

Analyse de vulnérabilité et gestion quantitative de la
ressource en eau sur le bassin Artois-Picardie

Rapport Phase 2 Etape 4 Détermination des scénarios climatiques à 2030 et 2050

SUEZ CONSULTING

Délégation France Nord-Ouest
Parc de L'Île
15-27, Rue du Port
92022 NANTERRE cedex

SAFEGE SAS - SIÈGE SOCIAL
Parc de l'Île - 15/27 rue du Port
92022 NANTERRE CEDEX
www.safeg.com

FICHE CONTRÔLE QUALITE

REFERENT MAITRE D'OUVRAGE	
Destinataire du projet	Agence de l'Eau Artois Picardie
Site	Bassin Artois Picardie
Interlocuteurs	Karine VALLEE
Adresse	200 rue Marceline - BP 80818 59508 DOUAI Cedex
Email	K.Vallee@eau-artois-picardie.fr
Téléphone	03 27 99 90 52
REFERENT INTERNE	
Interlocuteurs	RIZZA Jean-Philippe POSIADOL Guillaume
Adresse	Parc de L'Ile 15-27, Rue du Port 92022 NANTERRE CEDEX - France
Email	jean-philippe.rizza@suez.com guillaume.posiadol@suez.com
Téléphone	01 46 14 73 89 02 32 08 18 82
REFERENCE PROJET	
Numéro du projet	19NRE026
Intitulé du projet	Analyse de vulnérabilité et gestion quantitative de la ressource en eau sur le bassin Artois-Picardie
Intitulé du document	Rapport Phase 2 Etape 4 Détermination des scénarios climatiques à 2030 et 2050
Date	03/07/2020

GESTION DES REVISIONS

Version	Rédacteur NOM / Prénom	Vérificateur NOM / Prénom	Date d'envoi JJ/MM/AA	COMMENTAIRES Documents de référence / Description des modifications essentielles
1	MENTHA Max	RIZZA Jean-Philippe	29 juin 2020	Version initiale

Sommaire

1	.....Glossaire et Liste d'acronymes	3
2	.....Préambule	7
3	.....Analyse bibliographique	9
	3.1 Analyse des scénarios climatiques	9
3.1.1	Vue d'ensemble	9
3.1.2	Présentation du GIEC.....	9
3.1.3	Evolution des scénarios climatiques du GIEC	9
3.1.4	Scénarios RCP	12
3.1.5	Les scénarios SSP, le reflet économique des scénarios RCP	14
	3.2 Analyse des modèles climatiques	17
3.2.1	Eléments introductifs	17
3.2.2	Problématique de la descente d'échelle et de la correction de biais	19
3.2.3	CMIP – Modélisation climatique globale	24
3.2.4	CORDEX – Modélisation climatique régionalisée	24
3.2.5	DRIAS – Modélisation climatique régionalisée pour la France	25
3.2.6	Modèles de prévision à court-terme	27
	3.3 Problématique des incertitudes	27
	3.4 Analyse des données climatiques existantes	28
3.4.1	Le portail CMIP	28
3.4.2	Le portail Euro-Cordex	28
3.4.3	Le portail Drias	28
3.4.4	Le portail du service du changement climatique du programme Copernicus	31
	3.5 Impacts sur la ressource en eau	33
3.5.1	Température	33
3.5.2	Précipitations	34
3.5.3	Ressource en eau superficielle	38
3.5.4	Ressource souterraine	43
3.5.5	Autres impacts	45
	3.6 Remarques générales	46
4	.....Entretiens avec les laboratoires français de modélisation du climat	47
	4.1 Météo France	47
	4.2 CNRS/CERFACS	48
	4.3 IPSL	49

5	.....	Choix et justifications des 4 scénarios climatiques à retenir ...	51
6	.....	Analyse des effets prévisibles des 4 scénarios climatiques retenus sur la ressource en eau	53
6.1		Effets du changement climatique sur les précipitations	53
6.2		Effets du changement climatique sur les températures	55
6.3		Effets du changement climatique sur les débits	56
6.4		Effets du changement climatique sur la ressource en eau souterraine	57
6.5		Synthèse	59
7	.....	Proposition d'un tableau de méthodes de descente d'échelle	61
8	.....	Autres points importants / Défis à relever.....	63
9	.....	Conclusion.....	65
10	.....	Références	67
11	.....	Annexe 1	71
12	.....	Annexe 2	72
13	.....	Annexe 3	73
14	.....	Annexe 4	74

Tables des illustrations

Figure 1 : Elaboration en parallèle des scénarios climatiques (d'après Noorwijkerhout).....	11
Figure 2 : Comparaison du forçage radiatif selon les scénarios RCP (traits pleins) et SRES (tirets). (DRIAS)	12
Figure 3 : Projections d'émissions des scénarios RCP (courbes) et d'un large éventail de scénarios d'émissions figurant dans les publications scientifiques (surfaces) (Source : (GIEC, 2015)).....	13
Figure 4 : Les cinq SSP types, répartition selon le défi socio-économique pour l'adaptation et pour l'atténuation (d'après A Nigell et al.).....	15
Figure 5 : Relations entre RCP et SSP, d'après T. KRAM	16
Figure 6 : Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton)	18
Figure 7 : Exemple de restitution d'un modèle climatique global de 250 km de résolution (source : (Boé J. , 2014)).....	20
Figure 8 : Schématisation d'un modèle de climat régional (source : (Boé J. , 2014)).....	21
Figure 9 : Simulations CNRM - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.	26
Figure 10 : Simulations IPSL - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.	26
Figure 11 : Simulations EUROCORDEX - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.	27
Figure 12 : polygones de sous-bassin (taille moyenne 215 km ²) tels qu'utilisés dans la configuration du modèle européen HYPE EHYPE 3. Mise en évidence de la région Artois-Picardie (sources : (Agence de l'Eau Artois-Picardie, s.d.) et (Copernicus, s.d.))	32
Figure 13 : Evolution des températures annuelles en Picardie.....	34
Figure 14 : Evolution temporelle des sécheresses SPI3 au cours du XXI ^e siècle selon les saisons (février=hiver, mai=printemps, août=été, novembre=automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps.....	35
Figure 15 : Evolution des précipitations annuelles en Picardie.....	37
Figure 16 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs de précipitations désagrégées (%) sur la période 2035-2065 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. Les ensembles de GCM sont différents pour chaque scénario (voir Tableau 2.1). Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août, SON : Septembre-Octobre-Novembre.	38
Figure 17 : Pourcentage de changement du débit moyen annuel pour une augmentation globale de la température de 2°C par rapport à la référence 1980-2010. Les couleurs indiquent le pourcentage de changement et leur saturation indique la robustesse de cette évaluation. Cette analyse se base sur 5 modèles de circulation générale et 11 modèles hydrologiques globaux	39
Figure 18 : Evolutions relatives possibles (en %) du module entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	39
Figure 19 : Evolutions relatives possibles (en %) du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	39
Figure 20 : volutions relatives possibles (en %) du QJXA10 entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.....	40
Figure 21 : Evolution des débits mensuels de la Somme en 2050 (haut) et 2080 (bas) par rapport au climat actuel simulé (1971-2000). L'enveloppe représente les valeurs minimales et maximales pour chaque mois, les lignes bleues continues les 10 ^{ème} et 90 ^{ème} quantiles, les lignes pointillées les 25 ^{èmes} et 75 ^{èmes} quantiles, et la ligne noire la moyenne. 26 simulations sont considérées pour 2050 et 39 pour 2080. La ligne rose représente la moyenne de 2050. Source : (Habets, 2013).....	41
Figure 22 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015).....	42
Figure 23 : Ecarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur / temps présent, selon l'étude Explore 207043	
Figure 24 : Evolution de la cote piézométrique de la Seine (carrés) et de la Somme (cercles) pour 2050 (haut) et 2080 (bas) (Habets, 2013).....	44
Figure 25 : Evolution temporelle des sécheresses SWI3 au cours du XXI ^e siècle selon les saisons (février=hiver, mai=printemps, août=été, novembre=automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps.....	45
Figure 26 : Evolution des précipitations annuelles en Picardie (DGEC, 2014).....	53

Figure 27 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs de précipitations désagrégées (%) sur la période 2035-2065 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. Les ensembles de GCM sont différents pour chaque scénario (voir Tableau 2.1). Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août, SON : Septembre-October-Novembre. (Source : (Dayon, 2015)..... 54

Figure 28 : Evolution des températures annuelles en Picardie (DGEC, 2014)..... 55

Figure 29 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-October-Novembre. Source : (Dayon, 2015)..... 56

Figure 30 : Ecart minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur / temps présent, selon l'étude Explore 207057

Figure 31 : Evolution de la cote piézométrique de la Seine (carrés) et de la Somme (cercles) pour 2050 (haut) et 2080 (bas) (Habets, 2013)..... 58

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010)..... 12

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) d'après Terray et al 2010) 22

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (DRIAS)) 23

Tableau 4 : Présentation des différentes méthodes de descente d'échelle (Sources : (DRIAS), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011))..... 61

1 GLOSSAIRE ET LISTE D'ACRONYMES

Adamont : Méthode statistique de descente d'échelle basée sur la méthode quantile-quantile et prenant en compte différents types de temps pour chaque saison de l'année.

ALADIN : *Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International*. Modèle de prévision climatique régional développé par le CNRM.

AR1 - AR5 : *Assessment report 1 – Assessment report 5*. Il s'agit de la dénomination utilisée pour identifier chacun des rapports d'évaluation successifs du GIEC. Le dernier sorti en date est le cinquième (AR5).

Arpege-Climat : Modèle de prévision climatique global développé par le CNRM.

Asca : Bureau d'études en environnement.

CDF-t : *Cumulative Distribution Function – Transfert*. Intitulé d'une méthode statistique de descente d'échelle consistant en une amélioration de la méthode quantile-quantile.

Cerfacs : *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique*. Centre de recherche en mécanique des fluides numérique appliquée à plusieurs domaines dont le climat.

Climsec : Le projet Climsec, porté par le CNRM et présenté en 2011, a permis la réalisation d'une étude de l'évolution passée et future des réserves d'eau des couches superficielles des sols en tenant compte des facteurs d'évolution climatique.

CMIP: *Coupled Model Intercomparison Project*. Le CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) est un projet continu démarré en 1995 mené par le WGCM (Working Group on Coupled Modelling) qui est lui-même une entité du WCRP (World Climate Research Program). L'objectif principal de ce projet est de permettre aux scientifiques de partager et comparer leurs modèles climatiques.

CNRM : *Centre National de Recherches Météorologiques* (Entité de Météo France).

CNRM-CM5 : Il s'agit du modèle climatique global développé par le CNRM pour le cinquième rapport d'évaluation du GIEC.

Conditions aux limites : Conditions imposées aux limites d'un modèle pour reproduire les effets des processus ayant lieu en dehors de son emprise.

CORDEX: *Coordinated Regional Downscaling Experiment*. L'initiative internationale CORDEX est un programme soutenu par le WCRP pour organiser une structure intégrée internationale ayant pour but de produire des projections régionales de changement climatique améliorées pour toutes les régions du monde. Les résultats de CORDEX ont notamment servi d'intrant aux études d'impact et d'adaptation au changement climatique réalisées dans le contexte du 5^{ème} rapport d'évaluation (AR5) du GIEC.

Descente d'échelle et correction de biais : La descente d'échelle (que l'on nomme également régionalisation ou désagrégation spatiale) est un processus permettant, à partir de simulations climatiques de grande échelle (de l'ordre de 300 à 50 km), de descendre à des échelles fines de

l'ordre de la dizaine de kilomètres, et/ou (cas de la correction de biais) de corriger les résultats des simulations à partir d'observations.

DGEC : *Direction Générale de l'Energie et du Climat.*

DRIAS : *Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement.* « DRIAS, les futurs du climat » permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur la France, et de commander des données ciblées.

EURO-CORDEX : EURO-CORDEX est la branche européenne du programme CORDEX. Dans le cadre du projet européen EUROCORDEX, des projections climatiques ont été réalisées sur toute l'Europe jusqu'à une résolution de 12 km. Ces modèles régionaux sont forcés par différents modèles de circulation générale du projet CMIP5 utilisés pour l'exercice du GIEC (2013).

Explore 2070 : Projet mené entre juin et octobre 2012 avec pour objectif d'évaluer les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à l'échéance 2070, et d'élaborer des stratégies d'adaptation.

Forçage radiatif : Le forçage radiatif, exprimé en W/m^2 , est le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre. Plus la valeur du forçage est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe.

GIEC : *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.*

Incertitude : Degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données, d'une ambiguïté dans la définition des concepts ou de la terminologie employés ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts).

IPSL : *Institut Pierre Simon Laplace.* Organisme de recherche impliqué notamment sur les problématiques de projection climatique.

IPSL-CM5 : Il s'agit du modèle climatique global développé par l'IPSL pour le cinquième rapport d'évaluation du GIEC.

MCG ou GCM : *Modèle de Circulation Générale ou Global Circulation Model.*

Prévision climatique : Une prévision climatique est le résultat d'une tentative d'estimation (à partir d'un état donné du système climatique) de l'évolution réelle du climat à l'avenir, par exemple à l'échelle d'une saison, de plusieurs années voire d'une décennie. Comme il est possible que l'évolution future du système climatique soit fortement influencée par les conditions initiales, de telles prévisions sont, en général, de nature probabiliste.

Projection climatique : Simulation de la réponse du système climatique à un scénario futur d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols, obtenue généralement à l'aide de modèles climatiques. Les projections climatiques se distinguent des prévisions climatiques par le fait qu'elles sont fonction des scénarios d'émissions, de concentration ou de

forçage radiatif utilisés, qui reposent sur des hypothèses concernant, par exemple, l'évolution socio-économique et technologique à venir, ces hypothèses pouvant se réaliser ou non.

Quantile : Le quantile est une généralisation de la notion de médiane qui divise la distribution d'un échantillon de données en deux parties égales. On définit notamment les quartiles, déciles et centiles sur la population, ordonnée dans l'ordre croissant, que l'on divise en 4, 10 ou 100 parties de même effectif. On parlera ainsi du « centile 90 » pour indiquer la valeur séparant les premiers 90 % de la population des 10 % restants.

RCM: *Regional Climate Modeling*.

RCP: *Representative Concentration Pathway*. Intitulé des derniers scénarios climatiques du GIEC.

SAFRAN : Safran est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire au pas de temps horaire les paramètres suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km) (source : Drias).

SPI : *Standardized Precipitation Index*. Index largement utilisé pour caractériser les sécheresses météorologiques.

SRES : *Special Report on Emissions Scenarios*. Intitulé des anciens scénarios climatiques du GIEC.

SSP: *Shared socio-economic pathways*. Il s'agit d'un ensemble de cinq familles de scénarios socio-économiques élaborés en parallèle des scénarios d'émissions RCP, afin d'assurer une cohérence entre les climatologues et les économistes.

SSWI: *Standardized Soil Wetness index*. Index permettant de mesurer la sécheresse en termes d'humidité du sol. On l'appelle également indice de sécheresse agricole.

WCRP: *World Climate Research Program*.

WRF: *Weather Research and Forecasting Model*. Intitulé d'un modèle climatique développé par l'IPSL.

2 PREAMBULE

Le présent rapport a pour objectifs :

- D'identifier et de justifier les scénarios de changement climatiques qui seront retenus dans la suite de l'étude ;
- De présenter les différentes méthodes de descente d'échelle existantes, avec leurs avantages et inconvénients.

4 scénarios, dont 2 optimistes et 2 plutôt pessimistes seront dans un premier temps proposés et argumentés. Une réunion de COTECH permettra d'identifier, sur la base de ces éléments, un scénario plutôt pessimiste et un scénario plutôt optimiste à retenir dans la suite de l'étude. Sur la base des analyses réalisées, la (ou les) méthodes de descente d'échelle la plus appropriée sera appliquée afin de pouvoir représenter les processus influençant le climat à une échelle régionale.

Le présent rapport est structuré de la manière suivante :

- Recherche bibliographique ;
- Choix et justification des 4 scénarios climatiques à retenir ;
- Analyse des effets prévisibles des 4 scénarios climatiques sur la ressource en eau ;
- Proposition d'un tableau des méthodes de descente d'échelle.

Les trois derniers points de la liste ci-dessus s'appuieront sur les informations récoltées dans le cadre de la recherche bibliographique. Cette dernière est donc orientée vers les données et études à même d'apporter les éléments nécessaires à ces analyses.

3 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

3.1 Analyse des scénarios climatiques

3.1.1 Vue d'ensemble

Que ce soit au niveau français ou international, la littérature disponible indique que la communauté scientifique s'appuie systématiquement, en ce qui concerne les scénarios de changement climatique, sur les travaux du GIEC.

Le présent paragraphe a pour objectif de présenter le GIEC et ses scénarios climatiques.

3.1.2 Présentation du GIEC

Sources : (GIEC, 2015)

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) pour évaluer les fondements scientifiques du changement climatique. Le GIEC est aussi chargé d'estimer les risques et les conséquences du changement climatique, d'envisager des stratégies d'adaptation aux impacts et d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers (1990, 1995, 2001, 2007, 2014) à une évaluation de l'état des connaissances.

3.1.3 Evolution des scénarios climatiques du GIEC

3.1.3.1 Quatrième état de connaissance

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GIEC, 2013), (DRIAS)

Jusqu'à récemment, les études réalisées sur l'évolution du climat s'appuyaient largement sur l'état de connaissance réalisé en 2007 (désigné par l'acronyme AR4 pour « fourth assessment report »).

Lors de cet état de connaissance, la stratégie suivie était séquentielle. Le point de départ était une synthèse des travaux de modélisation économique qui conduisit à définir un ensemble de scénarios d'évolution possible de nos sociétés et modes de vie, prenant en compte des choix en matière d'énergie et de rapports à la mondialisation (Développements démographiques et économiques futurs, régionalisation, production et utilisation d'énergie, technologie, agriculture, gestion forestière et occupation du sol). Ces scénarios, appelés SRES (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter, Special Report on Emissions Scenarios) proposaient plusieurs évolutions :

- Scénario A1 : Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel.
- Scénario B1 : Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.
- Scénario A2 : Développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel.
- Scénario B2 : Développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.

Ces scénarios se traduisaient ensuite en termes d'émission de gaz à effet de serre. Ces évolutions d'émissions de GES étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles de projections climatiques. Enfin, les projections climatiques alimentent les modèles d'impact (sur l'hydrosystème, les écosystèmes, la socio-économie...).

Les scénarios SRES étaient produits par le GIEC lui-même.

3.1.3.2 Cinquième état de connaissance

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GIEC, 2013), (DRIAS)

En 2014, un nouvel état de connaissance (désigné par l'acronyme AR5 pour « fifth assessment report ») a été publié par le GIEC.

Depuis l'AR4, les déterminants socio-économiques tels que l'économie, les technologies, les politiques publiques, et la connaissance du système climatique ont évolué.

Par exemple, il n'avait pas été envisagé à l'époque la possibilité d'un développement aussi rapide des pays émergents. Dans le même temps, les projections démographiques globales ont été revues à la baisse, de 14 milliards d'humains à 10 milliards à l'horizon 2100. Ces quinze dernières années ont aussi vu, à l'échelle mondiale, l'adoption de politiques climatiques dont il est désormais nécessaire d'intégrer les effets sur la réduction des émissions de gaz et les rétroactions en termes d'impacts et d'adaptation pour les systèmes considérés. Ces mécanismes n'étaient pas inclus dans les scénarios précédents.

Il est aujourd'hui aussi envisagé d'avoir des évolutions des émissions globales de gaz à effet de serre qui diminueraient après une phase de croissance au XXI^e siècle ce qui oblige certains scénarios à être prolongés au-delà de 2100.

Le GIEC a décidé de définir des nouveaux scénarios pour mieux prendre en compte ce nouveau contexte et permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle.

La démarche suivie pour la définition des scénarios pour le 5^e rapport procède donc d'une nature différente au précédent. Au-delà de la conception de nouveaux scénarios, c'est un véritable virage méthodologique qu'opère la communauté scientifique.

Auparavant, l'analyse était menée en suivant une logique séquentielle. La réflexion partait d'un faisceau de « futurs possibles » pour nos sociétés, intégrant une vaste palette de déterminants – les évolutions des économies nationales, l'offre technologique, les choix énergétiques, la démographie, les comportements individuels, etc.

Pour gagner en rapidité et en réactivité, la communauté scientifique applique désormais une méthode différente. Les scientifiques ont défini ex ante des profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols représentatives d'un accroissement du bilan énergétique : les RCP (« Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration »).

À partir de ces profils de référence, les équipes travaillent simultanément et en parallèle : les climatologues produisent des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée, tandis que les sociologues et les économistes élaborent des scénarios débouchant, en sortie, sur des émissions de gaz à effet de serre cohérents avec les RCP.

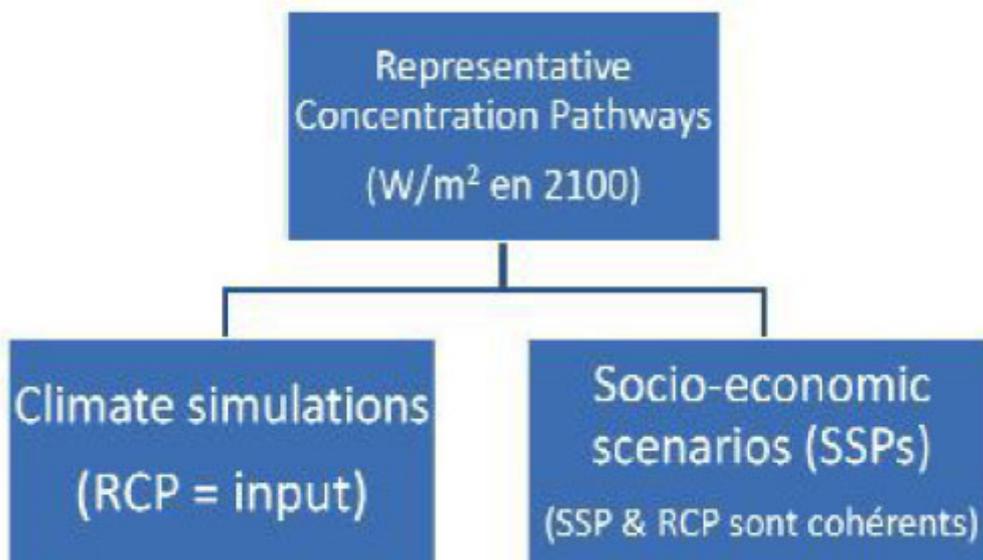


Figure 1 : Elaboration en parallèle des scénarios climatiques (d'après Noorwijkerhout)

En comparaison avec les SRES, Les scénarios RCP présentent les caractéristiques principales suivantes :

- Ils ne sont pas nécessairement plus capables de représenter les développements futurs que les scénarios SRES (en raison des très fortes incertitudes liées à ces derniers), mais permettent une meilleure prise en compte des informations disponibles à ce jour ;
- Contrairement aux scénarios SRES, ils ne sont pas basés sur des pronostics socio-économiques. Les RCP peuvent ainsi représenter toute une gamme de politiques climatiques pour le XXI^e siècle ;
- Ils intègrent une meilleure prise en compte des gaz à effet de serre de courte durée de vie et des changements de l'occupation du territoire, des évolutions démographiques, du développement des pays émergents et des politiques climatiques envisageables ;
- Ils n'ont pas été définis par le GIEC lui-même, mais lui ont été soumis par la communauté scientifique internationale Enfin, contrairement aux scénarios SRES, ces nouveaux scénarios ne sont pas définis par le GIEC lui-même, mais ont été établis par la communauté scientifique pour répondre aux besoins du GIEC.

