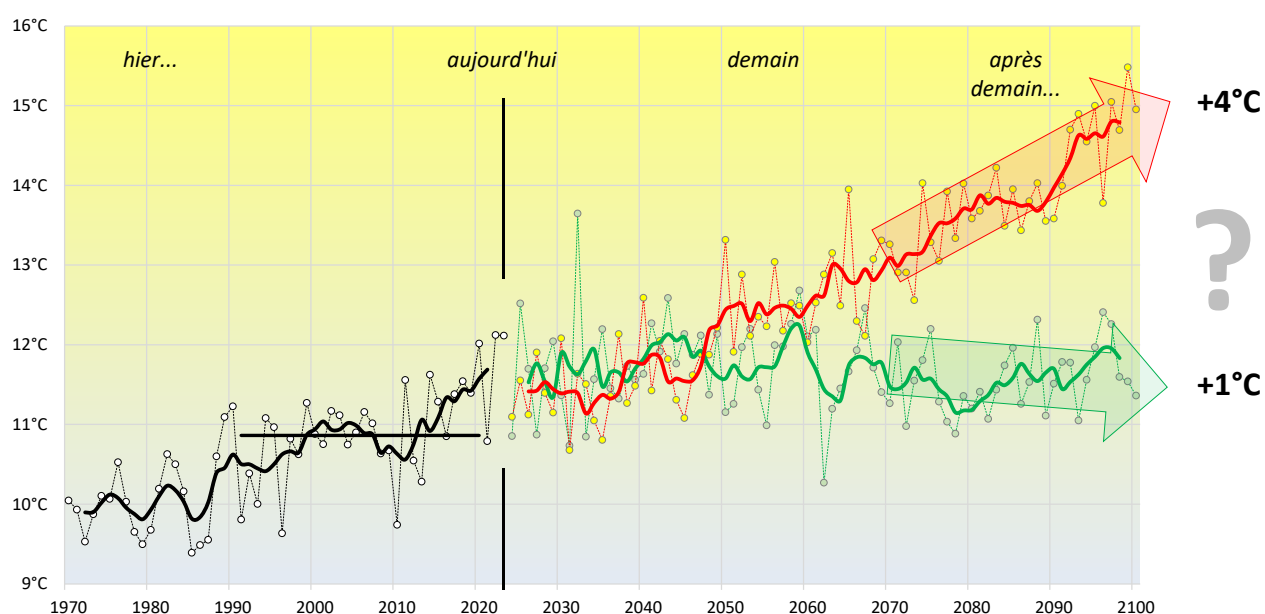


GIEC Normand – Phase 2

Thème

Changement climatique et Aléas météorologiques en Normandie



Olivier CANTAT (IDEES Caen, Université de Caen Normandie)
Stéphane COSTA (IDEES Caen, Université de Caen Normandie)
François BEAUVAIS (IDEES Caen, Université de Caen Normandie)
Benoît LAIGNEL (M2C Rouen, Université de Rouen Normandie)
Nicolas BUFFARD (Météo-France, Référent Normandie)

SOMMAIRE

GIEC Normand – Phase 2

Thème : Changement climatique et Aléas météorologiques

Introduction

1. Evolution du climat en Normandie au cours des dernières décennies

1.1. *Présentation globale du climat à partir des données spatialisées Safran Isba de Météo-France*

1.2. *Présentation globale du climat à partir des données des stations de Météo-France*

2. Projections sur l'évolution du climat en Normandie à l'horizon 2100

2.1. *Evolution de la température atmosphérique*

2.2. *Evolution du nombre de jours de chaleur et de froid*

2.3. *Evolution des précipitations*

3. Aléas météorologiques (forte chaleur et grand froid, neige, sécheresses, précipitations intenses, tempêtes)

3.1. *Fortes chaleurs et canicules*

3.2. *Grands froids et chutes de neige...*

3.3. *Sécheresses atmosphériques*

3.4. *Indicateurs bioclimatiques*

3.5. *Précipitations intenses...*

3.6. *Tempêtes*

4. Le changement climatique et la ville

Etat des connaissances sur les îlots de chaleur (ICU) en Normandie.

Conclusion

Et demain ?

