

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

Rapport Phase 2 Etape 4B 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.safege.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 4B Détermination des scénarios climatiques à 2030 et 2050
Date	03/08/2020

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	DE DREUZY Mathilde	RIZZA Jean-Philippe	29 juillet 2020	Version initiale

Sommaire

1	.....Glossaire et liste d'acronymes.....	3
2	.....Préambule	7
3	.....Choix des deux scénarios à retenir	9
3.1	Rappel de la présentation des deux modèles CNRM/IPSL.....	9
3.2	Présentation des données du portail DRIAS de température journalière et de précipitation journalière extraites pour les deux modèles CNRM/IPSL.....	12
3.3	Un préalable possible : la correction de biais	17
3.4	Autre approche alternative : exploitation des situations de référence.....	22
3.5	Présentation des évolutions des deux paramètres température journalière et précipitation journalière jusqu'à 2050 + 15 ans	23
3.6	Calcul de la température moyenne mensuelle et de la précipitation moyenne mensuelle pour les deux années de référence 2030 (+/-15 ans) et 2050 (+/-15 ans) conformément aux recommandations des spécialistes du changement climatique 25	
3.7	Choix et justifications des 2 scénarios climatiques à retenir	26
4	.....Calcul de l'évapotranspiration	29
4.1	Présentation des formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) 29	
4.1.1	Les formules empiriques et semi-empiriques.....	29
4.1.2	Les formules physiques.....	31
4.1.3	Modèles simplifiés	32
4.1.4	Choix de la formule à retenir	32
4.2	Calcul de l'ETP Thornthwaite à partir des données de température.....	33
4.3	Incidence sur le calcul de la recharge à partir de l'ETP calculée de Thornthwaite comparée à la recharge calculée à partir de l'ETP de Penman.....	34
5	.....Recommandations et conclusion.....	37
6	.....Suite de l'étude à donner	39
6.1	Mise à jour de la recharge.....	39
6.2	Mise à jour des usages à l'aide de l'étude socio-économique	39
6.3	Mise à jour des indicateurs pour les différents horizons et scénarios.....	39
7	.....Références	41

Tables des illustrations

Figure 1 : Simulations CNRM - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales	12
Figure 2 : Simulations IPSL - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales	12
Figure 3 : Points de la grille SAFRAN sélectionnés pour la comparaison des périodes de référence observée et calculée	13
Figure 4 : Polygones de Voronoï associés aux stations pluviométriques (cf Rapport de phase 1)	14
Figure 5 : Polygones de Voronoï associés aux stations ETP (cf Rapport de phase 1)	14
Figure 6 : Comparaison des moyennes de température mensuelle de différentes séries de stations Météo France	18
Figure 7 : Comparaison des données de pluviométrie mensuelle de différentes séries de stations Météo France	19
Figure 8 : Comparaison de températures moyennes mensuelles sur le bassin Artois-Picardie pour les modèles CNRM et IPSL sur la période 1981-2005	21
Figure 9 : Comparaison de précipitations moyennes mensuelles sur le bassin Artois-Picardie pour les modèles CNRM et IPSL sur la période 1981-2005	22
Figure 10 : Evolution des paramètres pluviométrie et température sur la période 2006-2065, pour les modèles IPSL et CNRM et les scénarios RCP4.5 et 8.5	23
Figure 11 : Comparaison des températures journalières moyennes (en haut) et des pluviométries annuelles moyennes (en bas) pour les quatre scénarios de changement climatique sélectionnés	24
Figure 12 : Comparaison des différents scénarios à horizon 2030 selon les moyennes mensuelles de précipitation et température, sans biais (losange) et avec biais (rond)	25
Figure 13 : Comparaison des différents scénarios à horizon 2050 selon les moyennes mensuelles de précipitation et température, sans biais (losange) et avec biais (rond)	25
Figure 14 : Moyennes mensuelles interannuelles sur la période 1981-2010 calculée selon les formules de Penman (Météo France ou de Thornthwaite)	33

Table des tableaux

Tableau 1 : Moyennes mensuelles interannuelles de température et pluviométrie par station Météo France	17
Tableau 2 : Biais mensuels moyen calculés pour les deux modèles	20
Tableau 3 : Comparaison des scénarios aux moyennes mensuelles annualisées des stations Météo France	26
Tableau 4 : Conclusion sur le choix des scénarios proposés	27
Tableau 5 : Biais calculés entre les ETP de Penman et Thornthwaite et pourcentages de différence	33
Tableau 6 : Comparaison des valeurs de recharge calculées à partir de l'ETP de Penman et de l'ETP de Thornthwaite	34

1 GLOSSAIRE ET LISTE D'ACRONYMES

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

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

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 WCGM (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 WRCPPour 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

À la suite des décisions du comité de pilotage, le présent rapport Phase 2 Etape 4B a pour objectifs :

- D'identifier les 2 scénarios à retenir, le plus pessimiste et le plus optimiste pour les horizons 2030 et 2050, parmi les 4 suivants : RCP4.5/CNRM, RCP4.5/IPSL, RCP8.5/CNRM et RCP8.5/IPSL
- De présenter les formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et valider la formule à retenir pour calculer les projections d'ETP aux horizons 2030 et 2050

Le présent rapport est structuré de la manière suivante :

- Présentation des données du portail DRIAS de température journalière et de précipitation journalière extraites pour les deux modèles CNRM/IPSL.
- Présentation des évolutions des deux paramètres température journalière et précipitation annuelle jusqu'à 2050 + 15 ans
- Calcul de la température moyenne mensuelle et de la précipitation moyenne mensuelle pour les deux années de référence 2030 (+/-15 ans) et 2050 (+/-15 ans) conformément aux recommandations des spécialistes du changement climatique.
- Présentation des formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP).
- Recommandations et conclusions pour les 2 scénarios et la formule de calcul de l'ETP à retenir.

3 CHOIX DES DEUX SCENARIOS A RETENIR

3.1 Rappel de la présentation des deux modèles CNRM/IPSL

Sources : (DRIAS), (Boé J. , 2014), (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GICC, 2011)

Le rapport de Phase 2 – Etape 4A présente de façon détaillée les différents modèles climatiques existants. Cette partie résume les informations disponibles pour les modèles CNRM et IPSL accessibles sur la plateforme DRIAS.

Ces deux modèles peuvent être utilisés en tant que modèles climatiques régionaux : modèles climatiques à résolution horizontale élevée (typiquement 10 – 50 km), obtenus par désagrégation¹ 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 modèles climatiques globaux.

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) : 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 8 km 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.
- IPSL-CM5 (Institut Pierre Simon Laplace) : 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 8 km 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.

¹ Ou encore descente d'échelle ou régionalisation

Les versions 2014 de ces modèles sont disponibles sur le portail internet Drias (CNRM2014 et IPSL2014).

Information sur le portail DRIAS : 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 et IPSL2014, la plateforme DRIAS contient les éléments suivants :

- Simulations journalières ou mensuelles sur la période de référence² : 1971-2005 (données IPSL2014) et 1950-2005 (données CNRM2014) ;
- Simulations journalières ou mensuelles sur la période de projection : 2006-2100.

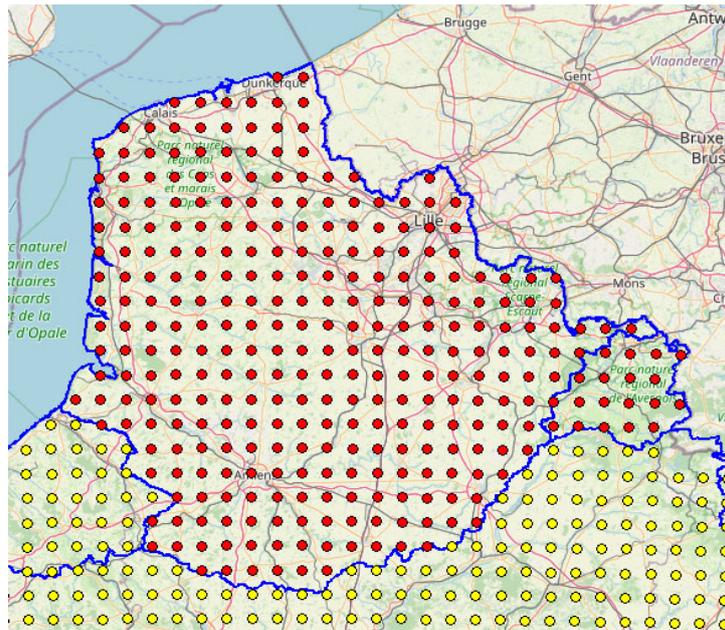
Plus précisément, on peut recenser les éléments suivants :

- Simulations CNRM2014 :
 - ▷ Les scénarios disponibles sont les suivants :
 - RCP2.6,
 - RCP4.5,
 - RCP8.5,
 - ▷ Les variables extraites sont les suivantes (extraction des simulations mensuelles) :
 - Température moyenne journalière (°C)
 - Température minimale journalière (°C)
 - Température maximale journalière (°C)
 - Précipitations journalières moyennes [mm],
 - Cumul des précipitations mensuelles [mm] ;
- Simulations IPSL2014 :
 - ▷ Les scénarios disponibles sont les suivants :
 - RCP4.5,
 - RCP8.5,
 - ▷ Les variables extraites sont les suivantes (extraction des simulations mensuelles) :
 - Température moyenne journalière (°C)

² 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.

- Température minimale journalière (°C)
- Température maximale journalière (°C)
- Précipitations journalières moyennes [mm],
- Cumul des précipitations mensuelles [mm].

Les extractions peuvent être réalisées au niveau des points de la grille SAFRAN, soit une maille de 8*8 km, 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).



En chacun de ces points de grille, il est possible d'extraire les variables d'intérêt sur des intervalles de temps choisis (par exemple 2015 – 2045 pour l'horizon 2030).

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*12 km) 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*12 km) 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.