3.1.3.3 Sixième état de connaissance

Sources : (Hausfather, 2019)

Le GIEC est actuellement en préparation du prochain état de connaissance (désigné par l'acronyme AR6 pour « sixth assessment report »), dont les premiers éléments devraient être publiés en avril 2021.

Dans ce nouvel état de connaissance, selon le site carbonbrief.org, de nouveaux scénarios climatiques sont définis ; les scénarios SSP (shared socio-economic pathways) à ne pas confondre avec les scénarios socio-économiques de l'AR5 portant le même type d'intitulé. Le forçage radiatif de ces nouveaux scénarios sera similaire à celui des scénarios RCP. Cependant, la traduction de ce forçage en émissions de gaz à effets de serre sera différente, en raison de l'amélioration des connaissances sur ce sujet.

Des modélisations climatiques basées sur ces nouveaux scénarios ont déjà été réalisées au niveau international, mais beaucoup sont encore en cours.

A ce jour, aucun des travaux concernant l'AR6 n'a encore fait l'objet d'une publication par le GIEC.

3.1.4 Scénarios RCP

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GIEC, 2015), (DRIAS)

Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP : representative concentration pathway) sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif¹ sur la période 2006-2300. Ils décrivent quatre modes différents d'évolution des émissions et des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, des émissions de polluants atmosphériques et de l'utilisation des terres au XXI^e siècle.

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	croissante
RCP 6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010)

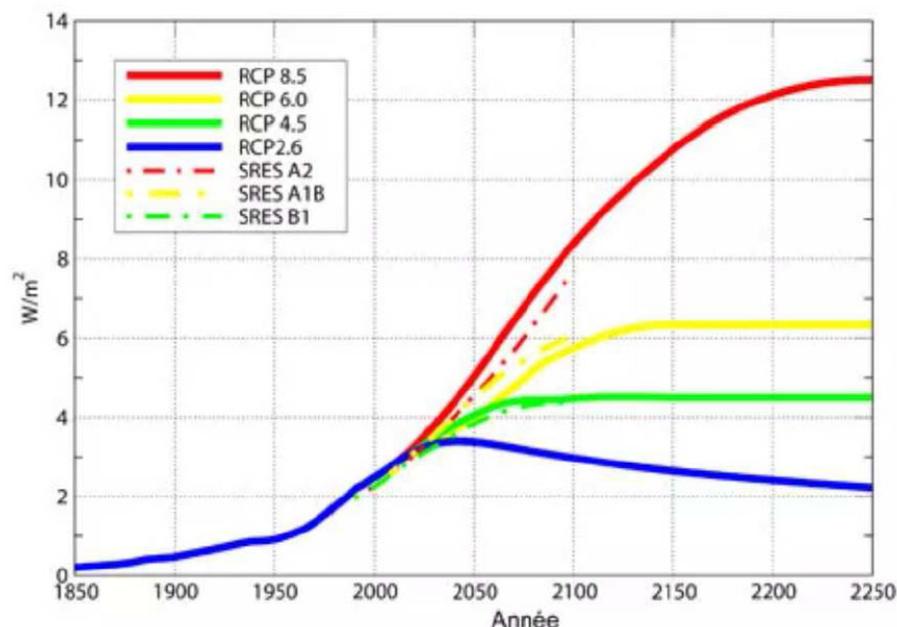


Figure 2 : Comparaison du forçage radiatif selon les scénarios RCP (traits pleins) et SRES (tirets). (DRIAS)

¹ Le forçage radiatif, exprimé en W/m², est le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre. Plus la valeur du forçage est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe.

Le contexte de chaque scénario RCP est détaillé ci-dessous :

- RCP2.6 : Scénario avec une politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO₂ afin de limiter le réchauffement planétaire à 2°C (par rapport à l'époque préindustrielle) en 2100. Il exige que l'on investisse dans l'atténuation sans tarder et que l'on adopte des techniques à émissions négatives au plus tard au cours du présent siècle (pic puis déclin) ;
- RCP4.5 : Scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO₂ avant 2100 (stabilisation sans dépassement) ;
- RCP6.0 : Scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO₂ après 2100 (stabilisation sans dépassement – scénario moins contraignant que le précédent) ;
- RCP8.5 : Scénario sans politique climatique (concentration en CO₂ croissante).

Dans ces profils, les différents scénarios d'utilisation des terres, pris ensemble, proposent un large éventail d'avenirs possibles, allant du reboisement net à l'aggravation du déboisement, ce qui est cohérent avec les projections figurant dans les publications qui proposent des scénarios complets. Pour ce qui concerne les polluants atmosphériques tels que le dioxyde de soufre (SO₂), les scénarios des profils prévoient une diminution régulière des émissions consécutives aux politiques de lutte contre la pollution atmosphérique et d'atténuation des émissions de GES. Il convient de souligner que ces scénarios ne tiennent pas compte des variations possibles de forçages naturels (par exemple, du fait d'éruptions volcaniques)

Les profils d'évolution d'émissions de gaz à effet de serre ont été sélectionnés par les scientifiques sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature. Les profils sont cohérents avec les scénarios très divers présentés dans les publications sur les mesures d'atténuation qui ont été examinées par le Groupe de travail III du GIEC (voir figure suivante). Le RCP8.5, le plus pessimiste, n'est dépassé que par environ 10% des hypothèses envisagées, tandis que le plus favorable, le scénario RCP2.6, ne dépasse que près de 10% d'entre elles.

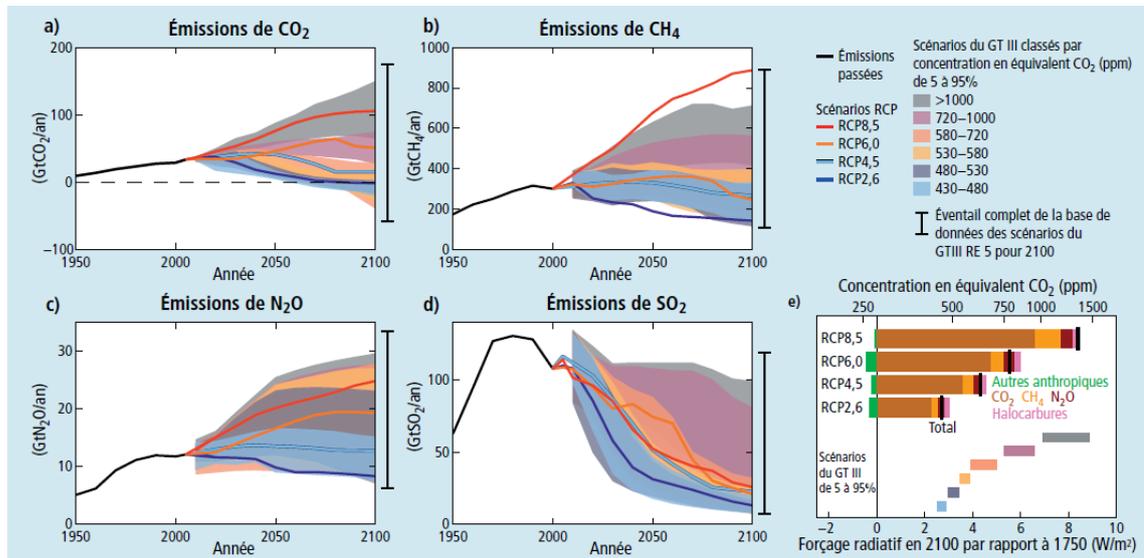


Figure 3 : Projections d'émissions des scénarios RCP (courbes) et d'un large éventail de scénarios d'émissions figurant dans les publications scientifiques (surfaces) (Source : (GIEC, 2015))

Globalement, en termes de forçage radiatif, les scénarios RCP restent assez proches des scénarios SRES utilisés précédemment, ainsi que l'illustre la Figure 2:

- Les profils RCP6.0 et RCP4.5 sont respectivement proches des scénarios A1B et B1.
- Le profil RCP8.5 est le plus pessimiste. Il est se situe légèrement au-dessus du scénario SRES A2.
- Le profil RCP2.6 n'a pas d'équivalent dans les anciens scénarios SRES. Sa réalisation implique l'intégration des effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C. Au vu de l'avancement de négociations climatiques à l'échelle mondiale ce scénario est jugé aujourd'hui peu réaliste – car trop optimiste -par de nombreux acteurs.

On remarquera également que :

- Pour 2030, premier horizon utilisé dans cette étude, les scénarios sont globalement peu différenciés (forçage radiatif compris entre 3.5 et 4 W/m²)
- Pour 2050, second horizon utilisé dans cette étude, les scénarios commencent à se disperser, cette dispersion étant beaucoup plus accentuée à la fin du 21^{ème} siècle (forçage compris entre 3.2 et 5 W/m²).

3.1.5 Les scénarios SSP, le reflet économique des scénarios RCP

Sources: (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GICC, 2011)

3.1.5.1 Représentation des évolutions sociales et économiques

En parallèle aux travaux des climatologues, les sociologues et les économistes s'emploient à évaluer les coûts d'adaptation et d'atténuation liés au changement climatique selon les évolutions possibles de nos sociétés, compatible avec les quatre scénarios de références (RCP) pour l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre.

La méthode générale a été définie par un article de A. Nigel (2011). Le principe repose sur une architecture en matrice, qui définit pour les cinq familles de scénarios d'évolution socio-économique (nommées SSP1 à SSP5) les efforts à consentir à l'échelle mondiale pour parvenir aux profils de concentrations correspondantes à chacun des RCP.

Cette approche novatrice a la particularité d'isoler la décision prise du point de vue du climat de toutes les autres décisions : politiques, sociales et économiques.

Les scénarios SSP seront utilisés pour évaluer des politiques sur le changement climatique. Pour cela, il est important que ces scénarios socio-économiques soient décrits précisément et couvrent une large gamme de futurs possibles pour nos sociétés, en se répartissant selon deux axes :

- Un axe représente le défi en matière d'adaptation des sociétés au changement climatique
- Un autre axe représente le défi en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Suite à un atelier organisé à Boulder (Colorado) en novembre 2011, les scientifiques ont défini cinq familles de scénarios-types.

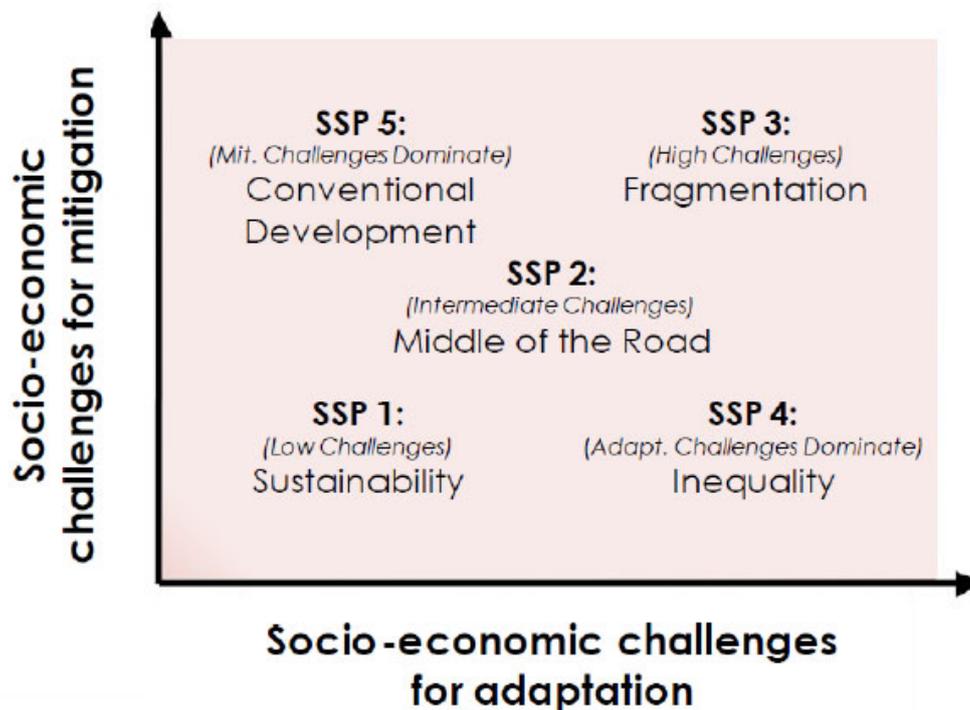


Figure 4 : Les cinq SSP types, répartition selon le défi socio-économique pour l'adaptation et pour l'atténuation (d'après A Nigell et al.)

- Le SSP1 (faible défi d'adaptation, faible défi d'atténuation), décrit un monde marqué par une forte coopération internationale, donnant la priorité au développement durable ;
- Le SSP2 (défi d'adaptation moyen, défi d'atténuation moyen), décrit un monde caractérisé par la poursuite des tendances actuelles
- Le SSP3 (défi d'adaptation élevé, défi d'atténuation élevé) dépeint un monde fragmenté affecté par la compétition entre pays, une croissance économique lente, des politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle et peu soucieuses de l'environnement.
- Le SSP4 (défi d'adaptation élevé, faible défi d'atténuation) est celui d'un monde marqué par de grandes inégalités entre pays et en leur sein. Une minorité y serait responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus faciles à mettre en place tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.
- Le SSP5 (faible défi d'adaptation, défi d'atténuation élevé) décrit un monde qui se concentre sur un développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement, fondé sur une forte consommation d'énergie et des technologies émettrices de carbone ; la hausse du niveau de vie permettrait d'augmenter la capacité d'adaptation, notamment grâce au recul de l'extrême pauvreté.

3.1.5.2 Cohérence entre évolutions climatiques et socio-économiques

En fonction des différents paramètres descriptifs des scénarios socio-économiques (démographie, urbanisation, croissance, ...) certaines familles de scénarios SSP sont compatibles avec une partie des profils d'émission (RCP). Par exemple (fig. 6), les familles SSP3 et SSP5 ne sont pas compatibles avec les profils d'émissions des RCP 2.6. Autrement dit, le monde décrit selon les paramètres définissant les familles SSP3 et SSP5 ne permet pas de limiter les émissions de gaz à effet de serre à un bas niveau.

La figure suivante montre en outre que le profil d'émission RCP4.5 peut être respecté pour l'ensemble des cinq familles SSP en fonction des valeurs plus ou moins modérées des paramètres descriptifs. Elle montre aussi que le monde décrit par la famille SSP1 est préservé des profils d'émission les plus élevés.

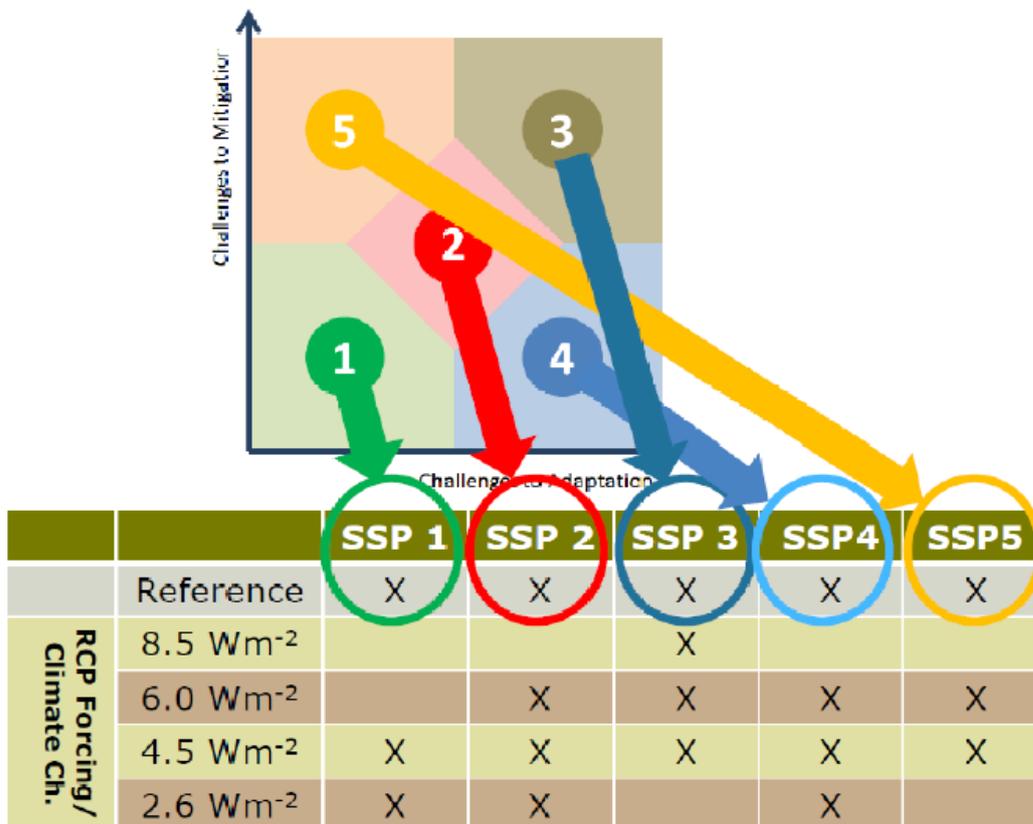


Figure 5 : Relations entre RCP et SSP, d'après T. KRAM

3.2 Analyse des modèles climatiques

3.2.1 Eléments introductifs

3.2.1.1 Définition des différents types de modèles climatiques

Sources : (DRIAS), (Boé J. , 2014)

Les différents types de modèles climatiques (par résolution décroissante) sont présentés ci-après :

- Modèles climatiques globaux = (Global Climate Models, GCM) :
 - ▷ Il s'agit de modèles climatiques à large échelle généralement conçus pour être utilisés à l'échelle du globe. Leur résolution horizontale est typiquement de 100 à 300 km ;
- Modèles climatiques régionaux= (Regional Climate Models, RCM) :
 - ▷ Il s'agit de modèles climatiques à résolution horizontale élevée (typiquement 10 – 50 km), obtenus par désagrégation² dynamique, statistique ou par une combinaison des deux méthodes, à partir de modèles climatiques globaux. Une correction de biais (s'apparentant à une méthode de désagrégation statistique) peut compléter cette approche. Ces modèles sont généralement appliqués à une région délimitée et les conditions à leurs limites sont déterminées à l'aide de modèle climatiques globaux ;
- Modèles d'impact :
 - ▷ Il peut s'agir de modèles environnementaux de différents types (hydro(géo)logiques, de rendement agricole...) qui ont pour objectif de restituer les effets du changement climatique sur différents types de systèmes.

² Ou encore descente d'échelle ou régionalisation

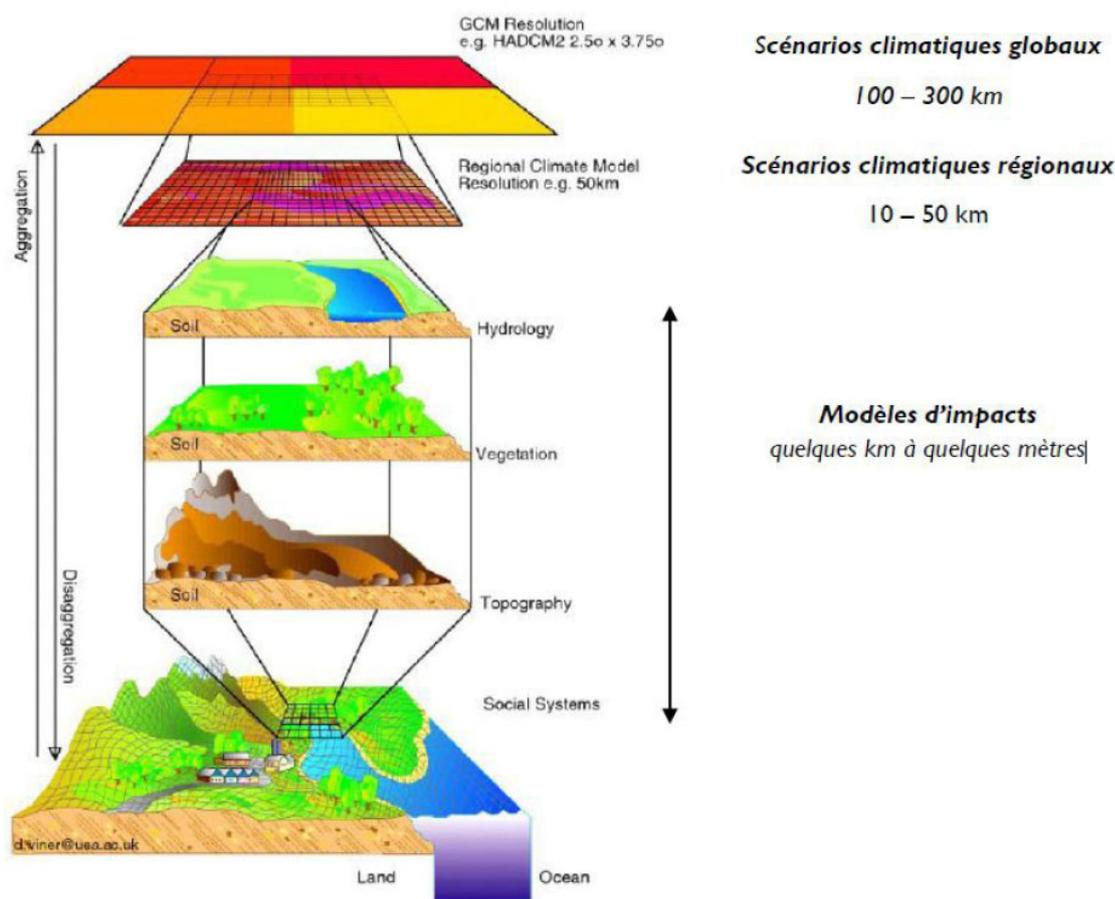


Figure 6 : Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton)

3.2.1.2 Evolutions récentes des modèles climatiques

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013)

Alors que seuls 23 modèles ont été exploités pour le 4e rapport d'évaluation, le GIEC s'appuie sur une cinquantaine de modèles pour le 5e (AR5).