Les pistes de progression dans la connaissance sur le changement climatique à échelle fine en Normandie

Bibliographie

Annexes

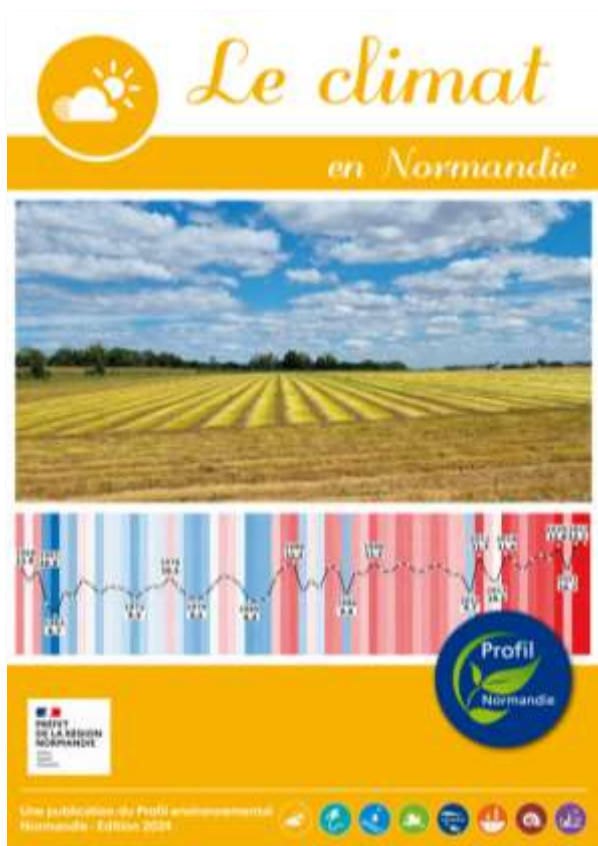
Information :

Un grand nombre de documents présentés dans ce rapport ont été initialement réalisés dans le cadre d'une étude financée par la DREAL de Normandie pour la publication « Le climat en Normandie » du Profil environnemental (Collectif coordonné par la DREAL Normandie. *Profil environnemental*. Le climat en Normandie. 200 pages. 2024).

Pour en savoir plus :

- Cette publication est consultable sur le site web de la DREAL de Normandie :

<https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/le-profil-climat-a6000.html>



- Vous avez aussi la possibilité de consulter et télécharger de nombreuses cartes prospectives régionales mises en ligne sur le portail web du Profil environnemental à l'adresse suivante :

<https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/le-changement-climatique-en-normandie-prospective-a4975.html>

- Concernant les projections à échelle spatiale très fine réalisées sur le territoire du Parc Naturel Régional Normandie-Maine, vous pouvez utiliser l'outil de visualisation :

<https://observatoire.parc-naturel-normandie-maine.fr/cartes/futurs-climats>

GIEC Normand

Thème : Changement climatique et Aléas météorologiques

O. Cantat (IDEES Caen), S. Costa (IDEES Caen),
F. Beauvais (IDEES Caen), B. Laignel (M2C Rouen), N. Buffard (Météo-France)

Depuis la première synthèse du GIEC normand parue en 2020, la situation climatique a continué de s'aggraver sur la planète avec comme marqueurs principaux l'établissement d'un nouveau record de température moyenne mondiale en 2023 et la multiplication des événements extrêmes. La Normandie n'échappe pas à cette dynamique générale du climat et il est donc apparu indispensable de mettre à jour nos informations grâce aux données spatialisées du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et aux observations sur le terrain des stations météorologiques de Météo-France. Concernant l'avenir de notre climat régional, les projections ont été réactualisées et complétées à partir du nouveau jeu de données DRIAS-2020 disponible sur la plateforme dédiée. Ces projections climatiques sont corrigées par la méthode statistique ADAMONT étendue sur la France.