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 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km)

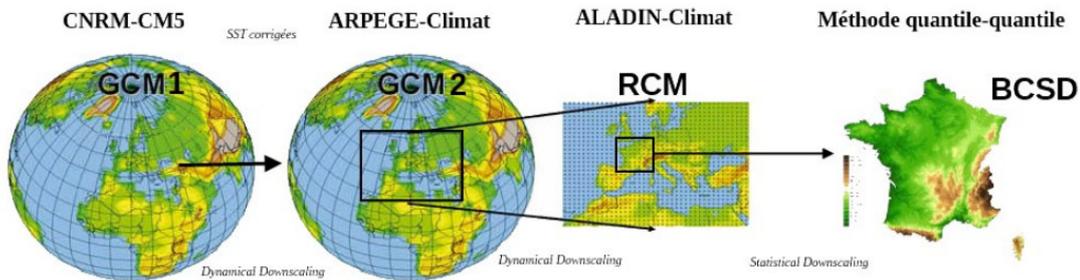


Figure 1 : Simulations CNRM - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.

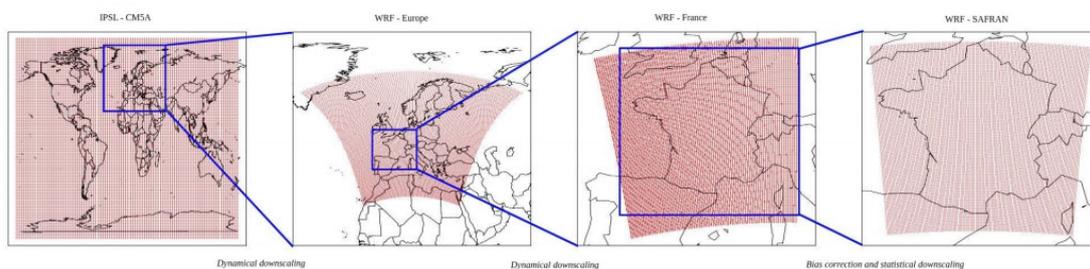


Figure 2 : Simulations IPSL - Les étapes de descente d'échelle depuis la modélisation climatique globale à régionale jusqu'à la désagrégation aux petites échelles spatiales.

3.2 Présentation des données du portail DRIAS de température journalière et de précipitation journalière extraites pour les deux modèles CNRM/IPSL

Les données météorologiques de la plateforme DRIAS sont des données de forçage essentielles pour les différentes projections. La stratégie suivante est proposée, pour rester en cohérence avec l'approche retenue pour l'évaluation des pluies et de l'ETP sur chaque secteur homogène pour la période observée :

- Pour chaque scénario et chaque horizon, extraction des séries mensuelles de pluies et de températures :
 - Pour les périodes **2015-2045** et **2035-2065**,
 - Aux points de grille DRIAS les plus proches des stations d'observations **météorologiques retenues pour caractériser la situation actuelle**. Pour rappel, 20 stations Météo France ont été sélectionnées lors du calcul de la recharge de la phase 1. Dans un souci de cohérence et de justesse des comparaisons, les données ont été extraites sur les 20 points de la grille SAFRAN, les plus proches de ces stations essentielles (Figure 3).

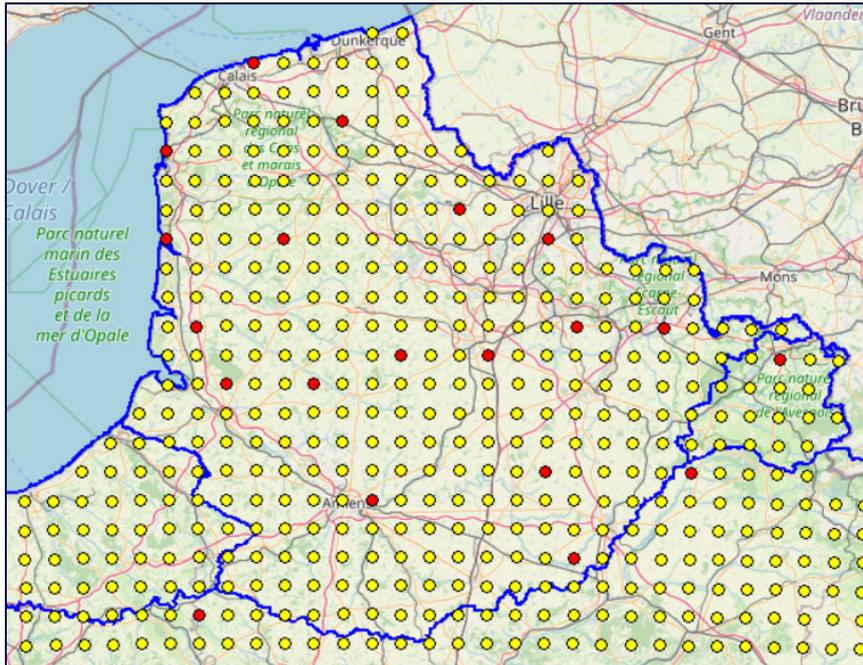


Figure 3 : Points de la grille SAFRAN sélectionnés pour la comparaison des périodes de référence observée et calculée

- Correction de biais éventuelle (voir paragraphe suivant),
- Calcul de l'ETP moyenne mensuelle à partir de la formule de Thornthwaite (voir ci-après),
- Affectation des pluies et de l'ETP sur chaque secteur homogène à partir des polygones de Voronoï utilisés pour les observations et présentés sur la Figure 4 (Pluie) et la Figure 5 (ETP),

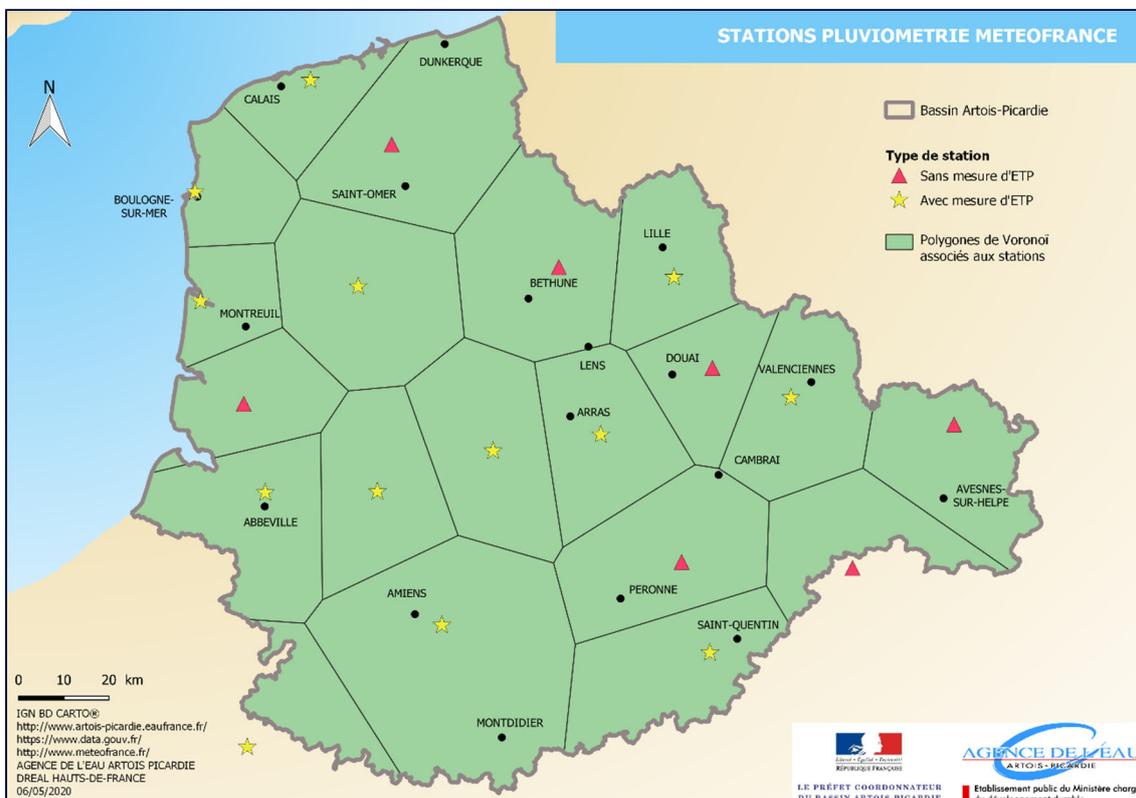


Figure 4 : Polygones de Voronoï associés aux stations pluviométriques (cf Rapport de phase 1)

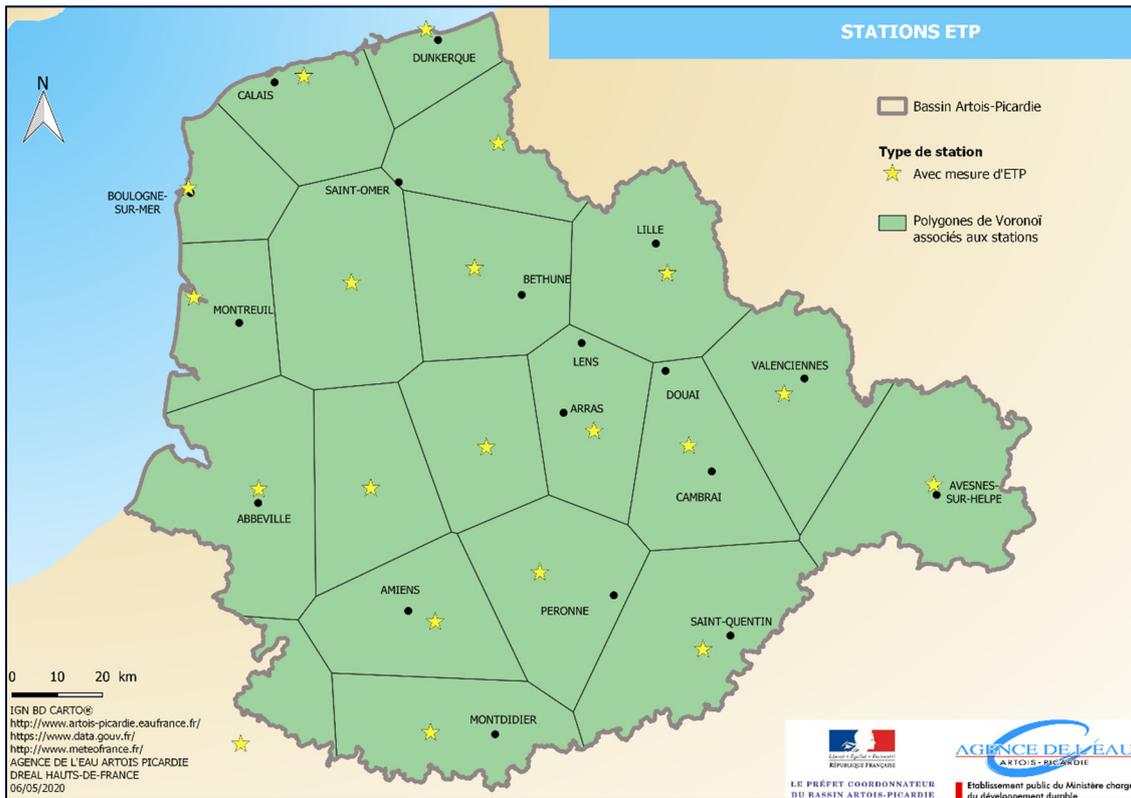


Figure 5 : Polygones de Voronoï associés aux stations ETP (cf Rapport de phase 1)

- Sur chaque secteur, on peut alors comparer les précipitations et l'ETP moyennes annuelles et mensuelles par rapport aux observations moyennes sur la même période que les fiches climatiques.

