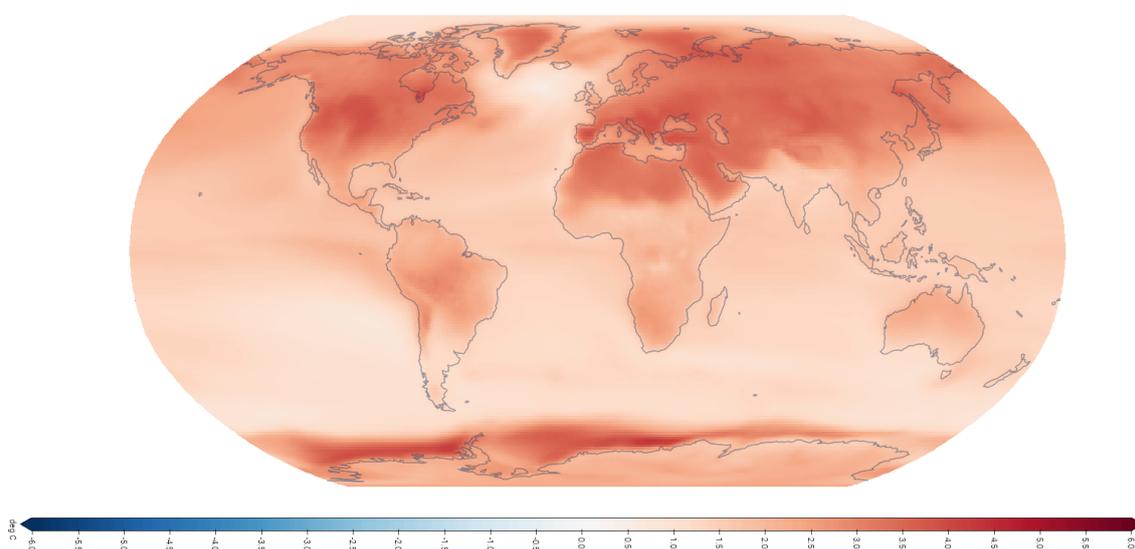


RAPPORT DE STAGE DE 2^{ÈME} ANNÉE DE MASTER

MASTER « BIODIVERSITÉ, ÉCOLOGIE ET ÉVOLUTION »
PARCOURS FONCTIONNEMENT ET GESTION DES ÉCOSYSTÈMES MARINS

UNIVERSITÉ DE LILLE - FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

PROMOTION 2020 - 2021



Impact à moyen terme des phénomènes climatiques extrêmes sur la ressource en eau au sein du bassin Artois-Picardie

Adrien STAQUET

Maitre de Stage : Olivier Canlers - Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement
et du Logement Hauts-de-France

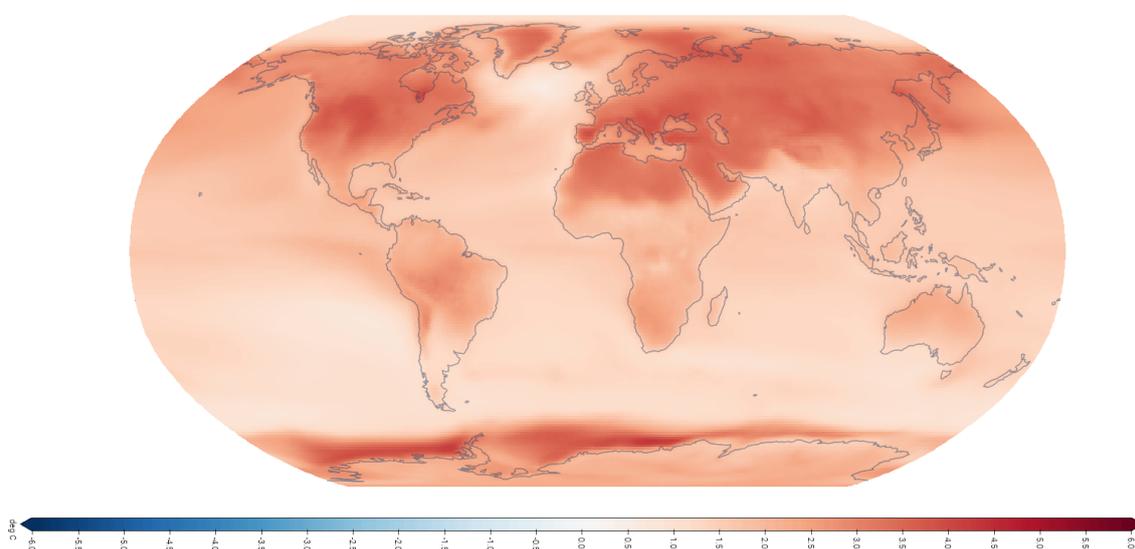
Fig. Écart de température moyenne à l'horizon 2041-2060 (*SSP8.5*). Issue de IPCC (2021)

RAPPORT DE STAGE DE 2^{ÈME} ANNÉE DE MASTER

MASTER « BIODIVERSITÉ, ÉCOLOGIE ET ÉVOLUTION »
PARCOURS FONCTIONNEMENT ET GESTION DES ÉCOSYSTÈMES MARINS

UNIVERSITÉ DE LILLE - FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

PROMOTION 2020 - 2021



Impact à moyen terme des phénomènes climatiques extrêmes sur la ressource en eau au sein du bassin Artois-Picardie

Adrien STAQUET

Maitre de Stage : Olivier Canlers - Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Hauts-de-France

Résumé. Le rapport AR6 du GIEC sorti durant l'été 2021 rend sans équivoque l'impact de l'homme sur le changement climatique mais aussi son rôle sur les phénomènes extrême tout autour du monde (*e.g.* vague de chaleur, sécheresse, précipitation intense, cyclone). Si les tendances des scénarios climatiques sont bien connues, ils restent quand même de l'incertitude face à l'évolution des précipitations et une plus grande incertitude sur le devenir de la ressource en eau qui risque de devenir un enjeu majeur dans plusieurs parties du monde. Au sein du bassin Artois-Picardie, les gestionnaires se demandent l'impact futur que cela peut avoir sur la ressource en eau, notamment durant la période d'étiage où des questions se posent sur sa bonne gestion. L'objectif de ce travail est de mieux caractériser l'évolution climatique au sein du bassin durant le siècle à venir. L'axe principal sera porté sur les événements extrêmes à la fois d'un point de vue historique mais aussi par une approche du climat futur avec des projections climatiques. Dans un premier temps par une étude bibliographique et par la rencontre d'acteurs de la thématique et dans un second temps par un travail d'analyse de donnée. Cela nous a permis d'effectuer des parallèles entre les événements extrêmes actuels et les tendances futurs afin d'avoir un aperçu des risques et besoins potentiels des territoires concernant la ressource en eau. Cette analyse préliminaire montre, dès 2050, un risque d'augmentation en fréquence des événements climatiques estivaux extrêmes qu'ait connue le bassin dans les cinquante dernières années.

Mots-clés : changement climatique ; phénomène extrême ; ressource en eau ; bassin Artois-Picardie ; DRIAS ; sécheresse.

Abstract. The IPCC AR6 report released during the 2021 summer makes unequivocal the impact of man on climate change, but also his role on extreme phenomena all around the world (*e.g.* heatwaves, droughts, heavy precipitation, cyclone). If the trends in climate change are well known, they still remain uncertain about the evolution of precipitation and there is a greater uncertainty about the future of water resources, which risks to become a major issue in several parts of the world. Within the Artois-Picardie basin, managers are wondering about good management of water resources in the future, especially during the low-flow period. The objective of this work is to better characterize the climatic evolution within the basin during the coming century. The main focus will be on extreme events both from a historical point of view but also by an approach of the future with climate projections. Firstly by a bibliographical study and by the meeting of stakeholders and secondly by data analysis. This has enabled us to draw parallels between current extreme events and future trends in order to gain an overview of the potential risks and needs of territories regarding water resources. This preliminary analysis shows, from 2050, a risk of an increase in frequency of the most extreme summer climatic events that the basin has experienced in the last fifty years.

Keywords. climate change ; extreme weather events ; water resources ; DRIAS ; Artois-Picardie water basin, droughts.

Table des matières

Résumé	5
Introduction	9
1 État des lieux et contexte du bassin Artois-Picardie	13
1.1 Origine du projet	13
1.2 La zone d'intérêt	14
2 Cadre théorique et méthodologie	15
2.1 Scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre	15
2.2 Données utilisées	15
2.2.1 DRIAS ^{les futurs du climat}	15
2.2.2 European Climate Assessment & Dataset	16
2.2.3 Jeux de données - Météo-France	17
2.3 Indicateurs	17
2.3.1 Indicateurs de sécheresse	17
2.3.1.1 Le Standardized Precipitation Index (SPI)	17
2.3.1.2 Standardized Soil Wetness Index (SSWI)	18
2.3.2 Indicateurs climatiques	19
2.4 Méthodologie	19
2.4.1 La recherche bibliographique	19
2.4.2 Enquête qualitative	20
2.4.3 Analyse des données recueillies	20
3 Analyse des variabilités climatiques historiques du bassin Artois-Picardie	23
3.1 Température et précipitation	23
3.1.1 Évolution des températures maximales au sein du bassin	23
3.1.2 Évolution des cumuls annuels de précipitations au sein des Hauts-de-France	24
3.2 Phénomènes météorologiques extrêmes	24
3.2.1 Sécheresse météorologique	24
3.2.2 Sécheresse agricole	24
3.2.3 Vague de chaleur	25
4 Analyse des projections climatiques futures du bassin Artois-Picardie	29
4.1 Température et précipitation	29
4.1.1 Évolution des températures maximales au sein du bassin	29
4.1.2 Évolution du nombre de jours très chaud $T_x \geq 27^\circ\text{C}$	29
4.1.3 Évolution des cumuls annuels de précipitations au sein des Hauts-de-France	31
4.1.4 Évolution des fractions des précipitations intenses au sein des Hauts-de-France	33
4.2 Phénomènes météorologiques extrêmes	33

4.2.1	Sécheresse météorologique	33
4.2.2	Sécheresse agricole	35
4.2.3	Vague de chaleur	36
4.3	Variabilité spatiale des effets climatique	37
	Discussion	41
	Bibliographie	45
	Liste des abréviations	49
	Table des figures	51
	Table des tableaux	53
	Liste des annexes	55

Introduction

La ressource en eau représente un enjeu majeur au sein des sociétés humaines, que ce soit pour son développement ou sa survie, et elle peut être source de nombreux conflits. Elle est à la fois omniprésente mais disponible en quantités fixes, et inégalement répartie au sein de la planète (Baechler, 2012). De plus l'eau douce à l'état liquide constitue uniquement 0.7% de l'eau disponible (Plat *et al.*, 2019).

Les besoins en eau pour les activités humaines peuvent se répartir en trois grands usages. Tout d'abord les prélèvements en eau domestique pour l'eau potable (8% de la consommation mondiale), en eau agricole utilisée pour l'irrigation des cultures (70% de la consommation mondiale) ou l'abreuvement du bétail, et en eau utilisée à des fins industrielle (22% de la consommation mondiale) et énergétique (de Marsily *et al.*, 2018). Des besoins qui varient en fonction des pays liés à leurs richesses et leurs habitudes alimentaires et il est estimé que les besoins mondiaux en eau vont doubler en moyenne au cours du XXI^e siècle au vu de l'expansion démographique (de Marsily, 2020).

En France métropolitaine, 36,5 milliards de m³ ont été prélevés en 2016 (hors barrage hydroélectrique) et répartis dans les différents usages. De manière générale près de 70% de ces prélèvements s'effectuent en eau de surface (*e.g.* lacs, cours d'eau, réservoirs) notamment pour les usages industriels et énergétiques. La France métropolitaine est divisée en 6 bassins hydrographiques qui ont chacun leurs ressources hydrologiques propres (Chataigner & Michon, 2019). Le bassin Artois-Picardie est le plus petit des bassins métropolitains (3.6% du territoire), il est compris dans son intégralité au sein de la région des Hauts-de-France, et il a la particularité d'avoir l'absence de grand fleuve ou de relief important (AEAP, 2021). Les prélèvements au sein du bassin se font principalement en eaux souterraines (78%) avec une majorité des prélèvements consacrée à des usages domestiques (62%). Contrairement aux usages domestiques et agricoles, l'usage industriel se fait majoritairement en eau de surface (Annexe A.1; AEAP (2019)).

Le changement climatique est une réalité qui n'est plus à démontrer depuis plusieurs années, confirmé par les trois groupes de recherche du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) lors de son rapport de 2007 (Solomon *et al.*, 2007) et par

la quasi-totalité de la communauté scientifique. Les activités humaines ont déjà provoqué un réchauffement d'environ 1°C par rapport à la période de référence préindustrielle [1850-1900] (IPCC, 2012) et il est fort probable de dépasser la limite de 1.5°C à l'horizon 2021-2040 selon le dernier rapport (IPCC, 2021). Pour finir, il est important de souligner que le réchauffement global (terres émergées et océan) implique un réchauffement beaucoup plus élevé sur les continents, en particulier pour les températures extrêmes où des réchauffements régionaux de +3°C / +4.5°C sont à attendre, soit une augmentation de facteur 2 ou 3 (Shukla *et al.*, 2019; Bazaz *et al.*, 2018).

La ressource en eau est influencée par le climat et inversement, de ce fait le changement climatique risque grandement d'influencer la ressource en eau et sa disponibilité (Kundzewicz, 2008). Par exemple sur le cycle de l'eau par l'augmentation de l'évapotranspiration ou la variabilité des précipitations saisonnières entraînant un déséquilibre sur la disponibilité annuelle de la ressource (Douville *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2007). Un autre impact attendu du changement climatique est aussi l'augmentation en fréquence et en intensité des événements extrêmes (*e.g.* sécheresse, canicule, précipitation intense; IPCC (2013)). À ne pas oublier qu'à ces contraintes se rajoute l'augmentation démographique, l'urbanisation des sols et l'augmentation de la pollution qui impacte quantitativement ou qualitativement la ressource (Kundzewicz, 2008).

Il est estimé que les effets négatifs du changement climatique sur les ressources en eau seront plus importants que les impacts positifs (Kundzewicz, 2008; Boé *et al.*, 2009), notamment durant la période estivale avec la baisse des précipitations, les diminutions importantes de débit des cours d'eau et de l'humidité des sols. Toutes ces modifications associées risquent d'entraîner une augmentation de la sévérité et de la fréquence des sécheresses (Dayon *et al.*, 2018; Boé *et al.*, 2018) qui influencera les besoins en prélèvements (Döll, 2002). Une sécheresse est un phénomène naturel causé par un manque d'eau dû à une baisse de précipitation sur une période prolongée, elle peut être météorologique, hydrologique ou agricole (Mishra & Singh, 2010; Wilhite & Glantz, 1985; Annexe A.2). Concernant la période hivernale, il est attendu une augmentation des précipitations, des débits, ainsi qu'une hausse de la température et une diminution des jours anormalement froids (Habets *et al.*, 2013; Christensen *et al.*, 2007; Jouzel *et al.*, 2014).

La question de l'impact du changement climatique sur les différentes ressources en eau, comment il se manifeste de manière locale est une question importante à intégrer dans la gestion de la ressource. Une première étude intitulée « Explore 2070 » (2010 - 2012), porté par différentes institutions de l'État, a voulu évaluer les impacts du changement climatique sur la ressource en eau à l'échelle nationale mais aussi régionale afin d'apporter des éléments pour mettre en

place des stratégies d'adaptations. Au niveau du bassin Artois-Picardie, l'étude a conclu à une baisse des débits de rivières de -25% à -45%, une baisse de recharge des nappes entre -6 à -46% et une augmentation des températures moyennes annuelles de 2°C (Chauveau *et al.*, 2013).

Une seconde étude, centrée uniquement sur le bassin Artois-Picardie, a été menée en 2020 afin d'identifier les territoires en tension à l'horizon 2030 et 2050 vis-à-vis de la ressource en eau. Elle a pour but d'analyser la vulnérabilité des ressources en eau au regard de la pression quantitative exercée à l'heure actuelle et dans la perspective de l'évolution des conditions climatiques ainsi que par les usages de l'eau. C'est une étude pilotée par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (AEAP) et la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) de la région des Hauts-de-France.

Ce stage, porté la DREAL et par l'AEAP, s'intègre donc dans une démarche de complémentarité à cette analyse de vulnérabilité. Elle essaiera ici d'apporter un regard sur la prise en compte de l'impact des phénomènes climatiques extrêmes sur la ressource en eau, à échéance 2030 et 2050, sur le bassin Artois-Picardie. Cette analyse se fera principalement d'un aspect climatologique, c'est-à-dire d'essayer d'estimer sa disponibilité en fonction de l'évolution des paramètres climatiques généraux (précipitation, température), et de leurs indicateurs associés.

Le premier objectif fut de faire une synthèse bibliographique des connaissances sur la ressource en eau au sein du bassin Artois-Picardie. Un deuxième objectif fut une analyse rétrospective afin d'avoir une meilleure connaissance de l'évolution du changement climatique sur le territoire dans les dernières décennies. Et dans un troisième temps nous nous sommes intéressés à l'analyse de l'évolution future du climat selon différents scénarios climatiques et d'estimer leurs potentiels impacts sur la ressource en eau.

Une seconde phase de cette étude, qui ne sera pas abordée au sein de ce rapport, mais soumis à rendu à la DREAL, fut de proposer une méthode de suivi des évolutions réelles des usages et du climat pour s'assurer de la réduction effective des tensions sur les territoires ou d'identifier des seuils d'alertes ou de crise comme le prévoit l'étude de vulnérabilité.

1 État des lieux et contexte du bassin Artois-Picardie

1.1 Origine du projet

Ce projet fait suite à une étude de l'analyse de vulnérabilité et de la gestion quantitative de la ressource en eau sur le bassin Artois-Picardie afin d'identifier les territoires en tension en 2020 et à horizon 2030 et 2050. Elle s'effectue en quatre phases :

1. Diagnostic de l'état des ressources à l'échelle du bassin Artois-Picardie : définition des territoires cohérents de partage actuellement en tension ;
2. Analyse prospective sur la gestion de la ressource ;
3. Propositions de solutions de sécurisation de l'alimentation en eau potable ;
4. Détermination d'une méthode de calcul du volume prélevable maximum sur un territoire en tension.