Introduction

Déterminer l'impact du changement climatique constitue aujourd'hui un enjeu mondial de société majeur auquel l'ensemble des acteurs (scientifiques, élus, gestionnaires et citoyens), quelle que soit l'échelle territoriale (internationale, nationale, régionale ou locale), doivent répondre. Les réponses à ces questionnements visent la mise en place de mesures conjointes d'atténuation et d'adaptation appropriées à chaque situation de chaque territoire. Ces actions doivent être accompagnées par une autorité scientifique (représentée par le GIEC ou IPCC en anglais¹) qui constitue aujourd'hui un garant moral pour l'évaluation des changements à une échelle globale et un conseil dans l'aide à la décision

Même si les effets du changement climatique peuvent être perçus de manières diverses suivant les régions du monde et selon la nature des outils utilisés, les résultats du GIEC/IPCC (2007, 2013, 2023) montrent que le réchauffement de l'atmosphère, des océans et des continents est sans équivoque et dû aux activités humaines (Fig. 1). D'après le programme européen de surveillance de la Terre « Copernicus », la décennie 2011-2020 a ainsi été la plus chaude depuis le début des mesures, avec un excédent de +1,09°C [fourchette comprise entre +0,95°C et +1,20°C] par rapport à la température moyenne pour la période 1850-1900, représentative de l'ère préindustrielle. Le réchauffement directement attribuable aux activités humaines serait de +1,07°C, soit la quasi-totalité de ce qui est observé. Et le phénomène se poursuit (Fig. 2 et 3). Samantha Burgess, du service Copernicus sur le changement climatique, note que « *Non seulement 2023 est l'année la plus chaude jamais enregistrée, mais c'est aussi la première année où tous les jours sont plus chauds de plus de 1 °C que la période préindustrielle. Les températures en 2023 dépasseront probablement celles de n'importe quelle période au cours des 100 000 dernières années au moins* ». Enfin, diverses analyses montrent qu'il est « de plus en plus probable » que 2024 sera l'année la plus chaude jamais enregistrée sur la planète...

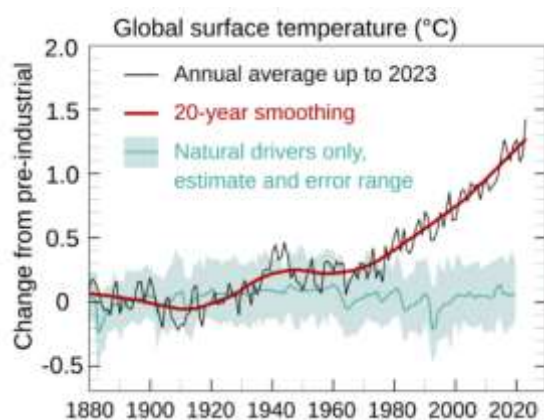


Figure 1 : Changements de la température de surface mondiale lors des 170 dernières années (ligne noire) par rapport à l'ère préindustrielle (1850-1900) et en moyenne annuelle, par rapport aux simulations du modèle climatique CMIP6 de la réponse de la température aux facteurs humains et naturels (rouge) et aux seuls facteurs naturels [soleil, volcanisme] (vert). Source : Copernicus, 2024.

¹ Pour différencier dans le document les travaux du GIEC normand des synthèses du GIEC international (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), l'acronyme de ce dernier sera accompagné de son appellation anglosaxonne d'origine IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : GIEC/IPCC.