Remarque :

- La méthode proposée a pour objectif d'être la plus cohérente possible avec la méthode utilisée pour répartir les observations sur le territoire pour la situation actuelle.
- Une autre solution possible est d'extraire les séries mensuelles de la base DRIAS sur un plus grand nombre de points de la grille de calcul puis d'en faire la moyenne sur chaque secteur homogène. Cette approche nous semble cependant introduire un biais dans la comparaison des projections avec la situation actuelle.

Rapport Phase 2 Etape 4B Détermination des scénarios climatiques à 2030 et 2050
Analyse de vulnérabilité et gestion quantitative de la ressource en eau sur le bassin Artois-Picardie

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
				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
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
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

3.3 Un préalable possible : la correction de biais

Les modèles climatiques sont par nature imparfaits. Leur capacité à reproduire les observations est entachée d'un certain niveau de biais, qui se traduit par un écart entre l'observation et sa reconstitution par le modèle.

Il est important de corriger ce biais, qui, en termes de projections climatiques, peut être significatif et d'une amplitude assez voisine de celle des impacts que l'on cherche à mettre en évidence.

Aussi, il nous semble intéressant de proposer ici une méthode de correction des biais des modèles climatiques. Cette méthode repose sur la démarche simple suivante :

- Mise en évidence des biais des modèles CNRM et IPSL :
 - A partir des fiches climatiques mises à disposition par Météo France, on peut disposer des moyennes de précipitations et de températures sur une vingtaine de postes d'observation « essentiels » du bassin Artois-Picardie, sur la période 1981-2010.

Ces stations Météo France correspondent à celles utilisées dans le rapport de phase 1. Il faut toutefois noter que les données mensuelles disponibles pour chaque station peuvent couvrir des périodes légèrement différentes. Le tableau ci-dessous récapitule ces données :

Tableau 1 : Moyennes mensuelles interannuelles de température et pluviométrie par station Météo France

Code de la station	Nom de la station	Moyennes de température et pluviométrie calculées sur la période
80001001	ABBEVILLE	1981-2010
80379002	AMIENS-GLISY	1988-2010
62873001	ARRAS-WANCOURT	1987-2010
80086002	BERNAVILLE	1988-2010
62160001	BOULOGNE-SUR-MER	1981-2010
62548002	CALAIS-MARCK	1991-2010
80271002	EPEHY	1988-2010
62826001	LE TOUQUET-PARIS PLAGE	1981-2010
59343001	LILLE-LESQUIN	1981-2010
59392001	MAUBEUGE	1985-2008
59456001	PECQUENCOURT	1981-2010
62685001	RADINGHEM	1989-2010
62706001	RICHEBOURG	1990-2008
2320001	SAINT-QUENTIN – FONTAINE-LES-CLERCS	1981-2010
62784001	SAULTY	1988-2010
59606004	VALENCIENNES	1987-2010
80815002	VRON	1988-2010
59647001	WATTEN	1981-2010
60566001	SAINT-ARNOULT	2001-2010

La station Saint-Arnoult est celle présentant la plage de données la plus restreinte. Malgré les disparités entre les différentes périodes de mesure, il a été décidé de conserver l'ensemble de ces stations dans les étapes suivantes de comparaison des données mensuelles observées et calculées via les différents modèles. En effet, comme le montrent les graphes ci-dessous, les différences de températures et précipitations mensuelles sont faibles entre les séries de stations sélectionnées. Par ailleurs, conserver l'ensemble des stations permet de couvrir l'ensemble du territoire plus efficacement et donc prendre en compte un maximum de variations locales du territoire.

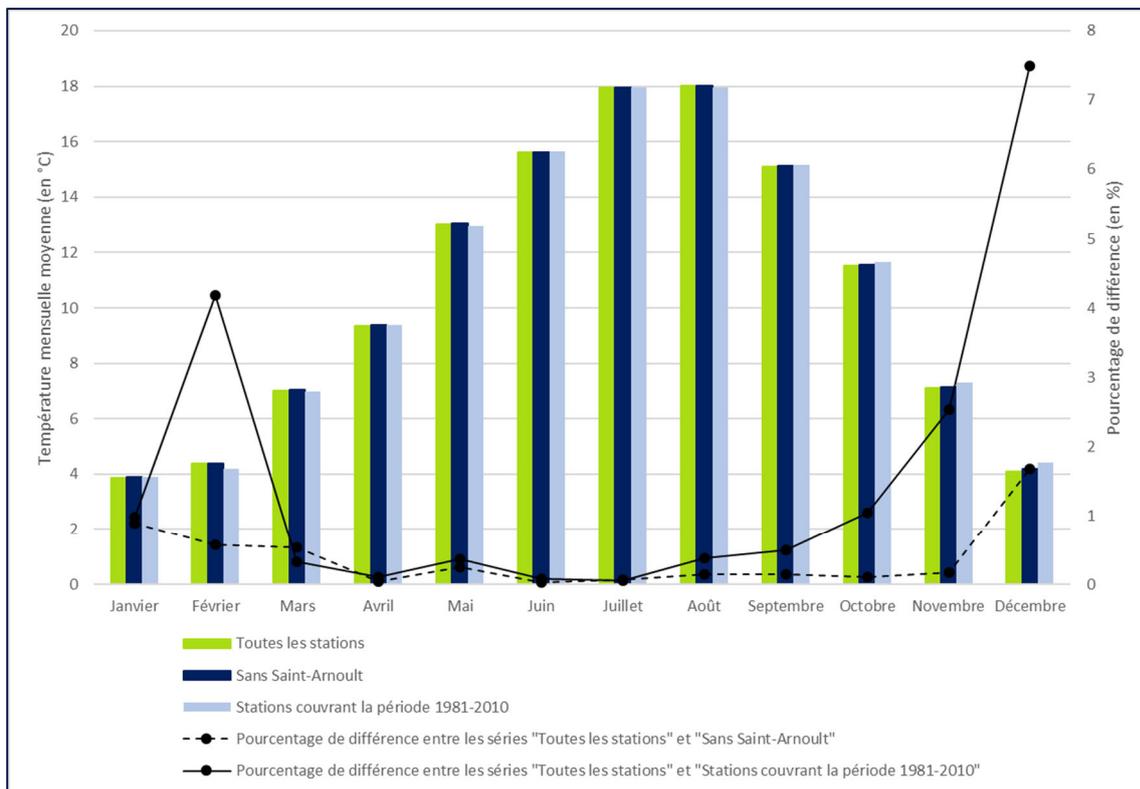


Figure 6 : Comparaison des moyennes de température mensuelle de différentes séries de stations Météo France

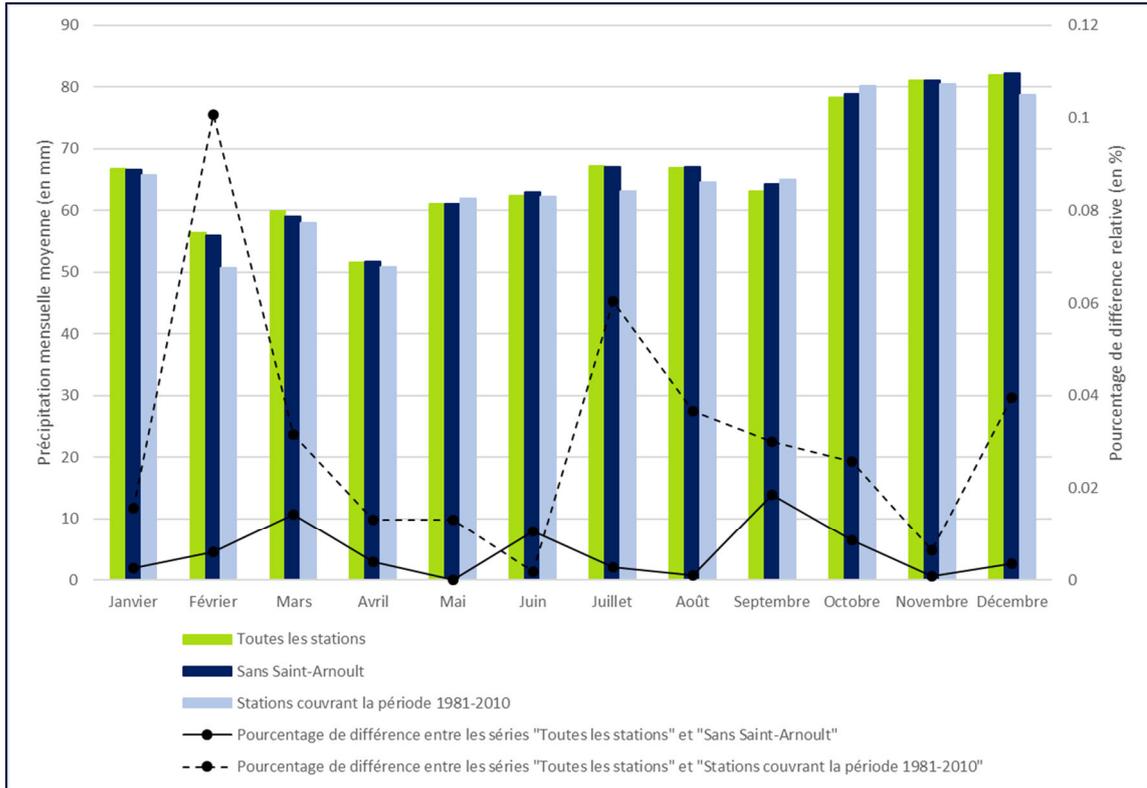


Figure 7 : Comparaison des données de pluviométrie mensuelle de différentes séries de stations Météo France