Les modèles utilisés par les scientifiques pour les simulations associées aux RCP, ont été affinés. Ces modèles progressent continuellement en intégrant de manière toujours plus complète les mécanismes qui régissent le climat (connaissance et représentation des phénomènes) et en bénéficiant des progrès des techniques numériques (puissance de calcul, algorithmes, optimisation des calculs).

Par exemple, certaines simulations pour le futur Rapport d'évaluation (AR5) prennent mieux en compte les contributions de la banquise et de la végétation, ou l'impact de la chimie des aérosols. Néanmoins aucun de ces outils n'intègre actuellement les effets de l'augmentation des feux de forêts qui dégagent du CO₂ ou le dégel des pergélisols qui dégagent du méthane (CH₄), puissant gaz à effet de serre. Au fur et à mesure que de nouveaux processus ou traitements sont ajoutés au modèles, ces derniers sont évalués et comparés aux observations disponibles.

La résolution spatiale des modèles a, elle aussi, été significativement améliorée. Certains modèles présentent un nombre de niveaux verticaux plus important, mais la plupart progressent surtout en résolution horizontale. Cette évolution est essentielle pour la régionalisation des projections, les modèles globaux ont classiquement une résolution de 100 à 300 km ne permettant pas d'obtenir des projections détaillées pour anticiper localement des impacts.

3.2.1.3 Modèles climatiques existants et mise à disposition de leurs résultats

Sources: (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GICC, 2011)

Pour le rapport GIEC AR5, les simulations climatiques globales sont réalisées dans le cadre d'un projet CMIP5 coordonné au niveau international (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5). Grâce à ce projet, les résultats des simulations du climat passé et futur sont rendus directement accessibles dans une base de données distribuée au niveau international :

<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip5-ipsl/>

Parmi les modèles disponibles, deux sont développés et utilisés par la communauté scientifique française :

- CNRM-CM5 (Météo-France et CERFACS) ;
- IPSL-CM5 (Institut Pierre Simon Laplace).

Aujourd'hui, la sixième phase du projet est en cours (CMIP6) et des résultats de nouvelles modélisations sont déjà disponibles :

<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/>

Comme mentionné au paragraphe 3.1.3.3, ces nouvelles modélisations sont basées sur de nouveaux scénarios qui n'ont encore fait l'objet d'aucune publication par le GIEC.

Un programme complémentaire, nommé Cordex (Coordinated Regional Downscaling Experiment), définit le cadre général pour la régionalisation des simulations climatiques et l'inter-comparaison des résultats à petite échelle sur des domaines limités. Il s'appuie sur les modélisations du CMIP5.

En France, une volonté similaire a conduit les climatologues à développer le portail internet « DRIAS, les futurs du climat ». Ce dernier permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur la France à partir de modélisations issues notamment de CMIP5 et CORDEX, et de commander des données ciblées.

3.2.2 Problématique de la descente d'échelle et de la correction de biais

Sources : (DGEC, 2014)

La descente d'échelle (que l'on nomme également régionalisation ou désagrégation spatiale) est un processus permettant, à partir de simulations climatiques de grande échelle (de l'ordre de 300 à 50 km), de descendre à des échelles fines de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et/ou (cas de la correction de biais) de corriger les résultats des simulations à partir d'observations.

Le présent paragraphe a pour objectif de présenter les principes généraux des méthodes de descente d'échelle. De plus amples détails sur ces dernières sont donnés par (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011).

3.2.2.1 Importance de la descente d'échelle

Sources : (Boé J. , 2014)

Les modèles climatiques globaux recensés dans la base de données du CMIP fournissent d'importantes informations sur l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Cependant leur basse résolution ne permet pas de réaliser des analyses locales, d'où l'importance de la descente d'échelle.

Modèle climatique 250km

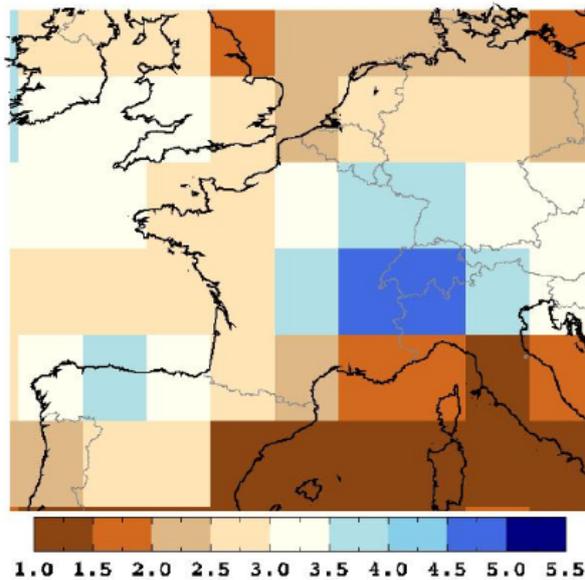


Figure 7 : Exemple de restitution d'un modèle climatique global de 250 km de résolution (source : (Boé J. , 2014))

3.2.2.2 Approche dynamique

Sources : (DGEC, 2014), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011), (Boé J. , 2014)

L'approche dynamique consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise pour cela des modèles climatiques régionaux, qui sont de même nature que les modèles atmosphériques ou océaniques utilisés pour les simulations du GIEC, mais ils ont l'avantage de décrire des phénomènes de plus petites dimensions grâce à leur résolution spatiale plus fine sur la région d'intérêt.

Cette solution souffre cependant d'un problème pratique important : plus la résolution est fine, plus le temps de calcul et les moyens numériques à mettre en place sont importants. Afin de réduire ces coûts numériques, une solution couramment adoptée est d'augmenter la résolution spatiale sur le domaine d'intérêt uniquement. On utilise pour cela des modèles de climat régionaux (RCM). Ce système impose l'utilisation d'un modèle global qui fournit les conditions aux limites.

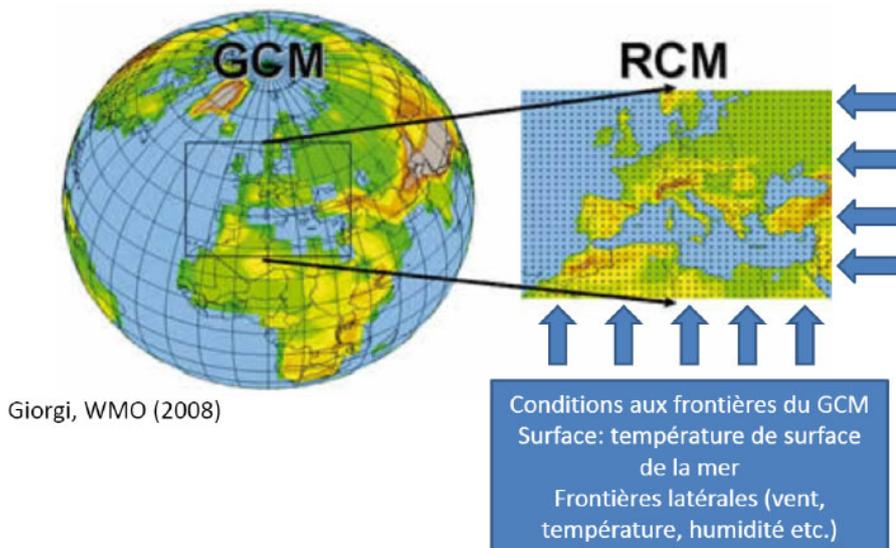


Figure 8 : Schématisation d'un modèle de climat régional (source : (Boé J. , 2014))

Cette méthode est nommée « méthode dynamique », la solution apportée se basant sur la résolution des équations de la dynamique atmosphérique du modèle régional.

Bien que les modèles de climats régionaux permettent une meilleure représentation des caractéristiques régionales, ils ne sont pas parfaits et souffrent également de certains biais. Ainsi, avant d'utiliser les simulations des modèles de climat régionaux pour les études d'impact, ils doivent subir également une correction de biais qui fait alors partie des désagréments statistiques que nous allons évoquer ci-dessous.

3.2.2.3 Approche statistique

Sources : (DGEC, 2014), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011), (DRIAS)

L'approche statistique repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elle se base 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, le type de surface, la couverture de végétation...

En mettant en relation les variables de grande échelle issues de simulations et les variables locales de surface, l'approche statistique permet de réaliser deux améliorations :

- La descente d'échelle : En effet, la résolution des données issues de l'approche statistique est identique à celles des observations sur lesquelles elle se base. Ainsi, dès lors que la résolution de ces observations est plus fine que celle des simulations à grande échelle, une descente d'échelle a lieu ;
- La correction de biais : Si l'on compare sur une période donnée, sur un espace donné, pour un paramètre donné, la moyenne de simulations climatiques à celle d'observations, on constate de manière générale un assez bon accord. Cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certains extrêmes sont assez mal reproduits. Il est donc nécessaire dans certaines applications de corriger à posteriori les variables du modèle pour rendre la distribution statistique des données quotidiennes identique à la distribution observée en chaque point. Il s'agit de la correction de biais réalisée par une approche statistique de descente d'échelle.

Les méthodes statistiques se déroulent en deux phases : une phase d'analyse ou d'apprentissage durant laquelle on va estimer les erreurs du modèle de climat et mettre en place une méthode visant à les corriger, et une phase d'application.

Ainsi, la phase d'apprentissage fait appel à la période de recouvrement entre les simulations climatiques et les observations. On parle alors de « temps présent modèle », afin de préciser qu'il s'agit d'une réalisation d'un modèle de climat sur le temps présent, c'est-à-dire sur le climat présent. La phase d'application peut comporter une période présente et une projection dans le futur.

Trois méthodes principales sont fréquemment rappelées dans la littérature :

- Une méthode relativement simple, appelée méthode des anomalies qui consiste à prendre en compte les variations moyennes simulées par le modèle de climat ;
- Une méthode plus affinée, prenant en compte les variations de la moyenne mais également de la distribution des variables simulées. Cette méthode est appelée quantile-quantile ;
- Une méthode prenant en compte les caractéristiques de grande échelle qui sont bien reproduites par les modèles de climat. Cette méthode est appelée méthode des régimes de temps (ou DSClim).

Le tableau suivant présente les avantages et inconvénients des trois méthodes statistiques présentées. Ce qu'il faut retenir, c'est que les méthodes des régimes de temps et des quantiles-quantiles permettent d'appréhender l'évolution des phénomènes extrêmes dans le futur alors que la méthode des anomalies n'est pas adaptée pour cela.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) d'après Terray et al 2010)

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Anomalies ou AN	Simple et mise en œuvre facile et rapide	Hypothèses très fortes et très peu réalistes sur les modifications de variabilité : la variabilité journalière et interannuelle est considérée invariante entre le futur et le passé.
Régime de temps ou RT	Applicable facilement à un grand nombre de projections climatiques Utilisable pour la quantification des incertitudes	Les liens grande échelle – échelle locale sont considérés invariants entre le futur et le passé. Non prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive passée (sauf pour la température).
Dynamique quantile-quantile ou QQ	La plus complète pour la prise en compte des rétroactions et les modifications des extrêmes	Très coûteuse en temps calcul. Les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariante entre le futur et le passé.

Il apparaît que la méthode quantile-quantile constitue la meilleure des trois approches présentées, si l'on omet la problématique des temps de calcul (qui pose de moins en moins problème avec l'amélioration continue des capacités computationnelles).

Son inconvénient principal est qu'elle fait l'hypothèse de la stationnarité (entre le présent et le futur) de la relation entre les fonctions de distribution des variables du climat simulées et observées. Pour remédier à cela, des améliorations de la méthode quantile-quantile ont été développées, avec notamment la méthode Adamont et la méthode CDF-t. Leurs particularités principales sont les suivantes :

- Adamont : Cette méthode applique la correction quantile-quantile de manière personnalisée sur 4 types de temps pour chaque saison de l'année. Ainsi, l'hypothèse de stationnarité ne s'applique plus pour l'ensemble de l'année, mais pour chaque type de temps de chaque saison. On considère alors que le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps ;
- CDF-t : cette méthode permet de prendre en compte l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique, par la prise en compte des modifications de la fonction de distribution, côté simulations, entre le climat présent et le climat futur.

Un tableau complet des méthodes statistiques recensées sur le site DRIAS est présenté ci-dessous :

Tableau 3 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : DRIAS))

Méthodes	Avantages	Inconvénients
DSClim (CERFACS)	<ul style="list-style-type: none"> - Préserve la cohérence spatiale et inter-paramètres. - Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. - Élimine les biais efficacement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problèmes de transférabilité de la méthode du passé au climat futur. - La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. - Ne tient pas compte des rétro-actions entre le sol (humidité et couverture de neige) et les variables.
Quantile-Quantile (M. Déqué)	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte des rétroactions et des modifications des extrêmes. - Permet d'éliminer les biais dans les deux premiers moments statistiques. Il peut saisir l'évolution et la variabilité de la moyenne du modèle tout en faisant correspondre tous les moments statistiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les erreurs du modèle et les paramétrisations physiques sont considérées invariantes entre le futur et le passé. - Aucun ajustement n'est apporté à la structure temporelle des précipitations quotidiennes. - Impossible de capturer les durées des périodes de sécheresse et d'humidité modélisées. - Il n'est pas en mesure de générer une variabilité interannuelle des précipitations.
CDF-t (IPSL)	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique. - Ajustement de la fréquence des précipitations. - Capable de simuler la durée des périodes d'humidité et de sécheresse. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dépendance inter-variables du modèle climatique n'est pas corrigée mais est préservée. - Les données sont désaisonnalisées et la tendance retirée. - N'est pas développée spécifiquement pour les événements extrêmes.
ADAMONT (Météo-France)	<ul style="list-style-type: none"> - Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. - L'hypothèse de stationnarité a de meilleures chances d'être vérifiée au sein d'un même types de temps de la même saison. Le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps. 	<ul style="list-style-type: none"> - La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. - La consistance entre les variables n'est plus assurée au terme de la chaîne de traitement.

3.2.2.4 Recommandations sur l'utilisation des méthodes de descente d'échelle

(Boé J. , 2014) indique que les approches dynamique et statistiques sont complémentaires et qu'il y a un intérêt à utiliser les deux (en général, désagrégation dynamique d'abord, puis statistique ensuite avec correction de biais).

Il rappelle également que la désagrégation n'est qu'une étape dans la modélisation du climat futur. En raison de la large gamme de résultats obtenus par les modèles climatiques globaux, il est considéré plus judicieux de chercher à appréhender les incertitudes en appliquant une unique méthode de descente d'échelle sur plusieurs modèles climatiques globaux plutôt que d'appliquer plusieurs méthodes de descente d'échelle sur un seul modèle.

3.2.3 CMIP – Modélisation climatique globale

Sources : (WCRP), (Hausfather, 2019)

Le CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) est un projet continu démarré en 1995 mené par le WGCM (Working Group on Coupled Modelling) qui est lui-même une entité du WCRP (World Climate Research Program).

L'objectif principal de ce projet est de permettre aux scientifiques de partager et comparer leurs modèles climatiques. Pour ce faire, des standards et des protocoles d'expérimentation sont définis par le projet, avec par exemple les scénarios climatiques RCP. Le respect par les modélisateurs de ces lignes directrices permet d'analyser collectivement les résultats de modélisation, ce qui permet d'obtenir de meilleures projections du climat. Pour concrétiser cela, le projet inclut la création d'une base de données intégrée, dans laquelle les résultats de toutes les modélisations incluses au projet sont stockées selon un standard commun, ce qui améliore leur accessibilité et la possibilité de les comparer.

La 5^{ème} phase du projet, CMIP5, a été utilisée par le GIEC pour la rédaction de son 5^{ème} état de connaissance.

Actuellement, la 6^{ème} phase du projet, CMIP6, est en préparation. Elle inclura les améliorations suivantes :

- Modèles exécutés avec une résolution plus fine ;
- Les modèles incluent des processus additionnels non inclus aux simulations précédentes ;
- De nouveaux outils d'analyse facilitent le traitement des données ;
- Infrastructure et documentation améliorées ;
- De nouveaux scénarios climatiques sont inclus pour compléter les RPC existants.

Le CMIP6 constitue un projet beaucoup plus ambitieux que le CMIP5, ce qui a provoqué des retards. Actuellement, le CMIP6 est affecté par un retard d'au moins un an. Alors que l'AR6 du GIEC est en cours de rédaction, seul un ensemble limité de modèles sont disponibles, et il paraît improbable que les simulations du CMIP6 seront exécutées à temps pour la version finale de l'AR6.

3.2.4 CORDEX – Modélisation climatique régionalisée

Sources : (EURO-CORDEX), (DRIAS)

L'initiative internationale CORDEX est un programme soutenu par le WCRP pour organiser une structure intégrée internationale ayant pour but de produire des projections régionales de changement climatique améliorées pour toutes les régions du monde. Les résultats de CORDEX ont notamment servi d'intrant aux études d'impact et d'adaptation au changement climatique réalisées dans le contexte du 5^{ème} rapport d'évaluation (AR5) du GIEC.

EURO-CORDEX est la branche européenne du programme CORDEX. Dans le cadre du projet européen EUROCORDEX, des projections climatiques ont été réalisées sur toute l'Europe jusqu'à une résolution de 12 km. Ces modèles régionaux sont forcés par différents modèles de

circulation générale du projet CMIP5 utilisés pour l'exercice du GIEC (2013). L'ensemble des projections peuvent être acquises sur le site du projet EURO-CORDEX à l'adresse suivante : <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>

3.2.5 DRIAS – Modélisation climatique régionalisée pour la France

Sources : (DRIAS), (DRIAS), (DRIAS)

3.2.5.1 Eléments introductifs

Le projet Drias a permis de donner un accès privilégié aux simulations climatiques régionalisées disponible à l'échelle du territoire français. Sur le portail internet de Drias, on retrouve les résultats des simulations suivantes :

- CNRM2014, produite par le CNRM en collaboration avec le Cerfacs ;
- IPSL2014, produite par l'IPSL ;
- EURO-CORDEX-2014, qui constitue en réalité un ensemble de simulations obtenues à l'aide d'un travail de correction exécuté sur un échantillon des simulations réalisées dans le cadre du projet EURO-CORDEX (voir paragraphe 3.2.4).

Pour chacune des simulations, on dispose de données journalières sur une grille spatiale de 8km de côté, pour les périodes 1950-2005 (référence) et 2006-2100 (Projections).

Les paragraphes suivants donnent quelques détails complémentaires sur ces différentes simulations.

3.2.5.2 Simulations du CNRM et de l'IPSL

Sources : (DRIAS), (DRIAS)

Les simulations du CNRM ont été réalisées sur la période continue de 1950-2100 dont les conditions aux limites latérales sont issues d'une précédente descente d'échelle dynamique entre le modèle couplé CNRM-CM5 à 1.4° de résolution (CMIP5) et ARPEGE-climat, de résolution 0.5° sur le globe. Trois scénarios sont modélisés : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2006-2100. Les simulations ALADIN-Climat mises à disposition sur le portail ont été projetées sur une grille de 8km de côté, et corrigées de leurs biais par la méthode quantile-quantile à partir d'analyse de données d'observations SAFRAN. Ces simulations sont produites au pas de temps journalier.

Les simulations de l'IPSL ont été réalisées sur la période continue de 1971-2100 dont les conditions aux limites latérales sont issues d'une simulation intermédiaire WRF-Europe elle-même forcée par le modèle couplé IPSL-CM4, de résolution respective 45km et ~300km. Deux scénarios sont modélisés : RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2006-2100. Les simulations WRF-France mises à disposition sur le portail ont été projetées sur une grille de 8km de côté, et corrigées de leurs biais par la méthode quantile-quantile à partir d'analyse de données d'observations SAFRAN. Ces simulations sont produites au pas de temps journalier.

Les simulations climatiques produites par les laboratoires français ont impliqué l'utilisation séquentielle de deux types de méthodes de descente d'échelle :

- La méthode dynamique, concrétisée par la construction de modèles climatiques régionalisés au maillage fin (12*12km) à l'échelle de la France, couplés aux modèles climatiques plus grossiers produits par les mêmes laboratoires, mais à l'échelle mondiale avec une résolution de 100*100 km ;

- La méthode statistique quantile/quantile, qui consiste à reprojeter les résultats des modèles régionalisés (12*12km) sur la grille SAFRAN³ (8*8 km) et à appliquer les corrections qui caractérisent cette méthode sur les résultats obtenus, en s'appuyant sur les observations SAFRAN. Les modalités d'applications de cette méthode dans le cadre des simulations françaises sont données en annexe 1.

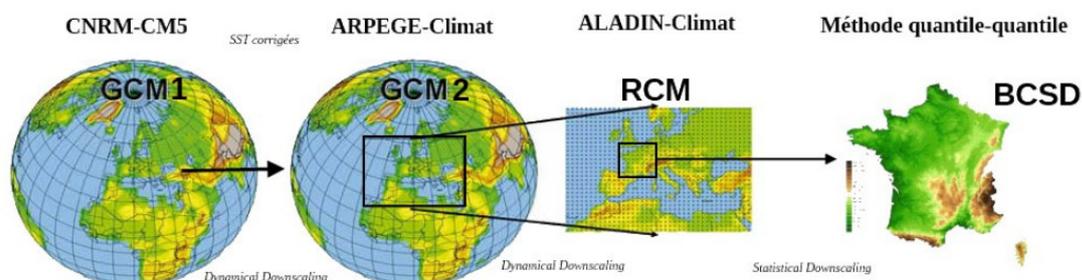


Figure 9 : Simulations CNRM - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.

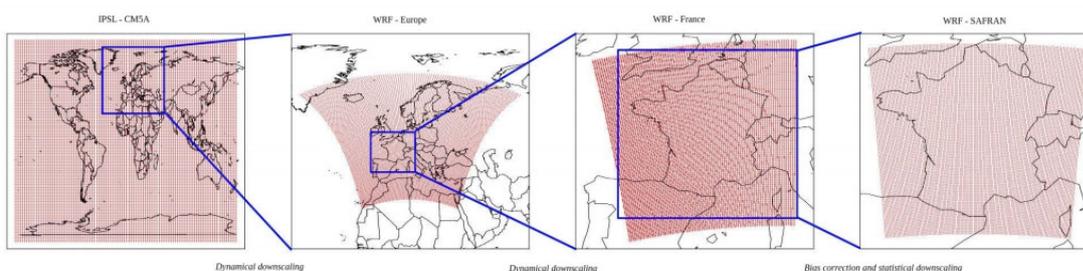


Figure 10 : Simulations IPSL - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.

3.2.5.3 Simulations du projet EuroCordex

Sources : (EURO-CORDEX), (DRIAS)

Dans le cadre du projet européen EUROCORDEX, des projections climatiques ont été réalisées sur toute l'Europe jusqu'à une résolution de 12 km. Ces modèles régionaux sont forcés par différents modèles de circulation générale du projet CMIP5 utilisés pour l'exercice du GIEC (2013).