L'étude a été commanditée par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie , établissement public administratif de l'État dont le siège est à Douai, qui assure au sein du Bassin hydrographique Artois – Picardie la traduction locale de la politique nationale de l'eau. Ainsi que par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement des Hauts-de-France, service de l'État qui met en œuvre les politiques des ministères en région et la feuille de route pour la transition écologique.

À l'heure actuelle, uniquement les phases 1 et 2 sont achevées depuis mars 2021. Elles ont permis la mise au point de la carte des territoires en tension intégrée dans le projet de schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) 2022-2027 qui est en consultation (Fig. 1.1).

La phase 2 conclue que les tensions sur les territoires du bassin Artois-Picardie ne vont pas augmenter significativement aux horizons 2030 et 2050 par rapport à la situation actuelle. Ces conclusions s'expliquent par les limites de l'étude qui est basée sur la comparaison d'indicateurs de tension calculés via des moyennes sur 30 ans de plusieurs paramètres climatiques. Cette

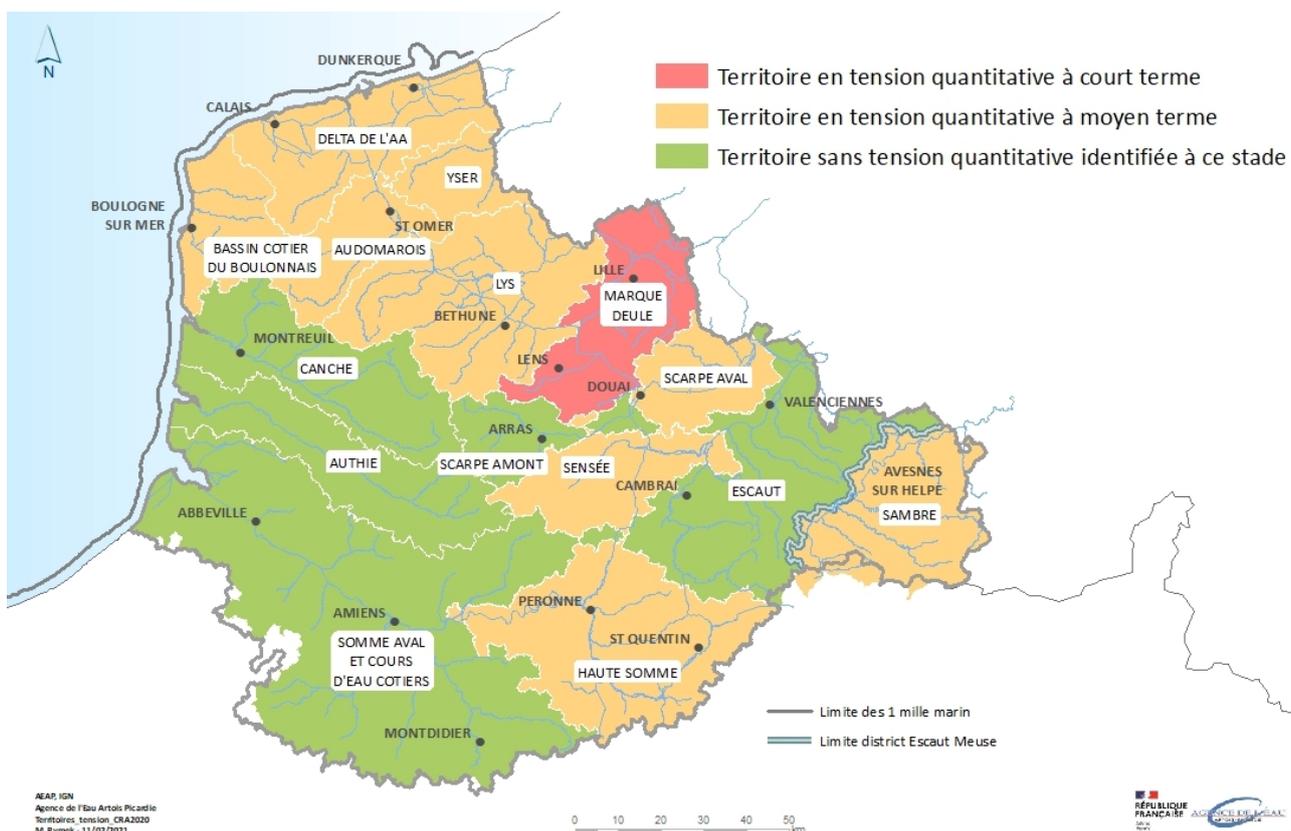


Figure 1.1 – Représentation des territoires sous tensions quantitatives de la ressource en eau par territoire de SAGE. Carte issue de l’AEAP, 2021.

méthode peut en effet induire des effets de lissage potentiellement importants. C’est pourquoi il est paru indispensable d’apporter via le stage des compléments à cette étude en analysant les phénomènes climatiques extrêmes à échéance 2050 et leurs conséquences sur la ressource en eau du bassin.

1.2 La zone d’intérêt

La zone d’étude concerne le bassin hydrographique Artois – Picardie. Il a une superficie de 20 000 km² pour une population de 4.8 millions d’habitants en 2017. Il recouvre en totalité les départements du Nord et du Pas-de-Calais, ainsi que partiellement les départements de la Somme, de l’Oise et de l’Aisne. Le bassin est intégralement couvert par 15 Schémas d’aménagement et de gestion des eaux (SAGE, Annexe A.3).

2 Cadre théorique et méthodologie

2.1 Scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre

Les scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES), ou RCP, ont été adoptés durant le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Ils permettent de modéliser les différents climats futurs en fonction des volumes de GES émis (IPCC, 2013). Les quatre scénarios principaux ont été créés afin de faire des projections selon quatre voies de développement différentes concernant notre impact sur la planète. Ils vont d'un futur pessimiste (*RCP8.5*) où rien n'est fait pour mitiger le changement climatique à un futur optimiste (*RCP2.6*) avec des atténuations strictes des émissions de GES (Annexe A.4).

Dans le cadre de ce projet nous nous concentrerons sur les deux scénarios choisis par l'étude de vulnérabilité : le scénario *RCP4.5* comme scénario optimiste, et le *RCP8.5* comme scénario pessimiste. Ils ont été sélectionnés car le *RCP2.6* semblait trop optimiste, et les données étaient bien développées pour ses deux scénarios.

2.2 Données utilisées

Au sein de ce stage, les analyses furent basées sur des données issues d'observations ou à partir de projections climatiques. Ces données étant présentées sous la forme de variables ou d'indicateurs climatiques. Trois grandes sources de données ont été utilisées afin d'effectuer nos analyses climatiques.

2.2.1 DRIAS^{les futurs du climat}

Le portail DRIAS, créé en 2009, met à disposition différentes projections climatiques régionalisées effectuées par différents laboratoires français (IPSL, CERFACS, CNRM). Les données disponibles sont issues de différentes simulations climatiques suivant des scénarios RCP et des horizons temporels différents. Dans le cas présent, nous allons nous concentrer sur deux simulations.

La première est la simulation DRIAS 2020. Elle est constituée tout d'abord de variables climatiques de surface à fréquence quotidienne (*e.g.* température, précipitation) sur une grande période temporelle (2005-2100). Et ensuite des indicateurs climatiques, calculés à partir des variables climatiques, sur des fréquences temporelles mensuelles, saisonnières, et annuelles selon trois périodes de temps de 30 ans (Horizon proche : 2021-2050 ; Horizon moyen : 2041-2070 ; Horizon lointain : 2071-2100).

La seconde simulation d'intérêt concerne le projet ClimSec. Il s'agit d'un projet développé par Météo-France en 2011 sur l'étude de l'impact du changement climatique en France sur la sécheresse et sur l'eau du sol. Deux phases sont comprises dans ce projet, tout d'abord l'étude de la variabilité en eau du sol sur la période 1958-2008 puis sur l'impact futur du changement climatique (Soubeyroux *et al.*, 2011).

Pour chaque variable et indicateurs, les données ont pu être extraites à partir de la grille spatiale SAFRAN de 8km de côté (Fig. 2.1), pour les périodes 1950-2005 (situation de référence) et 2006-2100 (projections climatiques).

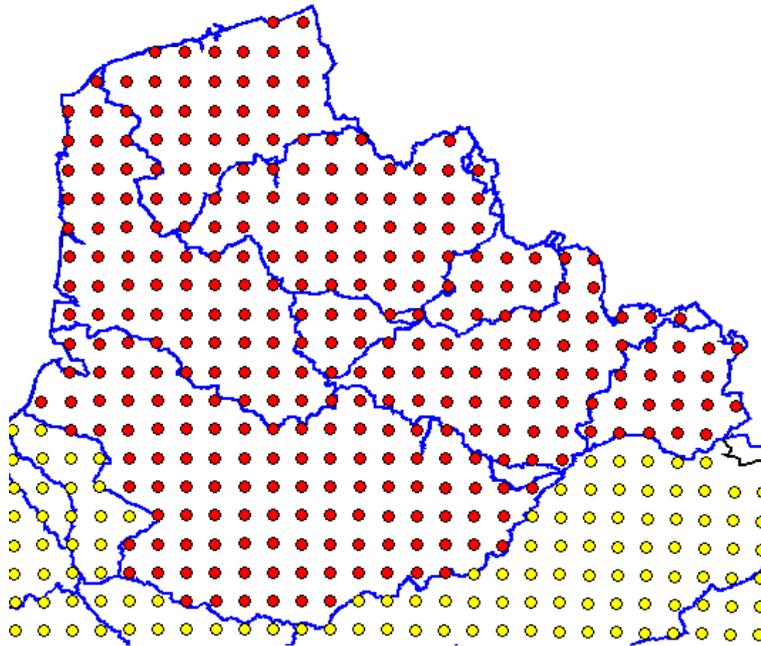


Figure 2.1 – Représentation de la grille d'extraction SAFRAN au niveau du bassin Artois-Picardie. Les points rouges correspondent aux points utilisés dans l'étude.

2.2.2 European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)

La base de données *ECA&D* a pour but d'estimer les changements climatiques au niveau de l'Europe. Il met à disposition des données d'observations quotidiennes issues de stations météorologiques ainsi que le calcul d'indices notamment relié aux situations extrêmes. Les

données utilisées dans cette étude seront issues des stations météorologiques du bassin (*e.g.* Abbeville, Dunkerque, Lille-Lesquin, Amiens, Boulogne-sur-Mer, Cambrai ; cf. Annexe A.5).

2.2.3 Jeux de données - Météo-France

Des données issues directement de Météo-France ont pu être récupérées suite à des prises de contact. Cela concerne des jeux de données d'observation de la station météorologique de Lille-Lesquin ainsi que des données d'indicateurs sur le territoire des Hauts-de-France.

2.3 Indicateurs

Les indicateurs ont été étudiés à partir de donnée d'observation (mesure de terrain), ou à partir de projection climatique. Ils se veulent représentatifs et synthétiques d'un ensemble de données plus important afin d'identifier des tendances et des évolutions, mais aussi de permettre la comparaison entre les périodes futures et passées (Angignard *et al.*, 2013).

2.3.1 Indicateurs de sécheresse

Ils vont nous permettre d'estimer la tendance et l'évolution d'intensité du risque de sécheresse météorologique ou agricole au sein du bassin. La sécheresse météorologique est causée par un déficit prolongé des précipitations alors que la sécheresse agricole concerne un déficit en eau des sols superficiels suffisant pour impacter la végétation (Wilhite & Glantz, 1985; Du Vachat, 2019). Les données des indicateurs de sécheresse sont issues du modèle Arpege-V4.6 tiré de Météo-France.

2.3.1.1 Le Standardized Precipitation Index (SPI)

Le Standardized Precipitation Index (SPI) est un indice qui a été développé par McKee *et al.* (1993). Il est fondé sur la probabilité de précipitations sur un laps de temps donné (Bong & Richard, 2019) et a été conçu afin de quantifier le déficit de précipitations et la sévérité des sécheresses à différente échelle de temps et lieu grâce à sa distribution normalisée (McKee *et al.*, 1993). Il traduit les incidences de la sécheresse sur les différents types de ressource en eau (humidité du sol, eaux souterraines, débit des cours d'eau). L'Organisation Mondial du Climat suggère de l'utiliser comme indice principal pour observer et analyser des situations de sécheresse météorologique (Bong & Richard, 2019). Il est défini selon l'équation (2.1).

$$SPI = (P - P_m) / \sigma_p \quad (2.1)$$

avec P = Précipitation totale d'une période (mm) ; P_m = Précipitation moyenne historique de la période (mm) ; σ_p = Écart-type historique des précipitations de la période (mm).

L'indicateur peut se calculer à différentes échelles de 1 à 24 mois. Dans le cas présent nous nous concentrerons en priorité sur le SPI 3 mois (ou SPI3), afin de caractériser les variations saisonnières. Le SPI3 consiste à comparer le cumul des précipitations sur la période de trois mois examinée et les cumuls des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose des données (Svoboda *et al.*, 2012).

La valeur de l'indice permet de définir l'intensité des épisodes de sécheresses, de manière générale, une valeur positive indique un événement humide alors qu'une valeur négative indiquera un événement sec (Tableau. 2.1). Une valeur à laquelle on peut rattacher une valeur de durée de retour des événements (intervalle de temps moyen séparant 2 réalisations de cet événement ou probabilité qu'un événement arrive chaque année).

Tableau 2.1 – Valeurs des indices SPI et SSWI assigné à leurs intensités de sécheresse et leurs probabilités d'occurrence respective. Issue du projet CLIMSEC (Soubeyroux *et al.*, 2011)

Indice	Catégorie	Durée de retour
$\geq 1,75$	Extrêmement humide	≥ 25 ans
1,28 à 1,75	Très humide	[10 ans - 25 ans[
0,84 à 1,28	Modérément humide	[5 ans - 10 ans[
-0,84 à 0,84	Proche de la normale	[0 ans - 5 ans[
-1,28 à -0,84	Modérément sec	[5 ans - 10 ans[
-1,75 à -1,28	Très sec	[10 ans - 25 ans[
$\leq -1,75$	Extrêmement sec	≥ 25 ans

2.3.1.2 Standardized Soil Wetness Index (SSWI)

Le SSWI s'inspire du SPI mais concernant les sécheresses agricoles en prenant en compte l'humidité des sols. Il s'agit de la normalisation de l'indice *Soil Wetness Index* (SWI) qui est défini selon l'équation (2.2). Il se traduit de la même manière que l'indice SPI à l'aide du tableau 2.1.

$$SWI = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt}) \quad (2.2)$$

avec W = le contenu intégré en eau du sol ; W_{wilt} = le contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} = le contenu en eau du sol à la capacité au champ.

2.3.2 Indicateurs climatiques

Le second type d'indicateur utilisé sert à décrire le climat moyen actuel ou futur. Ils sont calculés à partir de données quotidiennes de précipitations et de températures pour des périodes saisonnières. Les indicateurs ayant présenté le plus d'intérêts peuvent être retrouvés au sein de l'annexe A.6. Pour les projections climatiques, il sera étudié l'écart des indicateurs vis-à-vis de la période de référence 1976-2005 (période de référence issue de données de simulation).

Les indicateurs sont calculés pour chacune des simulations disponibles au sein du jeu DRIAS-2020 (12 modèles qui sont équiprobables, un modèle "chaud" à autant de chance d'arriver qu'un modèle "froid"). Dû aux différentes sources d'incertitude (variabilité interne, modèles climatiques, scénarios d'émissions ; Hawkins & Sutton (2011)) il est conseillé d'utiliser l'ensemble des modèles disponibles pour chaque scénario climatique et moyenné sur chaque horizon temporel afin de représenter la dispersion des signaux climatiques modélisés (Soubeyroux *et al.*, 2020). Cette dispersion est quantifiée à l'aide de différents percentiles : le cinquième percentile (Q5), la médiane (Q50) et le 95e percentile (Q95).

2.4 Méthodologie

Pour caractériser au mieux le changement climatique, son impact présent et futur et les répercussions possibles au sein du bassin hydrographique d'Artois-Picardie, plusieurs types de données ont été récoltées. Dans un premier temps, une importante recherche bibliographique a été effectuée dans le but d'obtenir des références multiples à analyser, puis cela a été complété par une dizaine d'entretiens et de rencontres qui ont permis d'avoir un aperçu des avancées actuelles sur le sujet que nous avons pu confronter aux études et théories recueillies préalablement.

2.4.1 La recherche bibliographique

Elle est dans tout projet une étape indispensable pour se familiariser avec le sujet et comprendre la problématique posée. Elle se présente sous différents types de ressources (*e.g.* ouvrage, article, rapport administratif, documentaire vidéo, colloque).

Différentes sources de littérature ont pu être accessibles :

- Documents mis à disposition par la DREAL-HdF afin de se familiariser avec le territoire et la thématique ;

- Recherches personnelles : bibliothèques scientifiques en ligne, bases de données bibliographiques d'acteurs de l'eau et de l'environnement (locaux ou internationaux), sites officiels du gouvernement ;
- Documentation mise à disposition lors de colloques ou webinaires ;
- Documentation récupérée après les entretiens.

Les recherches étaient concentrées sur différentes thématiques : le changement climatique et son impact sur la ressource en eau, les projets d'études en relation, le territoire du bassin Artois-Picardie, le cycle hydrologique, et toutes informations pertinentes pour ce projet.

2.4.2 Enquête qualitative

Des entretiens furent effectués afin de se familiariser sur la thématique et récupérer les informations nécessaires à sa bonne compréhension.