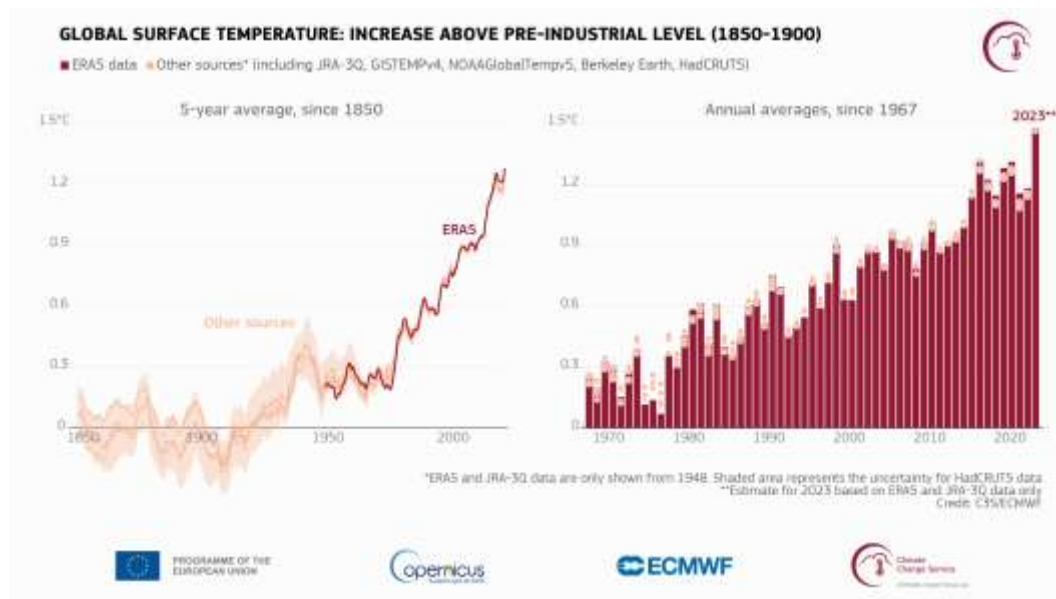


Figure 2 : Augmentation de la température de l’air à la surface du globe par rapport à la moyenne de 1850-1900, la période de référence préindustrielle désignée, sur la base de plusieurs ensembles de données sur la température mondiale présentées sous forme de moyennes sur 5 ans depuis 1850 (à gauche) et de moyennes annuelles depuis 1967 (à droite). Crédit : C3S/ECMWF.

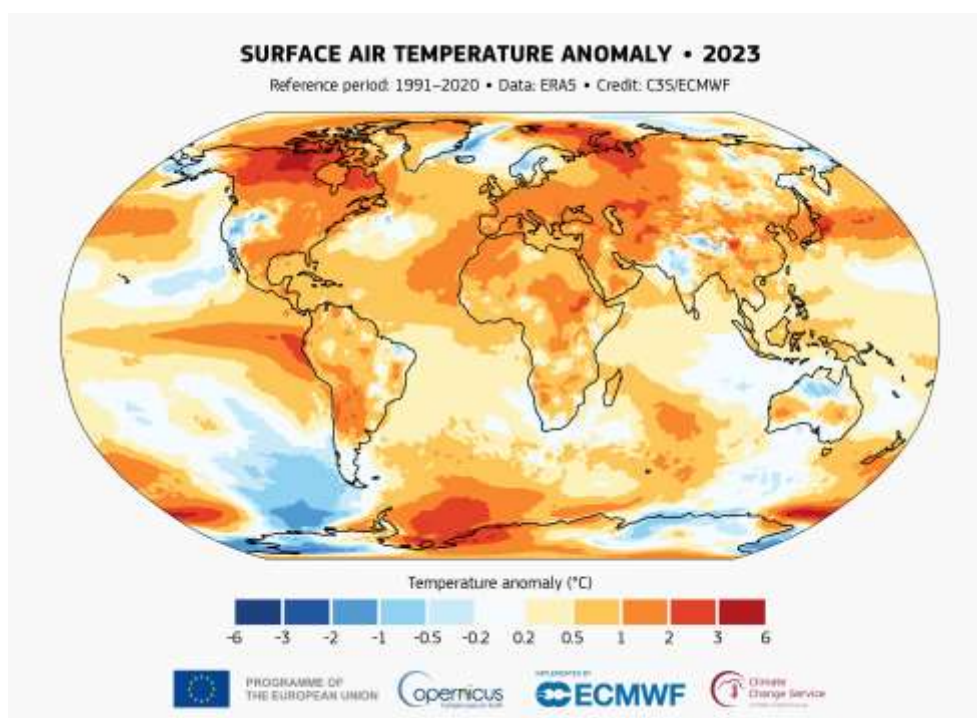


Figure 3 : Anomalie de la température de l’air en surface pour 2023 par rapport à la moyenne de la période de référence 1991-2020. Source des données : ERA5. Crédit : C3S/ECMWF.