Une sélection de projections EURO-CORDEX est également disponible à l'échelle de la France sur le portail DRIAS. Ces dernières ont été projetées sur une grille de 8km de résolution, et corrigées de leur biais par la méthode CDF-t à partir de l'analyse de données d'observations SAFRAN. Ces simulations sont disponibles au pas de temps journalier sur la période continue 1971-2100 (1971-2005 pour la partie historique et 2006-2100 pour la projection climatique) et ceci pour deux scénarios d'émission : RCP4.5 et RCP8.5.

³ SAFRAN est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire au pas de temps horaire les variables suivantes : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces variables sont analysées par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km)

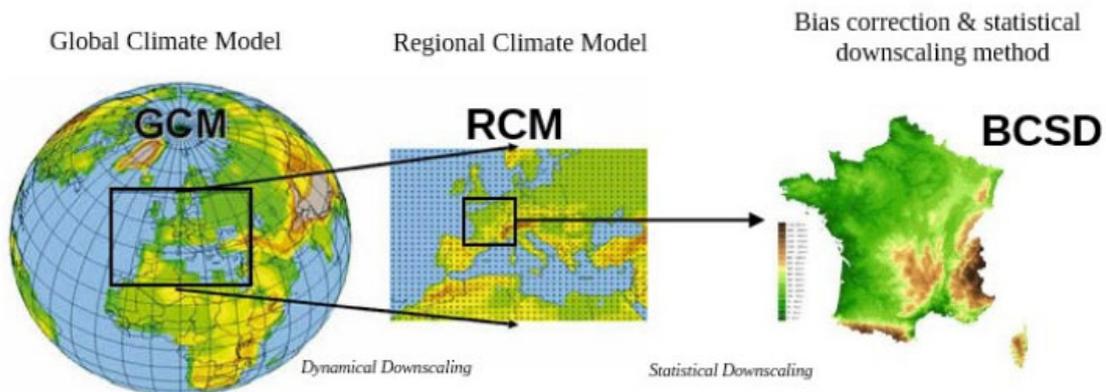


Figure 11 : Simulations EUROCORDEX - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.

3.2.6 Modèles de prévision à court-terme

Sources : (GICC, 2011)

Un axe de recherche prometteur en climatologie concerne l'obtention de prévisions décennales – et non plus de projections. Il s'agit ici de prévoir le climat pour les cinq à trente années à venir, à partir d'un état initial comme on le fait déjà à l'échelle de la saison. Outre le bénéfice évident qu'en tireraient les gestionnaires, cette possibilité intéresse de très près les climatologues : elle permettrait de réduire significativement les incertitudes qui entachent le résultat des modèles, en leur fournissant des conditions initiales plus précises pour les premières années de calcul. De telles prévisions sont désormais envisageables même si cela reste un sujet de recherche. Les premiers retours d'expérience, attendus pour 2014, donneront de bonnes indications quant à leur faisabilité.

3.3 Problématique des incertitudes

Sources : (Météo France), (DGEC, 2014), (Habets, 2013), (Météo France, 2011)

Définition de l'incertitude : Degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données, d'une ambiguïté dans la définition des concepts ou de la terminologie employés ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts).

Lorsqu'on cherche à modéliser le climat futur, on est confronté à trois grands types d'incertitudes :

- L'incertitude liée au scénario utilisé. En effet, chaque scénario formulé prévoit différentes évolutions des comportements humains et par conséquent différents changements climatiques ;
- L'incertitude structurelle de modélisation, liée aux simplifications et hypothèses intrinsèques aux modèles ;
- L'incertitude sur la variabilité interne du climat, liée à l'occurrence irrégulière et imprévisibles de phénomènes climatiques (tels qu'El Niño).

Dans les projections climatiques à court terme (prochaines décennies), c'est l'incertitude sur la variabilité interne du climat qui est prépondérante. Par la suite, les incertitudes de modélisation et de scénario climatique prennent le dessus.

La problématique des incertitudes autour des projections climatiques est d'autant plus importante pour la régionalisation que celles-ci vont croissant au fur et à mesure que l'on descend dans la chaîne de modélisation, compte tenu des limites de précision pouvant être apportées à une résolution plus élevée.

(Habets, 2013) a réalisé une étude sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau dans les bassins de la Somme et de la Seine. Cette étude s'appuie sur plusieurs combinaisons de plusieurs scénarios climatiques, modèles climatiques, méthodes de descente d'échelle et modèles hydrologiques et hydrogéologiques. Le fait de simuler les impacts en s'appuyant sur plusieurs combinaisons de ces différentes étapes permet de quantifier les incertitudes de chacune d'entre elles. Il est conclu dans cette étude que le facteur contribuant le plus à l'incertitude (à des horizons situés entre la moitié et la fin du siècle) est le modèle climatique utilisé (à raison d'une incertitude environ trois fois plus grande que pour les 3 autres étapes).

Au cours du projet CLIMSEC (voir paragraphe 3.5), une analyse des sources d'incertitudes a été réalisée. Cette dernière avait pour but de comparer l'incertitude provenant de différents éléments de la chaîne de modélisation, à savoir :

- Le choix du scénario climatique utilisé ;
- Le choix du modèle utilisé ;
- Le choix de la méthode de descente d'échelle utilisée.

Il apparaît, pour les variables modélisées par le projet CLIMSEC (SPI et SWI3), que le facteur le moins sensible est le choix de la méthode de descente d'échelle employée. Les incertitudes liées au choix du modèle et du scénario climatique sont, quant à elles, plus élevées et comparables entre elles, en ordre de grandeur.

3.4 Analyse des données climatiques existantes

3.4.1 Le portail CMIP

Sources : <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cmip5-ipsl/>

Les résultats des modélisations CMIP sont tous accessibles via un portail hébergé (entre autres) par l'IPSL. On y retrouve donc un répertoire de données très complet sur les résultats de ces modélisations globales. Ces dernières sont d'un intérêt limité pour la présente étude, étant donné leur faible résolution spatiale et l'important travail qui serait nécessaire pour les régionaliser, qui a déjà été réalisé par ailleurs (voir paragraphes suivants).

3.4.2 Le portail Euro-Cordex

Sources : <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>

Les résultats des modélisations EUROCORDEX sont tous accessibles via un portail hébergé (entre autres) par l'IPSL. On y retrouve donc un répertoire de données très complet sur les résultats de ces modélisations régionales. Ces dernières sont d'un intérêt limité pour la présente étude, étant donné leur nature biaisée et leur résolution spatiale inférieure à celle des données DRIAS.

3.4.3 Le portail Drias

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (DRIAS)

Remarque préalable importante : Une nouvelle version du portail incluant un nouvel ensemble de données sera mise à disposition en fin d'été (information transmise Samuel Somot du CNRM et Jean-Michel Soubeyroux de la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques de Météo France). Ils recommandent d'attendre la publication de ces éléments si le planning de l'étude le permet.

Ce service, réalisé avec l'appui du programme GICC et de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), est opérationnel depuis le 24 juillet 2012. « DRIAS, les futurs du climat » permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur la France, et de commander des données ciblées. Il est au fur et à mesure complété et mis à jour par les projections régionales issues des nouvelles simulations alimentant les travaux du GIEC ainsi que des simulations d'impacts comme, par exemple, la sécheresse des sols.

Concernant les simulations CNRM2014, IPSL2014 et Euro-Cordex 2014, la plateforme DRIAS contient les éléments suivants :

- Simulation jour par jour sur la période de référence⁴ : 1971-2005 (données IPSL2014 et Euro Cordex 2014) et 1950-2005 (données CNRM2014) ;
- Simulation jour par jour sur la période de projection : 2006-2100.

Plus précisément, on peut recenser les éléments suivants⁵ :

- Simulations CNRM2014 :
 - ▷ Les scénarios disponibles sont les suivants :
 - RCP2.6,
 - RCP4.5,
 - RCP8.5,
 - ▷ Les variables extraites sont les suivantes :
 - Température minimale journalière à 2 m (°C)
 - Température maximale journalière à 2 m (°C)
 - Précipitations liquides à grande échelle [mm],
 - Chutes de neige à grande échelle [mm] ;
 - Humidité spécifique à 2 m [g/kg] ;
 - Rayonnement visible incident à la surface [W/m²] ;
 - Rayonnement infra-rouge incident à la surface [W/m²] ;
 - Vitesse du vent à 10 m [m/s] ;
 - Maximum journalier des rafales de vent à 10 m [m/s] ;
 - ▷ Les pluies et températures journalières sont alors obtenues de la façon suivante :
 - Température journalière = (T_{min} + T_{max}) / 2
 - Précipitations journalière = Précipitations liquide + Neige
- Simulations IPSL2014 :
 - ▷ Les scénarios disponibles sont les suivants :
 - RCP4.5,
 - RCP8.5,
 - ▷ Les variables extraites sont les suivantes :
 - Température moyenne journalière à 2 m (°C) ;

⁴ Il est important de noter que les séries simulées sur la période de référence ne sont en aucun cas des observations. En revanche, les pluies et températures obtenues en sortie des différents modèles ont les mêmes caractéristiques statistiques que les observations réalisées sur la même période.

⁵ L'ensemble des modèles disponibles sur DRIAS sont présentés à l'annexe 2

- Température minimale journalière à 2 m (°C) ;
- Température maximale journalière à 2 m (°C) ;
- Précipitations totales [mm] ;
- Vent maximal sans rafales [m/s].

□ Simulations Euro-Cordex 2014 :

▷ Les scénarios disponibles sont les suivants⁶ :

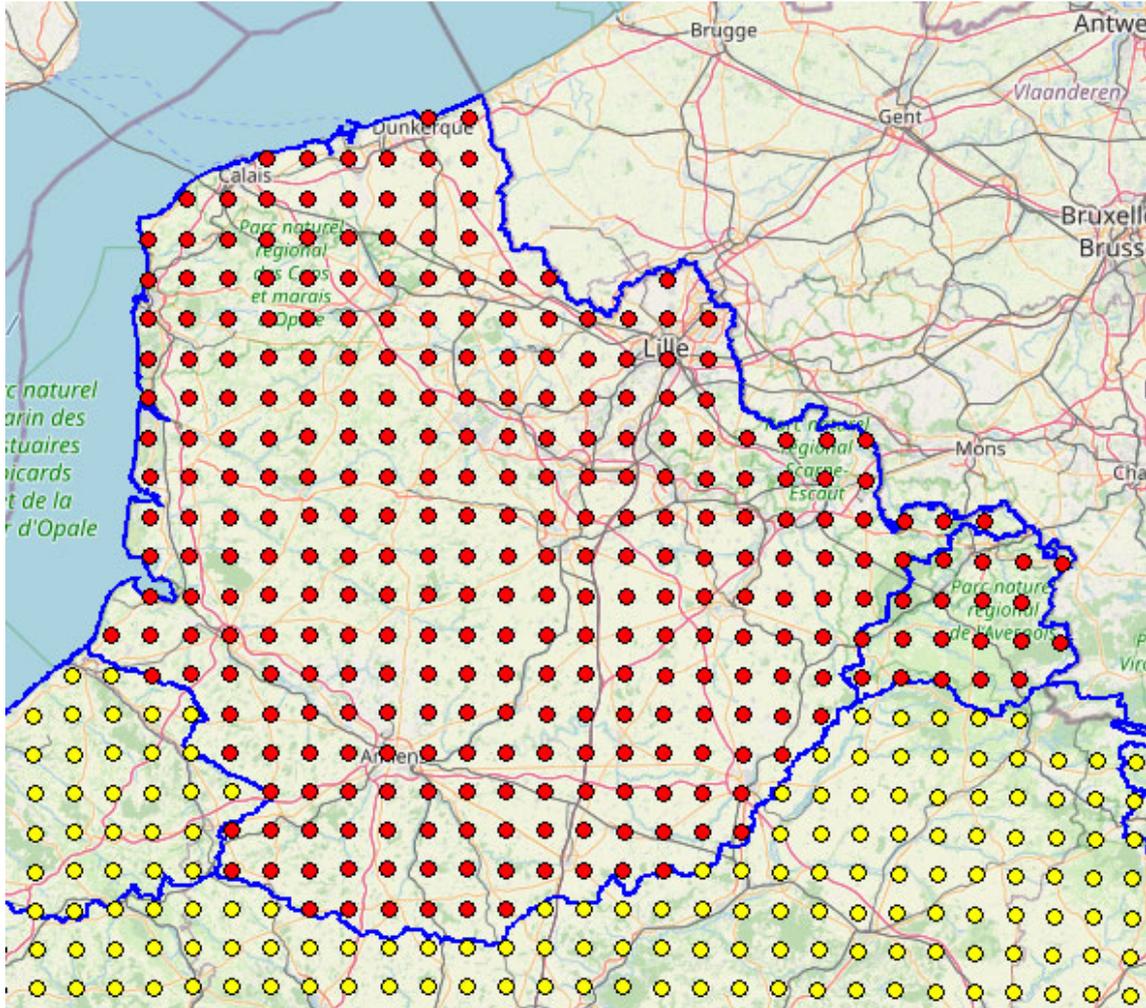
- RCP4.5,
- RCP8.5,

▷ Les variables disponibles sont les suivantes :

- Température moyenne journalière à 2 m (°C) ;
- Température minimale journalière à 2 m (°C) ;
- Température maximale journalière à 2 m (°C) ;
- Précipitations totales [mm] ;
- Vitesse du vent à 10 m (pour un seul modèle) [m/s]

Les extractions peuvent être réalisées au niveau des points de la grille SAFRAN, soit une maille de 8*8km, conduisant à la sélection de 313 points de grille. La grille d'extraction est présentée à la figure suivante (En jaune : les points de la grille SAFRAN, en rouge les points de la zone d'étude).

⁶ Pour 3 des 11 modèles présentés, seul un des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 est disponible



En chacun de ces points de grille, il sera possible d'extraire les variables d'intérêt des intervalles de temps choisis (par exemple 2020 – 2040 pour l'horizon 2030).

3.4.4 Le portail du service du changement climatique du programme Copernicus

Sources : (Copernicus, s.d.)

Le service du changement climatique du programme Copernicus fournit des informations sur le climat passé, présent et futur, ainsi que des outils pour permettre aux décideurs politiques et aux entreprises de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

Dans ce cadre, un portail nommé Climate Data Store a été créé. Parmi les jeux de données proposés figurent les suivants (les autres données présentes sur le portail et étant d'intérêt pour l'étude sont déjà proposées par les autres portails étudiés) :

- Essential climate variables for water sector applications derived from CMIP5 projections:
 - ▷ Cet ensemble de données contient 4 variables climatiques essentielles (ECV) pour les 18 modèles climatiques mondiaux (GCM) ajustés en biais du CMIP5: taux de précipitation quotidien et températures moyennes, maximales et minimales quotidiennes. Les données sont ajustées en fonction du biais à l'aide de la méthode Distribution Based Scaling (DBS) par rapport au jeu de données de référence mondial HydroGFD2.0, à la fois la méthode de réglage du biais et le jeu de données de

référence mondial développés par l'Institut météorologique et hydrologique suédois (SMHI) ;

- ▷ Résolution de 0.5° (~50 km) ;
- Water quantity indicators for Europe:
 - ▷ Cet ensemble de données contient des données modélisées sur le ruissellement et l'humidité de l'eau, le débit des rivières, l'équivalent en eau de neige, la teneur en eau du sol et d'autres quantités liées à l'eau pour la région européenne. Ces variables ont été calculées dans le cadre d'un contrat de validation de principe conçu pour accélérer le flux de travail dans les évaluations d'impact et pour simplifier l'adaptation au changement climatique des pratiques de gestion de l'eau à travers l'Europe. Ces quantités ont été modélisées à l'aide du modèle de l'Institut suédois de météorologie et d'hydrologie E-HYPE, du modèle VIC de l'Université de Wageningen et des modèles Lisflood du Joint Research Center. Ces modèles fonctionnent à différentes résolutions, ainsi les données sont fournies à différentes résolutions. E-HYPE et Lisflood ont été mis à l'échelle afin de montrer l'ensemble du modèle.
 - ▷ Différentes résolutions : 0,5°, 0,1° (~50 et 10 km) et résolution du bassin versant (215 km² en moyenne). La résolution du bassin versant sur la zone d'étude est illustrée à la figure suivante ;
 - ▷ La plupart des variables sont fournies sous forme de moyennes sur des périodes de 30 ans, soit pour chaque mois civil, soit pour toute la période. Cependant, pour certaines variables, le jour, le centile et les périodes de retour sont également fournis.

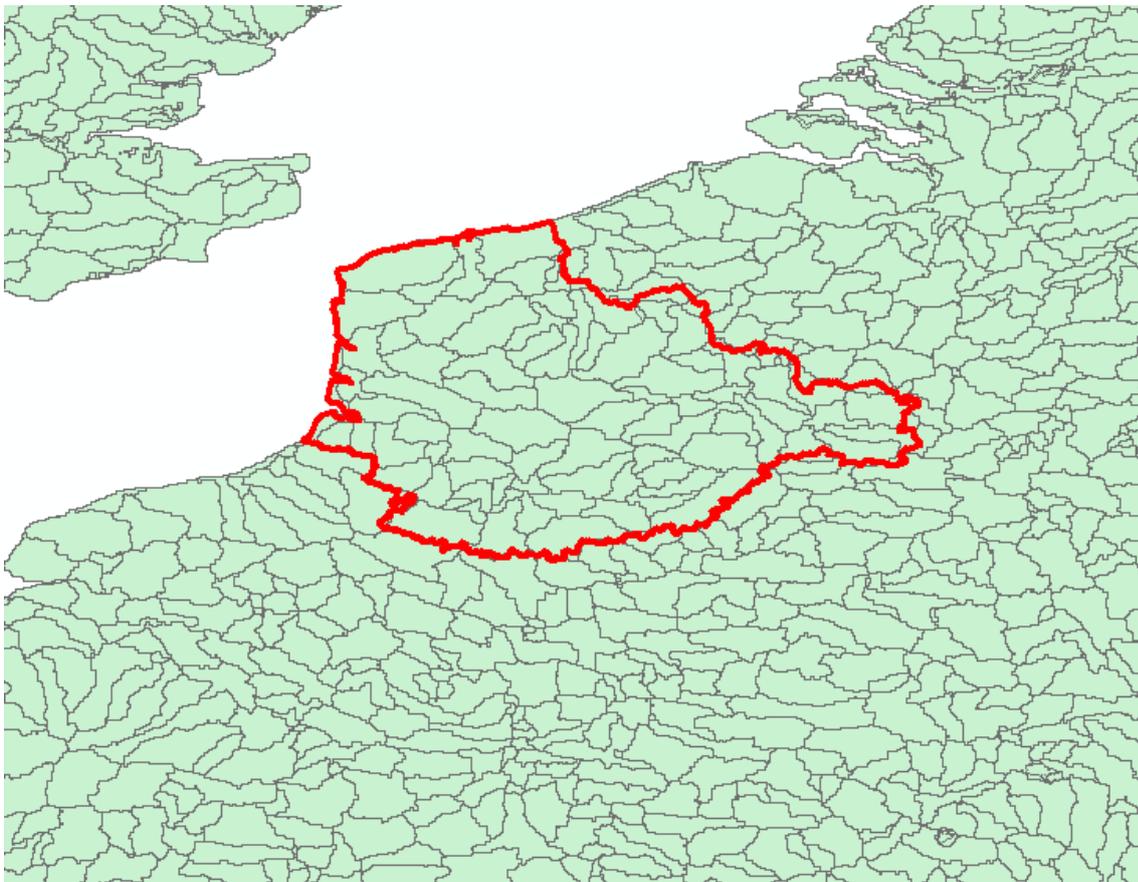


Figure 12 : polygones de sous-bassin (taille moyenne 215 km²) tels qu'utilisés dans la configuration du modèle européen HYPE EHYPE 3. Mise en évidence de la région Artois-Picardie (sources : (Agence de l'Eau Artois-Picardie, s.d.)et (Copernicus, s.d.))

Le premier de ces deux jeux de données présente une résolution insuffisante pour les besoins de l'étude. Le second, quant à lui, n'est basé que sur un ensemble restreint de modélisations qui n'ont pas été optimisées pour la France.

3.5 Impacts sur la ressource en eau

Le présent paragraphe a pour objectif de recenser les impacts estimés des différents scénarios climatiques sur la ressource en eau.

3.5.1 Température

Sources : (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2019), (Comité de Bassin Artois-Picardie, 2016), (Habets, 2013)

Même si elle ne constitue pas un indicateur direct de l'évolution de la ressource en eau, la température est un paramètre intéressant à analyser car elle est systématiquement calculée dans les modélisations climatiques. De plus, elle a une influence directe sur l'évaporation.

Sur le bassin Artois-Picardie, l'augmentation de la température de l'air devrait être d'environ **+2°C** (par rapport à la période de référence 1961-1990) à l'horizon 2070, selon l'étude Explore 2070, rédigée en 2012. Le scénario climatique considéré pour parvenir à cette conclusion est le scénario d'émission de gaz à effet de serre SRES A1B.

Le scénario tendanciel d'AScA à l'horizon 2030 (écrit en 2013) prévoyait une hausse des températures moyennes annuelles de l'air de l'ordre de **0,8 à 1,4°C**, ce qui paraît relativement élevé à la vue de l'augmentation totale envisagée à l'horizon 2070 (de +2°C). (Les scénarios climatiques considérés pour parvenir à cette conclusion ne sont pas détaillés dans les documents disponibles).

Selon l'étude (Habets, 2013), réalisée sur les scénarios climatiques A1B et A2, on observera, sur les bassins versants de la Somme et de la Seine :

- Une augmentation de la température de **1.7 à 2.7 °C** en 2050 par rapport à la période de référence 1971-2000 ;
- Une augmentation de la température de **2.2 à 4.2 °C** en 2080 par rapport à la période de référence 1971-2000 ;
- Selon l'étude (DGEC, 2014)⁷, basée sur les scénarios RCP et la période de référence 1976 - 2005 :
 - ▷ L'évolution de la température moyenne annuelle est à la hausse pour les deux horizons considérés (environ **+0.8 à +0.9°C** en 2030 et **+1.1 à +1.5°C** en 2050 en Picardie). Pour ces horizons, le choix du scénario climatique considéré ne semble pas être plus déterminant que le choix du modèle utilisé (parmi l'ensemble des modèles inclus dans le programme EURO-Cordex). L'écart entre le scénario RCP4.5 et RCP8.5 est d'environ 0.1°C en 2030 et 0.4°C en 2050 ;
 - ▷ L'accroissement des températures estivales est susceptible d'être légèrement plus élevé que celui des températures hivernales ;
 - ▷ L'accroissement des températures en Picardie sera probablement légèrement plus fort que celui ayant lieu en Nord-Pas de Calais.