- Les périodes de référence des modèles climatiques disponibles sur la plateforme DRIAS s'étendent de 1950 à 2005 (modèle CNRM) ou 1971-2005 (modèle IPSL). Au-delà de 2005, les données disponibles sont des « scénarios », intégrant un forçage radiatif.
- Pour chacun des deux modèles nous pouvons calculer les moyennes de précipitations et températures mensuelles sur la période **1981-2005** aux points de grilles les plus proches des stations essentielles du bassin Artois-Picardie.
- Chaque valeur est alors comparée mois par mois avec la moyenne correspondante issue de la fiche climatique, calculée sur la période 1981-2010. Mois par mois, on peut donc calculer un **biais mensuel moyen (ou anomalie)** du modèle considéré :
 - ▷ $\text{Biais}(T)_{(\text{Mois}, \text{modèle})} = T_{\text{modèle}}(\text{Mois}, \text{modèle}) - T_{\text{observée}}(\text{Mois})$
 - ▷ $\text{Biais}(P)_{(\text{Mois}, \text{modèle})} = P_{\text{modèle}}(\text{Mois}, \text{modèle}) - P_{\text{observée}}(\text{Mois})$
 - ▷ Exemple : « l'anomalie moyenne de température du modèle X au mois de janvier est -0.5°C » signifie que le modèle X a tendance à sous-estimer les températures du mois de janvier de 0.5°C en moyenne.
 - ▷ Les biais calculés pour les données de pluviométrie et température sont les suivants :

Tableau 2 : Biais mensuels moyen calculés pour les deux modèles

	CNRM		IPSL	
	Biais de Température (en °C)	Biais de Précipitation (en mm)	Biais de Température (en °C)	Biais de Précipitation (en mm)
Janvier	-1.08	3.21	-0.47	8.66
Février	-0.72	1.42	-1.53	-7.18
Mars	-0.92	-6.87	-0.86	-13.01
Avril	-0.71	-1.44	-0.76	-2.33
Mai	-1.29	0.62	-1.75	7.87
Juin	-0.74	14.52	-1.71	14.05
Juillet	-0.73	-8.20	-0.51	-3.19
Août	-0.67	-19.89	-0.83	-18.44
Septembre	-0.54	6.36	-1.01	-1.95
Octobre	-0.81	3.74	-1.22	-10.26
Novembre	0.01	-6.27	0.48	11.82
Décembre	0.23	-20.33	0.47	-7.59

- Correction de biais des séries climatiques mensuelles :
 - On part du principe que le biais moyen d'un modèle constaté sur la période d'observation est stable dans le futur.
 - On peut alors corriger les séries mensuelles DRIAS extraites sur les périodes 2015-2045 et 2035-2065 pour diminuer l'influence du biais de modèle. On considère pour ce faire :
 - ▷ $T_{\text{corrigée}}(\text{mois, modèle}) = T_{\text{DRIAS}}(\text{mois, modèle}) - \text{Biais}(T)_{(\text{Mois, modèle})}$
 - ▷ $P_{\text{corrigée}}(\text{mois, modèle}) = P_{\text{DRIAS}}(\text{mois, modèle}) - \text{Biais}(P)_{(\text{Mois, modèle})}$

Remarque : avant toute décision sur le fait d'appliquer cette correction de biais, il convient de préciser qu'elle est elle-même entachée d'approximations, en particulier :

- Le calcul des biais se fait sur des périodes légèrement différentes (1981-2005 pour les modèle vs 1981-2010 pour les observations). Les erreurs induites devraient cependant être marginales.
- La persistance du biais dans le temps (hypothèse forte mais classique),
- Le fait que les biais ne pourront être estimés que sur une vingtaine de points, et qu'ils seront donc répartis géographiquement sur les zones homogènes de manière sommaire (dans la pratique : on considèrera qu'une zone homogène sera soumise aux biais issus du point de contrôle le plus proche...).
- Pour se convaincre de l'intérêt de la correction de biais, il est utile de se reporter aux Figure 8 et Figure 9 qui permettent de comparer, **pour la période de référence réduite 1981-2005**, les températures et précipitations moyennes mensuelles sur le bassin Artois-Picardie fournies par les modèles IPSL et CNRM. Les profils obtenus, sensiblement différents en particulier pour les précipitations, signifient que les écarts par rapports aux observations peuvent être significatifs, ce qui légitime la correction de biais proposée.

Une distinction est à faire entre les légendes :

- « Relevés aux stations Météo France » correspondant aux données de température enregistrées sur les 20 stations Météo France et utilisées lors du calcul de recharge lors de la phase 1. Ces données sont mensualisées pour la période 1981-2010 (voir Tableau 1 pour plus de précision sur les données des stations) et moyennées sur les 20 stations afin d'obtenir des valeurs mensuelles à l'échelle du bassin ;
- « REF_1981-2005 » correspondant aux simulations des modèles CNRM et IPSL pour la période historique étudiée. Cette simulation a été réalisée pour 20 points sélectionnés sur la grille SAFRAN et les plus proches des stations Météo France citées ci-dessus (voir Figure 3). Ce calcul de moyennes mensuelles interannuelles sur 20 stations permet donc une comparaison avec les moyennes observées par Météo France. La différence de 5 ans sur la période d'étude ne devrait avoir qu'un impact minime sur ces moyennes.

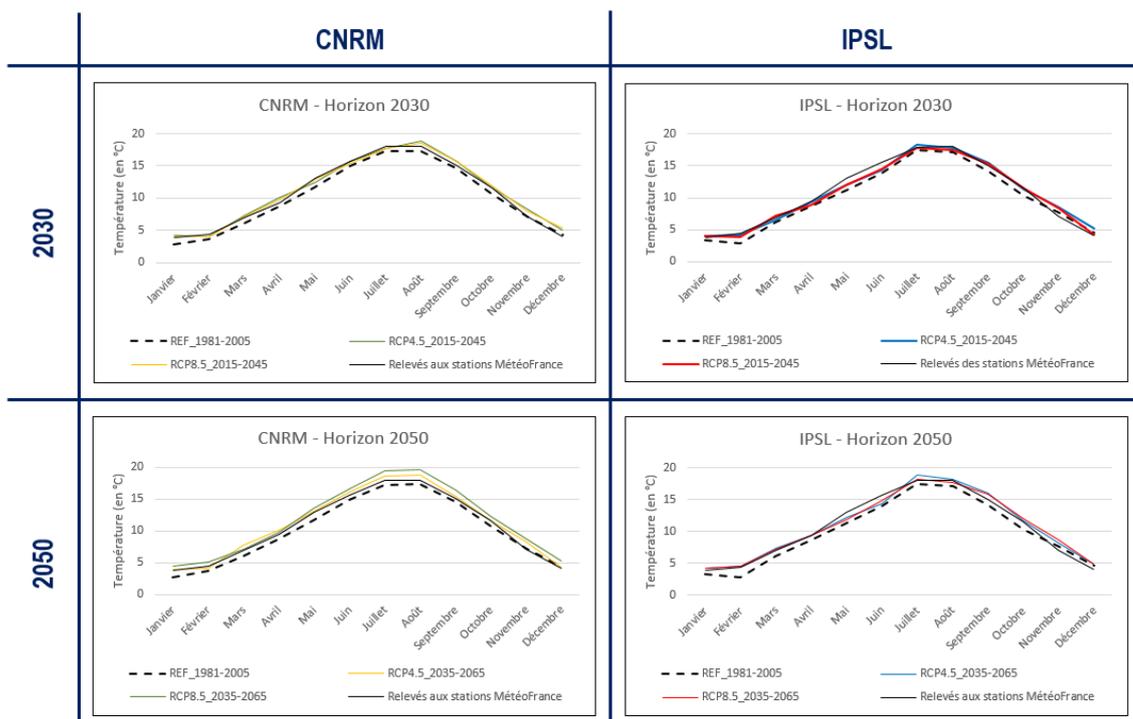


Figure 8 : Comparaison de températures moyennes mensuelles sur le bassin Artois-Picardie pour les modèles CNRM et IPSL sur la période 1981-2005

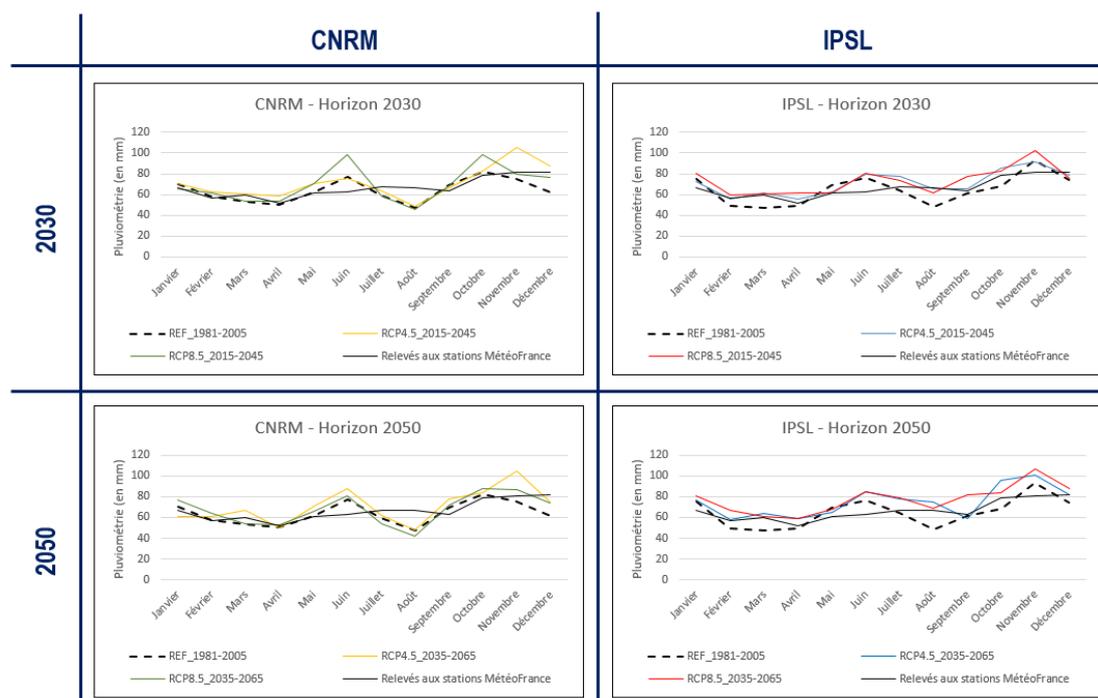


Figure 9 : Comparaison de précipitations moyennes mensuelles sur le bassin Artois-Picardie pour les modèles CNRM et IPSL sur la période 1981-2005