D’après le 6^{ème} Rapport du GIEC/IPCC (AR6, 2023), l’ampleur des changements récents du système climatique dans son ensemble et l’état actuel de plusieurs de ses composantes sont sans précédent depuis des centaines, voire des milliers d’années. Cela s’accompagne par une augmentation de la fréquence et de l’intensité des épisodes météorologiques et climatiques extrêmes partout dans le monde (vagues de chaleur, fortes précipitations, sécheresses et cyclones tropicaux) (exemple dans la figure 4 pour les vagues de chaleur et les fortes précipitations).

Les précipitations moyennes mondiales présentent aussi un accroissement des disparités spatiales : augmentation dans les régions des moyennes et hautes latitudes et dans les zones équatoriales, diminution dans les zones méditerranéennes et tropicales sèches. Les projections en 2100 soulignent une augmentation de ce contraste entre régions. Concernant les événements extrêmes : (1) la fréquence des vagues de chaleur (sécheresse) a augmenté sur une grande partie de l'Europe, de l'Asie et de l'Australie, (2) la fréquence ou l'intensité des épisodes de fortes précipitations a probablement augmenté dans les régions des latitudes moyennes et tropicales, (3) l'activité des cyclones tropicaux intenses aurait augmenté dans l'Atlantique nord et dans le Pacifique nord-ouest. Les conséquences du changement climatique s'observent déjà sur les stocks d'eau et les écosystèmes continentaux, aquatiques et littoraux... et sont susceptibles de s'accroître dans l'avenir : changement du débit des fleuves, du niveau des nappes souterraines, élévation du niveau de la mer entre 28 et 101 cm à l'horizon 2100, augmentation de la température de l'eau et modification de la qualité de l'eau, perte de biodiversité, conséquences négatives sur l'économie et la santé...