⁷ L'ensemble des résultats de l'étude peut être visualisé par région sur les portails suivants :

- <http://www.drias-climat.fr/decouverte>
- <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

A titre d'exemple, le graphique d'évolution des températures annuelles en Picardie est présenté à la figure suivante :

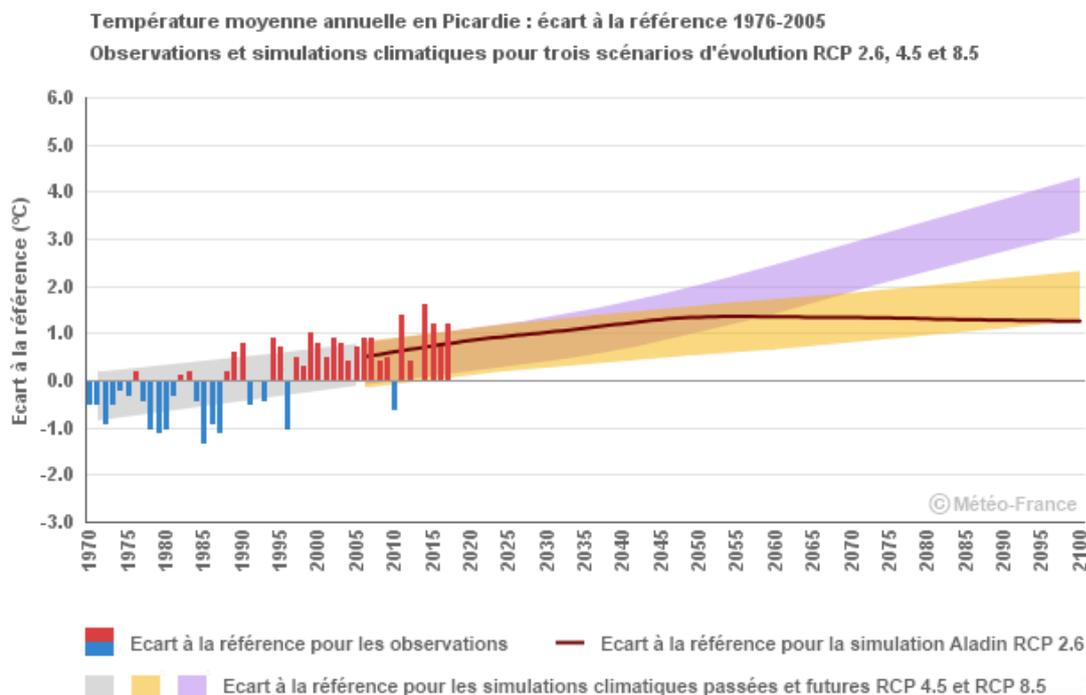


Figure 13 : Evolution des températures annuelles en Picardie

3.5.2 Précipitations

Même si elles ne constituent pas un indicateur direct de l'évolution de la ressource en eau, les précipitations sont intéressantes à analyser car elles sont systématiquement calculées dans les modélisations climatiques. De plus, elles ont une influence directe sur le débit des cours d'eau et la recharge des nappes.

3.5.2.1 A l'échelle mondiale

Sources : (GIEC, 2013)

Dans un premier temps, l'évolution des précipitations à l'échelle mondiale mérite d'être mentionnée. En effet, si l'augmentation de la température moyenne annuelle est généralisée à l'ensemble du globe, il n'en va pas de même pour les précipitations.

- A court terme, l'évolution des précipitations pourrait être dominée par l'association d'une variabilité interne naturelle, d'un forçage volcanique et des effets des aérosols anthropiques.
- A long terme, Il est quasiment certain que les précipitations mondiales vont augmenter avec l'élévation de la température moyenne à la surface du globe. Certaines régions connaîtront une augmentation, d'autres une diminution et d'autres encore aucun changement important. La configuration générale de cette évolution indique qu'il est très probable que les latitudes élevées subissent davantage de précipitations en raison de l'augmentation de l'humidité spécifique d'une troposphère plus chaude et de l'augmentation du transport de vapeur d'eau en provenance des tropiques d'ici la fin du XXI^e siècle, selon le scénario RCP8,5. Il est probable que de nombreuses zones arides et semi-arides des latitudes moyennes et subtropicales vont recevoir moins de précipitations et que de nombreuses régions humides des latitudes moyennes vont avoir davantage de précipitations d'ici la fin du XXI^e siècle selon le scénario RCP8,5.

3.5.2.2 A l'échelle locale

Sources : (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2019), (Comité de Bassin Artois-Picardie, 2016), (Habets, 2013), (Météo France, 2011), (Dayon, 2015), (DGEC, 2014)

Le projet Climsec, porté par le CNRM et présenté en 2011, a permis la réalisation d'une étude de l'évolution passée et future des réserves d'eau des couches superficielles des sols en tenant compte des facteurs d'évolution climatique.

Les scénarios climatiques employés proviennent de l'AR4 du GIEC ; il s'agit donc des scénarios SRES.

Les résultats de la modélisation consistent notamment sur le Standardized Precipitation Index (SPI) : indice permettant de mesurer la sécheresse météorologique. Il s'agit d'un indice de probabilité qui repose seulement sur les précipitations. Les probabilités sont standardisées de sorte qu'un SPI de 0 indique une quantité de précipitation médiane (par rapport à une climatologie moyenne de référence, calculée sur 30 ans). L'indice est négatif pour les sécheresses, et positif pour les conditions humides (Mc Kee et al., 1993).

À partir du modèle ARPEGE V4.6 scénario A2, la figure suivante présente une cartographie moyenne sur 30 ans de l'indice SPI3 pour les mois de février, mai, août et novembre au cours du XXIe siècle, représentant respectivement les sécheresses hivernales, printanières, estivales et automnales (car intégrées sur les 3 mois concernant la saison)

Pour les sécheresses météorologiques, en Artois-Picardie, on note :

- Aucune évolution sensible, quelle que soit la saison jusqu'en 2050 (si ce n'est une légère augmentation des sécheresses estivales en 2050) ;
- En fin de siècle, les sécheresses estivales et automnales s'aggravent ;
- Pas d'évolution des sécheresses printanières et hivernales.

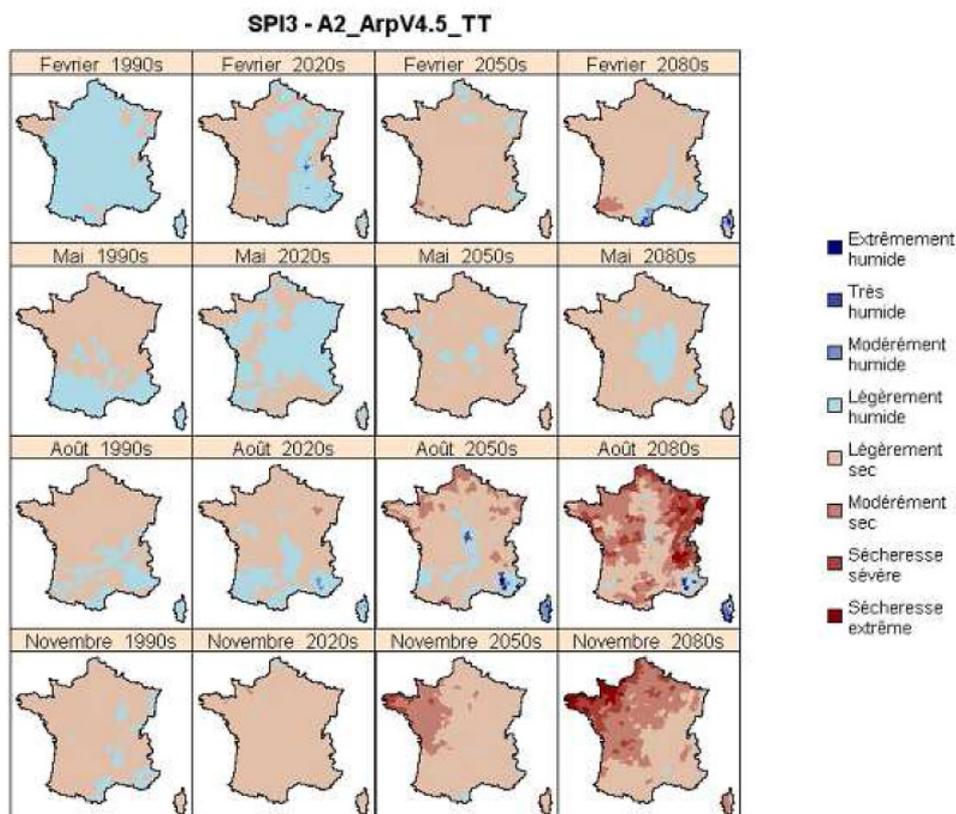


Figure 14 : Evolution temporelle des sécheresses SPI3 au cours du XXIe siècle selon les saisons (février=hiver, mai=printemps, août=été, novembre=automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps

Selon l'étude Explore 2070 rédigée en 2012, l'évolution des précipitations à l'échelle du territoire français est incertaine. Une tendance annuelle n'a pas pu être réellement observée, mais une **diminution d'environ 20%** l'été est envisagée (par rapport à la période de référence 1961-1990). Au niveau du bassin Artois-Picardie, les pluies devraient **diminuer de 5 à 10%** (moyenne annuelle) et leur régime devrait changer avec plus de pluies en hiver et probablement plus d'événements extrêmes.

Le scénario tendanciel d'AScA à l'horizon 2030 (écrit en 2013) prévoit aussi une variation des précipitations moyennes annuelles de **-10 à 5%** ; cette diminution de 10% des précipitations à l'horizon 2030 semble surestimée. Elle est en effet du même ordre de grandeur qu'à l'horizon 2070.

Selon l'étude (Habets, 2013), réalisée sur les scénarios climatiques A1B et A2, on observera, sur les bassins versants de la Somme et de la Seine :

- Evolution des précipitations entre **+0.4% et -14%** en 2050 par rapport à la période de référence 1971-2000 ;
- Evolution des précipitations entre **+4% et -24%** en 2080 par rapport à la période de référence 1971-2000 ;
- Selon l'étude (DGEC, 2014)⁸, basée sur les scénarios RCP et la période de référence 1976 - 2005 : :
 - ▷ Un très faible accroissement des précipitations annuelles est attendu, aux horizons considérés. L'ampleur de cet accroissement dépend beaucoup plus des modèles climatiques utilisés que du scénario considéré ;
 - ▷ Le volume précipité aura plutôt tendance à s'amplifier en hiver, et à s'amoindrir en été, mais ces tendances restent faibles ;
 - ▷ L'augmentation des précipitations annuelles devrait être légèrement plus marquée en Nord Pas de Calais qu'en Picardie ;

⁸ L'ensemble des résultats de l'étude peut être visualisé par région sur les portails suivants :

- <http://www.drias-climat.fr/decouverte>
- <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

A titre d'exemple, le graphique d'évolution des précipitations annuelles en Picardie est présenté à la figure suivante :

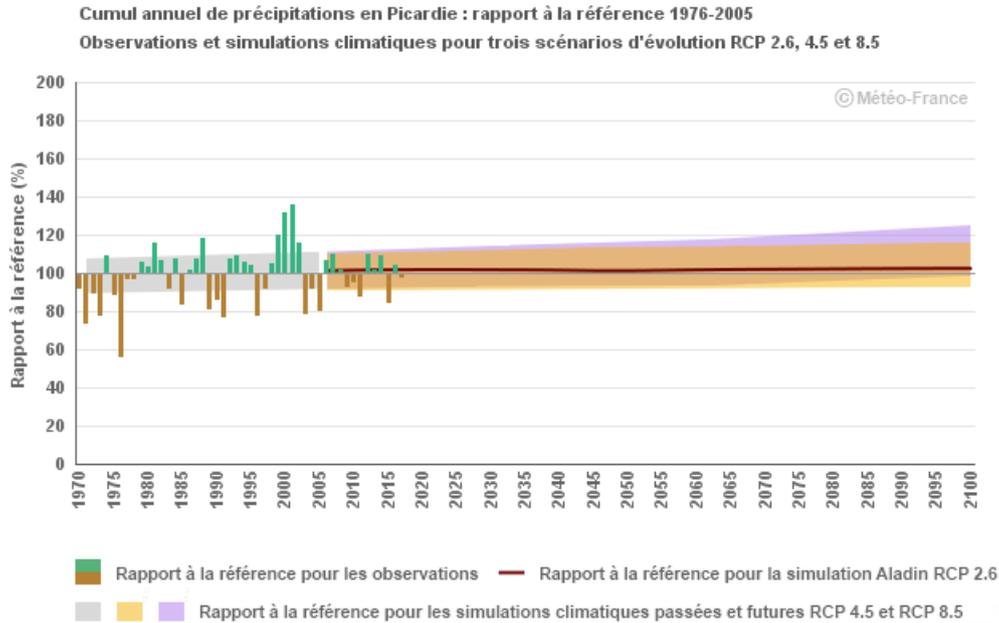


Figure 15 : Evolution des précipitations annuelles en Picardie

L'étude (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) indique que selon les anciennes projections climatiques (antérieures à celles des scénarios SRES), une augmentation marquée des pluies hivernales avait été prévue, tandis qu'elles n'augmentent que modérément dans les dernières projections. Ceci engendre des impacts très différents sur les précipitations annuelles.

Ainsi, l'expérience acquise lors des précédents projets montre qu'il est important de réaliser de nouvelles études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie au fur et à mesure que les projections du GIEC sont rendues disponibles.

Dans sa thèse, Gildas Dayon fournit une représentation de la pluviométrie désagrégée sur l'ensemble du territoire français à l'horizon 2035-2065 pour les différentes saisons et les différents scénarios climatiques. On observe que pour chaque scénario, on peut s'attendre à une augmentation des précipitations hivernales et une diminution des précipitations estivales. Au niveau de la région Artois-Picardie, chaque scénario conduit à des résultats similaires, hormis le RCP8.5 qui prévoit de plus grands écarts entre les précipitations estivales et hivernales que les autres.

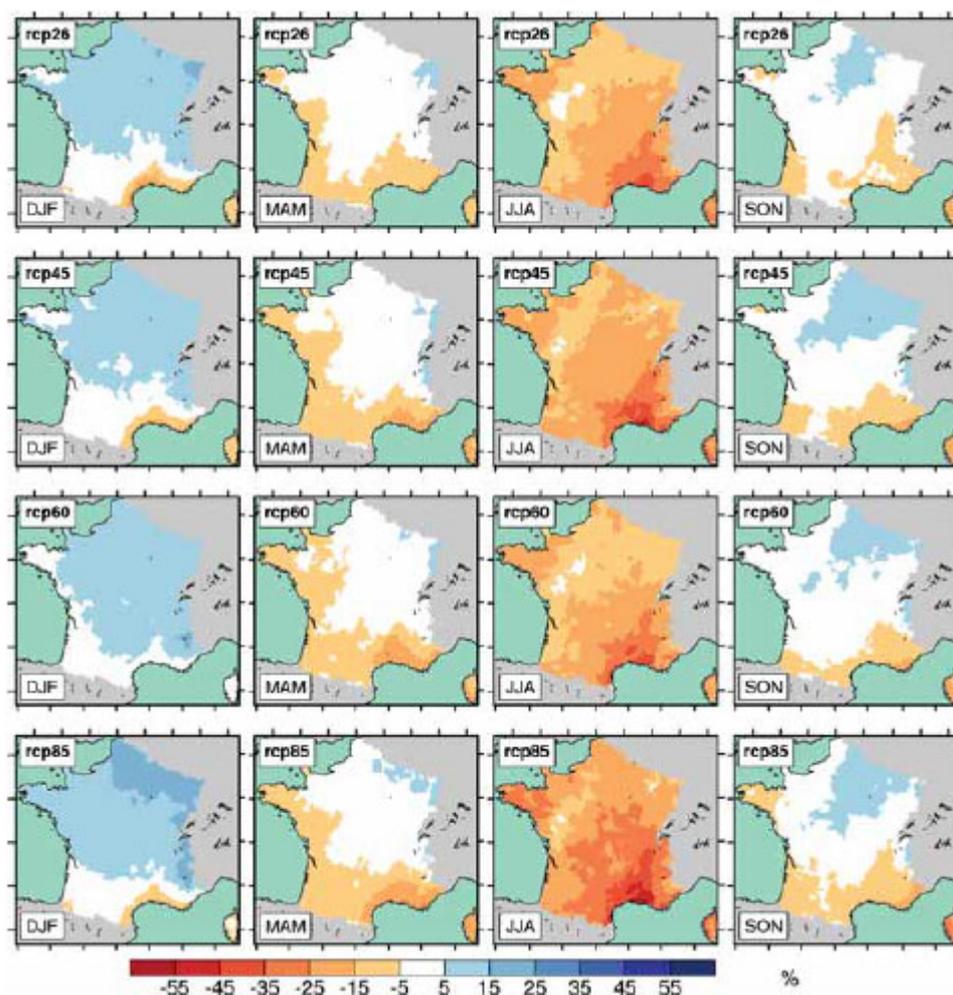


Figure 16 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs de précipitations désagrégées (%) sur la période 2035-2065 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. Les ensembles de GCM sont différents pour chaque scénario (voir Tableau 2.1). Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août, SON : Septembre-Octobre-Novembre.

3.5.3 Ressource en eau superficielle

Sources : (GIEC, 2013), (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012), (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2019)

Selon la carte ci-dessous, présentée dans le dernier rapport du GIEC, l'évolution des débits en région Artois – Nord Picardie devrait rester faible, soit croissante, soit décroissante. Cependant, l'incertitude concernant ces évolutions est relativement élevée et ces résultats sont issus d'analyses globales.

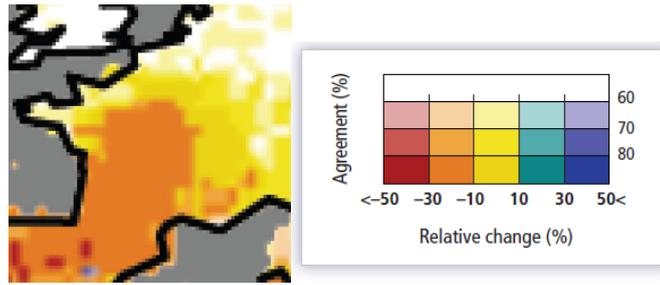


Figure 17 : Pourcentage de changement du débit moyen annuel pour une augmentation globale de la température de 2°C par rapport à la référence 1980-2010. Les couleurs indiquent le pourcentage de changement et leur saturation indique la robustesse de cette évaluation. Cette analyse se base sur 5 modèles de circulation générale et 11 modèles hydrologiques globaux

Selon l'étude Explore 2070, rédigée en 2012, les résultats concernant les eaux superficielles semblent prévoir une diminution du débit annuel moyen compris entre **25 et 45%**, une accentuation des étiages avec une baisse du QMNA5 allant de **30 à 70%** (résultats très dispersés), et une diminution possible des crues, avec une diminution du QJXA10 de **0 à 30%** (résultats également dispersés) (par rapport à la période de référence 1961-1990).

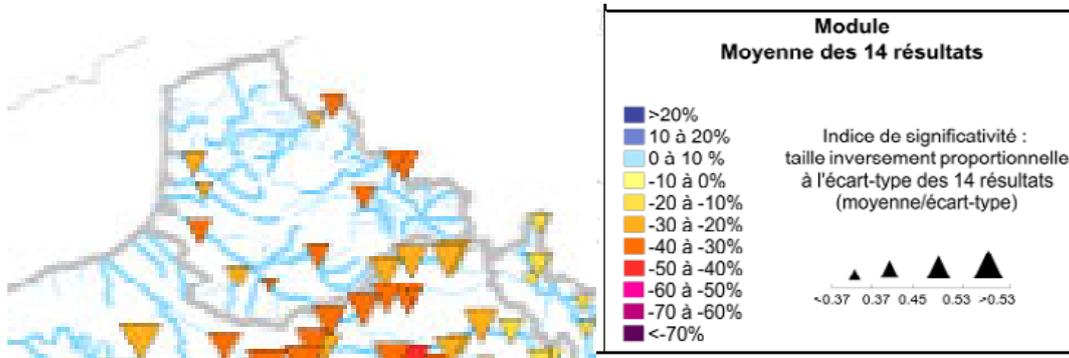


Figure 18 : Evolutions relatives possibles (en %) du module entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.

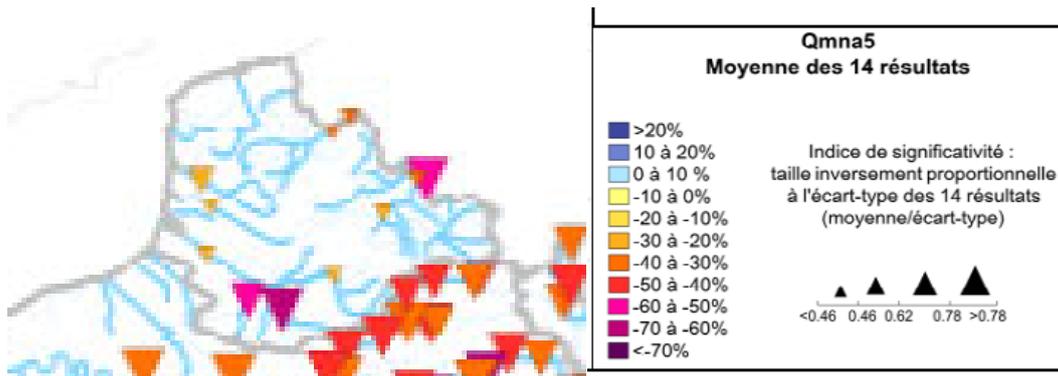


Figure 19 : Evolutions relatives possibles (en %) du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.

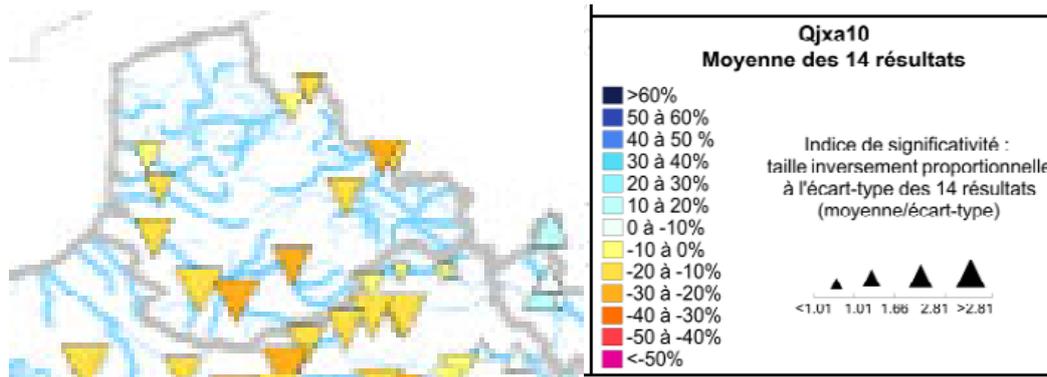


Figure 20 : variations relatives possibles (en %) du QJXA10 entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.

L'étude (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2019) indique, sur la base d'éléments datant de 2008, que dans les terres, l'accroissement du risque inondation en périodes hivernale et printanière lié à des événements extrêmes qui pourraient être de plus en plus fréquents. En période estivale, les étiages seraient plus sévères.