Selon Kaufmann & de Singly (2011) les entretiens directifs ayant fait preuve de peu d'efficacité sont peu utilisés et il est conseillé à l'enquêteur de rester libre dans ses questions, l'entretien semi-directif sera donc privilégié. Il n'a pas de question pré-construite et se déroule comme une discussion qui s'adapte aux réponses de l'interlocuteur. Il s'appuie sur un guide d'entretien qui permet de recadrer la discussion sur les questions initiales si l'interlocuteur s'égaré trop ou si certains thèmes importants n'ont pas encore été abordés (Couvreur & Lehuède, 2002). L'ensemble des entretiens résultant de cette approche pourront être par la suite soumis à une étude comparative.

Chaque interview, menée à l'aide d'un guide d'entretien, a été précédée d'une présentation de l'intervieweur et du projet de stage. Après chaque entretien, la relecture des notes et l'ajout des informations encore en tête ont permis de tirer les grands axes abordés durant le rendez-vous.

2.4.3 Analyse des données recueillies

Une fois la recherche bibliographique terminée, les entretiens bien retranscrits ou résumés et les données récupérées, les informations provenant de différentes sources ont été croisées entre elles afin d'améliorer l'étude et diriger nos analyses cartographiques et statistiques.

L'analyse cartographique fut effectuée grâce au logiciel QGIS (QGIS Development Team, 2009). Des interpolations TIN (réseaux triangulés irréguliers) furent réalisées afin de représenter en surface « raster » des points d'échantillons afin d'estimer au mieux des valeurs pour des zones sans données directes et d'avoir une bonne représentation du bassin.

L'analyse statistique fut effectuée grâce au logiciel R (R Core Team, 2019). Les analyses furent majoritairement descriptives (*e.g.* boxplot, courbe de distribution), néanmoins des tests de comparaison de groupe (paramétrique ou non le cas échéant) ont été réalisés afin d'observer si nous avons bien des différences significatives entre les différentes périodes de temps considérées. Le caractère significatif des résultats figure, dans cette étude, sous la symbolique suivante : * : $p < 0.05$; ** : $p < 0,01$ et *** : $p < 0,001$. Une analyse de Fourier fut aussi utilisée afin de décomposer les mesures climatiques en fréquences mensuelles. Enfin une analyse factorielle discriminante fut utilisée sur les données afin de discriminer la variabilité spatiale au sein du bassin.

3 Analyse des variabilités climatiques historiques du bassin Artois-Picardie

3.1 Température et précipitation

3.1.1 Évolution des températures maximales au sein du bassin

Plusieurs constats peuvent être émis concernant la période [1971-2020] (Fig. 3.2) :

- Une température maximale moyenne de 21.2°C ;
- Une tendance significative à l'augmentation de température de l'ordre de 0.4°C/an depuis 1971 sur le territoire du bassin ;
- L'année 1995 avec une température moyenne estivale de 22.4°C correspond à une année quinquennale (durée de retour de 5 ans) ;
- Les étés de 1976 et 2003 ont eu des températures exceptionnelles avec des écarts respectifs de 2.7°C et 2.5°C par rapport à la moyenne (resp. 23.9°C et 23.7°C) ;
- Depuis 2016, les températures maximales restent au-dessus de 22.7°C, soit un écart d'au moins 1.5°C par rapport à la moyenne.

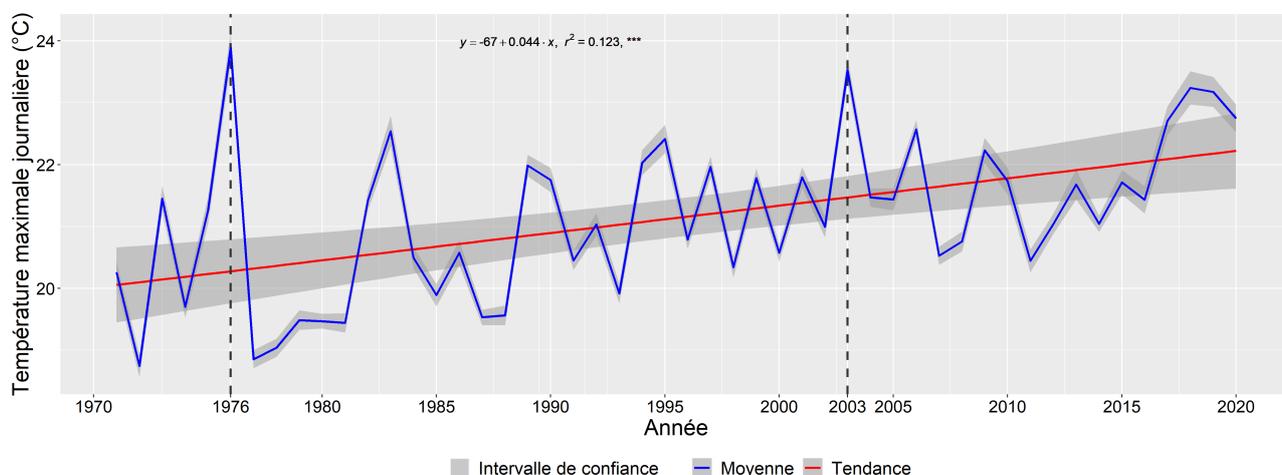


Figure 3.1 – Évolution de la température maximale estivale moyenne de 6 stations du bassin Artois-Picardie.

3.1.2 Évolution des cumuls annuels de précipitations au sein des Hauts-de-France

Les évolutions de précipitation sont moins certaines que pour les températures, les indicateurs présentant des degrés de certitude faible. Néanmoins pour la période de [1955-2016], on observe une hausse significative comprise entre 2.7% et 4.6% par décennies en fonction des stations (Météo-France, 2019). Concernant les répartitions saisonnières des précipitations, en fonction des stations on peut observer une tendance à la hausse des précipitations durant la période hivernale (+18% / +24%) sur les cinquante dernières années, mais il n’y a pas de tendance significative pour la période estivale (comm. pers. CERDD). À partir de 1970, les années 1973, 1976, et 2003 présentent les déficits de précipitations les plus importants, avec 1976 qui a un déficit de 40% par rapport à la période de référence (Annexe A.7).

3.2 Phénomènes météorologiques extrêmes

3.2.1 Sécheresse météorologique

L’indice de précipitation nous permet d’évaluer l’intensité des sécheresses météorologiques. La figure 3.2 montre trois événements (1990, 1995, et 2020) franchissant la valeur seuil équivalent à une durée de retour de 5 ans (sécheresse modérément sèche). L’année 1976 possède un SPI de -2.45, elle dépasse la valeur seuil équivalent à une durée de retour de 25 ans (sécheresse extrêmement sèche). Les années 1990, 1995 et 2020 correspondent à des années quinquennales sèches. On remarque que l’année 2003 qui a présenté de très fortes températures estivales (section 3.1.1) ne semble pas avoir subi d’événement de sécheresse. Enfin la valeur médiane (SPI : 0.15) et moyenne (SPI : 0.05) de la distribution reste proche de la normale.

3.2.2 Sécheresse agricole

L’indice d’humidité des sols permet d’évaluer l’intensité des sécheresses des sols. On observe que durant l’été de 1976 nous avons des valeurs de SWI dans les 1% et 2% de la distribution (record quotidien bas ou record sec d’humidité des sols). Cela correspond à un SSWI inférieur à -2 et donc à une situation de sécheresse des sols extrêmement forte. L’année 2019 est plus modérée avec un SWI compris entre la médiane et le premier décile de la distribution, nous avons donc des situations de sécheresse modérément sec durant le début de l’été (juin, juillet), un retour à la normale durant le mois d’août, et de nouveau un phénomène de sécheresse durant la fin de l’été. Enfin l’année 2020 a présenté durant tout l’été des phénomènes de sécheresse très sec avec une valeur d’indice comprise entre le 1^{er} décile et les records secs (Fig. 3.3).

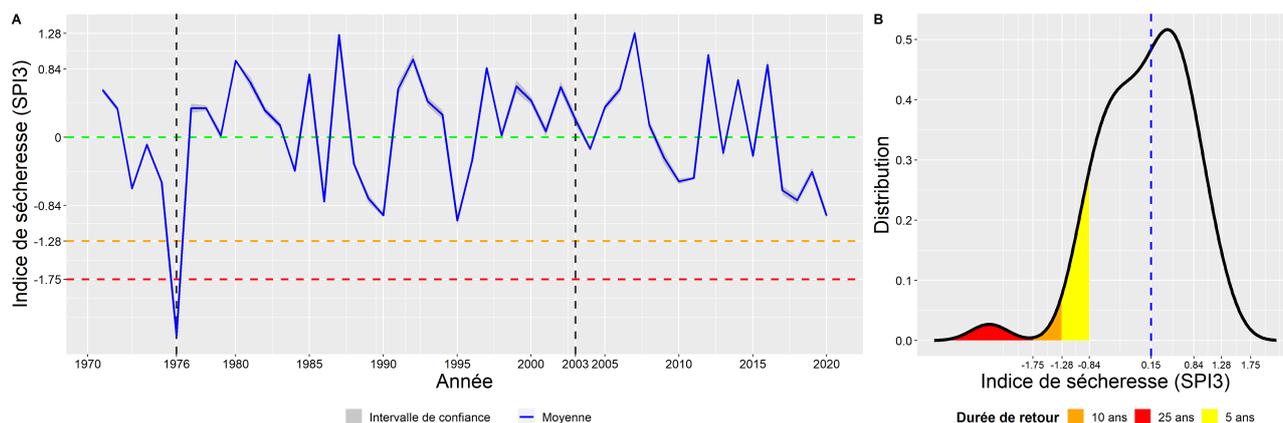


Figure 3.2 – Évolution des sécheresses météorologiques depuis 1970, à partir de l'indicateur SPI3 durant la période estivale. Il correspond à la moyenne des valeurs calculées sur 6 stations du bassin. (A.) Évolution au cours du temps de l'indicateur. (B.) Distribution des valeurs de l'indicateur sur la période [1970-2020], la ligne bleue correspond à la valeur médiane.

3.2.3 Vague de chaleur

Le bassin Artois-Picardie subit régulièrement des phénomènes de vagues de chaleur. Une vague de chaleur correspond à plus de cinq jours consécutifs avec des températures maximales supérieures de plus de 5°C des températures normales. À noter qu'une vague de chaleur dans le nord de la France ne serait pas forcément qualifiée de la même manière dans le sud. Dans le cas présent, nous avons en moyenne 7.1 jours/été de vagues de chaleur sur la période 1955-2018. Nous avons une hausse significative attendue de 2 jours par décennies. Les événements les plus intenses en températures sont les années 2003, 2018, 2019 et 2020, avec 2019 qui a atteint une température maximale de 30.5°C . L'année 1976 avait une intensité plus faible, mais sa longue durée (du 23 juin au 8 juillet) en a fait une des plus longues vagues de chaleur dans le nord de la France (Fig. 3.4). Enfin les événements de 2020, 2003 et 1976 sont les plus sévères connus dans le bassin.

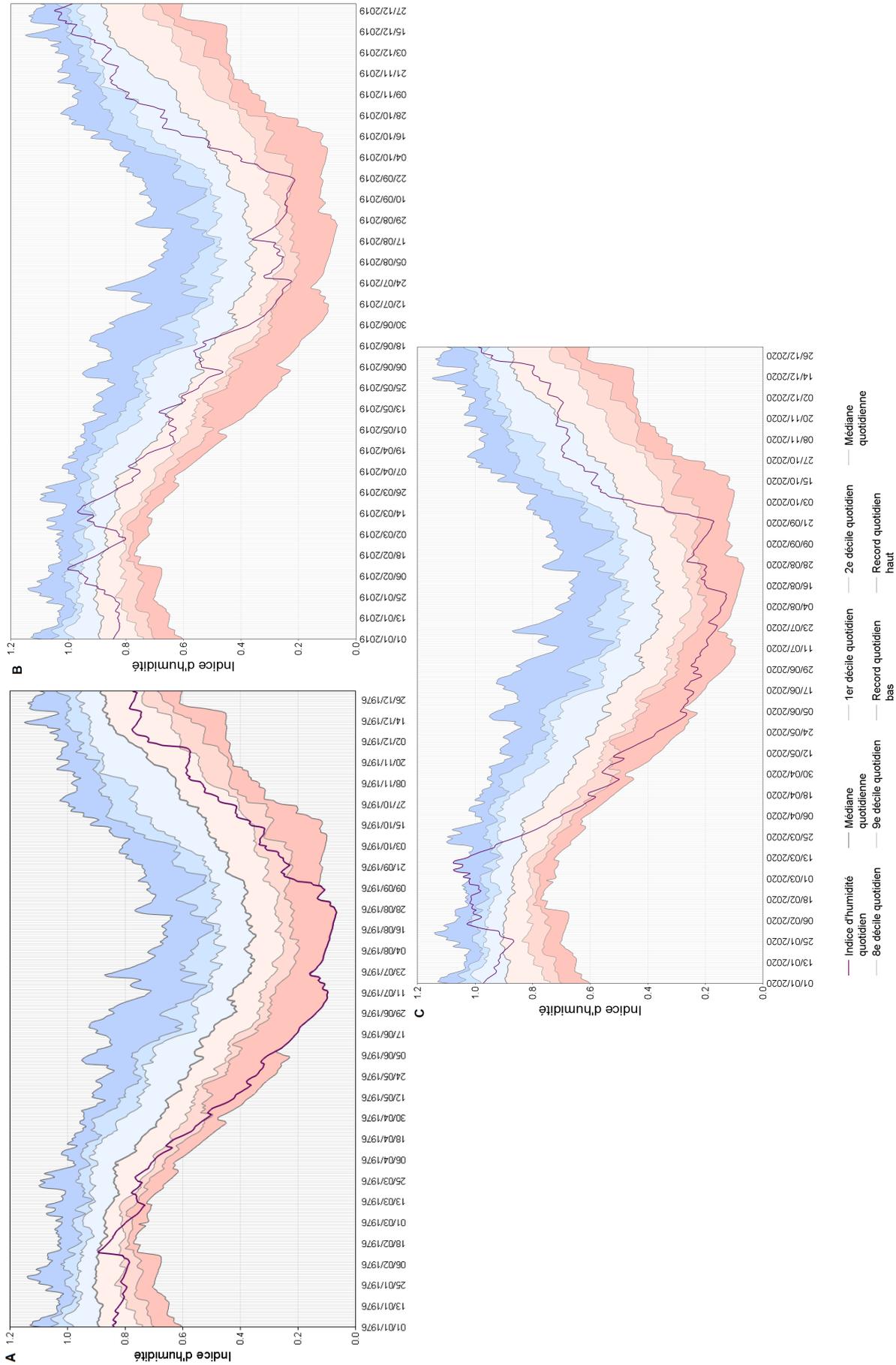


Figure 3.3 – Évolution de l'indicateur d'humidité des sols SWI au sein des Hauts-de-France pour les années (A.) 1976, (B.) 2019, (C.) 2020. Les zones ombragées concernent la distribution des valeurs de l'humidité des sols pour la période 1981-2010. Graphique issu de Météo-France.

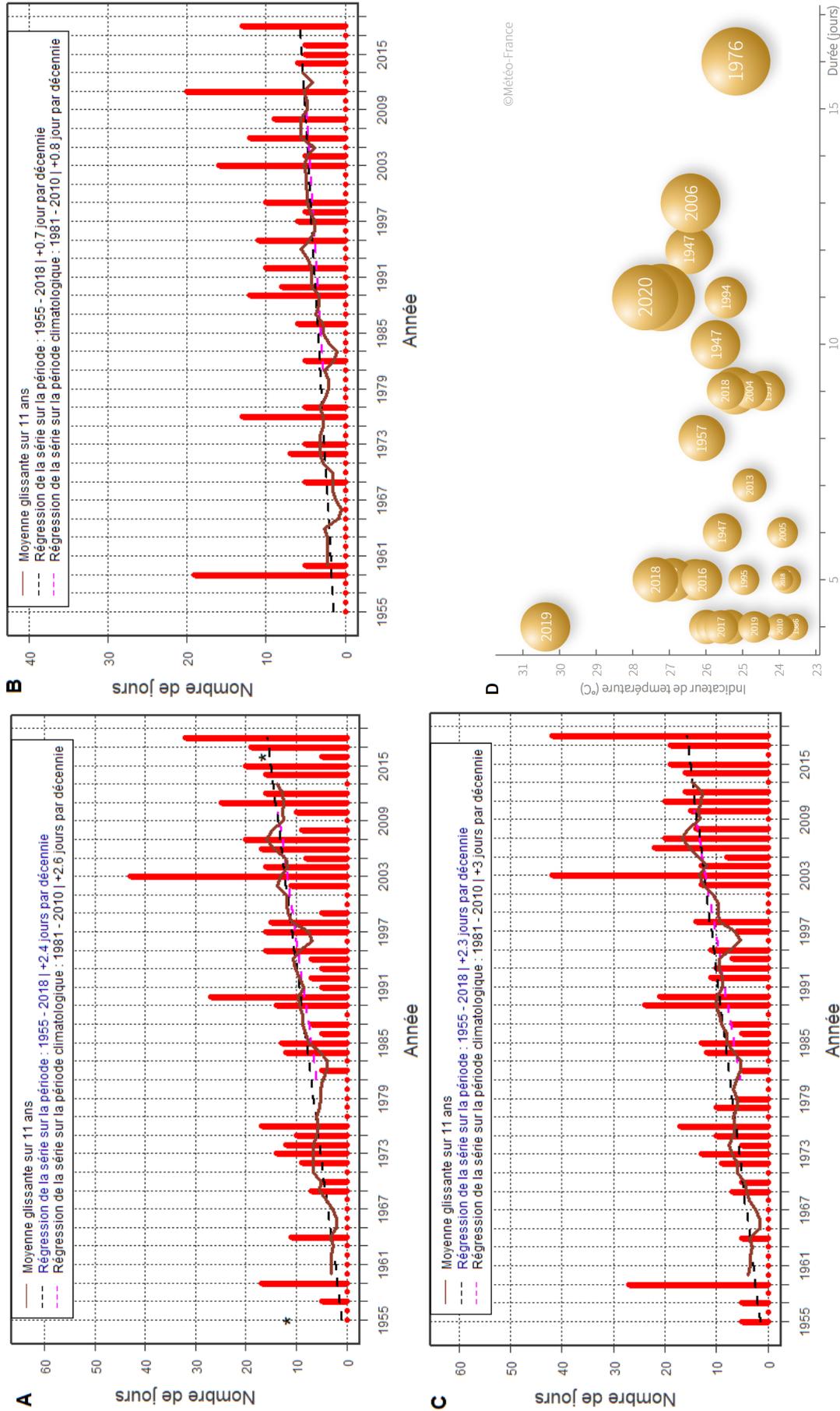


Figure 3.4 – Nombre de jours de vague de chaleur durant la période [1955-2018] au sein des stations de (A.) Lille-Lesquin, de (B.) Boulogne-sur-Mer, et de (C.) Cambrai-Epinoy. Les nombres annuels moyens de jours de vague de chaleur respectifs sont 8.3 jours, 3.5 jours, et 8.6 jours. D. Durée et intensité des vagues de chaleurs identifiées au sein de l'ex région Nord-Pas-de-Calais (bulle = un événement ; diamètre = sévérité proportionnelle à la chaleur cumulée de l'événement). Graphique issu de Météo-France (2019) et de Climat^{hd}.