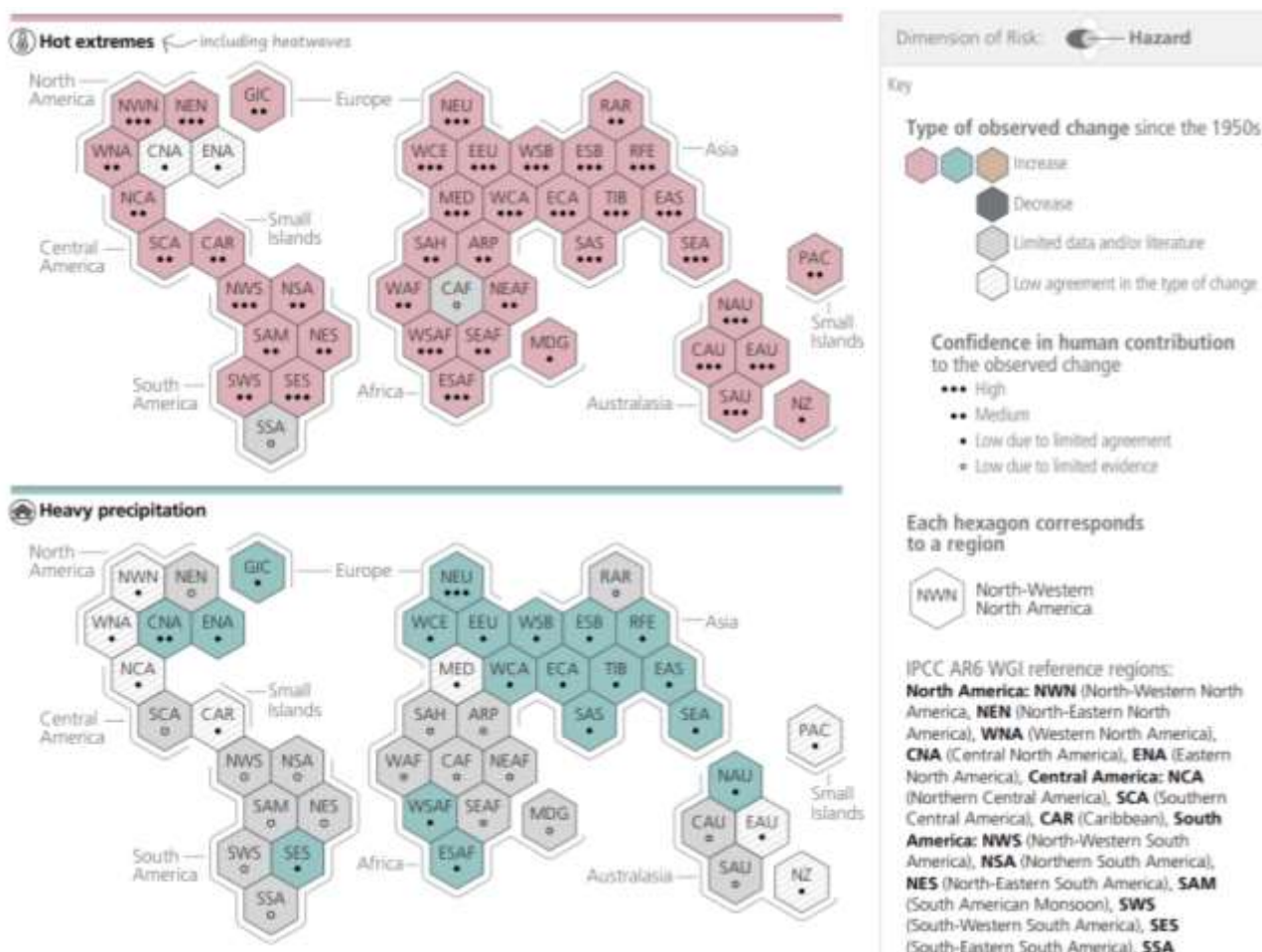


Figure 4 : Synthèse de l'évaluation des changements observés dans les températures extrêmes et les fortes précipitations et confiance dans la contribution humaine aux changements observés dans les régions du monde. IPCC AR6 (p.48)

Les projections à l'horizon 2100 indiquent une élévation de la température de l'atmosphère entre +1,4°C et +4,4°C selon les meilleures estimations des scénarios et des modèles et entre +1,0°C à +5,7°C si l'on considère l'ensemble de la fourchette « très probable » (*very likely*) des scénarios et des modèles (GIEC/IPCC, 2021) (Tabl. 1).

Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Tableau 1 : Evolution de la température de l'atmosphère à la surface de la Terre pour trois périodes de 20 ans au regard des cinq scénarios SSP étudiés par le GIEC/IPCC. Différences de température par rapport à la température moyenne de surface globale de la période 1850–1900. Source : *Résumé à l'intention des décideurs* du 1er volume de l'AR6, GIEC/IPCC, 2021.

Ces projections sont les conséquences de l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère selon différents scénarios socio-économiques. L'AR6 s'appuie sur un ensemble de cinq nouveaux scénarios d'émissions pour évaluer les réponses du climat vis-à-vis d'une palette plus large d'hypothèses que dans l'AR5 pour ce qui est des émissions de GES et de polluants atmosphériques, et de l'utilisation des terres (encadré 1 et figure 5).

Encadré 1 : Principes des scénarios SSP

Le GIEC/IPCC a élaboré des scénarios de référence pour l'AR6, appelés *Trajectoires socio-économiques communes* (Shared Socio-economic Pathways ou SSP), qui commencent tous en 2015 et couvrent les possibles évolutions futures des facteurs anthropiques du changement climatique. Ces scénarios sont notés sous la forme SSPx-y :

- la valeur de x varie de 1 à 5 (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5) et désigne la « famille » de trajectoires des évolutions socio-économiques :

SSP1 = scénario de la durabilité ;

SSP2 = scénario intermédiaire ;

SSP3 = scénario de concurrence régionale ;

SSP4 = scénario d'inégalité ;

SSP5 = scénario de développement intensif en énergies fossiles.

- la valeur y correspond aux différents niveaux de forçage radiatif (donc de déséquilibre du bilan radiatif terrestre) générés par le scénario en 2100 (forçage exprimé en W/m^2).

Les émissions mondiales de GES projetées pour chacun de ces scénarios varient en fonction des hypothèses sur les trajectoires socio-économiques, mais prennent aussi en compte les niveaux d'atténuation, les niveaux de réduction des polluants pour les précurseurs d'ozone non méthanique et les aérosols, affectant les émissions des forçeurs climatiques à courte durée de vie. Les émissions sont estimées à partir de ces scénarios d'entrée via des modèles dans le cadre du projet CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) du Programme mondial de recherches sur le climat WCRP (*World Climate Research Programme*).

