent à l'échelle mensuelle dans une problématique similaire à la notre. Cette méthode est aussi employée dans Déqué et al. (2007) dans un autre contexte.

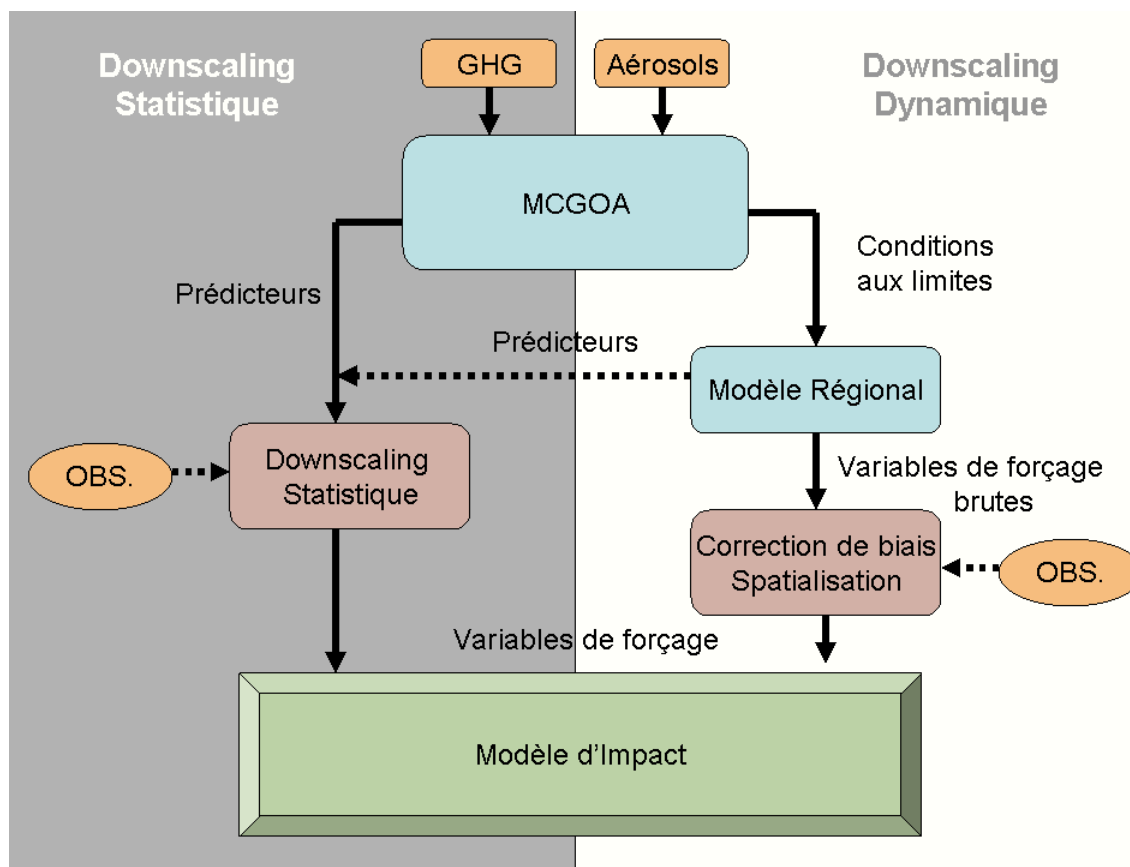
### **Les méthodes de rééchantillonnage conditionnel**

Elles utilisent les valeurs observées pour construire le scénario régional en fonction de prédicteurs de grande échelle issus d'un MCR. La méthode des analogues ou celle de classification en types de temps décrite dans la partie sur la désagrégation statistique fait partie de cette famille. Ce type de méthode est nécessaire lorsque les variables dont a besoin le modèle d'impact sont trop mal simulées par le MCR. Elle permet aussi de maintenir la cohérence spatiale et les cohérences physiques après correction entre les différentes variables nécessaires au modèle d'impact, ce qui est souvent difficile avec les autres méthodes.

La limitation majeure est que dans le scénario climatique, aucune valeur supérieure ou inférieure à celles observées dans le climat actuel ne peut être atteinte. Notons néanmoins que toutes les méthodes de correction établissent leur fonction de correction à partir des observations, et donc dans les bornes du climat observé, avant de l'appliquer au climat futur. Une certaine limitation pour les valeurs extrêmes existe donc dans tous les cas.

Les méthodes de correction de biais n'exigent pas toutes de recourir à un MCR (par exemple méthode de rééchantillonnage conditionnel). La distinction entre correction de biais pour désagrégation dynamique et désagrégation statistique est donc en partie arbitraire, d'autant plus que toutes les méthodes de désagrégation statistique citées précédemment peuvent aussi bien être utilisées avec les prédicteurs provenant d'un MCR. Qu'il s'agisse de désagrégation statistique ou de désagrégation dynamique avec correction de biais, il s'agit à la fois de corriger des biais et une différence de résolution (les deux pouvant en partie être liés). Dans le cas de la désagrégation dynamique les deux étapes sont séparées alors que pour la désagrégation statistique les deux étapes se font en même temps. La Figure 44 résume de façon générale les différentes étapes d'une étude des impacts du changement climatique classique que ce soit dans le cadre de la désagrégation statistique ou de la désagrégation dynamique.