4 Analyse des projections climatiques futures du bassin Artois-Picardie

4.1 Température et précipitation

4.1.1 Évolution des températures maximales au sein du bassin

On peut observer que durant la première partie du 21^{ème} siècle la température maximale (Tx) présente la même évolution pour les deux scénarios climatiques, ce n'est qu'à partir de la période [2071-2100] qu'on observe une plus forte évolution du *RCP8.5* (Fig. 4.1). Les anomalies de température (+2.5°C) observées en section 3.1.1 deviennent les valeurs moyennes attendues aux horizons moyens et lointains (2.3°C et 3.8°C - *RCP8.5*). À moyen terme (*RCP8.5*), on observe un écart par rapport à la période de référence [1976-2010] (Tx = 20.8°C) d'allant de 0.9°C, pour les modèles les plus froids, à 3.5°C pour les modèles les plus chauds. Les modèles médians présentant des écarts moyens de 2.3°C (Fig. 4.2). À une échelle journalière, lors des extrêmes de canicules des mois d'été (juin à août), les pics de températures des trois années dépassent à horizon moyen les records de la distribution simulée. Pour l'horizon lointain, les jours les plus chauds des années 2003 et 2020 restent anormalement chaud (Q90-Q99, Fig. 4.3).

4.1.2 Évolution du nombre de jours très chaud $T_x \geq 27^\circ\text{C}$

À moyen et long terme, on observe des différences significatives entre le nombre de jours très chaud entre la période de référence (nombre de jours moyen : 15.5 jours) et les différents scénarios climatiques. On note qu'au niveau de l'horizon moyen, il n'y a pas de différence observée entre les deux scénarios climatiques. Au niveau du scénario *RCP8.5*, à moyen terme on s'attend à une augmentation moyenne par été de huit jours, et en fin de siècle on s'attend à une augmentation de 20 jours, soit une valeur trois fois supérieure à la période de référence (Fig. 4.4).

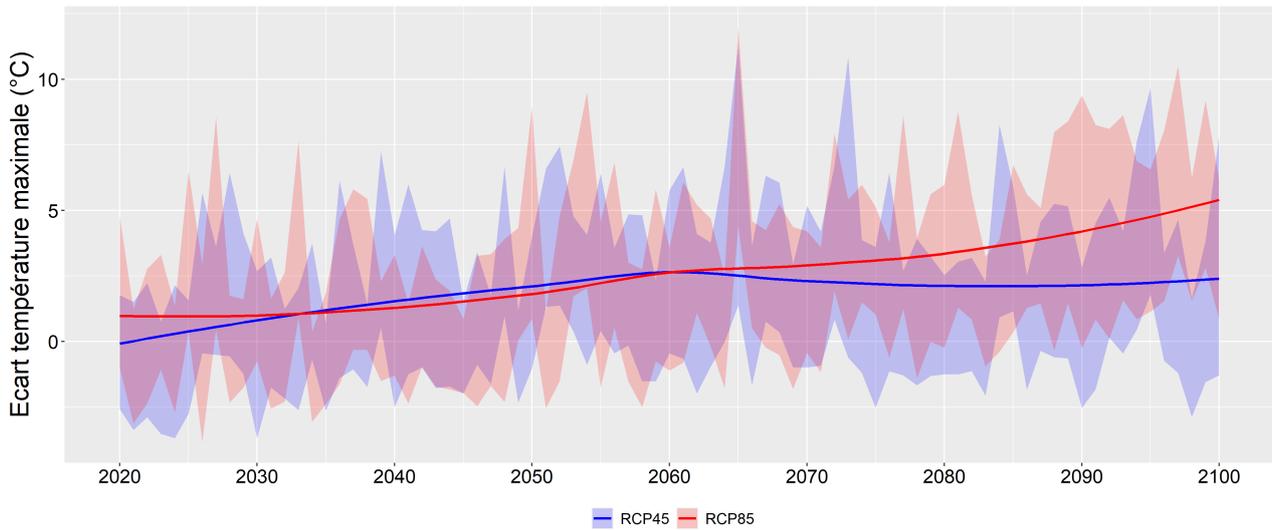


Figure 4.1 – Écart à la période de référence [1976-2005] des températures quotidiennes maximales (T_x) pour les scénarios climatiques $RCP4.5$ et $RCP8.5$ en fonction du temps. Courbe de lissage issue d'une régression loess, les zones ombragées correspondent aux intervalles de valeurs.

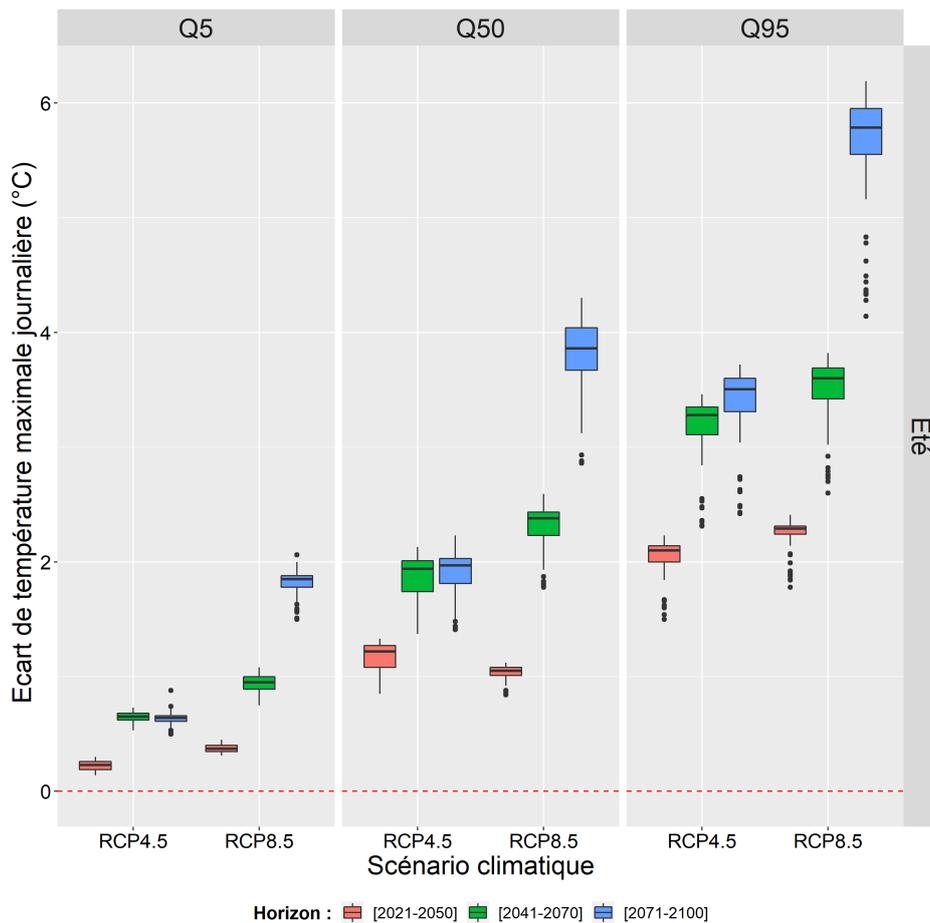


Figure 4.2 – Écart à la période de référence [1976-2005] des températures quotidiennes maximales (T_x) pour les scénarios climatiques $RCP4.5$ et $RCP8.5$ selon les trois périodes temporelles. Distributions en percentile 5, 50 et 95 durant la période estivale.

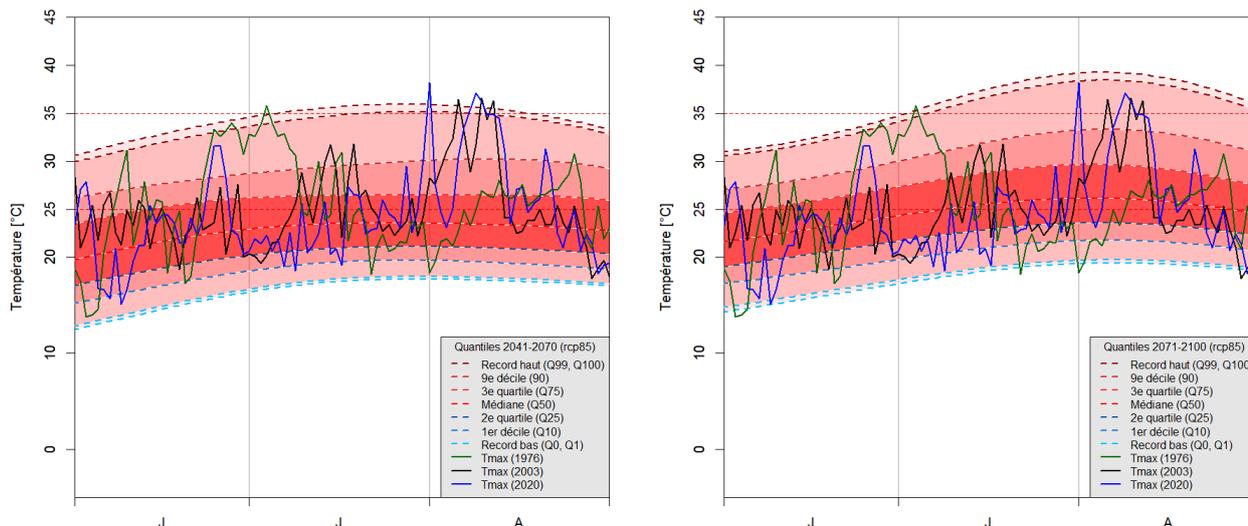


Figure 4.3 – Température maximale quotidienne des étés 1976, 2003 et 2020 moyennée sur le bassin Artois-Picardie, comparée à la distribution des percentiles à horizon moyen et lointain pour le scénario RCP8.5.

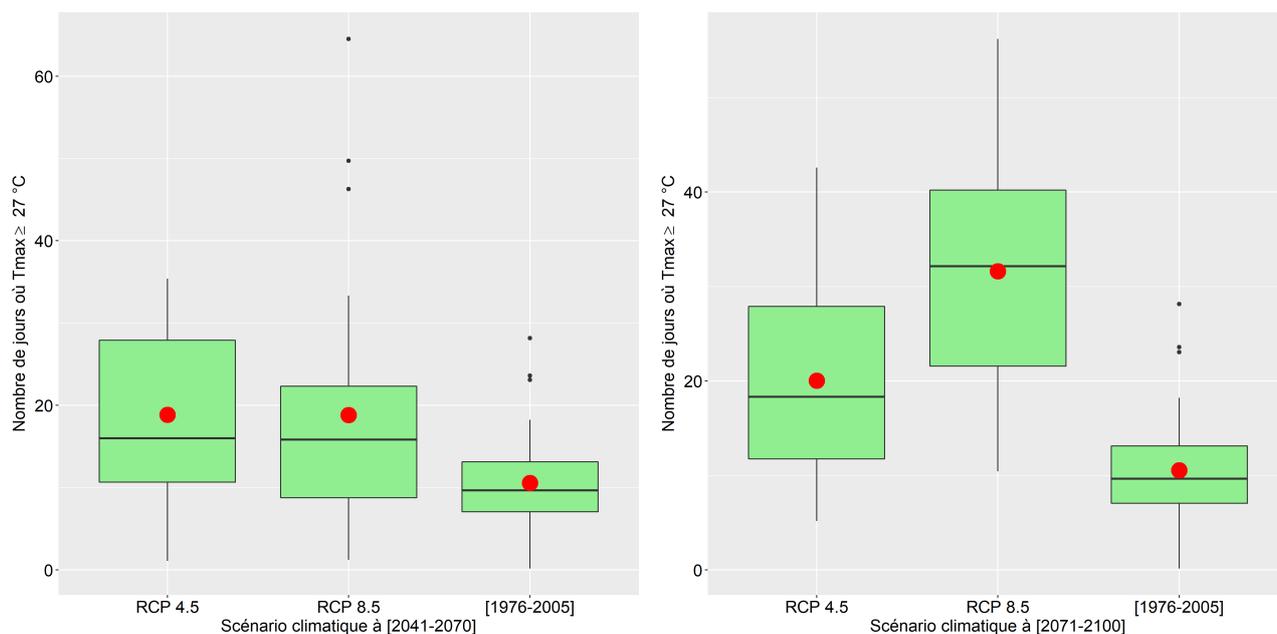


Figure 4.4 – Nombre de jours très chauds où la température maximale quotidienne est supérieure ou égale à 27°C, durant la saison estivale, pour les scénarios climatiques RCP8.5 et RCP4.5, et pour la période de référence 1976-2005. Le point rouge correspond au nombre de jours moyen par saison estivale.

4.1.3 Évolution des cumuls annuels de précipitations au sein des Hauts-de-France

Durant la période hivernale, on observe une augmentation des cumuls en fonction du temps et cela pour chaque distribution des modèles. Concernant la distribution médiane pour le scénario

RCP8.5, on observe un écart moyen à la période de référence (cumul moyen = 200 mm) de 30 mm à l'horizon proche, et de 66 mm à l'horizon lointain (Fig. 4.5.B). Concernant la période estivale, il y a de l'incertitude car nous avons deux cas de figure, les valeurs entre le Q5 et le Q50 présentent des déficits de précipitation (soit 45% des valeurs de la distribution), mais les valeurs de la distribution comprises entre le Q50 et le Q95 présentent à l'inverse une augmentation dans les cumuls (Fig. 4.5.A) par rapport à la période de référence (cumul moyen = 187 mm).

Si on se concentre uniquement sur les valeurs médianes de la distribution pour les variations saisonnières, on observe notamment une augmentation des précipitations durant l'hiver et une baisse durant l'été (Fig. 4.5.C).

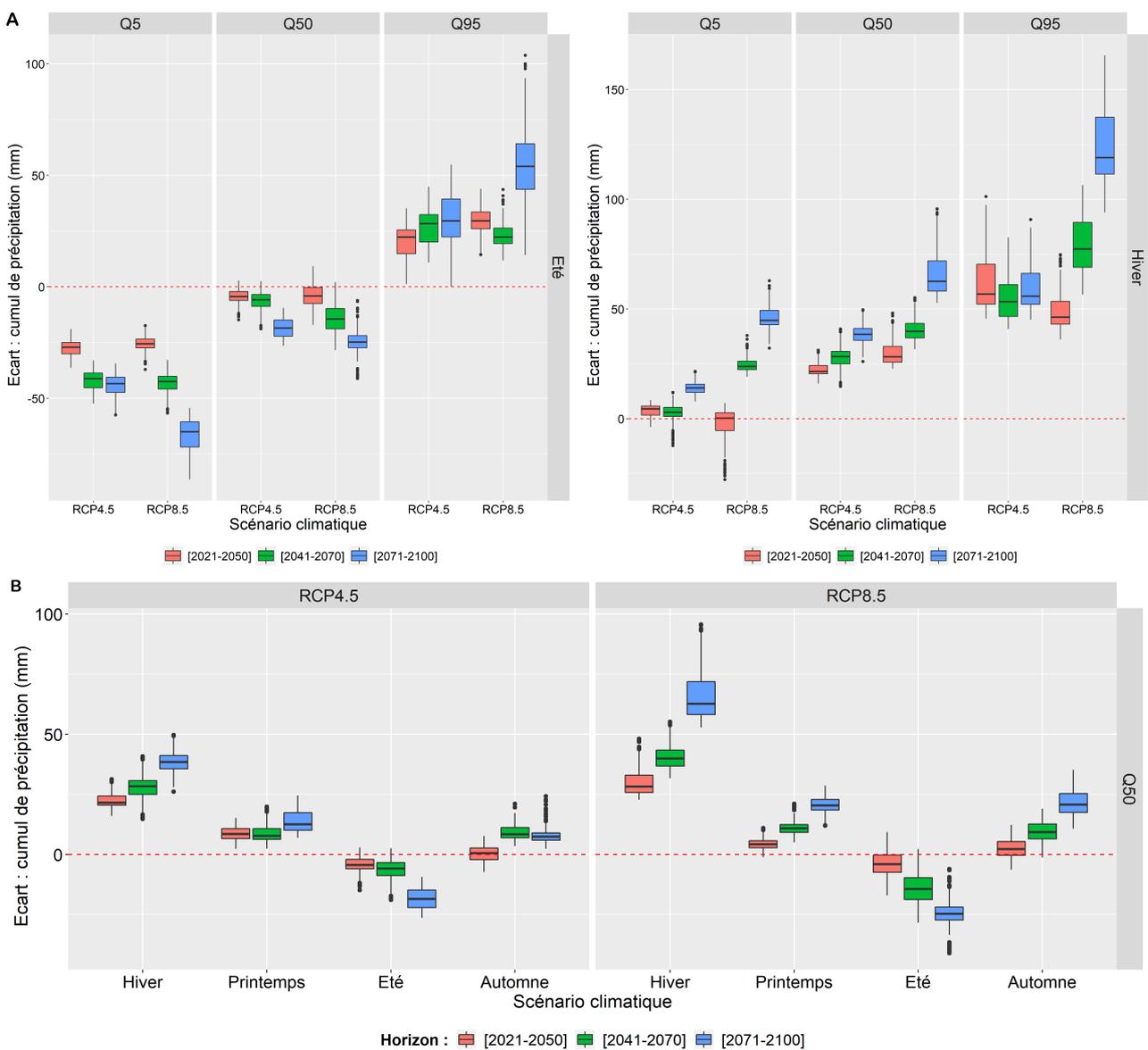


Figure 4.5 – Écart à la période de référence 1976-2005 des cumuls de précipitations pour chaque scénario climatique. **A.** Représentation pour les trois périodes temporelles pour les distributions en percentile 5, 50 et 95 durant la période estivale et hivernale. **B.** Représentation de la distribution en Q50 pour l'ensemble des saisons.