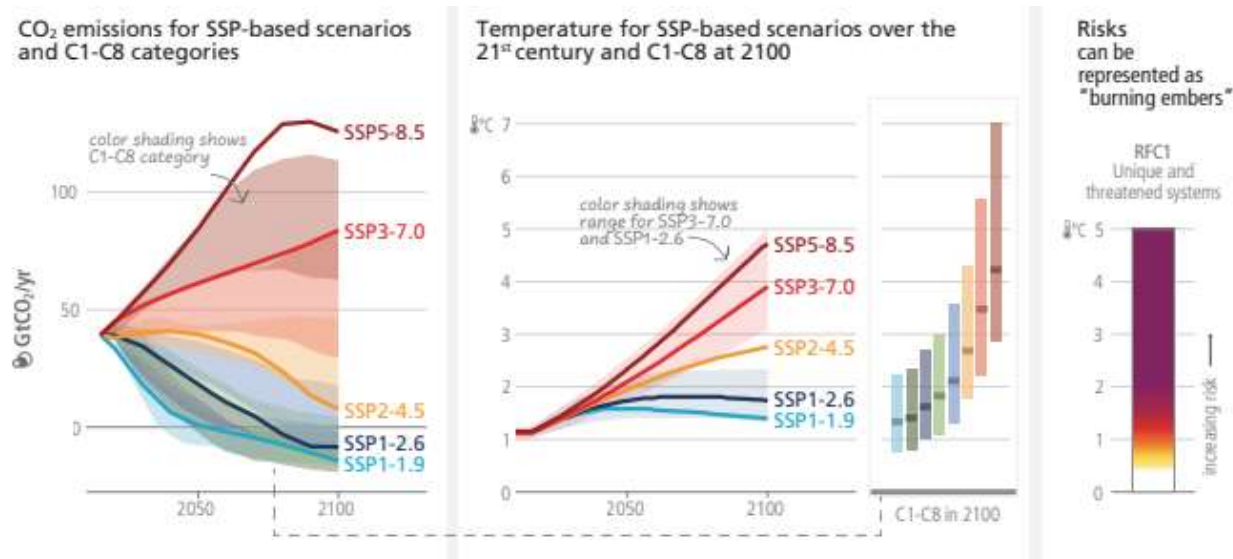


Figure 5 : Cadre d'évaluation intégré AR6 sur le climat futur, ses impacts et son atténuation. IPCC AR6 (p.65).

Au plan national, le projet « DRIAS les futurs du climat » (*Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements*) propose des projections climatiques régionalisées pour l'ensemble de la France, avec un portail internet dédié à ces projections et à l'évolution d'indices de températures, de précipitations, de rayonnement solaire et de vent. Ces données ont notamment été utilisées pour établir une « *synthèse approfondie sur les scénarios de référence à considérer pour la mise en œuvre du plan national d'adaptation au changement climatique* » (mission confiée à Jean Jouzel par le Ministère en charge du développement durable en 2010 ; Ouzeau et al., 2014 ; Planton et al., 2015). Ces dernières années, la production d'un nouveau jeu de données DRIAS 2020 a permis de tirer parti des nouvelles simulations Euro-CORDEX et de remettre à jour les simulations 2014 à partir de versions corrigées.

Les études récentes menées à l'échelle de la Normandie ou du bassin de la Seine (Programme Seine aval : Laignel et al., 2010, Laignel, 2012 ; Réseau d'Observation du Littoral Normand Picard ; Projet RexHySS : Ducharne et al., 2009 ; Etudes des DREAL Haute et Basse Normandie : DREAL BN, 2010 ; DREAL HN, 2011 ; DREAL BN 2015 ; Cantat, 2015 ; Beauvais et al., 2019 ; DREAL de Normandie 2020 ; Projet LiCCo ; etc.) synthétisées dans le cadre du GIEC normand, du GIEC de la Métropole Rouen Normandie (Laignel et Nouaceur, 2018 ; Laignel et al., 2020 ; Laignel et Nouaceur, 2024) et de l'ANR RICOCHET, indiquent que le changement climatique est une réalité en Normandie. Le paramètre le plus emblématique en est la température, dans le cadre d'une déclinaison régionale du « réchauffement global ». Les autres paramètres du temps sensible (précipitations, vent, ensoleillement) semblent moins affectés pour le moment, mais des modifications beaucoup plus tangibles pourraient apparaître dans les prochaines décennies. Elles seraient particulièrement prononcées dans la seconde partie du 21^e siècle si aucune politique climatique internationale n'est mise en place dès à présent...