L'étude (Habets, 2013), donne les indications suivantes, pour le bassin versant de la Somme par rapport à la période de référence 1971-2000 :

- Diminution du ruissellement (pour la vaste majorité des ensembles des situations modélisées) avec environ **-20% e 2050 et -30% en 2080**, mais avec une forte incertitude sur les valeurs (la diminution est relativement certaines, mais son ampleur ne l'est pas) ;
- Concernant les débits :
 - ▷ **-20% en 2050 et -30% en 2080** pour la Somme ;

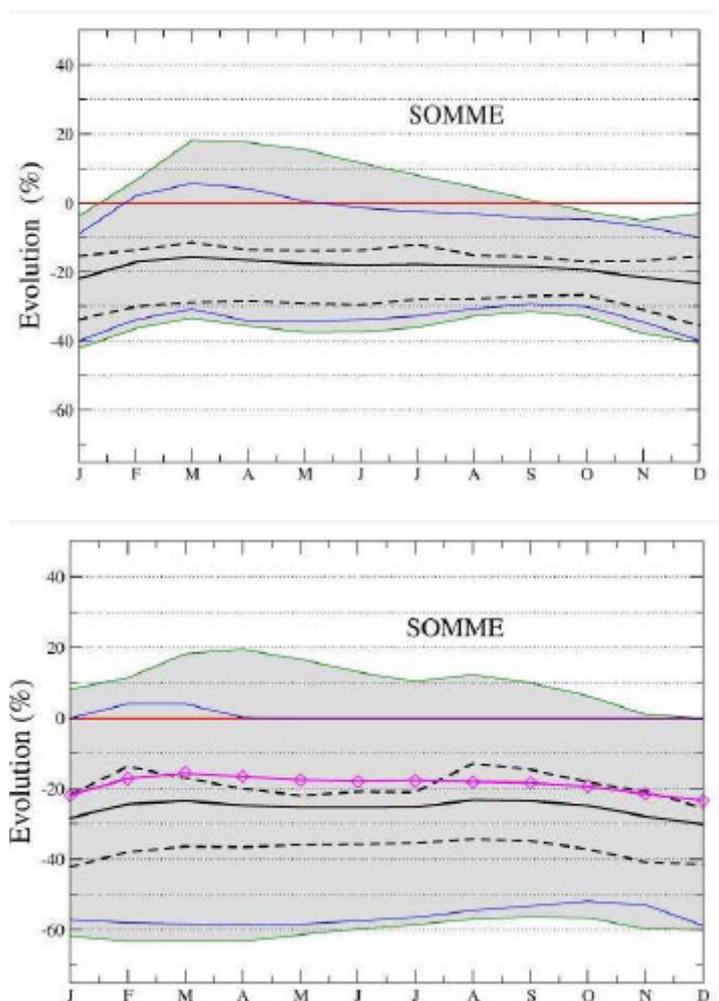


Figure 21 : Evolution des débits mensuels de la Somme en 2050 (haut) et 2080 (bas) par rapport au climat actuel simulé (1971-2000). L'enveloppe représente les valeurs minimales et maximales pour chaque mois, les lignes bleues continues les 10^{ème} et 90^{ème} quantiles, les lignes pointillées les 25^{èmes} et 75^{èmes} quantiles, et la ligne noire la moyenne. 26 simulations sont considérées pour 2050 et 39 pour 2080. La ligne rose représente la moyenne de 2050. Source : (Habets, 2013)

Selon la thèse de Gildas Dayon (Dayon, 2015), les débits dans le Nord de la France au milieu du siècle stagneront ou diminueront légèrement en hiver et au printemps, mais diminueront en été et en automne, quel que soit le scénario climatique considéré (voir figure suivante).

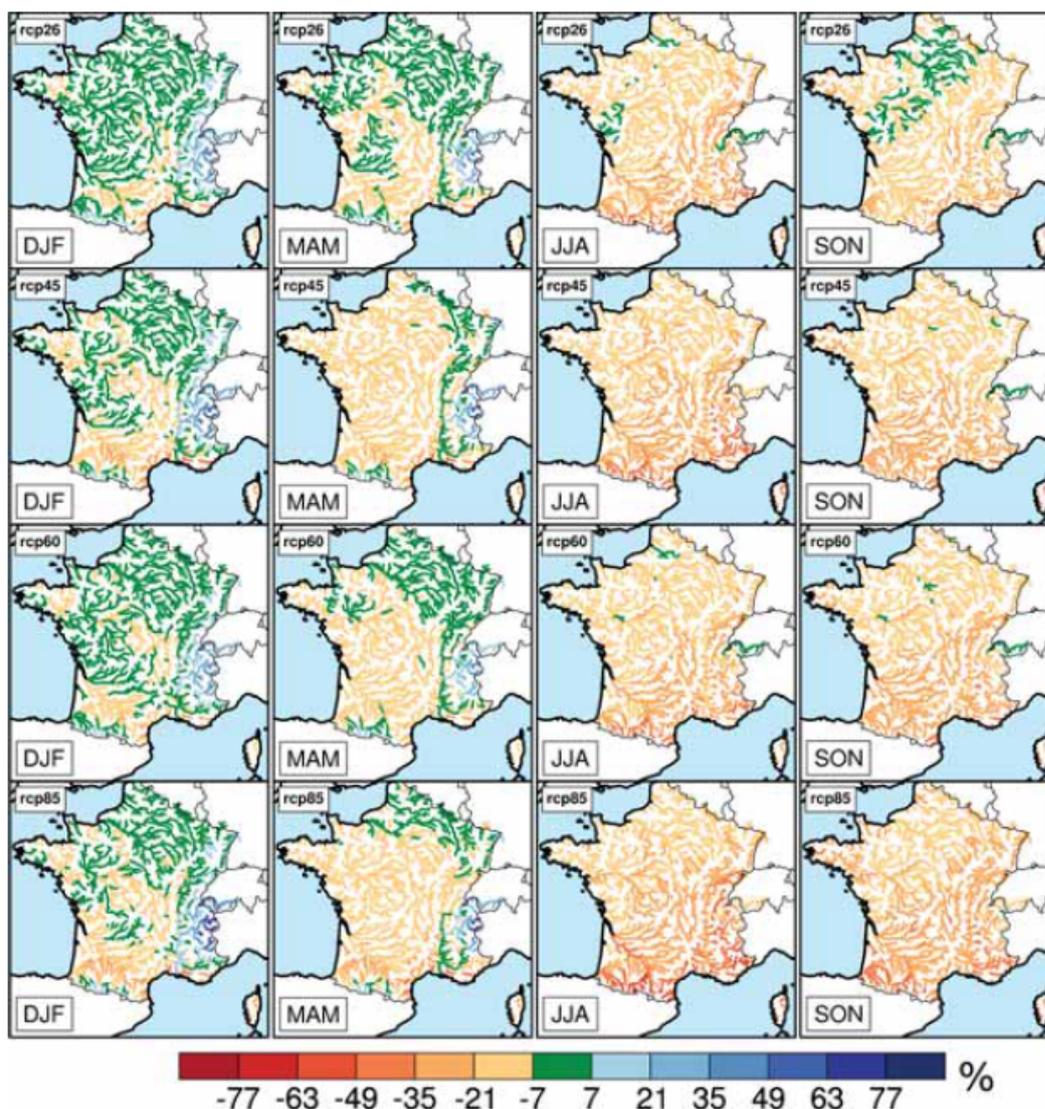


Figure 22 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015)

On observe que, pour la région d'étude, les pronostics diffèrent relativement peu d'un scénario à l'autre.

Les principales différences avec les études précédentes sont en hiver sur le quart nord-est du pays. Quel que soit le scénario considéré, les débits sur les bassins versants de la Seine et de la Somme ne changent pas d'ici le milieu du siècle, et augmentent dans certains cas à la fin du siècle. Dans les études précédentes, la tendance est plutôt à la diminution des débits en hiver dans cette région, d'environ 20% dans Ducharme et al. (2005), Boé et al. (2009) et Habets et al. (2013). Ces différences s'expliquent en partie par la différence des changements de précipitations sur le nord de la France. Dans les études citées, les précipitations en hiver n'augmentent que très légèrement sur le bassin versant de la Seine. Dans notre cas, les précipitations augmentent entre 5 et 15%, en moyenne sur les GCM, d'ici le milieu du siècle. Pour le scénario RCP8.5, l'augmentation des précipitations est même de plus de 15% sur le nord-est. Les modèles régionaux du projet Ensembles (van Der Linden et Mitchell, 2009), ainsi que les modèles CMIP5 (Terry et Boé, 2013) simulent une augmentation des précipitations en hiver sur le nord-est de la France, ce qui irait plutôt dans le sens des changements obtenus dans notre étude.

L'incertitude due à la fois aux modèles climatiques et à la variabilité interne augmente au cours du XXIème siècle, alors que celle due uniquement à la variabilité interne est stable.

3.5.4 Ressource souterraine

3.5.4.1 A l'échelle mondiale

Sources : (GIEC, 2015)

Des simulations pilotes ont été réalisées en différentes régions du monde sur la base d'un unique scénario. Différents modèles climatologiques s'appuyant sur ce scénario ont été utilisés. On observe de fortes variations de l'effet du changement climatique sur le niveau des nappes souterraines selon le modèle climatique utilisé.

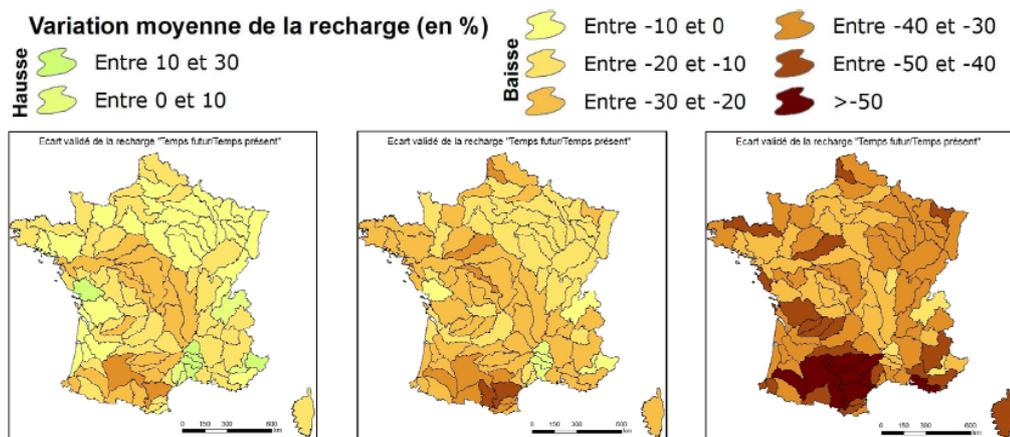
La sensibilité de la recharge en eau souterraine au changement climatique est :

- Moins forte en cas de végétation pérenne, sols fins, et présence d'aquitards ;
- Plus forte en cas de fauche annuelle, sols sableux et aquifères non confinés.

3.5.4.2 A l'échelle locale

Sources : (Comité de Bassin Artois-Picardie, 2016), (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2012), (Habets, 2013)

Au cours de l'étude Explore 2070 rédigée en 2012, l'évolution de la recharge a été évaluée. Afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaires des sept modèles climatiques considérés dans l'étude Explore, mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Il y a donc trois cartes proposées permettant ainsi de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.



Écarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/ temps présent

Figure 23 : Écarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur / temps présent, selon l'étude Explore 2070

On observe que dans la région Artois-Picardie, l'écart temps futur/temps présent est négatif, même en considérant la modélisation climatique la plus optimiste. En moyenne, les modèles climatiques prévoient une diminution située entre **10 et 20%** pour le Sud du bassin (bassin de la Somme), entre **20 et 30 %** pour le Nord-Est et entre **30 et 40 %** pour l'Ouest (par rapport à la période de référence 1961-1990). L'étendue totale des diminutions prévues est de **-6% à -46%**

A l'échelle du territoire français, les baisses significatives constatées s'expliquent par une diminution de la pluviométrie, une hausse significative de l'évapotranspiration Potentielle (via notamment l'élévation de température) une stagnation (inhérente aux hypothèses d'utilisation des

modèles) des coefficients cultureux (notamment vis-à-vis de la végétation non productive : irrigation) et des coefficients de ruissellement.

L'étude (Habets, 2013) indique, pour le bassin versant de la Somme et par rapport à la période de référence 1971-2000, une diminution du niveau des nappes de -2.45 m en 2050 et -3.72 m en 2080 pour la Somme. La diversité des résultats obtenus à l'aide de différents modèles hydrogéologiques est donnée aux figures ci-dessous :

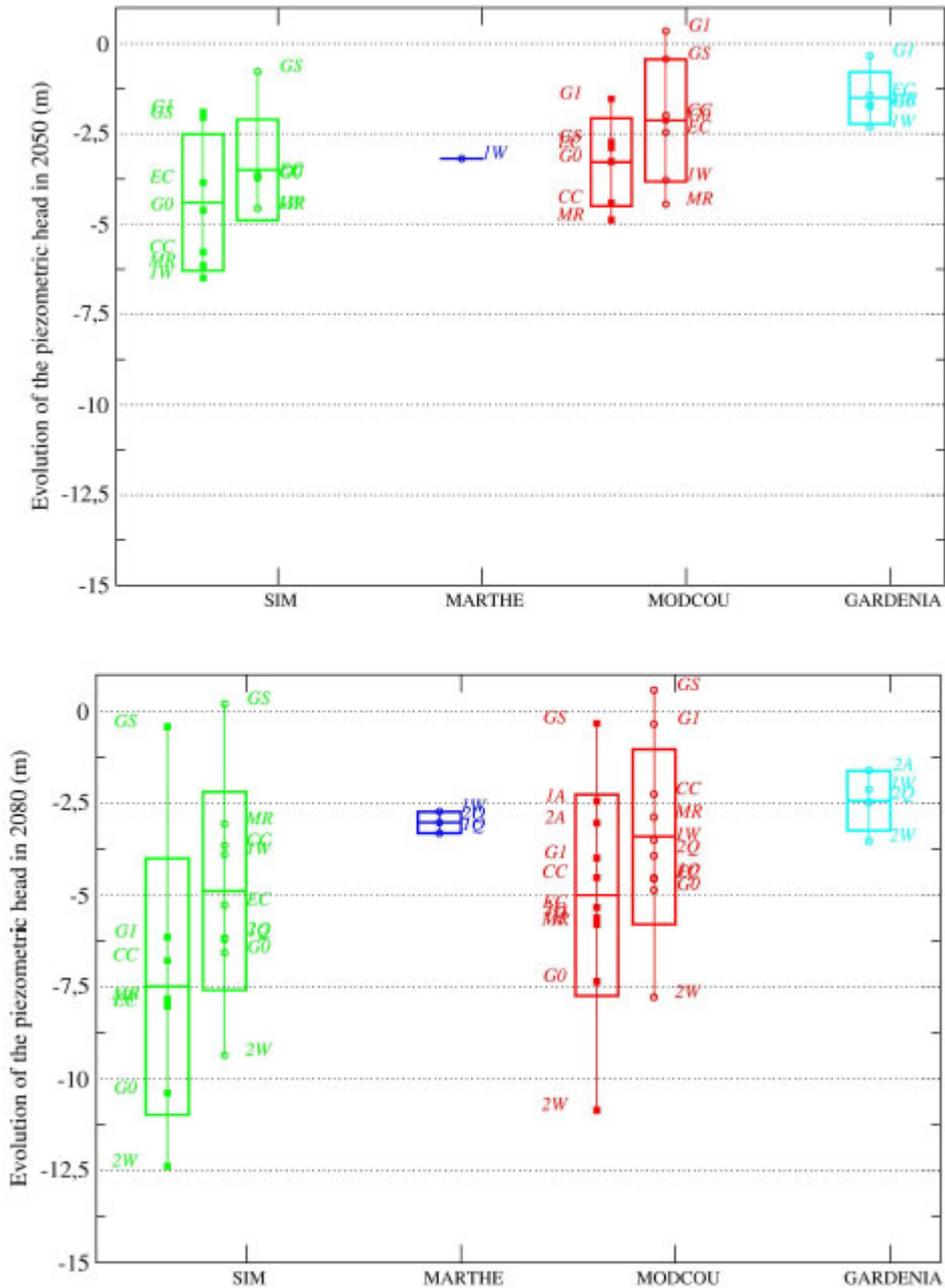


Figure 24 : Evolution de la cote piézométrique de la Seine (carrés) et de la Somme (cercles) pour 2050 (haut) et 2080 (bas) (Habets, 2013)

3.5.5 Autres impacts

Sources : (Météo France, 2011), (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2019)

Selon le projet Climsec, porté par le CNRM et présenté en 2011, une importante augmentation des sécheresses agricoles aura lieu, comme en témoigne l'évolution de l'indicateur Standardized Soil Wetness Index (SSWI : indice permettant de mesurer la sécheresse en termes d'humidité du sol. On l'appelle également indice de sécheresse agricole) :

- L'aggravation des sécheresses au cours du XXIe siècle est continue et concerne toutes les saisons, y compris la période proche centrée autour de 2020 ;
- En 2020 et 2050, l'aggravation la plus sensible concerne les sécheresses estivales ;
- En fin de siècle, toutes les saisons sont concernées par une forte aggravation des sécheresses ;

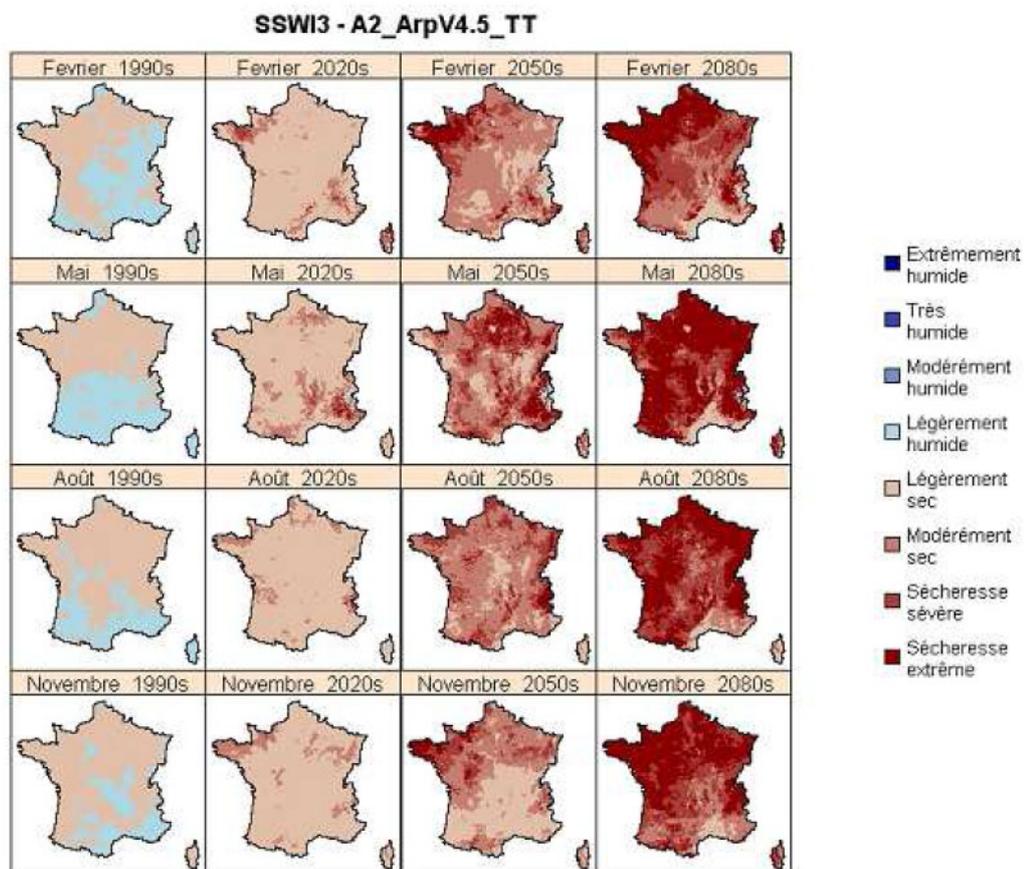


Figure 25 : Evolution temporelle des sécheresses SWI3 au cours du XXIe siècle selon les saisons (février=hiver, mai=printemps, août=été, novembre=automne) à partir des projections Arpège V4.6 scénario A2, méthode de descente d'échelle types de temps

Dans ce scénario temporel (particulièrement inquiétant), on peut souligner d'abord l'évolution plus rapide et plus forte des sécheresses du sol par rapport aux sécheresses météorologiques, sous l'effet probable de l'augmentation de l'évaporation (liée à la température). Cet élément semble prépondérant dans la compréhension des changements du cycle hydrologique au XXIe siècle et rend inadaptée la prise en compte des seules précipitations comme variable explicative pour décrire l'évolution des sécheresses.

Selon l'étude (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2019), d'autres types d'impacts sont attendus, tels que les suivants :

- La progression des risques sur la côte avec la remontée du niveau marin accentuant l'érosion du trait de côte, l'augmentation de l'aléa de submersion marine et la salinisation des territoires ;
- L'augmentation des vagues de chaleurs pourrait entraîner une hausse des besoins en eau et des pressions sur la ressource en eau ;
- La dégradation accrue de la qualité des eaux (concentration des polluants associée à la diminution des débits et l'augmentation de la température).

3.6 Remarques générales

L'ensemble des analyses climatiques présentées repose sur l'hypothèse d'une absence d'éruption volcanique intense ou de changement dans les certaines sources naturelles (par exemple, méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O)), ou encore de changement inattendu de l'éclairement énergétique solaire total.

4 ENTRETIENS AVEC LES LABORATOIRES FRANÇAIS DE MODELISATION DU CLIMAT

4.1 Météo France

Un entretien téléphonique entre Suez Consulting (représenté par Max Mentha) et la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques de Météo France (représentée par Jean-Michel Soubeyroux, Directeur adjoint) s'est tenu le 27/05/2020.

Un compte-rendu complet de la discussion est présenté en annexe 3. Les éléments principaux de ce dernier sont rappelés ici.