3.4 Autre approche alternative : exploitation des situations de référence

Dans la même optique de ne pas comparer directement des calculs issus de résultats de modèles de projection avec des calculs de situation « actuelle » fondés sur des observations, une autre approche est possible : il s'agit de recalculer une situation « pseudoactuelle » à partir des résultats des situations de référence des modèles météorologiques. Dans la pratique, en prenant l'exemple du calcul de la recharge :

- On extrait les séries de pluie et de températures mensuelles de la base DRIAS pour les situations de référence (1971-2005) des modèles IPSL et CNRM,
- On recalcule la recharge sur la période 1971-2005 à partir des situations de ces données. On obtient une recharge « de référence ».
- On peut alors estimer directement l'impact du changement climatique sur la recharge par différence $R_{projetée} - R_{référence}$. **Si la recharge projetée « absolue » comporte des biais résultants de ceux des modèles, la variation relative de la recharge par rapport à la situation de référence peut être considérée comme robuste.**
- Dans la pratique, on peut calculer une évolution moyenne mensuelle de la recharge projetée (+ ou - X% par rapport à la situation de référence pour chaque mois), puis en appliquant ce pourcentage d'évolution à la recharge réelle, obtenir un profil de recharge « projeté ».

L'un des inconvénients de cette méthode est qu'elle nous oblige à recalculer la référence à partir de résultats de modèles antérieurs à 2005, alors que nos calculs de l'« état actuel » s'appuient sur des plages de données plus larges (selon la durée de fonctionnement des stations).

3.5 Présentation des évolutions des deux paramètres température journalière et précipitation journalière jusqu'à 2050 + 15 ans

Source : (DRIAS)

Une extraction des données de température (en °C) et de précipitations (en mm) a été réalisée pour les deux scénarios retenus (RCP4.5 en tant que scénario optimiste et RCP8.5 en tant que pessimiste), sur l'ensemble de la période 2006-2065. Cette extraction permet une comparaison des évolutions des paramètres pluviométrie et température sur l'ensemble de la période souhaitée pour cette étude.

La figure ci-dessous retrace pour chaque scénario les évolutions estimées par les modèles IPSL et CNRM et permet une première qualification des quatre couples modèle/scénario qui seront conservés par la suite (le plus optimiste et le plus pessimiste aux horizons 2030 et 2050). Afin d'obtenir des résultats plus parlants, une moyenne annuelle des précipitations a été représentée.

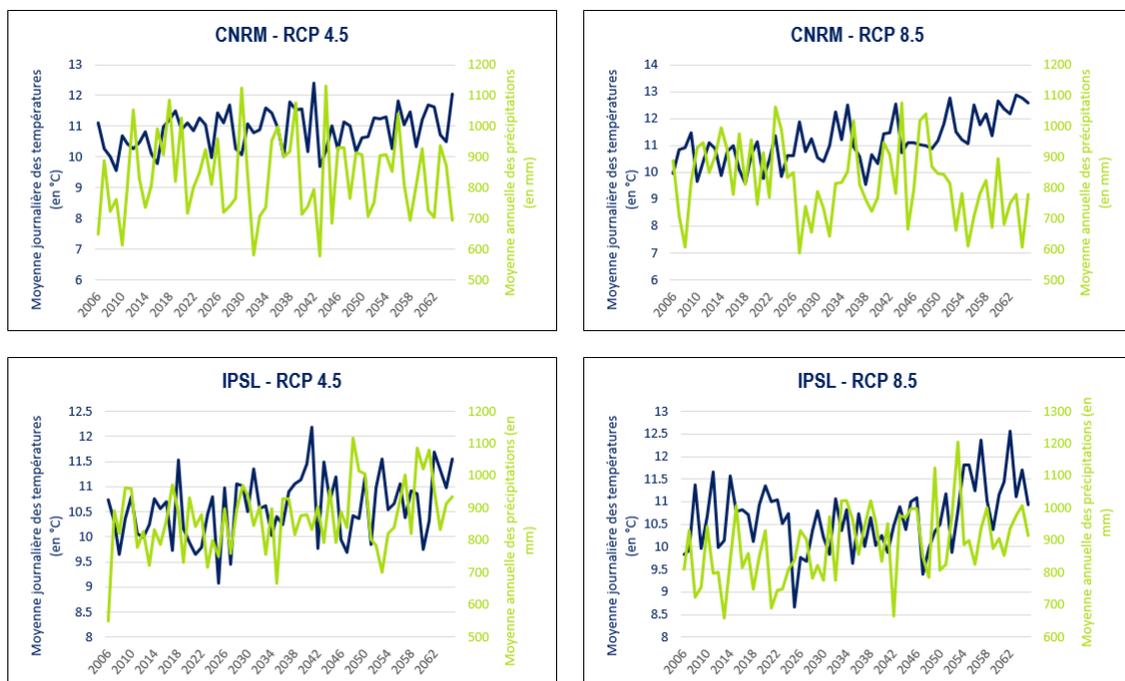


Figure 10 : Evolution des paramètres pluviométrie et température sur la période 2006-2065, pour les modèles IPSL et CNRM et les scénarios RCP4.5 et 8.5

Ces graphiques font ressortir les caractéristiques suivantes :

- CNRM – RCP4.5 : Une très légère augmentation de la température est observée entre 2006 et 2065. Bien que marquée par de fortes variations interannuelles, aucune tendance remarquable ne peut être attribuée à la pluviométrie.
- CNRM – RCP8.5 : Ce scénario, plus pessimiste, met en évidence une augmentation de la température moyenne journalière ainsi qu'une baisse de la pluviométrie annuelle. Ces tendances se renforcent vers 2050.
- IPSL – RCP4.5 : De même que le scénario CNRM – RCP4.5, celui-ci ne présente pas de tendance particulièrement marquée sur les soixante prochaines années. Une légère hausse des deux paramètres se fait toutefois sentir sur la fin de la période d'étude.
- IPSL – RCP8.5 : Ce scénario illustre une tendance à la hausse de la pluviométrie et de la température à partir de 2050.

Ces scénarios s'accordent à dire que les variations interannuelles resteront très prononcées pour les paramètres pluviométrie et température. Les tendances sont donc à considérer dans leur globalité. Cette observation confirme donc les recommandations faites par le CNRS et Météo France concernant l'utilisation de données de 30 ans pour l'estimation des températures et précipitations aux horizons 2030 et 2050.

La Figure ci-dessous regroupe sur un même graphe les données de température journalière moyenne pour les quatre couples modèle/scénario étudiés (de même pour la pluviométrie annuelle).

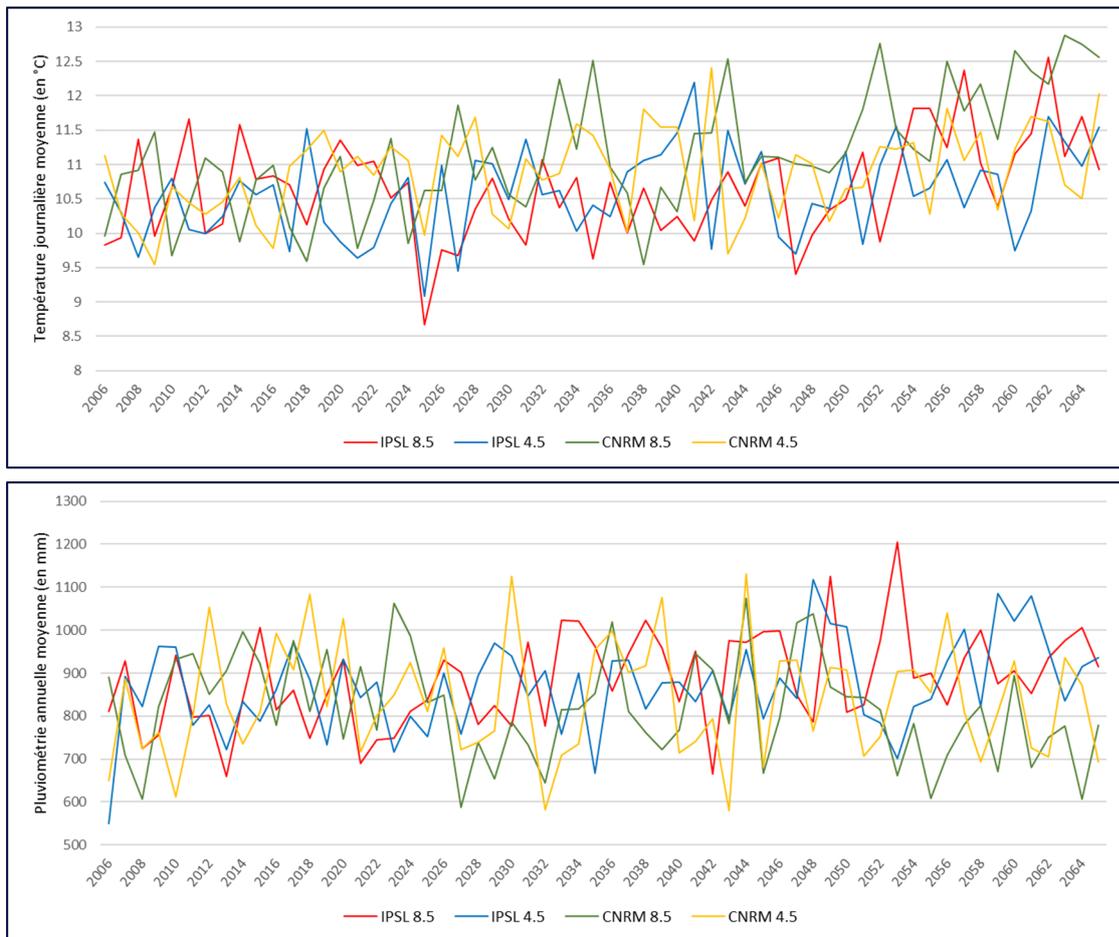


Figure 11 : Comparaison des températures journalières moyennes (en haut) et des pluviométries annuelles moyennes (en bas) pour les quatre scénarios de changement climatique sélectionnés

Comme vu ci-dessus, les différenciations sont donc peu marquées si ce n'est concernant le scénario CNRM – RCP8.5 qui se détache vers 2050 avec une hausse des températures et une baisse des précipitations plus marquées.