4.1.4 Évolution des fractions des précipitations intenses au sein des Hauts-de-France

On observe que 5% des valeurs de la distribution présentent une baisse des pluies intenses dans la part du cumul de la période hivernale par rapport à la période de référence (fraction moyenne : 54%). Le reste des valeurs de la distribution présente une augmentation pouvant aller jusqu'à 15% de part de précipitations intense dans les modèles extrêmes (Fig. 4.6). Plus on avance vers la fin du siècle, plus on aura une évolution du régime climatique présentant une part plus importante des pluies intenses sur le cumul total des précipitations qui sera alors sur une plus courte période.

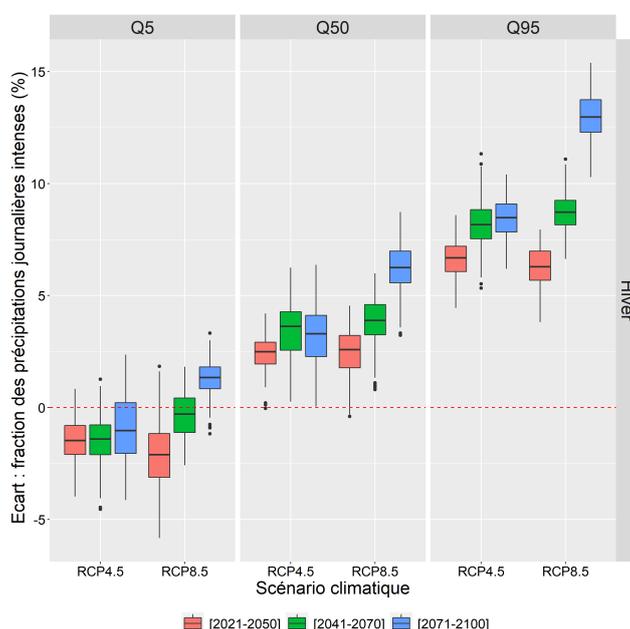


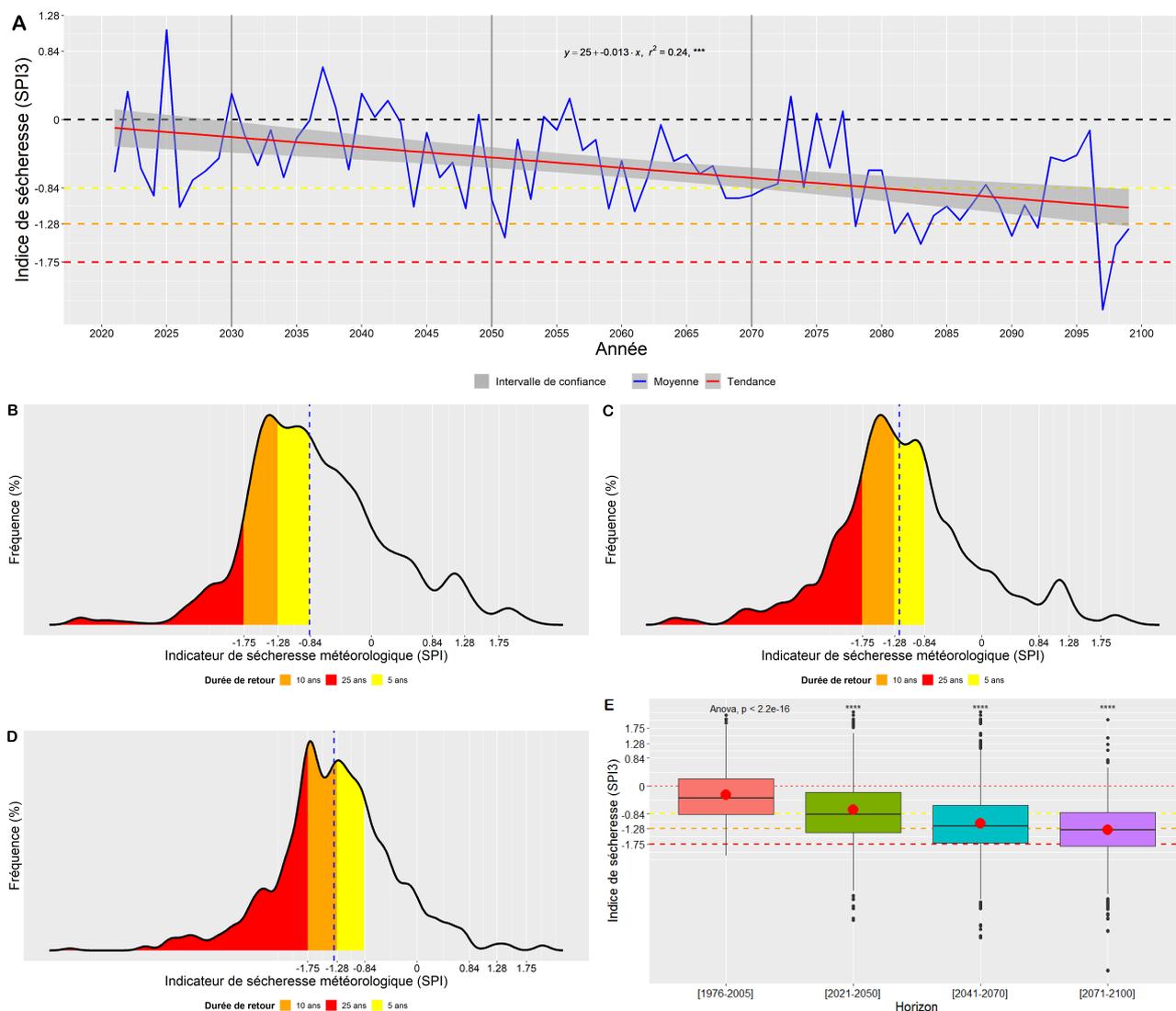
Figure 4.6 – Écart à la période de référence 1976-2005 des fractions des précipitations intenses durant la période hivernale pour les trois périodes de temps et les trois dispersions de percentile.

4.2 Phénomènes météorologiques extrêmes

4.2.1 Sécheresse météorologique

L'indicateur SPI présente une tendance négative indiquant une accentuation des sécheresses en fonction du temps. La valeur seuil des phénomènes de sécheresse modérément sèche (*e.g.* sécheresse de 2020 et 1995, Fig. 3.2) est franchie régulièrement à partir de la deuxième moitié du siècle (Fig. 4.7.A). Les trois périodes de temps présentent des différences significatives (Fig. 4.7.E) par rapport à la période de référence.

On observe que la normale de l'intensité des épisodes de sécheresses qui est actuellement proche de zéro (Fig. 3.2) se décale négativement, elle passe à -1.28 (épisodes de sécheresses modérément secs) pour la période 2041-2070 (Fig. 4.7.C). Pour la période 2071-2100, les événements proches de la normale deviennent des épisodes très secs qui ont normalement des durées de retours entre 10 ans et 25 ans (Fig. 4.7.D). À moyen terme, les événements de sécheresse quinquennaux deviennent des événements de sécheresse extrêmement sèche lors d'un scénario *RCP8.5*, pour un scénario *RCP4.5* ils correspondront à des épisodes très secs (Annexe A.9).



4.2.2 Sécheresse agricole

L'indicateur SSWI présente une tendance négative indiquant une accentuation de l'assèchement des sols. La valeur seuil des phénomènes de sécheresse extrêmement sèche (*e.g.* sécheresse de 1976) est franchie à partir de la 2^{ème} moitié du siècle (Fig. 4.8.A). Les trois périodes de temps présentent des différences significatives (Fig. 4.7.E) par rapport à la période de référence. La norme d'intensité des épisodes de sécheresses se décale négativement, elle passe d'épisode "proche de la normale" à des épisodes "très secs" pour la période 2041-2070 et à des épisodes "extrêmement secs" pour la période [2071-2100] (Fig. 4.8.C.D). En fin de siècle, près de 80% de la distribution des valeurs (*RCP8.5*) correspondront à des épisodes de sécheresses extrêmement secs. Les événements de sécheresse quinquennaux, quelque soit le scénario climatique, deviennent des événements de sécheresse extrêmement secs dès l'horizon proche (Annexe A.9).

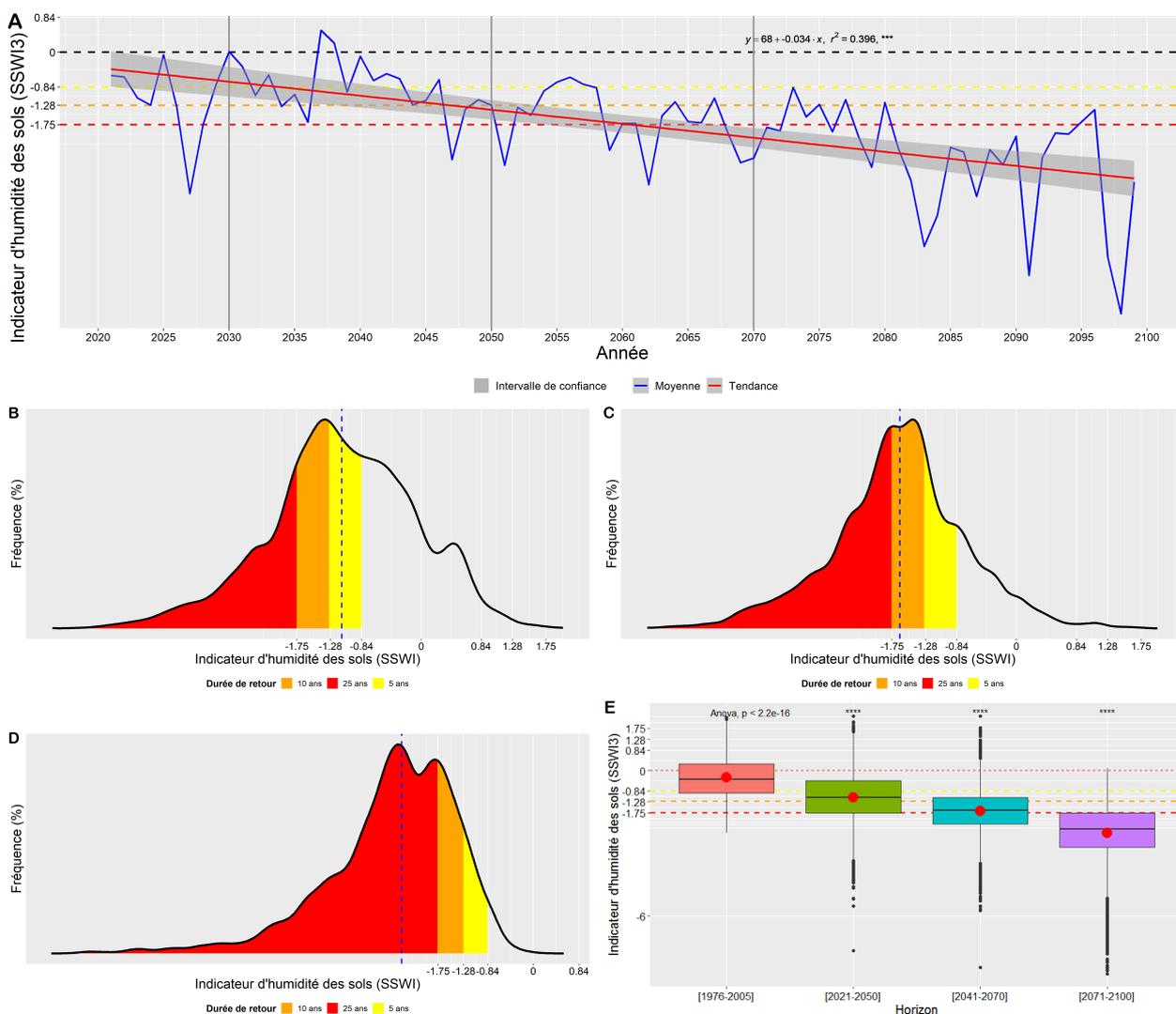


Figure 4.8 – Évolution des sécheresses de sols pour la période estivale dans un scénario *RCP8.5*. (A.) Évolution et tendance au cours du temps. Distribution de l'indicateur sur la période (B.) 2021-2050, (C.) 2041-2070, (D.) 2071-2100. (E.) Comparaison des différentes périodes futures par rapport à la période de référence [1976-2005].

4.2.3 Vague de chaleur

Concernant les épisodes de vagues de chaleur, on observe une augmentation du nombre de jours impacté par été. En scénario *RCP8.5*, on observe pour la période 2041-2070 une augmentation moyenne comprise entre +4 jours et +15 jours par rapport à la période de référence (env. 1.8 jours/été). En fin de siècle, on s'attend en moyenne à des épisodes de vague de chaleur pouvant aller jusque +5 à +33 jours par été (Fig. 4.9). De plus, on observe un élargissement de l'apparition des vagues de chaleur, certains phénomènes peuvent arriver durant les mois de printemps ou d'automne dans les horizons futurs (Fig. 4.10). À noter que les vagues de chaleur peuvent avoir lieu aussi durant la période hivernale mais on parle alors généralement de vagues de douceurs.

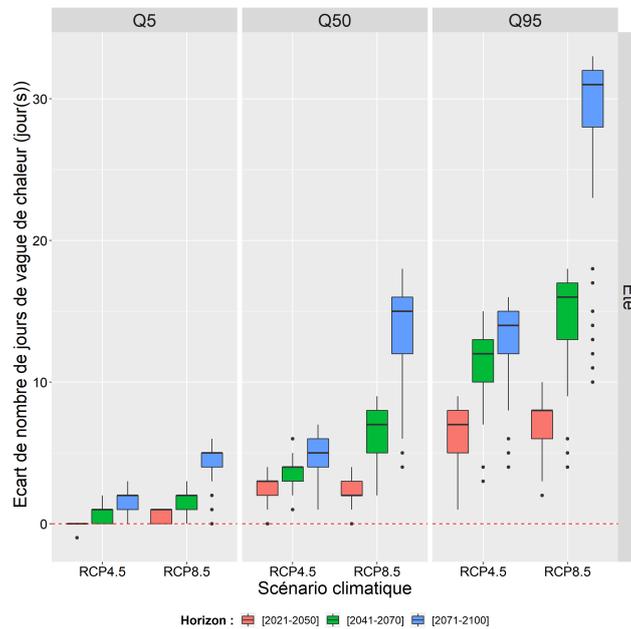


Figure 4.9 – Écart à la période de référence 1976-2005 des phénomènes de vague de chaleur pour chaque scénario climatique et pour les trois périodes temporelles.

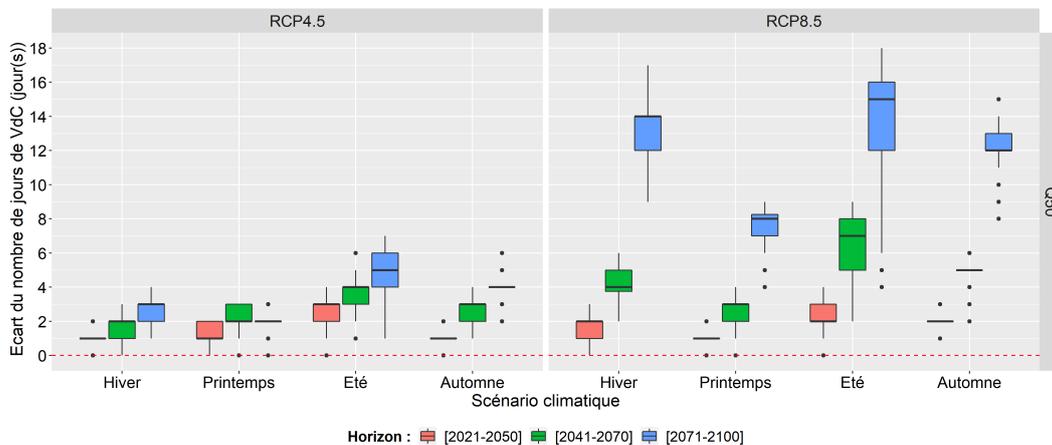


Figure 4.10 – Écart à la période de référence 1976-2005 des phénomènes de vague de chaleur pour chaque scénario climatique par saison.

4.3 Variabilité spatiale des effets climatique

Une ordination a été effectuée afin d’avoir une première analyse descriptive des différents secteurs du territoire du bassin Artois-Picardie à l’aide des indicateurs climatiques. Les variables de l’AFD (Fig. 4.11) sont réparties selon deux axes, l’axe 1 représente 35.5% de l’information totale et le second axe 27.8%. Il y a une différenciation de nos secteurs avec certains chevauchements. L’information de l’axe 1 est partiellement expliquée par les variables liées à la précipitation (*e.g.* précipitations journalières moyennes, cumul de précipitation) et l’information de l’axe 2 est notamment expliquée par les variables liées à la température (*e.g.* température maximale journalière, nombre de journées d’été, nombre de jours anormalement chauds, nombre de jours d’une vague de chaleur). Nos secteurs se différencient majoritairement sur l’axe 2 selon un gradient de température, où les secteurs situés les plus au sud du bassin (*e.g.* la Somme, la Sambre) présentent de fortes augmentations des variables liées à la température par rapport à la période de référence. Les secteurs situés au nord du bassin (*e.g.* l’AA, Marque Deule-Lys) présenteraient des variations de température plus faibles. L’AFD faite dans cette étude a été validé par un test de permutation de Monte-Carlo, ce qui signifie que l’AFD a effectuée une discrimination significative des groupes considérés.