- Choix du scénario climatique :
 - ▷ Pour les horizons temporels concernés par l'étude, le choix du ou des scénarios climatiques à considérer aura un impact relativement faible en comparaison à celui du choix de la ou des modélisations climatiques retenues. En effet, la dispersion des réponses climatiques obtenues par différents modèles pour un seul scénario est plus forte que la dispersion obtenue par un seul modèles pour différents scénarios climatiques ;
- Choix du ou des portail(s) d'accès aux données de modélisation climatique :
 - ▷ Le portail d'accès aux résultats de modélisations climatiques le plus approprié pour les études sur l'impact du changement climatique est DRIAS. En effet, il présente l'avantage de proposer des données prêtes à l'emploi ;
 - ▷ Le scénario RCP6.0 n'est pas inclus aux simulations EURO-CORDEX, il ne figure donc pas parmi les modélisations régionalisées existantes sur DRIAS et EUROCORDEX ;
 - ▷ Les seuls scénarios actuellement bien représentés sur DRIAS sont le RCP4.5 et le RCP8.5. Le RCP2.6 n'est représenté que par un seul modèle ;
- Mise à jour de DRIAS : Une mise à jour du portail DRIAS est prévue pour le mois de septembre. Elle inclura les améliorations suivantes :
 - ▷ Le scénario RCP2.6 sera mieux représenté (plusieurs modélisations basées sur ce scénario) ;
 - ▷ La diversité des résultats de l'ensemble des modélisations EUROCORDEX est mieux représentée ;
 - ▷ Prise en compte de l'évolution des prospections climatiques depuis 2014 (avec notamment l'évolution des prospections sur les précipitations) ;
 - ▷ L'ETP ne sera a priori pas disponible avant le début de l'année 2020 ;
 - ▷ La méthode de descente d'échelle/correction de biais Adamont sera utilisée sur l'ensemble des modélisations (cette méthode est considérée plus appropriée que les autres pour les études d'impact du changement climatique).
- Problématique de la prévision décennale :
 - ▷ La recherche bibliographique effectuée a permis d'identifier la prévision décennale comme un axe intéressant pour la représentation du climat futur à court terme, avec des incertitudes plus faibles annoncées. L'entretien avec Météo France a permis d'établir que ce type de modélisation est encore au stade de recherche. Il peut donner de bons résultats à l'échelle globale, mais pas à l'échelle locale. MetOffice (<https://www.metoffice.gov.uk/>) peut être considéré comme l'un des acteurs les plus avancés dans cette problématique ;
- Intervalle de temps à considérer pour les projections :

- ▶ Il est important de s'interroger sur l'intervalle de temps à considérer pour analyser les données de projections. Par exemple, pour l'horizon 2030, faut-il se baser sur les données de la période 2025-2035 (10 ans), 2020-2040 (20 ans) ? Météo France considère que plus le nombre de modèles climatiques considérés est élevé, plus on peut se permettre de se baser sur une période restreinte (et ainsi avoir une représentation moins lissée du changement climatique). Si le nombre de modèles climatiques considéré est faible, il est recommandé de se baser sur une période longue, de l'ordre de 30 ans.
- Impact du changement climatique sur la ressource en eau ; la littérature consultée à ce sujet est restreinte et ancienne. Les éléments récents et à venir sont les suivants :
 - ▶ Thèse de Gildas Dayon : Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies ;
 - ▶ Nouvelle version du projet Climsec à venir ;
 - ▶ Réalisation de modélisations hydrologiques à l'échelle de la France à venir (par Météo France, avec le modèle SIM).
- Possibilités de partenariat :
 - ▶ Météo France a l'habitude d'appuyer les acteurs du territoire dans la démarche de prise en compte du changement climatique et peut fournir des services à ce niveau ;
 - ▶ Météo France peut également produire des modèles d'impact hydrologique sur des régions ciblées à l'aide du modèle SIM.

4.2 CNRS/CERFACS

Sources : (Boé J. S., 2020)

Un entretien téléphonique entre Suez Consulting (représenté par Max Mentha) et le CERFACS (représenté par Julien Boé, Chercheur CNRS/CERFACS) s'est tenu le 03/06/2020.

Un compte-rendu complet de la discussion est présenté en annexe 4. Les éléments principaux de ce dernier sont rappelés ici.

- Choix des scénarios climatiques à considérer :
 - ▶ De nouvelles simulations faisant usage des nouveaux scénarios climatiques SSP ont été réalisées dans le cadre du CMIP6. Cependant, ces dernières n'ont pas encore fait l'objet d'une régionalisation. Ainsi, les données de projection climatique actuellement disponibles ne permettent pas de mettre en œuvre l'utilisation des nouveaux scénarios SSP. Les scénarios RCP restent la référence en la matière ;
- Choix du portail de données à utiliser :
 - ▶ Actuellement, seul le portail DRIAS propose des données régionalisées et débiaisées issues de plusieurs modèles à l'échelle de la France. Il s'agit donc de la source de données de prédilection ;
- Problématique de la prévision décennale :
 - ▶ La recherche bibliographique effectuée a permis d'identifier la prévision décennale comme un axe intéressant pour la représentation du climat futur à court terme, avec des incertitudes plus faibles annoncées. D'après Julien Boé, cette méthode n'est pas encore prête pour une utilisation opérationnelle et ne permettra d'obtenir de meilleures estimations sur le climat futur qu'à des horizons inférieurs à la dizaine d'années ;
- Intervalle de temps à considérer pour les projections :
 - ▶ L'utilisation de l'intervalle de temps de 20 ans employé par le GIEC est recommandée ;

- Impacts du changement climatique sur la ressource en eau :
 - ▷ L'étude de référence la plus récente est la thèse menée par Gildas Dayon ;
- Défauts observés sur les simulations climatiques régionales actuelles :
 - ▷ Un article publié début 2020 par Julien Boé présente des défauts observés sur les simulations climatiques régionales actuelles. Ces dernières, en comparaison avec les simulations globales, sous-estiment le réchauffement estival et la diminution des précipitations. Leur utilisation peut donc causer une sous-estimation des impacts du changement climatique.

4.3 IPSL

Un entretien par mail entre Suez Consulting (représenté par Max Mentha) et l'IPSL (représenté par Amélie Rajaud, Cheffe de projet EUR IPSL-Climate Graduate School) s'est tenu le 08/06/2020.

Les questions posées sont typiques d'une étude de vulnérabilité et d'impact en lien avec le changement climatique, et les choix dépendront fortement de la problématique (enjeux à privilégier par les utilisateurs) et de la méthodologie employée pour la suite ; il n'existe pas de réponse unique.

Quelques éléments cependant doivent guider les décisions du comité de pilotage :

- Ce sont toujours les scénarios RCP voire le scénario CMIP5 qui sont utilisés. Pour une étude rapide comme dans le cadre d'Artois Picardie, c'est sans doute l'exercice qui est recommandé. Le CMIP6 est trop récent pour une utilisation non académique. Le choix du scénario dépend de la demande : les scientifiques privilégient souvent le RCP8.5, mais les décideurs plus politiques demandent souvent le RCP2.6, par exemple. De manière générale, la bonne pratique est de ne jamais présenter un scénario unique, qui donnerait une fausse impression de certitude.
- Le choix de la source des données dépend fortement des contraintes du modèle d'impact à utiliser ;
- A ma connaissance, la prévision décennale constitue un sujet de recherche certes très porteur, mais qui n'est pas encore au stade d'une utilisation opérationnelle.
- L'intervalle de temps classiquement utilisé est de 30 ans : un intervalle de 10 ans ferait passer à côté de la variabilité décennale. Cependant, cet intervalle peut en effet, parfois, être réduit pour tenir compte du caractère transitoire du climat d'aujourd'hui (par opposition à un climat stable).
- Ne connaissant pas les projets du territoire de la région Artois-Picardie, c'est le projet PIREN-Seine, pour la Seine-Normandie, qui semble faire référence sur le sujet de la ressource en eau.

5 CHOIX ET JUSTIFICATIONS DES 4 SCENARIOS CLIMATIQUES A RETENIR

Les analyses réalisées au paragraphe 3.1, ainsi que les entretiens téléphoniques rapportés au paragraphe 4 permettent de restreindre le champ des scénarios climatiques envisageables aux scénarios RCP, qui constituent aujourd'hui la référence en la matière.

Ces scénarios étant au nombre de 4, ils constituent l'ensemble de base à partir duquel devront être extraits, conformément au cahier des charges de la présente étude, deux scénarios, dont un plutôt optimiste et un plutôt pessimiste.

Les éléments évoqués ci-dessous ont pour objectif d'orienter ce choix :

- Le choix des scénarios à retenir pour la suite de l'étude est conditionné par la disponibilité de données de modélisations climatiques concrétisant ces scénarios. Il a été vu au paragraphe 3.2 que la source de données à privilégier est le portail DRIAS., qui propose des données climatiques régionalisées et débiaisées sur l'ensemble du territoire français. En effet :
 - ▷ L'échelle d'analyse de la présente étude exclut l'utilisation directe de résultats de modélisations globales ;
 - ▷ Le besoin d'adopter une approche multi-modèle étant avéré (voir paragraphe 3.3), les résultats régionalisés proposés par le programme Copernicus ne seront pas appropriés ;
 - ▷ Le travail qui consisterait à régionaliser et débiaiser des données climatiques globales issues du portail CMIP sort du périmètre de la présente étude ;
- Actuellement, seuls les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont bien représentés sur le portail DRIAS. Dans sa nouvelle version (annoncée pour septembre), le portail proposera également plusieurs modélisations associées au scénario RCP 2.6 ;
- Le scénario 2.6 est jugé aujourd'hui peu réaliste – car trop optimiste -par de nombreux acteurs.

Au vu de ces considérations, il est suggéré de retenir :

- Le scénario RCP4.5 en tant que scénario optimiste ;
- Le scénario RCP8.5 en tant que scénario pessimiste.

Il est important de rappeler que pour les horizons temporels concernés par l'étude, le choix du ou des scénarios climatiques à considérer aura un impact relativement faible en comparaison à celui du choix de la ou des modélisations climatiques retenues. En effet, la dispersion des réponses climatiques obtenues par différents modèles pour un seul scénario est plus forte que la dispersion obtenue par un seul modèles pour différents scénarios climatiques. Il apparaît donc comme primordial de se baser, pour chaque scénario climatique considéré, sur un ensemble de plusieurs modélisations climatiques.

6 ANALYSE DES EFFETS PREVISIBLES DES 4 SCENARIOS CLIMATIQUES RETENUS SUR LA RESSOURCE EN EAU

La littérature consultée fournit quelques éléments sur l'effet du changement climatique sur la ressource en eau. Cependant :

- La plupart des textes recensés sont relativement anciens et s'appuient sur les scénarios climatiques SRES, qui ne constituent plus aujourd'hui la référence en la matière. D'importantes évolutions sur les projections ont eu lieu depuis lors ;
- Aucune étude approfondie et spécifiquement ciblée sur la région Artois-Picardie n'a pu être identifiée. Cependant, des études réalisées à l'échelle de la France peuvent apporter quelques éléments.

Les paragraphes suivants récapitulent les informations les plus récentes concernant :

- Les précipitations (témoins de l'évolution de la ressource en eau en général) ;
- Les températures (témoins de l'évolution de la ressource en eau en général, car facteur déterminant de l'évapotranspiration) ;
- Les débits (témoins de l'évolution de la ressource en eau superficielle) ;
- La recharge de nappe (témoin de l'évolution de la ressource en eau souterraine).

6.1 Effets du changement climatique sur les précipitations

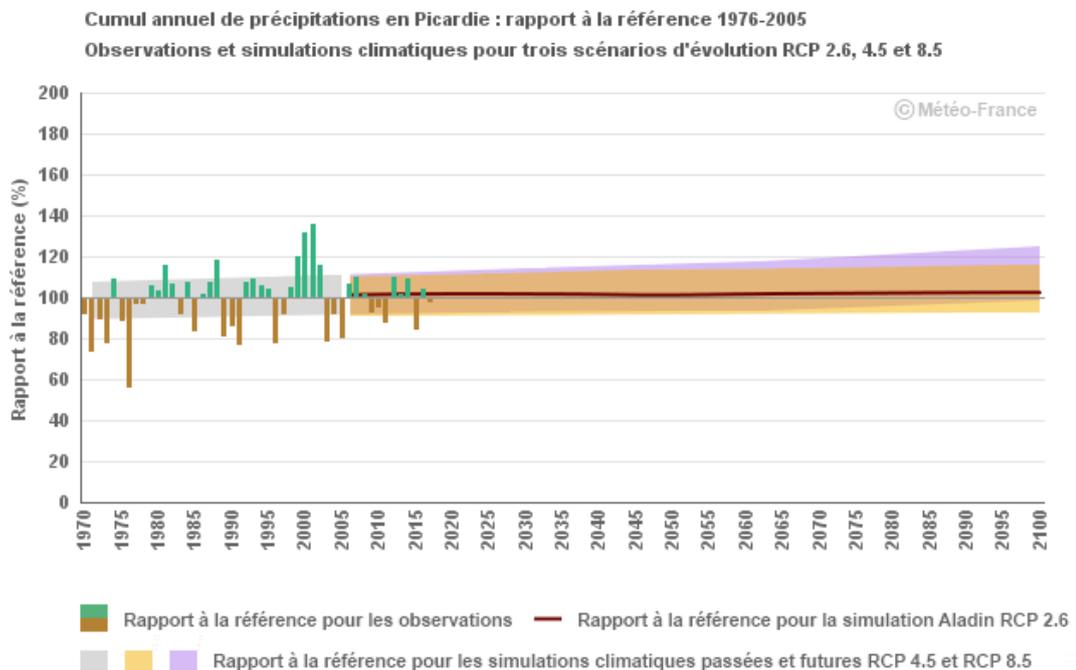


Figure 26 : Evolution des précipitations annuelles en Picardie (DGEC, 2014)

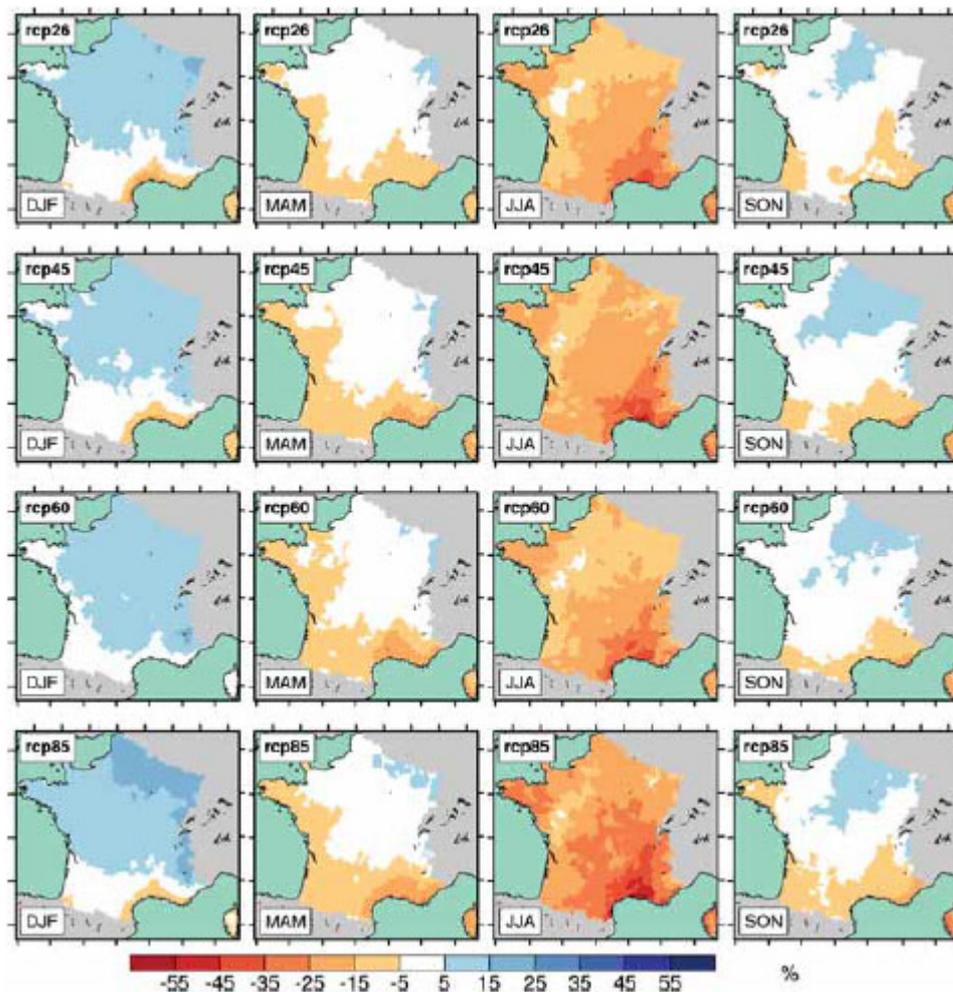


Figure 27 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs de précipitations désagrégées (%) sur la période 2035-2065 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. Les ensembles de GCM sont différents pour chaque scénario (voir Tableau 2.1). Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août, SON : Septembre-Octobre-Novembre. (Source : (Dayon, 2015))

Quel que soit le scénario climatique considéré, les précipitations annuelles ne devraient pas substantiellement évoluer aux horizons considérés dans la présente étude. Cependant, la répartition des précipitations sur l'année évoluera, avec plus de pluie en hiver et moins en été. Cette différence est à peu près similaire pour chaque scénario considéré, sauf pour le RCP8.5, pour lequel elle est légèrement plus marquée.

6.2 Effets du changement climatique sur les températures

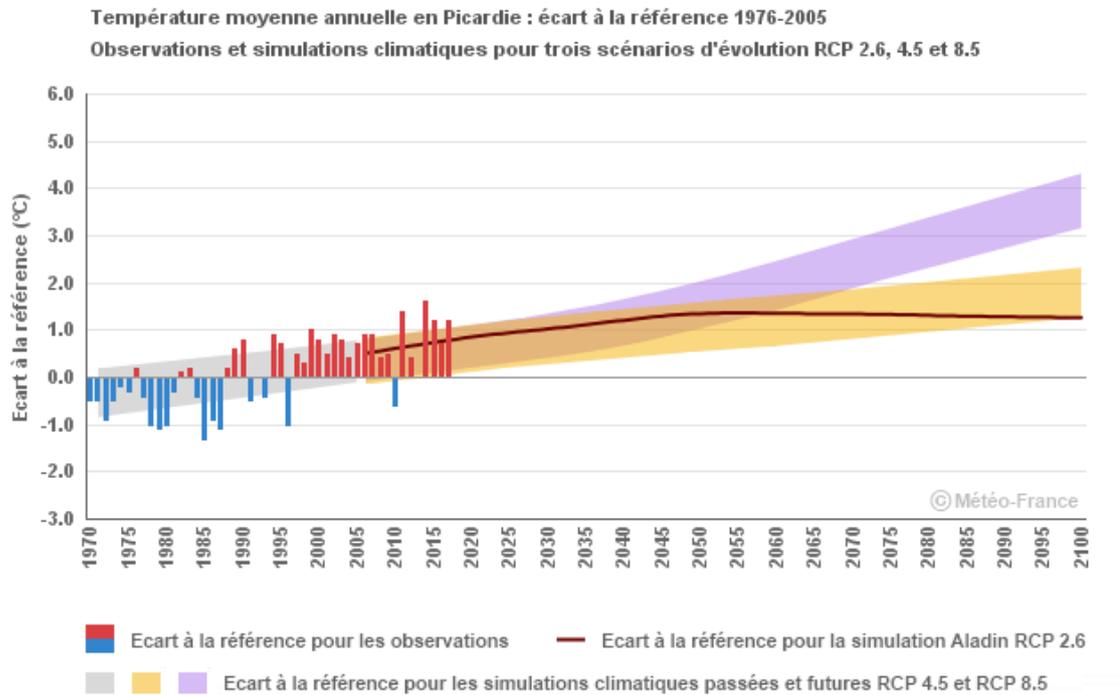


Figure 28 : Evolution des températures annuelles en Picardie (DGECC, 2014)

A l'horizon 2030, l'évolution des températures annuelles est similaire pour les différents scénarios climatiques. Un écart proche de 0.5°C apparaît à l'horizon 2050 entre les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

6.3 Effets du changement climatique sur les débits

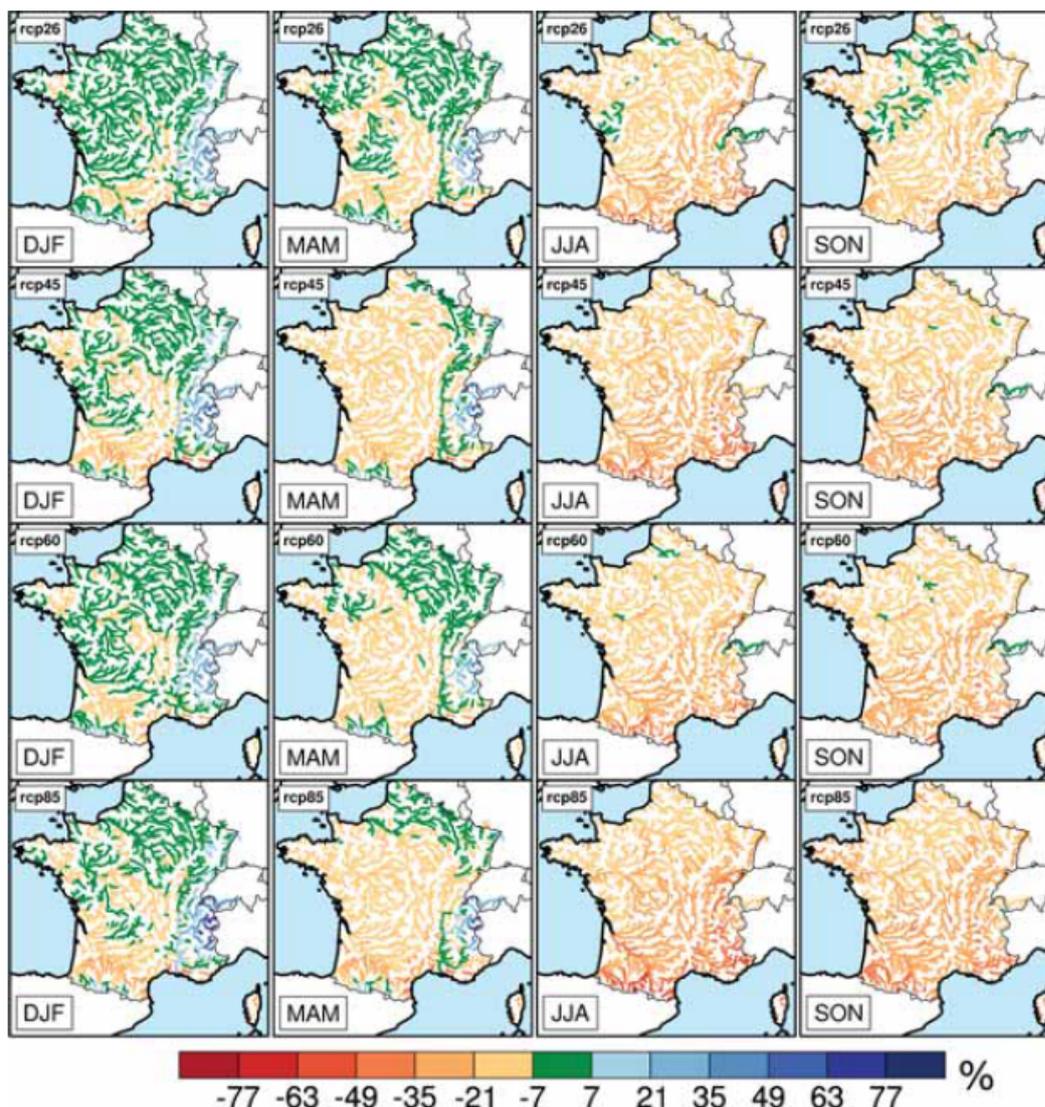
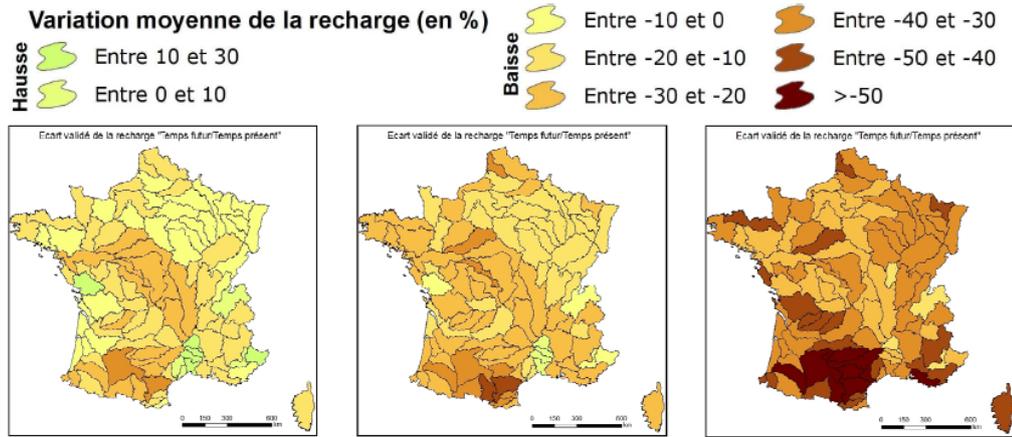


Figure 29 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015)

L'effet du changement climatique sur le débit des cours d'eau est globalement du même ordre de grandeur quel que soit le scénario considéré. On observera une diminution de ces derniers durant la période estivale et automnale, et de faibles variations sur le reste de l'année.