3.6 Calcul de la température moyenne mensuelle et de la précipitation moyenne mensuelle pour les deux années de référence 2030 (+/-15 ans) et 2050 (+/-15 ans) conformément aux recommandations des spécialistes du changement climatique

Les variations mensuelles des différents scénarios sont données dans les Figure 8 et Figure 9 ci-dessus.

Pour une comparaison plus globale et visuelle, les moyennes mensuelles de température et pluviométrie aux horizons 2030 et 2050 ont été calculées. Il s'agit donc des moyennes des données mensuelles sur les périodes 2015-2045 (pour l'horizon 2030) et 2035-2065 (pour l'horizon 2050). Les moyennes sans prise en compte du biais sont représentées par les symboles de losange ; celles avec prise en compte du biais (calculé Tableau 2) sont représentées par des cercles.

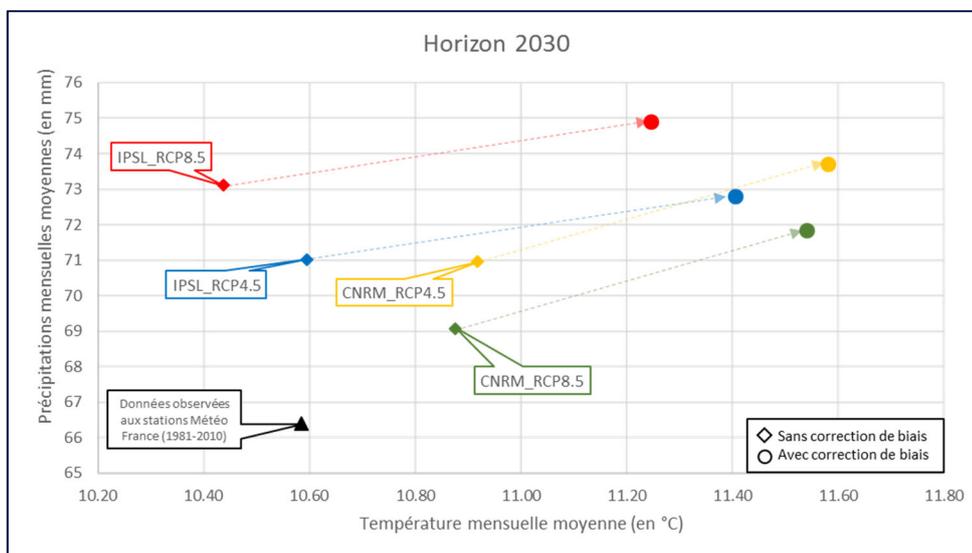


Figure 12 : Comparaison des différents scénarios à horizon 2030 selon les moyennes mensuelles de précipitation et température, sans biais (losange) et avec biais (rond)

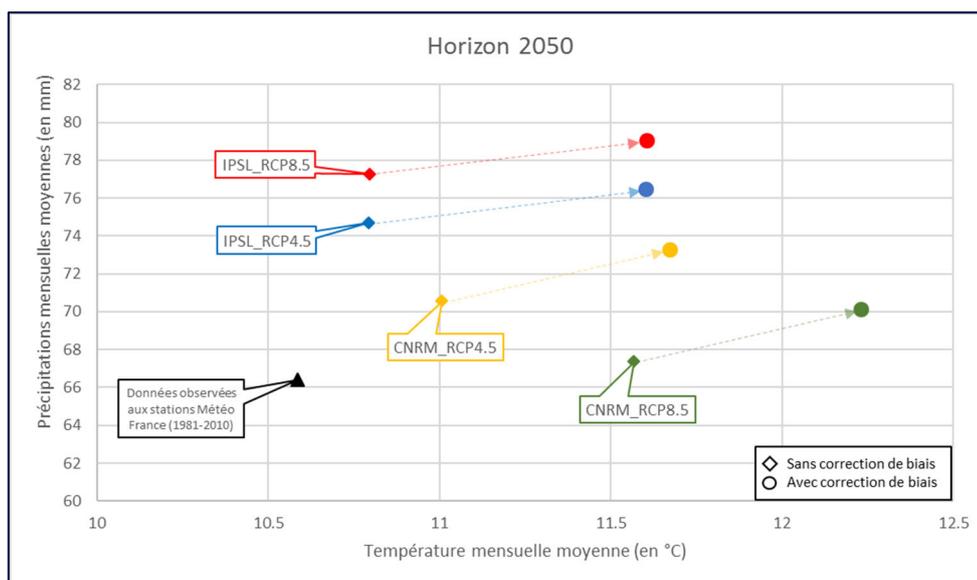


Figure 13 : Comparaison des différents scénarios à horizon 2050 selon les moyennes mensuelles de précipitation et température, sans biais (losange) et avec biais (rond)

La prise en compte du biais engendre un changement dans la distribution des précipitations et températures des scénarios traduisant, en règle générale, une sous-estimation des données DRIAS vis-à-vis des données réellement observées.

3.7 Choix et justifications des 2 scénarios climatiques à retenir

Les horizons 2030 et 2050 n'étant pas assez éloignés dans le temps, il est parfois difficile de distinguer les scénarios réellement caractérisables en tant que scénarios optimistes et pessimistes.

Les différents graphiques et calculs réalisés pour ce rapport présentent toutefois les éléments suivants :

Tableau 3 : Comparaison des scénarios aux moyennes mensuelles annualisées des stations Météo France

Horizon	Scénario	Commentaires <i>(les comparaisons sont faites avec les données observées par les stations Météo France sur la période 1981-2010)</i>
2030	CNRM / RCP4.5	Sans correction de biais : augmentations mensuelles d'environ 0,3°C et 5 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 1°C et 7 mm.
	CNRM / RCP8.5	Sans correction de biais : augmentations mensuelles d'environ 1°C et 1 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 1°C et 5,5 mm.
	IPSL / RCP4.5	Sans correction de biais : pas d'augmentation de la température et augmentation mensuelle des précipitations de 5 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 0,8°C et 6,5 mm.
	IPSL / RCP8.5	Sans correction de biais : baisse de 0,15°C et augmentation mensuelle 7 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 0,7°C et 9 mm.
2050	CNRM / RCP4.5	Sans correction de biais : augmentations mensuelles d'environ 0,4°C et 4 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 1°C et 7 mm.
	CNRM / RCP8.5	Sans correction de biais : augmentations mensuelles d'environ 1°C et 1 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 1,5°C et 4 mm.
	IPSL / RCP4.5	Sans correction de biais : augmentations mensuelles d'environ 0,2°C et 8 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 1°C et 10 mm.
	IPSL / RCP8.5	Sans correction de biais : augmentations mensuelles d'environ 0,2°C et 11 mm ; Avec correction de biais : augmentations mensuelles de 1°C et 13 mm.

Compte-tenu de ces observations :

- Les données extraites de DRIAS semblent être, en général, sous-estimées lorsque l'on compare les moyennes avec et sans biais inclus.
- A horizon 2030, les scénarios CNRM / RCP4.5 et IPSL / RCP4.5 présentent peu de différences après application du biais. L'augmentation de température est toutefois légèrement inférieure pour le scénario IPSL / RCP4.5 et s'accompagne d'une augmentation de pluviométrie supérieure de 1,5 mm environ. Par ailleurs, comme le montre la Figure 10, les variations interannuelles de ce scénario semblent moins prononcées. Il peut donc être considéré comme un scénario optimiste favorable à horizon 2030. Concernant les scénarios CNRM / RCP8.5 et IPSL / RCP8.5, bien que les différences post-correction de biais soient également peu marquées, le CNRM /RCP8.5 apparaît comme le plus pessimiste avec une augmentation moins importante des précipitations mensuelles pour une hausse des températures supérieures de 0,3°C à l'IPSL / RCP8.5.
- A horizon 2050, les scénarios IPSL / RCP4.5 et CNRM / RCP4.5 présentent presque la même augmentation de température après correction de biais (très légèrement inférieure pour IPSL / RCP4.5) mais une pluviométrie mensuelle de 10 mm pour l'IPSL contre 7 mm pour le CNRM. Le scénario IPSL / RCP4.5 est donc proposé en tant que scénario optimiste. Pour finir, en raison de sa forte augmentation de température en parallèle d'une faible augmentation de la pluviométrie, le scénario CNRM / RCP8.5 semble être le plus pertinent à conserver en tant qu'option pessimiste (ceci en accord avec les variations annuelles marquées représentées sur la Figure 10).

Le Tableau 4 ci-dessous synthétise les propositions de choix de scénarios aux horizons 2030 et 2050.

Tableau 4 : Conclusion sur le choix des scénarios proposés

	Scénario optimiste	Scénario pessimiste
Horizon 2030	IPSL / RCP4.5	CNRM / RCP8.5
Horizon 2050	IPSL / RCP4.5	CNRM / RCP8.5

4 CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Sources : (Lecarpentier, 1975), (Quentin, 2015), (Oudin L., 2005) (Courault D., 2005)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un paramètre mesurant une émission de vapeur d'eau (en mm) résultant de deux phénomènes :

- L'évaporation, phénomène physique ;
- La transpiration végétale, phénomène biologique.

On la caractérise plus précisément comme ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau.

L'évapotranspiration est l'une des composantes du cycle de l'eau les plus difficiles à quantifier du fait de la complexité du système sol-terre-plante. Elle englobe les pertes d'eau dues au climat, celles en provenance du sol ainsi que la transpiration végétale et est dès lors essentielle dans toutes les démarches de calcul de recharge des masses d'eau souterraines.