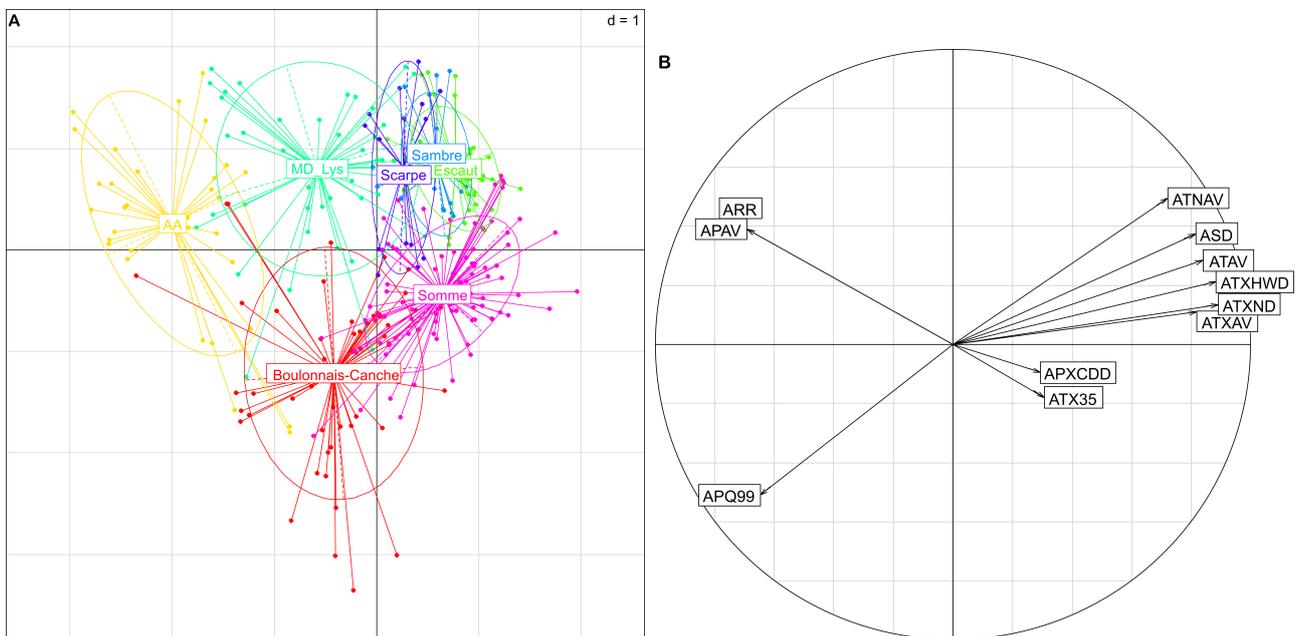


Figure 4.11 – Analyse factorielle discriminante sur les 312 stations réparties en 7 secteurs (Annexe A.5) et sur 11 indicateurs climatiques pour la période [2041-2070] durant la période estivale. **A.** Projection des stations selon les secteurs du bassin Artois-Picardie sur le plan défini par les axes de l’analyse discriminante. **B.** Cercle de corrélation entre les indicateurs climatiques et les axes de l’analyse. Les dénominations des variables peuvent être retrouvées en annexe A.8

Concernant les sécheresses météorologiques (Fig. 4.12.A) on peut noter trois aspects :

- Il y a peu d'évolution sensible sur le territoire jusqu'à l'horizon 2050 ;
- En milieu et fin de siècle, les sécheresses s'aggravent notamment au niveau du nord du bassin avec une intensité moyenne qui passe de "proche de la normale" à "très/extrêmement sec" ;
- Le sud du bassin présente une évolution modérée avec une partie du territoire de la Somme qui ne présente pas de modification d'intensité.

L'analyse faite pour les sécheresses de sols (Fig. 4.12.B) renvoie un constat plus alarmant :

- Une aggravation des sécheresses continue au cours du temps dès l'horizon proche ;
- À l'horizon moyen, l'aggravation la plus forte concerne de nouveau le nord du bassin ;
- En fin de siècle, les sécheresses extrêmes sont présentes sur l'ensemble du territoire.

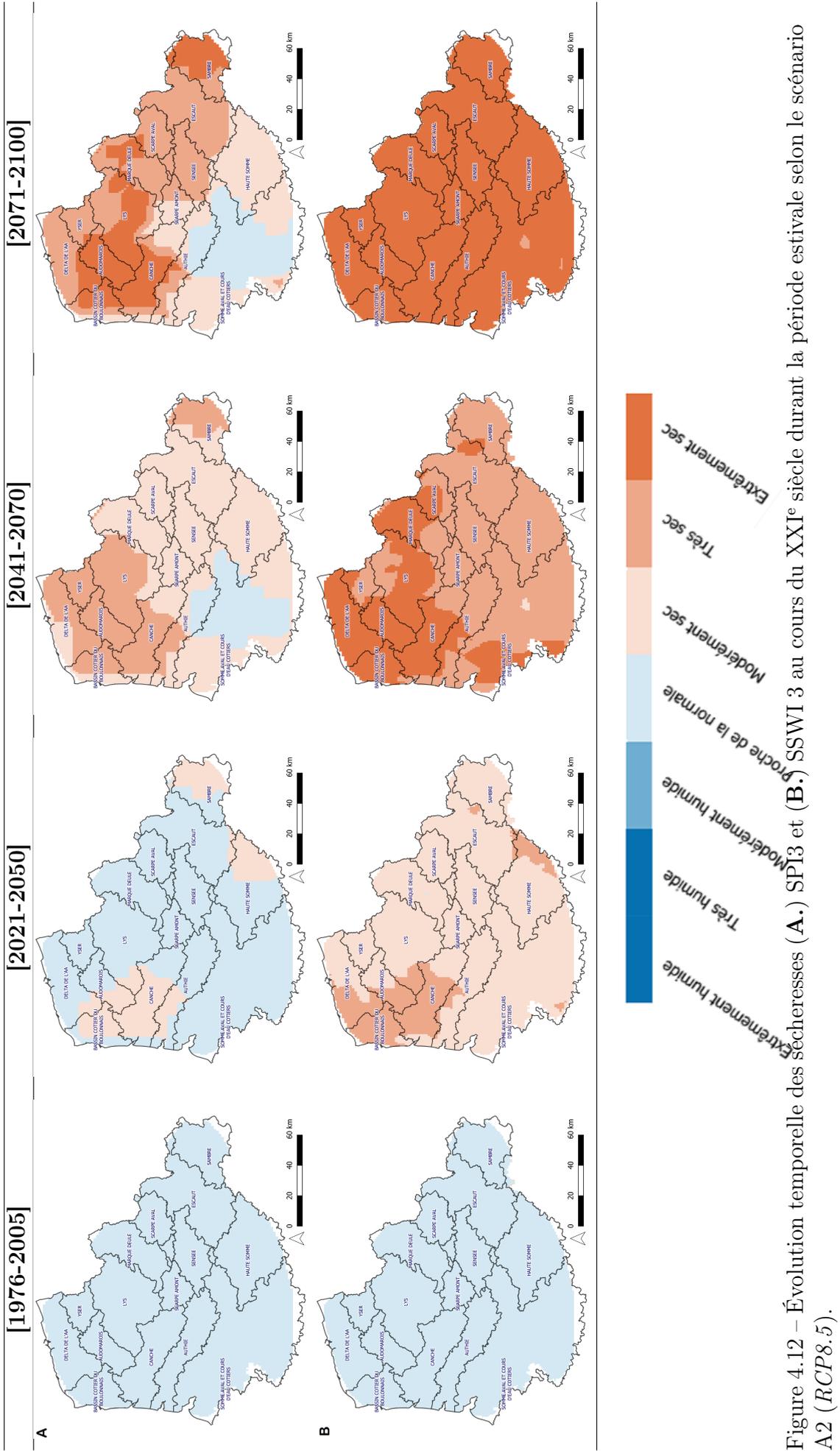


Figure 4.12 – Évolution temporelle des sécheresses (A.) SPI3 et (B.) SSWI 3 au cours du XXI^e siècle durant la période estivale selon le scénario A2 (RCP8.5).

Discussion

Afin de mettre en évidence les impacts du changement climatique sur la ressource en eau au niveau du bassin Artois-Picardie, une étude bibliographique, des entretiens et l'étude de projections climatiques ont été effectués. L'analyse de ce corpus de donnée a permis de développer nos premières conclusions face à une question environnementale qui a des problématiques aussi sociales et économiques.

Dans un premier temps, nous avons pu observer que le territoire fait déjà face à des événements extrêmes causés ou accentués par le changement climatique, à l'exemple la canicule de l'été 2003 où les facteurs anthropiques ont multiplié la probabilité d'occurrence de la canicule par un facteur 2 ou 3 (Stott *et al.*, 2004; Robin & Ribes, 2020) ou celle de 2019 qui a mesuré une anomalie de $+3.5^{\circ}\text{C}$ par rapport à la normale au niveau de la métropole lilloise (Vautard *et al.*, 2020). Cela nous a permis aussi de mettre en évidence des dates majeures qui pourront faire acte de référence pour les événements futurs.

Les résultats liés aux projections des indicateurs de températures indiquent que l'on peut s'attendre à ce que les températures maximales moyennes des années 2017/2019 correspondent aux températures proches de la normale à l'horizon moyen. Les fortes anomalies (*e.g.* 1976, 2003) vont devenir des températures d'années quinquennales à l'horizon moyen et des températures proches de la normale à l'horizon lointain. Les projections indiquent aussi une augmentation du nombre de jours très chauds par été qui pourrait dépasser les 20 jours à moyen terme ou même les 40 jours en fin de siècle (*RCP8.5*).

Les projections concernant les épisodes de vagues de chaleur indiquent une augmentation en fréquence et en intensité avec au minimum un doublement des jours de vague de chaleur par été dès l'horizon moyen. Un épisode caniculaire comme celui de 2003 avec ses pics de température restera rare en 2050, mais risque de devenir un événement fréquent dès la fin du siècle. Cela va dans le sens d'études estimant qu'il s'agit de phénomène qui risquent de devenir communs en 2040 (Christidis *et al.*, 2014), et où la France risque de voir un doublement de son nombre de vagues de chaleurs estivales en 2050 (Jouzel *et al.*, 2014; Ouzeau *et al.*, 2016).

Cette augmentation de température a un impact direct sur les prélèvements domestiques de la ressource en eau, car les organismes de gestion estiment qu'au niveau de la région Hauts-de-France une augmentation de 30% de la consommation est à attendre lorsque la température maximale quotidienne dépasse entre 26 et 29°C. L'augmentation de la consommation d'eau potable est une composante forte de l'intensification des phénomènes de sécheresse hydrologique (Wada *et al.*, 2013).

À l'augmentation des températures se rajoute une variation du régime pluviométrique. Dans un premier temps sur une variabilité saisonnière plus prononcée avec une augmentation en hiver et une baisse en été, et dans un second temps une augmentation des pluies intenses. L'augmentation des pluies intense est liée à la hausse des températures qui permet d'augmenter la capacité de charge en vapeur d'eau de l'atmosphère (7% d'eau supplémentaire par hausse de 1°C) mobilisant ainsi un réservoir d'eau atmosphérique plus important (Ribes *et al.*, 2019). Dans un premier temps cela peut avoir pour conséquence des précipitations plus intenses qui vont saturer rapidement les sols en eau et augmenter le ruissellement, entraînant une baisse des pluies efficaces et de la recharge des nappes. Et dans un second temps, une hausse de la demande évaporative entraînant une augmentation du risque de sécheresse.

Les résultats liés aux projections des sécheresses indiquent une aggravation plus rapide et plus intense des assèchements durant la période estivale due au déficit d'humidité du sol et à la baisse des débits de cours d'eau. Les facteurs principaux responsables d'un tel assèchement estival sont la diminution des précipitations en été, mais surtout une augmentation de l'évapotranspiration en surface due à l'augmentation de la température (Soubeyroux *et al.*, 2012) (Boé *et al.*, 2018; Soubeyroux *et al.*, 2012). Les projections montrent que la situation devrait continuer à s'aggraver continuellement, avec des situations de sécheresses plus fréquentes, plus longues et plus sévères sont à attendre sur l'ensemble du bassin (Boé *et al.*, 2018; Samaniego *et al.*, 2018). À l'horizon moyen, pour les sécheresses agricoles et météorologiques nous pouvons nous attendre à des années normales correspondant aux années quinquennales actuelles. Et pour ses dernières, nous devrions nous attendre à des épisodes de sécheresses à mi-chemin entre ceux de 2020 et de 1976, voir supérieur à 1976 pour les sécheresses agricoles. Durant la seconde partie du siècle, il risque d'y avoir des sécheresses agricoles en quasi-continue d'une intensité égale ou supérieure à celle survenue en 1976 avec une augmentation de temps passé en sécheresse d'environ 30 à 40% pour la France (Du Vachat, 2019), les années quinquennales sèches seront à des intensités encore inconnues sur le territoire du bassin Artois-Picardie. Les conséquences pour la biodiversité, mais aussi pour l'agriculture seront très importantes, impliquant un besoin d'adaptation transformationnelle des activités et de la gestion de la ressource

en eau.

Le Projet Aqui-FR a travaillé sur l'évolution des sécheresses hydrogéologiques à l'horizon 2100, ce type de sécheresse se définit par un niveau des nappes, lacs ou rivières, anormalement bas. Dans le cas du scénario RCP 8.5, les eaux souterraines sont impactées par une augmentation de la surface des nappes touchée (+50%), l'intensité des sécheresses (+20%), et la durée des sécheresses (+30%) (Habets *et al.*, 2018), il n'y a pas encore d'information sur comment cela peut impacter les prélèvements de la ressource en eau, cela reste néanmoins un aspect intéressant à envisager dans le futur. Enfin, un nouveau type de sécheresse est à attendre sur le territoire des Hauts-de-France, il s'agit de sécheresse éclair caractérisée par des assèchements temporaires très intenses qui impacte le sol et la végétation, et qui est favorable aux développements des incendies (comm. pers. Météo-France).

Dans le nord de la France à l'horizon 2050-2070, une baisse de la ressource en eau dans les aquifères ainsi qu'une diminution des débits d'étiage pour une grande majorité des cours d'eau liés aux évolutions climatiques est à attendre (Habets *et al.*, 2013; Chauveau *et al.*, 2013), avec des risques annuels de débit proche de la normale sèche (débit d'étiage quinquennal). Les prélèvements sont essentiellement faits durant la période estivale, avec près de 97% des prélèvements pour des besoins agricoles qui s'effectuent au niveau des nappes et qui sont fortement dépendants de la sécheresse des sols. Le territoire de la Somme sera fortement impacté, car les prélèvements agricoles y sont les plus importants (76% des prélèvements agricoles du bassin). À l'horizon moyen on peut s'attendre à des prélèvements annuels équivalents à l'année 2020 qui présente une hausse des prélèvements de 80% comparé aux prélèvements effectués dans les deux dernières décennies (DREAL, 2021). L'impact sur les cours d'eau risque de toucher les industries qui font majoritairement leurs prélèvements en eau de surface (env. 25% de perte; comm. pers. DREAL) et qu'il faudra donc compenser par des prélèvements dans les eaux souterraines qui restent à déterminer.

Conclusion

Afin d'estimer l'impact des événements extrêmes sur la ressource en eau, il a semblé plus pertinent de s'intéresser uniquement à la période estivale, car un sol peut s'assécher très vite même s'il y a eu un hiver très humide et on n'observe pas de compensation visible entre les saisons. L'ensemble du territoire du bassin Artois-Picardie va être soumis à des risques liés à l'augmentation des sécheresses estivales et à l'amplification des vagues de chaleur, dont les modélisations montrent une augmentation en fréquence et en intensité. L'apparition plus fréquente de ces

phénomènes extrêmes va engendrer des tensions et usages supplémentaires sur la ressource en eau, comme on a pu en connaître durant les événements récents.

Avec les phénomènes extrêmes, il semble difficile de conclure qu'il n'y a pas d'augmentation significative de risque de tensions de la ressource en eau à l'horizon moyen comme indiqué par l'étude de vulnérabilité. À moyen terme un épisode de sécheresse quinquennale correspondra à nos extrêmes actuels dans un scénario climatique optimiste et à plus forte mesure dans un scénario pessimiste. La diminution de la ressource en eau face à ces phénomènes avec l'augmentation du besoin en eaux, notamment dans l'agriculture pour compenser les étés très chauds (Boé *et al.*, 2009), risque de mettre en tension certains territoires et de créer des conflits d'usages. Notamment concernant le territoire de la Somme, qui après ajout des extrêmes aux indicateurs de l'étude de vulnérabilité présente maintenant des signes de tension dans le futur.

En prenant en compte les événements extrêmes à échéance 2050 et fortiori 2100, la majorité des territoires du bassin Artois-Picardie risque d'être en tension face à ses événements de plus en plus fréquents. Il est donc important d'améliorer les politiques d'adaptations face aux changements climatiques. Cela peut se traduire par la mise en place de stratégie d'économie d'eau afin de préparer en amont les situations critiques lors de l'apparition d'événements extrêmes. Mais aussi par le changement de pratique agricole (*e.g.* optimisation des techniques d'irrigation, améliorer la capacité de rétention des sols), la bonne gestion de l'eau industrielle ou la réduction de la consommation domestique (en 2014 - 85 m³/foyer/an ; AEAP).