Figure 44 : Les différentes étapes d'une étude des impacts du changement climatique



#### AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DEUX APPROCHES

Les deux approches que nous avons décrites dans ce chapitre -dynamique et statistique- présentent à la fois des points forts et des points faibles qu'il est important d'avoir en tête avant de se décider pour l'une ou l'autre. De plus, le choix de la méthode ne dépend pas uniquement de considérations scientifiques, car de nombreuses contraintes "matérielles" peuvent peser sur celui-ci : temps et puissance de calcul disponible, disponibilité d'observations, type du modèle d'impact utilisé...

#### Disponibilité d'observations

Une contrainte majeure de la désagrégation statistique est la nécessité de disposer de données observées de bonne qualité, aux échelles spatiales et temporelles compatibles avec le modèle d'impact. Ainsi, pour de nombreuses zones du globe, la désagrégation statistique ne peut pas être utilisée.

A l'inverse, dans l'absolu, le downscaling dynamique ne nécessite pas de disposer d'observations. Néanmoins, dès que l'on souhaite utiliser une méthode de correction de biais, -ce qui s'avère presque toujours nécessaire en pratique- les observations deviennent aussi indispensables avec l'approche dynamique.

### **Résolution spatiale requise**

La désagrégation statistique n'a aucune limite quant à la résolution des variables climatiques qu'elle peut fournir ou, plus exactement, la seule limite est celle des observations qu'on utilise pour bâtir le MDS. L'approche dynamique est limitée par la résolution du MCR. Une interpolation à plus petite échelle est possible, mais la variabilité sous-maille n'existera pas, à moins d'employer des techniques spécifiques de spatialisation compliquant encore la tâche.

### **Difficulté de mise en place et coût numérique**

La désagrégation statistique demande un travail préalable important afin de comprendre les mécanismes physiques reliant la CAGE et le climat régional, et ensuite de les traduire statistiquement. Une fois la méthode de désagrégation statistique établie, elle peut par contre être utilisée simplement pour régionaliser un grand nombre de scénarios climatiques, le coût de calcul restant très limité. Le travail préalable effectué pour construire le MDS peut en outre s'avérer très utile pour l'analyse fine des mécanismes physiques du climat régional et de leurs changements. A l'inverse, la désagrégation dynamique est particulièrement coûteuse en temps de calcul, ce qui constitue sa principale limitation. En effet, pour qu'une étude d'impact du changement climatique puisse être réellement utile aux décideurs, il est indispensable de prendre en compte les (nombreuses) incertitudes en jeu (Wilby et al., 2006). Comme par exemple Rowell (2006) le montre, le modèle climatique basse résolution servant à forcer le MCR est une source d'incertitude majeure. Il faut alors utiliser une approche multi-modèles (ou des approches alternatives comme par exemple la physique perturbée (Murphy et al., 2004) pour pouvoir échantillonner ces incertitudes. On est ainsi amené à devoir régionaliser un grand nombre de scénarios climatiques basse résolution. De ce point de vue, le recours à la désagrégation statistique est bien plus adapté.

### **Hypothèse(s) de stationnarité**

Le principal problème de la désagrégation statistique est l'hypothèse de stationnarité de la relation entre prédicteur(s) et climat régional. Un MDS se base uniquement sur une représentation simplifiée des phénomènes : il se pourrait que des phénomènes secondaires dans le climat présent deviennent importants dans le climat futur ou que la relation entre prédicteurs et climat régional soit modifiée avec le changement climatique. Même s'il existe des moyens de rendre cette hypothèse moins forte, il n'y a pas moyen de la lever totalement. Dans cette optique, l'avantage principal des MCR est qu'ils prennent en compte la majeure partie des processus physiques qui vont jouer avec le changement climatique ainsi que leurs interactions complexes. Deux bémols majeurs sont néanmoins à mentionner. D'une part, les paramétrisations physiques des MCR établies empiriquement (en partie) pour le climat actuel sont supposées rester valables dans le climat futur. Cette hypothèse de stationnarité est sans doute plus facile à accepter que celle de la désagrégation statistique.

D'autre part, la correction de biais implique aussi une hypothèse de stationnarité : la fonction de correction est établie en comparant le modèle aux observations pour le climat présent et est appliquée au climat futur. Or, il est loin d'être évident que cette fonction reste valable dans le climat futur. Par exemple, on pourrait imaginer que le biais du MCR en précipitations dépende de la température. Dans ce cas, si la fonction de correction ne prend pas en compte la température, son application dans le climat futur est problématique. Une difficulté est de comprendre comment le biais d'une variable peut être influencé par les valeurs ou les biais des autres variables, et quoi qu'il en soit la longueur limitée des observations ne permet pas d'établir de façon robuste des fonctions de correction dépendant de nombreuses variables. Cette deuxième hypothèse de stationnarité du downscaling dynamique est en fait exactement la même que celle de la désagrégation statistique.