Considérée comme un facteur adéquat pour estimer l'impact du changement climatique, l'ETP sera donc utilisée dans cette phase 2 de l'étude.

Pour cela, plusieurs formules sont présentées dans la partie ci-dessous.

4.1 Présentation des formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

De nombreuses formules permettent de calculer l'ETP en s'appuyant sur différents facteurs que sont :

- Les précipitations
- La date
- La latitude de l'endroit considéré
- L'humidité de l'endroit considéré
- L'altitude
- La vitesse du vent
- L'albédo
- La température
- L'insolation

La chaleur du sol (issue du rayonnement solaire) est souvent considérée comme l'un des principaux facteurs conditionnant l'ETP (Courault et al. (2005)).

Quelques-unes des formules les plus fréquemment utilisées sont présentées ci-après.

4.1.1 Les formules empiriques et semi-empiriques

Les méthodes semi-empiriques utilisent des données ajustées sur des résultats expérimentaux pour une simplification des calculs.

4.1.1.1 Formule de Barney-Cridle

Etablie en domaine sub-aride, cette formule semble donner des résultats satisfaisants dans ce contexte climatique particulier. Elle reste cohérente dans un contexte méditerranéen à condition d'ajuster le coefficient K (ici, 0.254).

$$ETP = \frac{K(1.8 * T + 32)P}{100}$$

Avec :

K : un coefficient à ajuster suivant le contexte climatique (0.254 pour un climat méditerranéen)

T : la température moyenne mensuelle (en °C)

ETP : l'évapotranspiration potentielle (en mm/mois)

P : le pourcentage de la durée moyenne d'une journée (calculé à partir du nombre d'heures diurnes d'un mois)

4.1.1.2 Formule de Turc

Turc considère la radiation globale comme un facteur climatique parmi d'autres. Elle inclut ainsi des facteurs logiques à l'évapotranspiration, à l'exception du vent. Les résultats de cette formule étant toujours acceptables, peu importe la localisation géographique, celle-ci peut être qualifiée d'universelle.

- Si l'humidité relative (hr) est supérieure à 50 %

$$ETP = 0.013 * J * (Rg + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right)$$

- Si l'humidité relative (hr) est inférieure à 50 %

$$ETP = 0.013 * J * (Rg + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right) \left(1 + \frac{50 - hr}{70} \right)$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle en mm/mois

J : nombre de jours dans le mois

T : température moyenne sur le mois (°C)

hr : humidité relative moyenne (%)

Rg : rayonnement solaire moyen (cal/cm²/jour)

4.1.1.3 Formule de Thornthwaite

Cette formule est souvent la plus utilisée, car ne dépendant que de données thermométriques. Elle est par ailleurs applicable à tout territoire car n'utilisant pas de coefficient régionaux ou cultureaux.

$$ETP = 16 \left(\frac{L}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^\alpha$$

Avec

$$\alpha = (6.75 * 10^{-7})I^3 - (7.71 * 10^{-5})I^2 + (1.792 * 10^{-2})I + 0.49239$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_{ai}}{5} \right)^{1.514}$$

Et :

ETP : potentiel estimé d'évaporation (mm/mois) ;

T_a : moyenne quotidienne de température du mois calculé (en °C)

N : nombre calculé de jours dans le mois ;

L : la longueur moyenne en heures de la journée

I : Indice de chaleur

4.1.2 Les formules physiques

La formule de PENMAN MONTEITH est une des plus utilisées et adaptées pour calculer une ETP à l'échelle décadaire. Elle résulte d'une combinaison entre un bilan énergétique et un transfert aérodynamique.

L'Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) la recommande comme modèle de référence du fait de sa polyvalence. Elle peut en effet être utilisée dans toutes les situations climatiques mais nécessite des données fiables et récentes et fait appel à un grand nombre de paramètres.

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{Cte}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$$

Avec :

$$\Delta = \frac{4098 e_{sat}(T)}{(T + 237.3)^2}$$

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} P$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.665z}{293} \right)^{5.26}$$

$$e_s = e_{sat}(T) = 0.6108 e^{\frac{17.27 T}{T+237.3}}$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)}$$

Et :

ETP : évapotranspiration potentielle de référence (mm/j ou mm/h)

Rn : Rayonnement global (MJ/m²/j ou MJ/m²/h)

G : flux de chaleur dans le sol par conduction (MJ/m²/j ou MJ/m²/h)

Δ et γ = constantes en kPa/°C,

Cte = 900 pour un pas de temps journalier et 37 pour un pas de temps horaire

T = température (°C)

P = pression atmosphérique (kPa)

z = altitude par rapport à la mer (m)

es (*T*) = *esat* (*T*) : pression de vapeur saturante (kPa)

ea(*T*) = pression de vapeur actuelle en kPa (= humidité relative * *es* / 100)

u2 = vitesse du vent à 2 mètres du sol en m/s

4.1.3 Modèles simplifiés

Différentes études (Oudin et al. (2005) et Jackson et al. (1977)) cherchent à prouver l'efficacité de formules simplifiées, se basant sur un nombre de paramètres réduits en comparaison de la formule de Penman-Monteith.

Oudin (2004) proposait ainsi à l'issue de sa thèse, une formule d'évapotranspiration nécessitant peu de données, et ayant une grande robustesse spatiale, optimisée pour répondre aux besoins de la modélisation hydrologique en climat stationnaire.

Une formule recalibrée sur les modèles de Jensen-Hai et McGuinness a donc été établie :

$$\text{Si } T_a + K_2 > 0, \quad ETP = \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_a + K_2}{K_1}$$

Sinon ETP = 0

Avec :

ETP = évapotranspiration potentielle (mm/j)

R_e = Radiation terrestre (MJ/m²/j)

ρ = densité de l'eau (kg/ m³)

λ = Chaleur de flux latent (2.45 MJ/kg)

T_a = Température journalière (°C)

K_1, K_2 = constante (5 et 100)

4.1.4 Choix de la formule à retenir

La partie 4.1 ne présente qu'un petit aperçu des formules d'ETP les plus couramment utilisées. A titre d'information, Oudin et al. (2004) mettent en comparaison dans leur article 27 formules différentes. Cette comparaison aboutit à la conclusion suivante : une formule appelant peu de variables différentes peut bien souvent être suffisante.

Par ailleurs, dans son étude « L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques », Claude Lecarpentier dresse les conclusions suivantes :

	Climat Tempéré Humide	Climat Semi-Aride	Climat Tropical Humide
Formule de Blaney et Criddle	Peu efficace sur ces climats, bien adaptée aux climats sub-arides. Coefficients culturaux difficilement déterminables.		
Formule de Turc	Bien adaptée	Correct	Bien adaptée
	La radiation est à inclure dans la formule		
Formule de Thornthwaite	Très bien adaptée	Peu adaptée	Peu adaptée
		Sous-estime l'ETP	
Formule de Penman-Monteith	Très bien adaptée	Correct	Correct
	Paramètre radiatif à inclure		

Bien qu'à l'échelle du globe la formule de Turc semble souffrir le moins de restrictions, les formules de Thornthwaite et Penman-Monteith restent les mieux adaptées au bassin Artois-Picardie.

Par ailleurs, la formule de Penman-Monteith étant particulièrement complexe du fait du grand nombre de paramètres nécessaires pour son application, nous recommandons l'utilisation de la formule de Thornthwaite pour la suite de l'étude et l'évaluation du changement climatique.

Afin de justifier ceci, la partie suivante fait une comparaison des deux formules citées ci-dessus.

4.2 Calcul de l'ETP Thornthwaite à partir des données de température

L'ETP est calculé au pas de temps mensuel à l'aide de la formule de Thornthwaite. Pour cela, les données de température mensuelles interannuelles (période 1981-2010) de la station Abbeville ont été utilisées. L'ETP de Thornthwaite a par la suite été calculée et comparée aux valeurs d'ETP de Penman mensuelles interannuelles disponibles sur Météo France.

Le graphique ci-dessous a été obtenu :

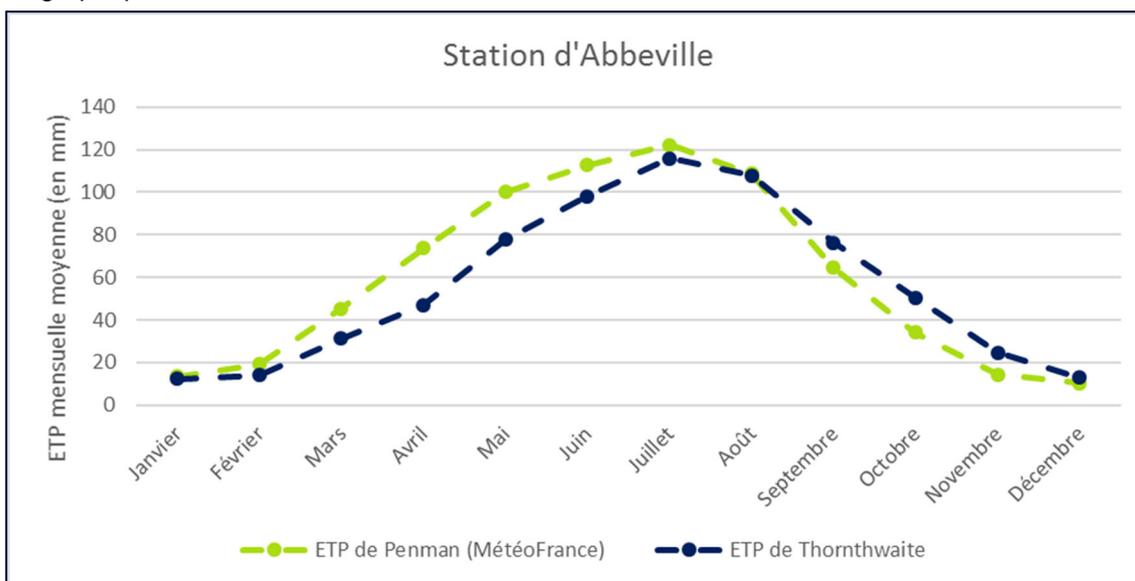


Figure 14 : Moyennes mensuelles interannuelles sur la période 1981-2010 calculée selon les formules de Penman (Météo France ou de Thornthwaite)

Le tableau suivant renseigne sur le différentiel obtenu entre l'ETP de Penman, issue des données de Météo France et l'ETP calculée de Thornthwaite pour la station Abbeville.