Par la suite, il est prévu d'effectuer une étude prenant en compte des modèles hydrologiques qui manque à cette étude qui se focalise uniquement sur les aspects climatiques afin de mesurer directement l'impact sur la ressource en eau à l'aide d'Études Volumes Prélevables. Concernant les analyses climatiques, les projections commencent à être dépassées notamment avec le dernier rapport du GIEC paru durant l'été 2021. Il serait donc intéressant de retravailler les indicateurs avec les futures données réactualisées grâce au projet *ClimSec 2021-2023* (Indicateur SPI/SSWI), au projet *Life EauClimat* qui souhaite ajouter une dimension hydrologique à la plateforme de donnée DRIAS avec notamment des projections liées à l'évapotranspiration et au projet *Explore 2* qui s'inscrit dans la suite de l'étude *Explore 2070*.

Enfin il serait intéressant d'étudier des scénarios spécifiques de recharge des nappes (*e.g.* événement ponctuel de recharge historique extrême minimal/maximal, années successives de recharge relativement faible/élevée, temps nécessaire au système pour se remettre d'une année sans recharge ; Hellwig *et al.*, 2020), mais aussi les conséquences de la salinisation des nappes phréatiques par l'élévation de la mer sur la ressource en eau.

Bibliographie

- AEAP (2019). L'état des lieux des districts hydrographiques. Rapport technique, Agence de l'eau Artois-Picardie.
- AEAP (2021). Tableau de bord schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux artois-picardie 2022-2027. Rapport technique, Agence de l'eau Artois-Picardie.
- Angignard, M., Greiving, S., Bailly, B., Delachenal, M., & Glon, M. (2013). Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique. *Angers, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)*, 978–2.
- Baechler, L. (2012). La bonne gestion de l'eau : un enjeu majeur du développement durable. *L'Europe en Formation*, 365(3), 3.
- Bazaz, A., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., de Coninck, H., Engelbrecht, F., Jacob, D., Hourcade, J.-C., Klaus, I., de Kleijne, K., *et al.* (2018). Summary for urban policymakers : What the ipcc special report on global warming of 1.5° c means for cities.
- Boé, J., Radojevic, M., Bonnet, R., Dayon, G., de France, I., & Habets, F. (2018). Scénarios sécheresse sur le bassin seine-normandie.
- Boé, J., Terray, L., Martin, E., & Habets, F. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in french river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, 45(8).
- Bong, C. H. J. & Richard, J. (2019). Drought and climate change assessment using standardized precipitation index (SPI) for sarawak river basin. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 956–965.
- Chataigner, J. & Michon, J. (2019). Prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau (données 2016). Rapport technique, Agence française pour la biodiversité (AFB).
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., *et al.* (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en france à l'horizon 2070? *La Houille Blanche*, (4), 5–15.
- Christensen, J., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R., Kwon, W.-T., Laprise, R., Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., & Whetton, P. (2007). Regional climate projections. climate change 2007 : The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 847–940.
- Christidis, N., Jones, G. S., & Stott, P. A. (2014). Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 european heatwave. *Nature Climate Change*, 5(1), 46–50.

- Couvreur, A. & Lehuede, F. (2002). *Essai de comparaison de méthodes quantitatives et qualitatives à partir d'un exemple : le passage à l'euro vécu par les consommateurs*. CRÉDOC, Département Consommation.
- Dayon, G., Boe, J., Martin, E., & Gailhard, J. (2018). Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), 141–153.
- de Marsily, G. (2020). Will we soon run out of water? *Annals of Nutrition and Metabolism*, 76(Suppl. 1), 10–16.
- de Marsily, G., del Rio, R. A., Cazenave, A., & Ribstein, P. (2018). Allons-nous bientôt manquer d'eau? *La Météorologie*, (101), 39.
- Douville, H., Ribes, A., Decharme, B., Alkama, R., & Sheffield, J. (2012). Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nature Climate Change*, 3(1), 59–62.
- DREAL (2021). Dynamique de création de forage et de nouveaux prélèvements. Doc n°2, Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Haut-de-France.
- Du Vachat, R. J. (2019). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique/par l'onerc. *Météorologie*, (107), 6.
- Döll, P. (2002). Impact of climate change and variability on irrigation requirements : A global perspective. *Climatic Change*, 54(3), 269–293.
- Habets, F., Amraoui, N., Caballero, Y., Thiery, D., Vergnes, J.-P., Morel, T., Le Moigne, P., Courtois, Q., de Dreuzy, J.-R., Ackerer, P., et al. (2018). *Evolution de la ressource en eau souterraine passée, présente et future estimée par Aqui-FR*. PhD thesis, AFB.
- Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L., Thiéry, D., Oudin, L., & Viennot, P. (2013). Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France. *Climatic Change*, 121(4), 771–785.
- Hawkins, E. & Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate dynamics*, 37(1), 407–418.
- Hellwig, J., Stoelzle, M., & Stahl, K. (2020). Stress-testing groundwater and baseflow drought responses to synthetic climate change-informed recharge scenarios.
- IPCC (2012). *Summary for Policymakers*, (pp. 582). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- IPCC (2013). *Summary for Policymakers*, book section SPM, (pp. 1–30). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press.
- Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., & Vautard, R. (2014). Le climat de la France au xxie siècle (volume 4), scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. *Rapports de la Direction générale de l'Énergie et du Climat, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie*.

- Kaufmann, J. & de Singly, F. (2011). *L'entretien compréhensif*. 128. Sociologie anthropologie. A. Colin.
- Kundzewicz, Z. W. (2008). Climate change impacts on the hydrological cycle. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 8(2-4), 195–203.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., *et al.* (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, volume 17, (pp. 179–183). Boston.
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202–216.
- Météo-France (2019). Diagnostics climatiques. Rapport technique, Observatoire Climat Hauts-de-France.
- Ouzeau, G., Soubeyroux, J.-M., Schneider, M., Vautard, R., & Planton, S. (2016). Heat waves analysis over france in present and future climate : Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, 4, 1–12.
- Plat, B., Lamrby, A., de Lavit, P. D., & de la Touanne, D. (2019). Les services publics d'eau et d'assainissement en france 7ème édition. données économiques, sociales environnementales. Rapport technique, Fédération Professionnelle des Entreprises de l'Eau.
- QGIS Development Team (2009). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation.
- R Core Team (2019). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing.
- Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., Planton, S., & Soubeyroux, J.-M. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the french mediterranean. *Climate dynamics*, 52(1), 1095–1114.
- Robin, Y. & Ribes, A. (2020). Nonstationary extreme value analysis for event attribution combining climate models and observations. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 6(2), 205–221.
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E. F., & Marx, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates european soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, 8(5), 421–426.
- Shukla, P., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H., Roberts, D., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Van Diemen, R., *et al.* (2019). *Ipcc, 2019 : Climate change and land : an ipcc special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.
- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., Qin, D., *et al.* (2007). *Climate change 2007-the physical science basis : Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*, volume 4. Cambridge university press.
- Soubeyroux, J., Vidal, J.-P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Pagé, C., & Habets, F. (2011). Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final. Research report.

- Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R., & Tocquer, F. (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence drias 2020 pour la métropole. *Météo-France*, 98.
- Soubeyroux, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P., Martin, É., & Dandin, P. (2012). Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, 8(78), 21.
- Stott, P. A., Stone, D. A., & Allen, M. R. (2004). Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432(7017), 610–614.
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. A. (2012). *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé*. Organisation météorologique mondiale (OMM).
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359–392.
- Vautard, R., van Aalst, M., Boucher, O., Drouin, A., Haustein, K., Kreienkamp, F., van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E. L., Ribes, A., Robin, Y., Schneider, M., Soubeyroux, J.-M., Stott, P., Seneviratne, S. I., Vogel, M. M., & Wehner, M. (2020). Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094077.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., Wanders, N., & Bierkens, M. F. P. (2013). Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034036.
- Wilhite, D. A. & Glantz, M. H. (1985). Understanding : the drought phenomenon : The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.
- Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, F. H., Gillett, N. P., Solomon, S., Stott, P. A., & Nozawa, T. (2007). Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448(7152), 461–465.

Liste des sigles et des abréviations

AEAP	Agence de l'Eau Artois-Picardie
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
DREAL-HdF	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Hauts-de-France
ECA&D	European Climate Assessment & Dataset
GES	Gaz à effet de serre
Horizon-lointain	Période de temps entre 2071-2100
Horizon-moyen	Période de temps entre 2041-2070
Horizon-proche	Période de temps entre 2021-2050
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace – Sciences du climat
RCP	Representative Concentration Pathway - scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre
SAFRAN	<i>"Safran est un système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire au pas de temps horaire différents paramètres (e.g. température, humidité, vent, précipitations). Ces paramètres sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km)".</i> Définition issue de Drias, 2021.
SAGE	Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SPI	Standardized Precipitation Index
SSWI	Standardized Soil Wetness Index

Table des figures

1.1	Représentation des territoires sous tensions quantitatives de la ressource en eau par territoire de SAGE	14
2.1	Représentation de la grille d'extraction SAFRAN au niveau du bassin Artois-Picardie	16
3.1	Évolution de la température maximale estivale moyenne de 6 stations du bassin Artois-Picardie.	23
3.2	Évolution des sécheresses météorologiques depuis 1970, à partir de l'indicateur SPI3 durant la période estivale	25
3.3	Évolution de l'indicateur d'humidité des sols SWI au sein des Hauts-de-France	26
3.4	Nombre de jours de vague de chaleur durant la période 1955-2018	27
4.1	Écart à la période de référence 1976-2005 des températures quotidiennes maximales (Tx) pour les scénarios climatiques <i>RCP4.5</i> et <i>RCP8.5</i> en fonction du temps	30
4.2	Écart à la période de référence 1976-2005 des températures quotidiennes maximales (Tx) pour les scénarios climatiques <i>RCP4.5</i> et <i>RCP8.5</i> selon les trois périodes temporelles	30
4.3	Température maximale quotidienne des étés 1976, 2003 et 2020 moyennée sur le bassin Artois-Picardie	31
4.4	Nombre de jours très chauds où la température maximale quotidienne est supérieure ou égale à 27°C durant la saison estivale	31
4.5	Écart à la période de référence 1976-2005 des cumuls de précipitations pour chaque scénario climatique	32
4.6	Écart à la période de référence 1976-2005 des fractions des précipitations intenses durant la période hivernale	33
4.7	Évolution des sécheresses météorologiques pour la période estivale dans un scénario <i>RCP8.5</i>	34
4.8	Évolution des sécheresses de sols pour la période estivale dans un scénario <i>RCP8.5</i>	35
4.9	Écart à la période de référence 1976-2005 des phénomènes de vague de chaleur pour chaque scénario climatique durant la période estivale	36
4.10	Écart à la période de référence 1976-2005 des phénomènes de vague de chaleur pour chaque scénario climatique par saison	36
4.11	Analyse factorielle discriminante sur les 312 stations réparties en 7 secteurs et sur 11 indicateurs climatiques pour la période 2041-2070 durant la période estivale	37
4.12	Évolution temporelle des sécheresses au cours du XXI ^e siècle durant la période estivale	39

Table des tableaux

2.1	Valeurs des indices SPI et SSWI assigné à leurs intensités de sécheresse et leurs probabilités d'occurrence respective. Issue du projet CLIMSEC (Soubeyroux <i>et al.</i> , 2011)	18
-----	---	----

Liste des annexes

A.1 Répartition des volumes d'eau prélevés par origine sur le bassin Artois-Picardie .	56
A.2 Schéma représentant différentes catégories de sécheresse et leurs développements	56
A.3 Représentation des SAGE du bassin Artois-Picardie	57
A.4 Représentation des émissions de CO2 selon les scénarios RCP	57
A.5 Représentation des stations météorologiques et de la sectorisation hydrographique du bassin Artois-Picardie	58
A.6 Les indicateurs climatiques DRIAS 2020	59
A.7 Écart du cumul annuel des précipitations par rapport à la période de référence 1981-2010	60
A.8 Dénomination des indicateurs climatiques utilisés dans l'analyse factorielle discriminante	60
A.9 Valeurs seuils des durées de retour pour chaque périodes de temps et chaque scénarios climatiques	61

A.1 Répartition des volumes d'eau prélevés par origine sur le bassin Artois-Picardie. issu de AEAP, 2019

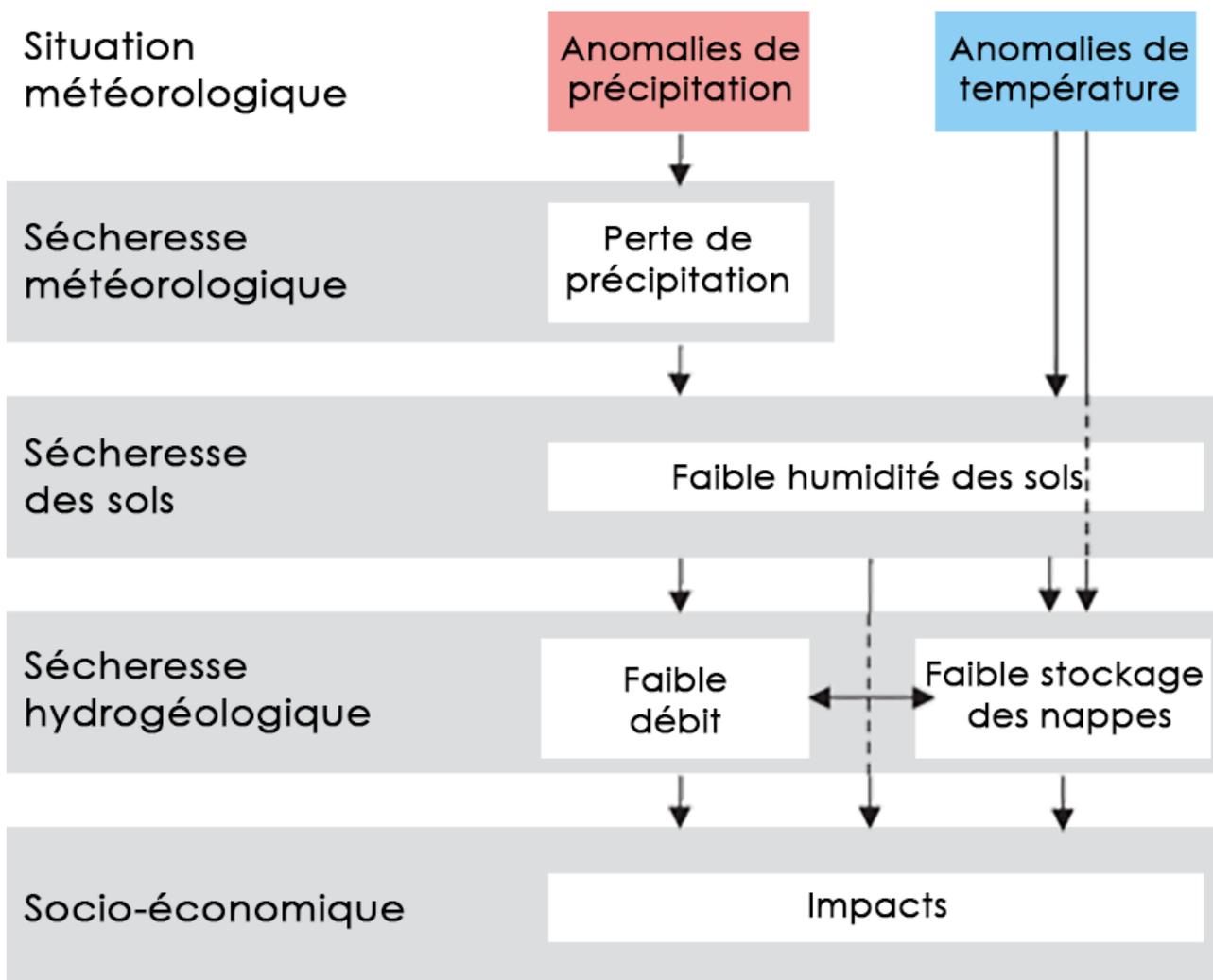
Origine de l'eau	Prélèvements (en Mm3) en 2016 pour un usage ...					Part
	Eau potable	Agricole	Industriel		Total	
eau de surface	→ 22	1	↘↘	90	↘ 113	22%
eau souterraine	→ 299	34	↘	72	↘ 405	78%
Artois - Picardie	→ 321	35	↘	162	↘ 518	100%
	62%	7%		31%		

Légende : Évolution des pressions depuis 6 ans (quand la donnée est disponible).

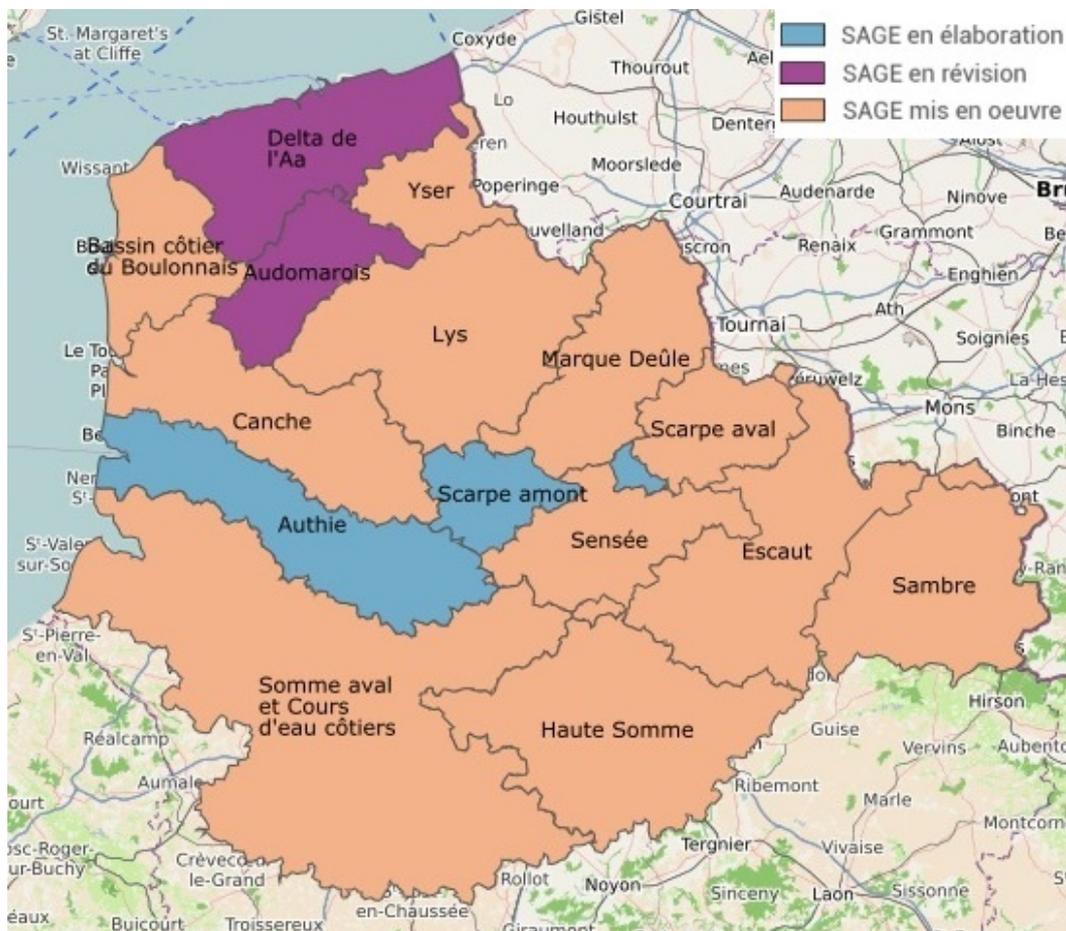
↘↘ au moins -20% ; ↘ entre -20 et -5% ; → entre -5 et +5% ;

↗ entre +5 et +20% ; ↗↗ au moins +20%.