6.4 Effets du changement climatique sur la ressource en eau souterraine



Ecarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/ temps présent

Figure 30 : Ecarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur / temps présent, selon l'étude Explore 2070

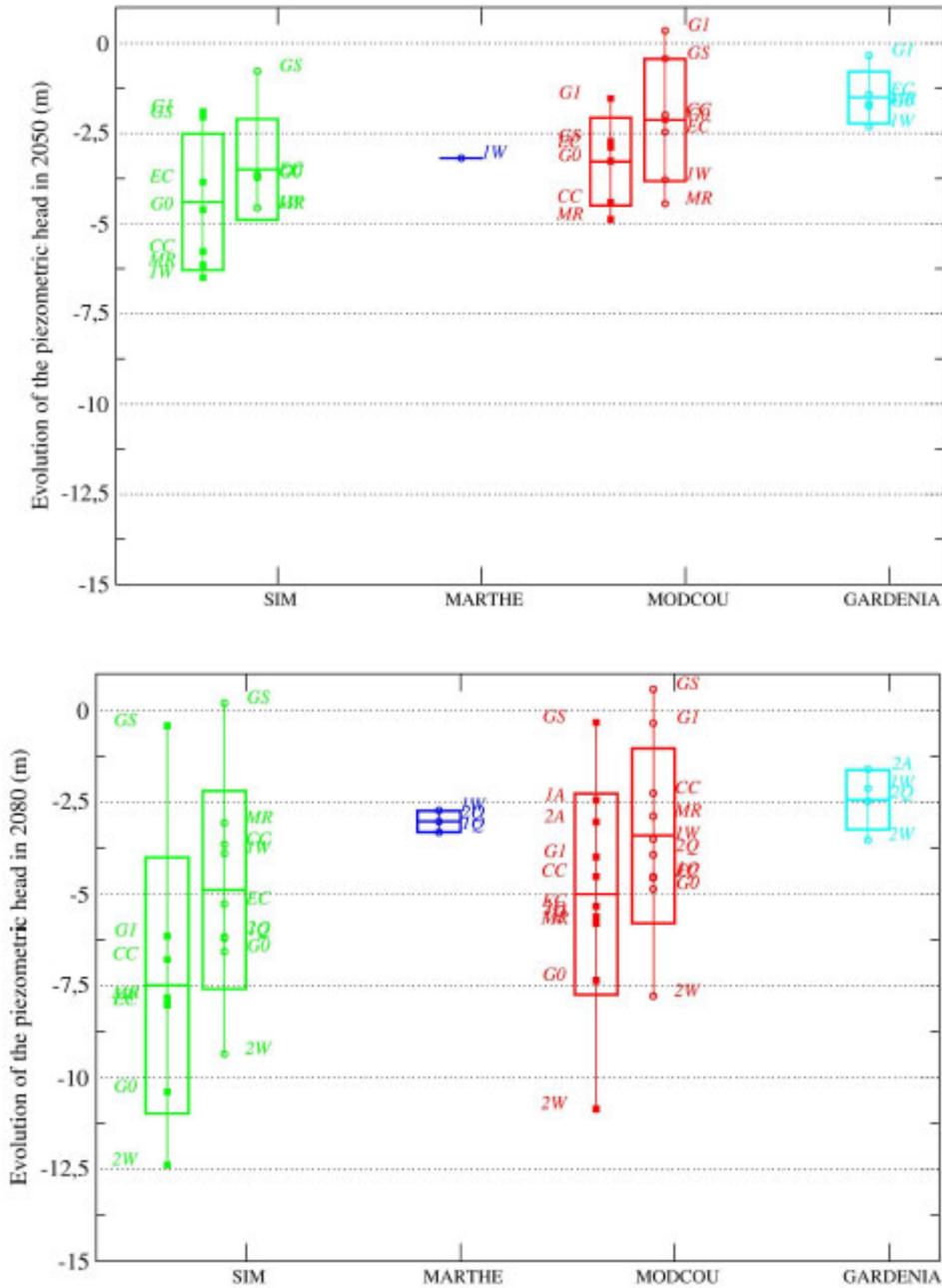


Figure 31 : Evolution de la cote piézométrique de la Seine (carrés) et de la Somme (cercles) pour 2050 (haut) et 2080 (bas) (Habets, 2013)

Les éléments disponibles concernant la ressource en eau souterraine sont relativement anciens et ne permettent pas de mettre en perspective les différents scénarios climatiques. Cependant, ils indiquent qu'une diminution de cette dernière peut être attendue.

6.5 Synthèse

Il ressort des analyses réalisées que les informations concernant l'impact du changement climatique sur la ressource en eau sont limitées et souvent anciennes. La réalisation, dans le cadre de la présente étude, de modélisations et /ou analyses sur les données climatiques récentes permettra de combler cette lacune.

Les quelques données disponibles permettent d'établir que pour les horizons considérés :

- Les différents scénarios présentent peu de différences entre eux, en termes de précipitations et de débits. Une légère diminution des débits est attendue, tandis que les précipitations annuelles devraient stagner (malgré une accentuation de la différence entre les précipitations estivales (faibles) et hivernales (fortes)) ;
- L'évolution des températures à l'horizon 2050 diffère selon le scénario considéré ;
- La ressource souterraine devrait diminuer.

7 PROPOSITION D'UN TABLEAU DE METHODES DE DESCENTE D'ECHELLE

Les différentes méthodes de descente d'échelle existantes ont été présentées au paragraphe 3.2.2. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des méthodes présentées est donné ci-dessous.

A noter que compte tenu de la faible influence du choix de méthode de descente d'échelle sur les résultats obtenus au regard des autres sources d'incertitudes (paragraphe 3.3) et vu que l'ensemble des modélisations proposées sur DRIAS s'appuient sur la méthode quantile-quantile (ou assimilée), considérée comme la plus appropriée, il peut être considéré que la méthode utilisée ne constituera pas un facteur déterminant dans le choix des modélisations climatiques à utiliser dans la suite de la présente étude.

Tableau 4 : Présentation des différentes méthodes de descente d'échelle (Sources : (DRIAS), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011))

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Anomalies ou AN	Simple et mise en œuvre facile et rapide	Hypothèses très fortes et très peu réalistes sur les modifications de variabilité : la variabilité journalière et interannuelle est considérée invariante entre le futur et le passé.
Régime de temps ou RT ou DSClim	Applicable facilement à un grand nombre de projections climatiques Utilisable pour la quantification des incertitudes	Les liens grande échelle – échelle locale sont considérés invariants entre le futur et le passé. Non prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive passée (sauf pour la température).
Dynamique quantile-quantile ou QQ	La plus complète pour la prise en compte des rétroactions et les modifications des extrêmes	Très coûteuse en temps calcul. Les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariante entre le futur et le passé.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
CDF-t (IPSL)	<ul style="list-style-type: none"> Prise en compte de l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique. Ajustement de la fréquence des précipitations. Capable de simuler la durée des périodes d'humidité et de sécheresse. 	<ul style="list-style-type: none"> Dépendance inter-variables du modèle climatique n'est pas corrigée mais est préservée. Les données sont désaisonnalisées et la tendance retirée. N'est pas développée spécifiquement pour les événements extrêmes.
ADAMONT (Météo-France)	<ul style="list-style-type: none"> Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens. L'hypothèse de stationnarité a de meilleures chances d'être vérifiée au sein d'un même types de temps de la même saison. Le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps. 	<ul style="list-style-type: none"> La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles. La consistance entre les variables n'est plus assurée au terme de la chaîne de traitement.

Améliorations

Dans la version actuelle du portail DRIAS, les modélisations climatiques proposées s'appuient sur la méthode quantile-quantile et sur la méthode CDF-t. Dans la nouvelle version du portail annoncée pour septembre 2020, l'ensemble des modélisations s'appuieront sur la méthode ADAMONT.

8 AUTRES POINTS IMPORTANTS / DEFIS A RELEVER

La plupart des modélisations climatiques actuellement disponibles n'incluent pas l'ETP parmi les variables de sortie. Or, il s'agit d'un paramètre dont la connaissance est requise pour évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Ce dernier peut être estimé à partir de la connaissance de la température et du rayonnement solaire, mais la connaissance conjointe de ces deux variables n'est actuellement disponible que pour un modèle de DRIAS (le modèle CNRM2014).

Une importante mise à jour du portail DRIAS aura lieu en septembre, avec des améliorations qui pourraient profiter à la présente étude.

Un article publié début 2020 par Julien Boé présente des défauts observés sur les simulations climatiques régionales actuelles. Ces dernières, en comparaison avec les simulations globales, sous-estiment le réchauffement estival et la diminution des précipitations. Leur utilisation peut donc causer une sous-estimation des impacts du changement climatique. Il convient de garder ces considérations à l'esprit lors de l'interprétation des résultats issus de ces modélisations climatiques régionalisées.

9 CONCLUSION

Dans le cadre du présent rapport, 4 scénarios climatiques ont été identifiés et justifiés et les méthodes de descente d'échelle existantes ont été identifiées et décrites.

En anticipation du choix final de deux scénarios (un optimiste, un pessimiste), le présent rapport aiguille d'ores et déjà le choix vers les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, pour les raisons suivantes :

- Les scénarios RCP constituent les éléments les plus récents qui aient été validés par l'ensemble de la communauté scientifique (les scénarios définis plus récemment que ces derniers s'appliquent à des travaux qui sont actuellement en cours et qui n'ont par conséquent pas fait l'objet de validation globale) ;
- Le scénario RCP2.6 est aujourd'hui déjà considéré comme peu réaliste par de nombreux acteurs, car trop optimiste ;
- La différence entre les scénarios RCP4.5 et RCP6.0 est très faible aux horizons d'intérêt de l'étude (2030 et 2050) ;
- Sur le portail DRIAS, les scénarios les mieux représentés sont les RCP4.5 et RCP8.5 (seule une simulation avec le RCP2.6 et aucune avec le RCP6.0).

L'utilisation des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 permet de couvrir un éventail d'évolution du climat large mais réaliste.

La littérature évaluant les impacts du changement climatique sur la ressource en eau présente certaines lacunes. En effet, la plupart des textes identifiés font référence à un panel de scénarios climatiques restreint et souvent obsolète (scénarios SRES...). Ainsi, il serait intéressant, dans la suite de l'étude, d'évaluer ces impacts à l'aide de modélisations hydrogéologiques basées sur les données de projection climatique associées aux scénarios retenus [Non prévu au contrat].

La littérature consultée et les entretiens réalisés mettent en avant l'importance d'une approche multi-modèle, en raison de la grande incertitude liée à la modélisation.

Concernant la problématique de descente d'échelle, il apparaît que les simulations proposées sur DRIAS ont déjà fait l'objet d'une régionalisation pouvant être considérée appropriée. Ainsi, on peut s'affranchir de réaliser un choix à ce niveau.

Avec ces éléments, le COTECH dispose des informations nécessaires pour identifier les deux scénarios climatiques à retenir pour la suite de la présente étude.

10 REFERENCES

- Agence de l'eau Artois-Picardie. (2019). *ÉTUDE SUR LA STRUCTURATION SOCIO-ÉCONOMIQUE DES ACTIVITÉS, HORS TOURISME, JUSTIFICATION DE LA DESIGNATION DES MASSES D'EAU ARTIFICIELLES ET MASSES D'EAU FORTEMENT MODIFIÉES ET ELABORATION DE 3 SCENARIOS TENDANCIELS SUR LES DISTRICTS ESCAUT SOMME & COTIERS.*
- Agence de l'Eau Artois-Picardie. (s.d.). *Données géographiques du bassin Artois-Picardie.* Récupéré sur Eau Artois-Picardie: <https://www.eau-artois-picardie.fr/donnees-geographiques-du-bassin-artois-picardie>
- Agence de l'Eau Seine-Normandie. (2011). *Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine - Résultats du projet GICC - RexHySS.*
- Boé, J. (2014). *Désagrégation spatiale: les différentes approches avec des applications dans l'étude des impacts du changement climatique.*
- Boé, J. S. (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Climate Dynamics*, pp. 2981-3002.
- Comité de Bassin Artois-Picardie. (2016). *Regards croisés sur l'eau et le changement climatique - Adapter la gestion de l'eau à l'évolution du climat dans le bassin Artois-Picardie.*
- Copernicus. (s.d.). Récupéré sur Climate Change Service: <https://climate.copernicus.eu/>
- Dayon, G. (2015). *Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies.*
- DGEC. (2014). *Le climat de la France au XXI^e siècle - Volume 4.*
- DGEC/SCEE/Onerc. (2013). *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC.*
- DRIAS. (s.d.). *Données et produits.* Récupéré sur Drias les futurs du climat: https://drias-prod.meteo.fr/okapi/catalogueProduit/_visualisercatalogue.jsp
- DRIAS. (s.d.). *DRIAS : Simulations climatiques – CNRM2014 – ARPEGE / ALADIN52.* Récupéré sur DRIAS les futurs du climat: https://drias-prod.meteo.fr/serveur/simulations_climatiques/Documentations_Donnees/Fiches_techniques_Atmospherique/4-Jouzel2014/CNRM2014/Doc_DRIAS_database_CNRM2014-ARPEGE_ALADIN52.pdf
- DRIAS. (s.d.). *DRIAS : Simulations climatiques – EUROCORDEX – CNRM-CM5 / RCA4.* Récupéré sur DRIAS les futurs du climat: https://drias-prod.meteo.fr/serveur/simulations_climatiques/Documentations_Donnees/Fiches_techniques_Atmospherique/4-Jouzel2014/EUROCORDEX/Doc_DRIAS_database_EUROCORDEX_CNRM-CM5_RCA4.pdf

- DRIAS. (s.d.). *DRIAS : Simulations climatiques – IPSL2014 – IPSL-CM5A / WRF*. Récupéré sur DRIAS les futurs du climat: https://drias-prod.meteo.fr/serveur/simulations_climatiques/Documentations_Donnees/Fiches_tec hniques_Atmospherique/4-Jouzel2014/IPSL2014/Doc_DRIAS_database_IPSL2014-IPSL-CM4_WRF.pdf
- DRIAS. (s.d.). *La France au XXIe siècle*. Récupéré sur Drias les futurs du climat: <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/182>
- DRIAS. (s.d.). *La régionalisation*. Récupéré sur DRIAS les futurs du climat: <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/51>
- DRIAS. (s.d.). *Les méthodes de correction*. Récupéré sur [drias-climat.fr/accompagnement/section/52](http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/52)
- DRIAS. (s.d.). *Les scénarios RCP*. Récupéré sur Drias les futurs du climat: <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175>
- EURO-CORDEX. (s.d.). *EURO-CORDEX - Coordinated Downscaling Experiment - European Domain*. Récupéré sur EURO-CORDEX: <https://www.euro-cordex.net/index.php.en>
- GICC. (2011). *Les nouveaux scénarios utilisés par le GIEC: quelques clés pour comprendre - synthèse du séminaire du 23 novembre 2011, Paris*.
- GIEC. (2013). *Changements climatiques 2013 (AR5) - Les éléments scientifiques*.
- GIEC. (2015). *Changements climatiques 2014 (AR5) - Rapport de synthèse*.
- Habets, F. J. (2013). *Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in Northern France*. *Climatic Change*, Springer Verlag.
- Hausfather, Z. (2019, 12 21). *CMIP6: the next generation of climate models explained*. Récupéré sur CarbonBrief - Clear on climate: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
- Météo France. (2011). *Projet ClimSec - Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*.
- Météo France. (s.d.). *Les incertitudes dans les scénarios de changement climatique*. Récupéré sur Météo France: meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/les-incertitudes-dans-les-projections-climatiques
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. (2012). *Explore 2070 - Hydrologie souterraine - synthèse*.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (2012). *Synthèse du projet Explore 2070 - Hydrologie de surface*.
- WCRP. (s.d.). *WCRP Coupled Model Intercomparison Projet (CMIP)*. Récupéré sur WCIP World Climate Research Programme: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>

11 ANNEXE 1

Sources : (DGEC, 2014)

Dans le cas des simulations Aladin-Climat et WRF, les données SAFRAN (analyses météorologiques quotidiennes de température, précipitations et vent sur la France métropolitaines de Météo-France), disponibles sur une grille de 8x8 km², sont utilisées comme des observations de base (Quintana-Seguí et al., 2008). Les séries quotidiennes issues d'un point de grille du modèle sont corrigées en utilisant les données du point de grille le plus proche des analyses SAFRAN. La correction est appliquée selon la méthode de correction quantile/quantile (Déqué, 2007). Cette méthode 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 quotidienne on calcule les 99 centiles des séries. On calcule de même les 99 centiles des séries observées. Chaque variable est corrigée indépendamment et au pas de temps quotidien. 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. 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. Cette méthode ne se contente pas de corriger les biais des valeurs moyennes des variables climatiques de la simulation de référence, mais elle corrige également les biais de leurs distributions statistiques en « ramenant » les fonctions de distribution des variables simulées vers les fonctions de distribution des observations. Les statistiques des événements calculés à partir des variables corrigées de la simulation de référence sont donc très proches des statistiques des événements observés. Les mêmes corrections sont aussi appliquées aux résultats des scénarios du climat futur en faisant l'hypothèse que les biais - c'est à dire les écarts aux observations liés aux erreurs du modèle - sur les distributions statistiques restent inchangés entre le climat actuel et le climat futur. Cette correction permet ainsi d'augmenter le degré de confiance dans l'estimation des moyennes et des extrêmes climatiques tirés des simulations du climat futur.

Comme pour le précédent rapport, pour chaque saison, les situations météorologiques de chaque jour sont préalablement classées en quatre régimes de temps caractéristiques du domaine Atlantique Nord-Europe. La correction est ensuite appliquée par saison et par régime de temps. Cette façon de procéder garantit que les fonctions de distribution des variables climatiques simulées seront proches des fonctions de distribution des observations, non seulement pour chaque saison, mais aussi pour chacun des quatre régimes de temps considérés. Cependant, comme la fréquence d'occurrence des régimes de temps peut ne pas être parfaitement simulée par rapport aux observations, cela ne garantit pas que, après correction, les fonctions de distribution complètes simulées seront aussi proches que possible des fonctions de distribution complètes observées. Cet accord dépendra aussi du modèle considéré. Par contre, l'avantage de cette méthode est que l'hypothèse selon laquelle les biais sur les distributions statistiques restent inchangés entre le climat actuel et le climat futur, est dans ce cas faite pour un régime de temps donné. Cette hypothèse est plus satisfaisante dans la mesure où les biais des modèles sont dépendants des régimes de temps et que la fréquence des régimes est affectée par le changement climatique.

12 ANNEXE 2

Ensemble des modélisations disponibles sur le portail DRIAS !

Expérience	Institution	Modèle climatique Global *	Modèle climatique Régional **	Scénario CO2				Périodes disponibles	Nbr de variables	Nom de la simulation	Méthode de correction et de descente d'échelle	DATE	Commentaire
				Hist	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5						
CNRM2014	CNRM	ARPEGE	ALADIN52	X	X	X	X	1950-2005 ; 2006-2100	9	CNRM – ALADIN52	Quantile-Quantile	Mai 2013	
IPSL2014	CNRM	IPSL-CM4A	WRF	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	5	IPSL – WRF	Quantile-Quantile	Juillet 2014	
EUROCORDEX	CLMcom	CNRM-CM	CCLM4-8-17	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	CLMcom-CNRM-CM5-CCLM4-8-17	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	CLMcom	MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	CLMcom-MPI-ESM-LR-CCLM4-8-17	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	CNRM	CNRM-CM5	ALADIN53	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	3	CNRM-CNRM-CM5-ALADIN53	CDF-t	Septembre 2014	Retiré de la base DRIAS → problème détecté
EUROCORDEX	CSC	MPI-ESM-LR	REMO019	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	CSC-MPI-ESM-LR-REMO019	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	DMI	EC-EARTH	HIRHAM5	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	2	DMI-ICHEC-EC-EARTH-HIRHAM5	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	IPSL	IPSL-CM5A	WFR331F	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	5	IPSL-IPSL-CM5A-MR-WFR331F	CDF-t	Septembre 2014	4 + sfcwind
EUROCORDEX	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	KNMI-MetEir-EC-EARTH-RACMO22E	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	SMHI	CNRM-CM5	RCA4	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-CNRM-CM5-RCA4	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	SMHI	EC-EARTH	RCA4	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-ICHEC-EC-EARTH-RCA4	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	SMHI	IPSL-CM5A	RCA4	X			X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-IPSL-CM5A-MR-RCA4	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	SMHI	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	X		X	X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-MOHC-HadGEM2-ES-RCA4	CDF-t	Septembre 2014	
EUROCORDEX	SMHI	MPI-ESM-LR	RCA4	X			X	1971-2005 ; 2006-2100	4	SMHI-MPI-ESM-LR-RCA4	CDF-t	Septembre 2014	

13 ANNEXE 3

14 ANNEXE 4