## Variables de sortie

L'avantage majeur de la désagrégation dynamique est que l'on peut disposer de toutes les variables météorologiques possibles, ce qui permet des études de mécanismes bien plus fines et poussées que celles permises par la désagrégation statistique, qui se limite aux quelques variables nécessaires pour forcer le modèle d'impact.

### BIBLIOGRAPHIE DE L'ANNEXE 2

- Corte-Real J., Qian B. et Xu H.**, 1999 : Circulation patterns, daily precipitation in Portugal and implications for climate change simulated by the second Hadley Centre GCM, *Climate Dyn.*, **15**, 921–935.
- Déqué M.**, 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values, *Glob. and Plan. Change*, **57**, 16–26, doi :10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.
- Gibelin A. L. et Déqué M.**, 2003 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Climate Dyn.*, **20**, 327–339.
- Giorgi F., Marinucci M. R. et Visconti G.**, 1990 : Use of a limited-area model nested in a general circulation model for regional climate simulation over Europe, *J. Geophys. Res.*, **95(D11)**, 18413–18431, doi :10.1029/90JD016.
- Hughes J. P. et Guttorp P.**, 1999 : A non-homogeneous hidden Markov model for precipitation occurrence, *App. Stat.*, **48**, 15–30.
- Huth R.**, 1999 : Statistical downscaling in central Europe : Evaluation of methods and potential predictors, *Climate Res.*, **13(2)**, 91–101.
- Kilsby C. G., Cowpertwait P. S. P., OConnell P. E. et Jones P. D.**, 1998 : Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables, *Int.J.Climatol.*, **18**, 523–539.
- Liu X., Coulibaly P. et Evora N.**, 2007 : Comparison of data-driven methods for downscaling ensemble weather forecasts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **4**, 189–210.
- Martin E., Timbal B. et Brun E.**, 1997 : Downscaling of general circulation model outputs : simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change, *Climate Dyn.*, **13**, 45–56.
- Mearns L. O., Rosenzweig C. et Goldberg R.**, 1996 : The effect of changes in daily and interannual climatic variability on CERES-wheat : a sensitivity study, *Clim. Change*, **32**, 257–292.
- Michelangeli P.-A., Vautard R. et Legras B.**, 1995 : Weather regimes : Recurrence and quasi stationarity, *J. Atmosph. Sci.*, **52(8)**, 1237–1256.
- Murphy J. M., Sexton D. M. H., Barnett D. N., Jones G. S., Webb M. J., Collins M. et Stainforth D. A.**, 2004 : Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations, *Nature*, **430**, 768–772.
- Onibon H., Lebel T., Afouda A. et Guillot G.**, 2004 : Gibbs sampling for conditional spatial disaggregation of rain fields, *Water Resources Research*, *Water Resources Res.*, **40**, W08401, doi : 10.1029.
- Panofsky H. A. et Brier G. W.**, 1968 : *Some applications of statistics to meteorology*, The Pennsylvania State University Press.
- Rowell D. P.**, 2006 : A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation, *Clim. Change*, **79(3-4)**, 243–257, doi : 10.1007/s10584-006-9100-z.

- 
- Timbal B.**, 2004 : Southwest Australia past and future rainfall trends, *Clim. Res.*, **26(3)**, 233–249.
- von Storch H., Zorita E. et Cubasch U.**, 1993 : Downscaling of global climate change estimates to regional scales : An application to Iberian rainfall in wintertime, *J. Climate*, **6**, 1161–1171.
- von Storch H.**, 1999 : On the use of ‘inflation’ in statistical downscaling, *J. Climate*, **12(12)**, 3505–3506.
- Wilby R. L., Charles S. P., Zorita E., Timbal B., Whetton P. et Mearns L. O.**, 2004 : Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, *Data Distribution Centre of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Available at <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines>.
- Wilby R. L., Whitehead P. G., Wade A. J., Butterfield D., Davis R. J. et Watts G.**, 2006 : Integrated modeling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment : River Kennet, UK., *J. Hydrol.*, **330**, 204–220.
- Wilks D. S. et Wilby R. L.**, 1999 : The Weather Generation Game : A Review of Stochastic Weather Models, *Prog. Phys. Geo.*, **23**, 329–357.
- Wood A., Leung L. R., Sridhar V. et Lettenmaier D. P.**, 2004 : Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate outputs, *Clim. Change*, **62**, 189–216.
- Zhang X., Wang X. L. et Corte-Real J.**, 1997 : On the relationship between daily circulation patterns and precipitation in Portugal, *J. Geophys. Res.*, **102, 13**, 13495–13507.
- Zorita E. et von Storch H.**, 1999 : The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique : Comparison with More Complicated Methods, *J. Climate*, **12**, 2474–2489.
- Zorita E., Hughes J. P., Lettemaier D. P. et von Storch H.**, 1995 : Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local prec