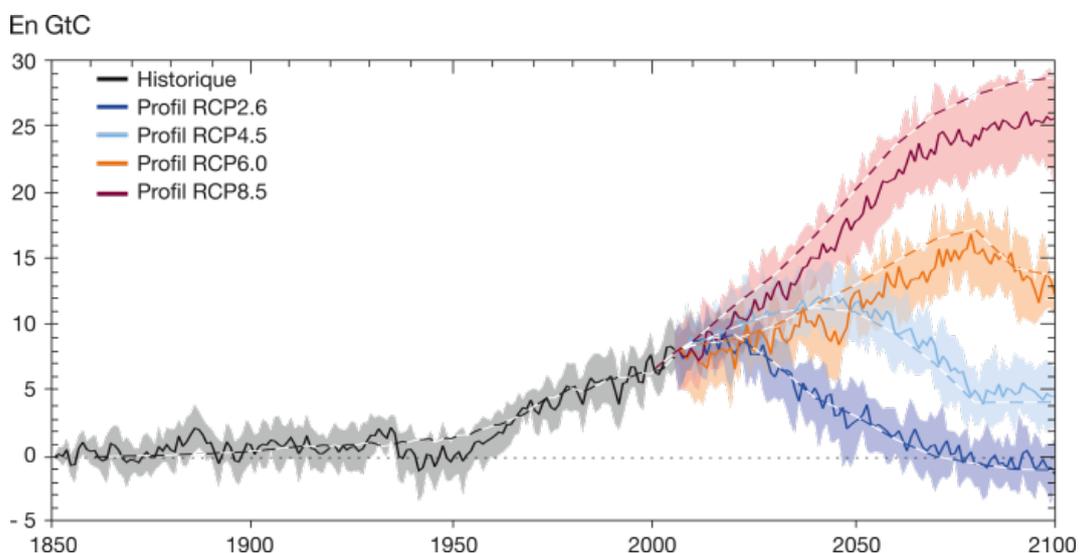
A.2 Schéma représentant différentes catégories de sécheresse et leurs développements. Adapté de Van Loon, 2015



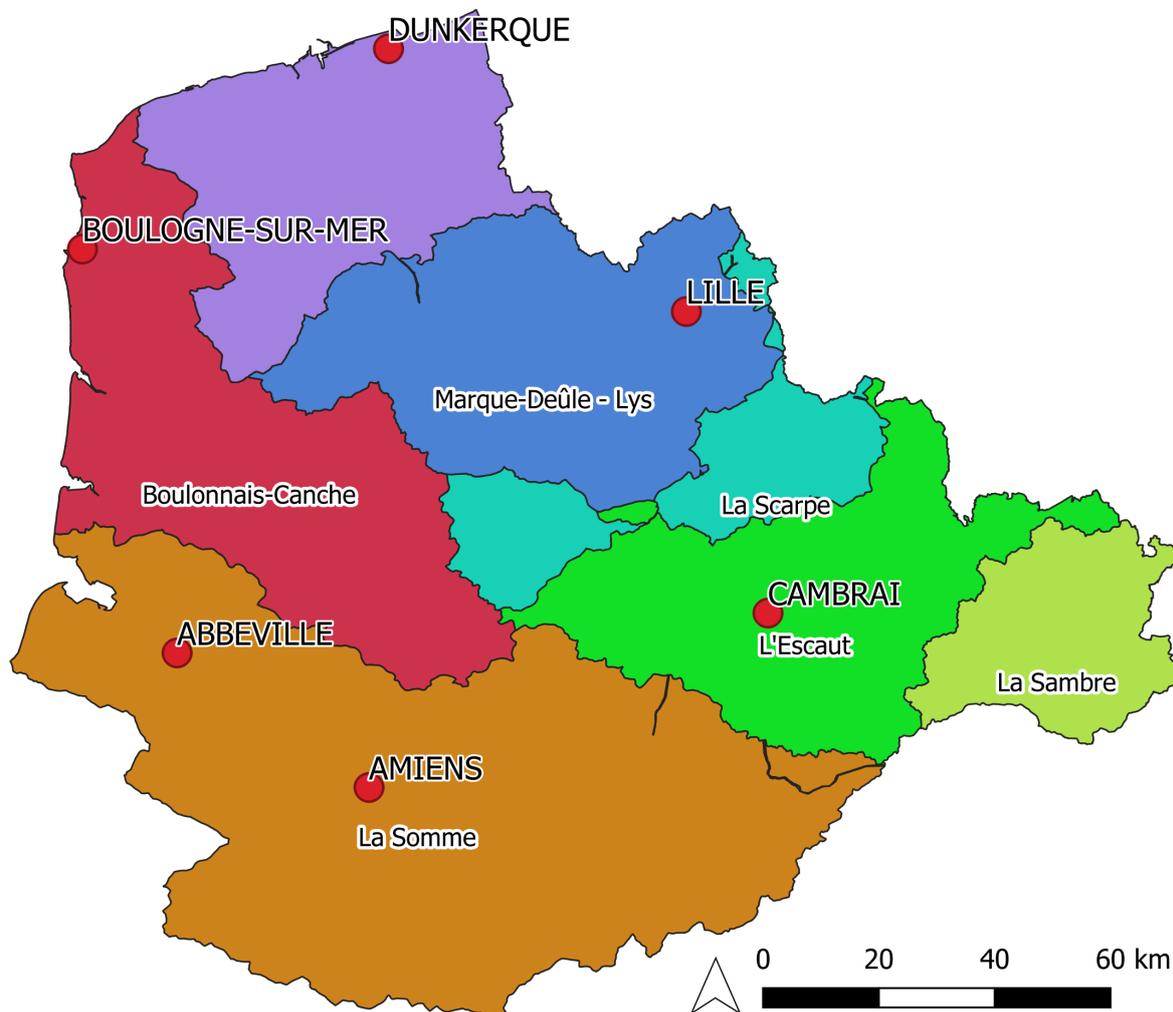
A.3 Représentation des SAGE du bassin Artois-Picardie. Issue de GEST'EAU, 2021



A.4 Représentation des émissions de CO2 selon les scénarios RCP. Issue de IPCC (2013)



A.5 Représentation des stations météorologiques et de la sectorisation hydrographique du bassin Artois-Picardie

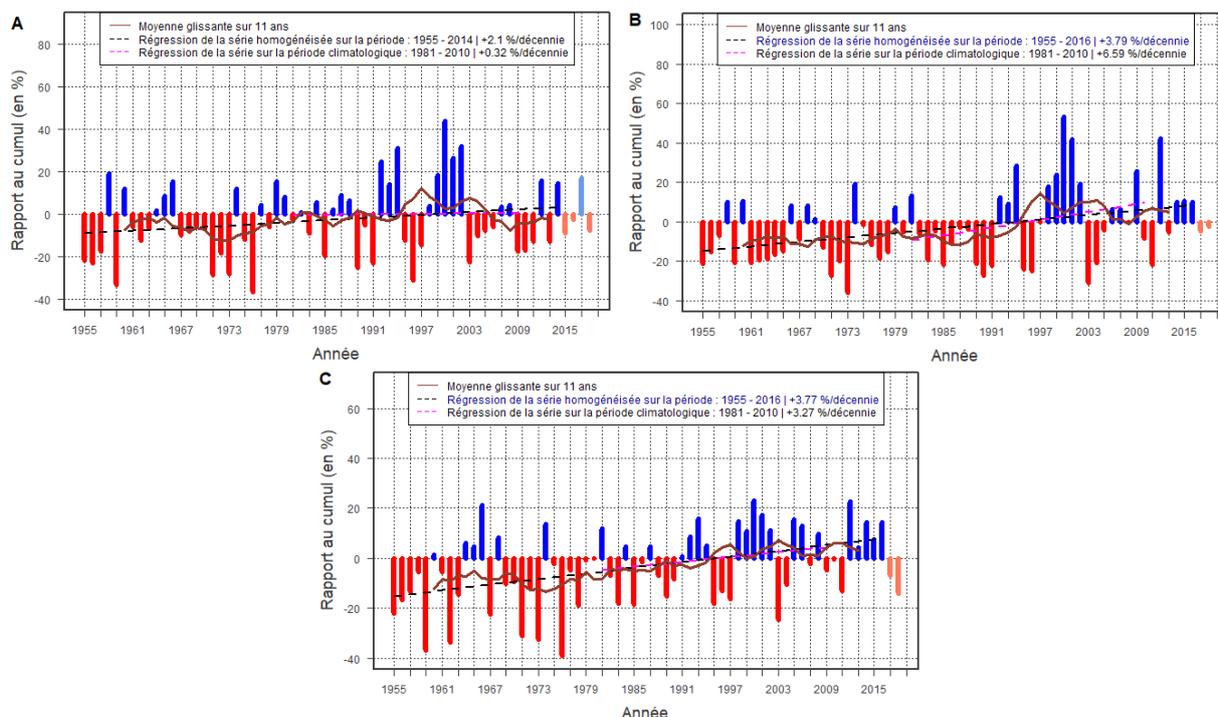


donnée issue de data.eaufrance.fr

A.6 Les indicateurs climatiques DRIAS 2020

Indicateur	Description	Unité
Précipitations quotidiennes moyennes	Moyenne des précipitations journalières (Pr) de la période	mm
Cumul de précipitation	Cumul sur la période des précipitations liquides et solides	mm
Fraction des précipitations journalières intenses	où $Pr \geq 90$ e centile des précipitations annuelles	%
Nombre de jours de fortes précipitations	Nombre de jours pour lesquels $Pr \geq 20$ mm	jour(s)
Précipitations extrêmes	99ème centile des précipitations annuelles	mm
Période de sécheresse	Nombre de jours consécutifs pour lesquels $Pr < 1$ mm	jour(s)
Nombre de jours de pluie	Nombre de jours pour lesquels $Pr \geq 1$ mm	jour(s)
Nombre de jours de précipitations intenses	Nombre de jour où les $Pr > 99$ ème centile des précipitations totales de la période considérée	jour(s)
Température moyenne	Moyenne de la température quotidienne moyenne de la période	°C
Température maximale journalière (Tx)	Moyenne de la température quotidienne maximale de la période	°C
Nombre de journées d'été	Nombre de jours pour lesquels $Tx > 25^\circ\text{C}$	jour(s)
Nombre de jours de forte chaleur	Nombre de jours pour lesquels $Tx > 35^\circ\text{C}$	jour(s)
Nombre de jours d'une vague de chaleur	Nombre de jours où $Tx > 5^\circ\text{C}$ de la normale dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs	jour(s)
Nombre de jours anormalement chauds	Nombre de jours pour lesquels $Tx \geq Tx$ de référence $+5^\circ\text{C}$	jour(s)
Nombre de jours très chauds	Nombre de jours pour lesquels $Tx > 27^\circ\text{C}$	jour(s)

A.7 Écart du cumul annuel des précipitations par rapport à la période de référence [1981-2010] au sein des stations de (A.) Abbeville, de (B.) Boulogne-sur-Mer, et de (C.) Lille-Lesquin. Graphique issu de Météo-France (2019)



A.8 Dénomination des indicateurs climatiques utilisés dans l'analyse factorielle discriminante

ATAV	Écart de température moyenne journalière	(°C)
ATNAV	Écart de température minimale journalière	(°C)
ATXAV	Écart de température maximale journalière	(°C)
ASD	Écart de nombre de journées d'été	(jour(s))
ATX35	Écart de nombre de jours de forte chaleur ($T_x > 35^\circ\text{C}$)	(jour(s))
ATXND	Écart de nombre de jours anormalement chauds	(jour(s))
ATXHWD	Écart de nombre de jours d'une vague de chaleur	(jour(s))
APAV	Écart de précipitations journalières moyennes	(mm)
ARR	Écart de cumul de précipitation	(mm)
APXCDD	Écart de période de sécheresse	(jour(s))
APQ99	Écart de précipitations extrêmes	(q99) (mm)

A.9 Valeurs seuils des durées de retour pour chaque périodes de temps et chaque scénarios climatiques

Indicateur	Contexte	Période	25	10	5	Normale	5	10	25
SPI	RCP8.5	[1976-2005]	-1.77	-1.19	-0.95	-0.37	0.41	0.89	1.91
		[2021-2050]	-3.31	-1.73	-1.49	-0.85	0.03	0.62	1.84
		[2041-2070]	-3.61	-2.23	-1.86	-1.21	-0.42	0.26	1.59
		[2071-2100]	-3.88	-2.45	-1.95	-1.33	-0.61	-0.14	1.26
	RCP4.5	[1976-2005]	-1.77	-1.19	-0.95	-0.37	0.41	0.89	1.91
		[2021-2050]	-3.2	-1.83	-1.44	-0.84	-0.1	0.28	1.09
		[2041-2070]	-2.79	-1.58	-1.27	-0.67	0.15	0.51	0.98
		[2071-2100]	-3.63	-2.35	-1.61	-0.99	-0.36	0.03	0.97
SSWI	RCP8.5	[1976-2005]	-1.88	-1.41	-1.11	-0.35	0.43	0.89	2.17
		[2021-2050]	-3.76	-2.42	-1.88	-1.12	-0.22	0.28	1.09
		[2041-2070]	-4.08	-2.89	-2.36	-1.64	-0.93	-0.5	0.624
		[2071-2100]	-6.60	-4.13	-3.42	-2.42	-1.62	-1.28	-0.69
	RCP4.5	[1976-2005]	-1.88	-1.41	-1.11	-0.35	0.43	0.89	2.17
		[2021-2050]	-2.92	-2.01	-1.66	-1	-0.21	0.36	1.33
		[2041-2070]	-3.00	-1.93	-1.61	-0.96	-0.08	0.4	1.17
		[2071-2100]	-3.88	-2.76	-2.38	-1.56	-0.87	-0.46	0.5

Résumé. Le rapport AR6 du GIEC sorti durant l'été 2021 rend sans équivoque l'impact de l'homme sur le changement climatique mais aussi son rôle sur les phénomènes extrême tout autour du monde (*e.g.* vague de chaleur, sécheresse, précipitation intense, cyclone). Si les tendances des scénarios climatiques sont bien connues, ils restent quand même de l'incertitude face à l'évolution des précipitations et une plus grande incertitude sur le devenir de la ressource en eau qui risque de devenir un enjeu majeur dans plusieurs parties du monde. Au sein du bassin Artois-Picardie, les gestionnaires se demandent l'impact futur que cela peut avoir sur la ressource en eau, notamment durant la période d'étiage où des questions se posent sur sa bonne gestion. L'objectif de ce travail est de mieux caractériser l'évolution climatique au sein du bassin durant le siècle à venir. L'axe principal sera porté sur les événements extrêmes à la fois d'un point de vue historique mais aussi par une approche du climat futur avec des projections climatiques. Dans un premier temps par une étude bibliographique et par la rencontre d'acteurs de la thématique et dans un second temps par un travail d'analyse de donnée. Cela nous a permis d'effectuer des parallèles entre les événements extrêmes actuels et les tendances futurs afin d'avoir un aperçu des risques et besoins potentiels des territoires concernant la ressource en eau. Cette analyse préliminaire montre, dès 2050, un risque d'augmentation en fréquence des événements climatiques estivaux extrêmes qu'a connue le bassin dans les cinquante dernières années.

Mots-clés : changement climatique ; phénomène extrême ; ressource en eau ; bassin Artois-Picardie ; DRIAS ; sécheresse.

Abstract. The IPCC AR6 report released during the 2021 summer makes unequivocal the impact of man on climate change, but also his role on extreme phenomena all around the world (*e.g.* heatwaves, droughts, heavy precipitation, cyclone). If the trends in climate change are well known, they still remain uncertain about the evolution of precipitation and there is a greater uncertainty about the future of water resources, which risks to become a major issue in several parts of the world. Within the Artois-Picardie basin, managers are wondering about good management of water resources in the future, especially during the low-flow period. The objective of this work is to better characterize the climatic evolution within the basin during the coming century. The main focus will be on extreme events both from a historical point of view but also by an approach of the future with climate projections. Firstly by a bibliographical study and by the meeting of stakeholders and secondly by data analysis. This has enabled us to draw parallels between current extreme events and future trends in order to gain an overview of the potential risks and needs of territories regarding water resources. This preliminary analysis shows, from 2050, a risk of an increase in frequency of the most extreme summer climatic events that the basin has experienced in the last fifty years.

Keywords. climate change ; extreme weather events ; water resources ; DRIAS ; Artois-Picardie water basin, droughts.