Tableau 5 : Biais calculés entre les ETP de Penman et Thornthwaite et pourcentages de différence

Mois	Différentiel	Pourcentage arrondi de la différence
	$(\Delta = ET_{Penman} - ETP_{Thornthwaite})$	$(\% = (ETP_{Thornthwaite} - ETP_{Penman}) / ETP_{Penman})$
Janvier	1.3	-9
Février	5.1	-27
Mars	14.2	-31
Avril	26.8	-36
Mai	22.2	-22
Juin	14.8	-13
Juillet	6.1	-6
Août	0.7	-1
Septembre	-11.7	18
Octobre	-16.2	48
Novembre	-10.6	75
Décembre	-2.7	27

Les premiers résultats de calculs permettent de constater que des écarts entre l'ETP Penman (fournie par Météo France) et l'ETP recalculée par la formule de Thornthwaite existent. L'ETP de Thornthwaite a notamment tendance à sous-estimer les valeurs entre janvier et juillet et à les surestimer entre août et décembre.

A la suite de cette remarque, la présence d'un biais sera donc à prendre en compte pour les futurs résultats d'évaluation du changement climatique.

Il faut donc noter qu'une comparaison pertinente entre état actuel et projections, aurait nécessité l'utilisation d'une même formule d'ETP dans les deux cas. Autrement dit, comme nous utiliserons la formule de Thornthwaite pour les projections, il aurait fallu utiliser cette formule lors du calcul de la recharge en phase 1.

4.3 Incidence sur le calcul de la recharge à partir de l'ETP calculée de Thornthwaite comparée à la recharge calculée à partir de l'ETP de Penman

Au cours de la phase 1, des valeurs mensuelles d'ETP de Penman (issue des stations Météo France sélectionnées) ont été attribuées à chaque maille de la grille quadrillant le bassin Artois-Picardie. Ces ETP ont permis de calculer des valeurs de recharge au droit de chaque maille.

Afin de vérifier l'influence des ETP sur les valeurs mensuelles de recharge, ce paragraphe compare, pour la maille isolée comprenant la station Météo France d'Abbeville, les valeurs de recharge calculées à partir :

- De l'ETP de Penman d'une part ;
- De l'ETP de Thornthwaite d'autre part.

Tableau 6 : Comparaison des valeurs de recharge calculées à partir de l'ETP de Penman et de l'ETP de Thornthwaite

Mois	Recharge calculée à partir de l'ETP de Penman (en mm)	Recharge calculée à partir de l'ETP de Thornthwaite (en mm)	Pourcentage arrondi de différence (en %)
Janvier	0.00	0.00	0
Février	9.70	1.60	-84
Mars	70.56	67.40	-4
Avril	73.90	73.63	-0
Mai	52.75	53.38	1
Juin	34.88	37.96	9
Juillet	16.98	28.34	67
Août	0.00	7.13	100
Septembre	0.00	0.00	0
Octobre	0.00	0.00	0
Novembre	0.00	0.00	0
Décembre	0.00	0.00	0
Total sur l'année	258.77	269.43	4

Cette comparaison permet donc de mettre en évidence un écart mensuel parfois important entre les recharges calculées à partir de l'ETP de Penman au cours de la phase 1 et de l'ETP de

Thornthwaite. La différence sur l'ensemble de l'année est toutefois compensée et les deux ETP aboutissent à une recharge totale du même ordre de grandeur.

Il sera tout de même intéressant d'intégrer par la suite un biais de correction afin de prendre en compte ces écarts et permettre la comparaison de la recharge calculée lors de la phase 1 à celles estimées aux horizons 2030 et 2050.

5 RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION

Ce rapport a permis de présenter les différents scénarios et leurs variations de température et précipitation calculées à travers les modèles IPSL et CNRM.

En accord avec les recommandations du CNRS/CERFACS et de Météo France lors de l'étape 4A, des valeurs moyennes mensuelles ont été calculées, prenant en compte les données de 2015-2045 pour l'horizon 2030 et de 2035-2065 pour l'horizon 2050. Une comparaison de ces valeurs annualisées a permis d'aboutir aux propositions de scénarios suivantes ; propositions qui pourront être utilisées pour la suite de l'étude :

- Horizon 2030
 - Scénario optimiste : IPSL / RCP4.5
 - Scénario pessimiste : CNRM / RCP8.5
- Horizon 2050
 - Scénario optimiste : IPSL / RCP4.5
 - Scénario pessimiste : CNRM / RCP8.5

Des éléments justificatifs ont été fournis expliquant ce choix mais les horizons relativement proches ne permettent pas toujours de distinguer de très nettes différences.

Il ne faut par ailleurs pas oublier l'importance de l'intégration d'un biais et donc d'une correction potentielle à apporter aux données de température et précipitation calculées pour les scénarios de prévision.

Nous recommandons également de considérer l'ETP en tant que variable pouvant caractériser le changement climatique sur le territoire et permettre la mise à jour d'un calcul de recharge aux horizons considérés. Pour sa facilité d'utilisation, sa pertinence d'utilisation sur le territoire et le faible nombre de paramètres d'entrée nécessaires, la formule de Thornthwaite semble adaptée à la situation. L'utilisation de cette formule entraînera toutefois un biais dans la comparaison réalisée avec la recharge actuelle (calculée pour la phase 1). En effet, les données d'ETP Météo France utilisées pour cette phase 1 reposent sur la formule de Penman. L'intégration d'une correction par biais est donc suggérée pour les prochaines étapes de l'étude.

6 SUITE DE L'ETUDE A DONNER

6.1 Mise à jour de la recharge

Une fois le choix des scénarios, de l'application (ou non) de la correction de biais et de la formule d'ETP validés, les étapes suivantes seront à réaliser pour les 4 scénarios :

- Application des données de pluviométrie mensuelles exportées de DRIAS (à partir des 20 points les plus proches des stations Météo France) aux polygones de Voronoï définis Figure 4 ;
- Calcul de l'ETP à l'aide de la formule choisie sur douze mois pour les 20 points de la grille SAFRAN les plus proches des stations Météo France de mesure d'ETP et application de ces valeurs aux surfaces homogènes du territoire délimitées par les polygones de Voronoï (voir Figure 5) ;
- Actualisation du calcul de la recharge à partir des données météorologiques (pluie et ETP) mises à jour à l'aide des données DRIAS. Le cas échéant, si des modifications de l'occupation des sols sont renseignées dans les tableaux de synthèse descriptifs, celles-ci se répercutent automatiquement dans le calcul de la recharge.
- Intégration des corrections de biais si nécessaire.

6.2 Mise à jour des usages à l'aide de l'étude socio-économique

Les hypothèses concernant les évolutions socio-économiques des usages de l'eau et de la population sont abordées lors de l'étape 5.

Sur la base des deux scénarios de réchauffement climatique qui seront retenus, l'évolution des différents usages de l'eau sera projetée aux horizons 2030 et 2050.

Il s'agira d'identifier pour chaque usage les conséquences possibles du réchauffement climatique sur la base des évolutions possibles de l'usage, en fonction des tendances de consommation actuelles, mais également de l'impact du réchauffement climatique sur ces usages.

Deux scénarios seront associés à chaque scénario de réchauffement climatique :

- Un scénario tendanciel qui poursuivra les évolutions constatées ces dernières années ;
- Un scénario optimiste qui intégrera des mesures d'économie d'eau pour chaque usage.

Pour construire ces scénarios des entretiens avec des experts de la thématique eau et des animateurs SAGE du bassin AEAP seront menés. Une analyse bibliographique permettra d'identifier les mesures d'économie d'eau pouvant être appliquées sur le bassin.

6.3 Mise à jour des indicateurs pour les différents horizons et scénarios

Dans la partie « projections », la seule variable pour laquelle nous ne disposons pas de valeurs chiffrées est le débit. Or le débit intervient dans le calcul des indicateurs 1, 4, 5 et 6, où deux grandeurs sont présentes :

- Le module interannuel,
- Le QMNA5,

Pour obtenir un ordre de grandeur de ces débits - qui devrait logiquement provenir de modélisations hydrologiques non prévues ici -, il convient d'avoir recours à la bibliographie.

Cette approche restera nécessairement très approximative, du fait notamment, que les scénarios SRES ne sont pas encore étudiés (sauf dans le projet MOSARH21).

On peut cependant faire ressortir des ordres de grandeurs d'évolution des modules et/ou des débits d'étiage, en veillant si possible :

- A la spatialisation des résultats en fonction des zones couvertes par les études,
- Au choix des « horizons » (horizon le plus proche) / « scénarios » (scenario RCPIe proche).

Cette approche permet de faire ressortir des ordres de grandeurs du type : hypothèse de variation de X% pour le module et hypothèse de variation de Y% pour les débits d'étiage.

Exemple d'Explore 2070 : *Les résultats concernant les eaux superficielles semblent prévoir une diminution du débit annuel moyen compris entre 0 et 40%, une accentuation des étiages avec une baisse du QMNA5 allant de 5 à 75% (résultats très dispersés), et une augmentation possible des crues, avec une augmentation du QJXA10 de +5 à +30% (résultats également dispersés).*

Les incertitudes associées seront donc nécessairement fortes...

7 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/>
- Courault D., O. A. (2005). *Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches.*
- Dayon, G. (2015). *Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies.*
- DGEC. (2014). *Le climat de la France au XXIe 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_tech_niques_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_tech_niques_Atmospherique/4-

Jouzel2014/EUROCORDERX/Doc_DRIAS_database_EUROCORDERX_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_tech_niques_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

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>

Lecarpentier. (1975). L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques. *Annales de Géographie - n°464, 385-414*.

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.*

Oudin L., H. F. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model ? : Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for a rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*, 290-306.

Quentin, A. (2015). *Etude de la variabilité interannuelle de l'évaporation potentielle : conséquence sur les prévisions de l'impact hydrologique du changement climatique.*

WCRP. (s.d.). *WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)*. Récupéré sur WCIP World Climate Research Programme: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>