Informations préliminaires sur les données et méthodes d'analyse :

Dans cette mise à jour de la synthèse sur l'évolution du climat en Normandie, l'essentiel des documents et commentaires se fonde sur le traitement de données de Météo-France pour la période historique (1970-2023), et pour le futur sur les données de projections climatiques DRIAS-2020 du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM).

Pour l'analyse des changements climatiques contemporains (1970 à 2023), les données Météo-France utilisées sont de deux natures différentes et complémentaires : des données simulées par le modèle Safran Isba sur une grille de 8 km pour une vision spatiale exhaustive du territoire, et des données enregistrées sur site dans sept stations représentatives de la diversité climatique régionale pour une approche concrète du territoire : Alençon, Caen, Cherbourg, Dieppe, Evreux, Le Havre et Rouen.

Pour couvrir la palette des possibles du climat, deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont proposés : l'un « optimiste », RCP 2.6, supposant la mise en application immédiate d'une politique climatique internationale ; l'autre « pessimiste », RCP 8.5, dans l'optique d'une absence de politique climatique. Les scénarios retenus sont les RCP (Representative Concentration Pathways) car les SSP (Shared Socio-economic pathways) évoqués précédemment ne disposent pas actuellement de déclinaisons opérationnelles sous la plateforme DRIAS (production de simulations régionalisées sur CMIP6 en cours de validation).

Le modèle retenu pour illustrer les changements climatiques du futur – en l'état actuel des connaissances scientifiques – est Aladin63 (expérience Météo-France CNRM 2020) dont les données sont toutes disponibles sur le portail Drias. Les analyses prospectives sont issues pour l'essentiel de la comparaison des « normales climatiques » de l'horizon lointain (2071-2100), par rapport à la période de référence actuelle modélisée (1976-2005), complétée par une vue du continuum temporel année après année établi entre 1970 et 2100.

Par souci d'efficacité dans la consultation des points marquants du changement climatique en Normandie, l'accent a été mis dans ce rapport sur l'expression graphique et cartographique.

1. Evolution du climat en Normandie au cours des dernières décennies

Pour un aperçu homogène spatialement du climat régional et de son évolution contemporaine, les données mensuelles du modèle Safran Isba de Météo-France ont été reprises sous forme de cartes en points de grille, d'un tableau de synthèse et de graphiques d'évolution sur la période 1970-2023. Ce modèle permet en effet d'estimer les bilans d'eau et d'énergie en surface sur la France à partir d'une maille régulière de 8 km de côté. La Normandie est ainsi décrite à partir de 494 points. Pour une approche plus concrète du climat sur certaines villes, ces données simulées sont complétées ensuite par une analyse des données enregistrées par 7 stations du réseau officiel de Météo-France disposant a minima d'informations complètes sur la même période 1970-2023.

1.1. Présentation globale du climat à partir des données spatialisées Safran Isba de Météo-France

Les deux principales composantes du climat – la température et les précipitations – proposent une répartition géographique dépendante essentiellement de la distance à la mer, du relief et des flux dominants de composante Ouest² (Fig. 6). Sur la période actuelle (Normale 1991-2020), la température moyenne annuelle de 10,9°C présente un gradient sensible entre les côtes adoucies par les eaux de la Manche (11 à 12°C) et les hauteurs rafraîchies des collines du Bocage virois jusqu'à celles du Pays de Bray (9 à 10°C). Pour les précipitations totales annuelles (885 mm), là encore la distribution spatiale est un marqueur de la géographie : les secteurs les plus arrosés correspondent aux reliefs exposés de la façade occidentale de la région et secondairement à celles du Pays de Caux (souvent plus de 1000 mm), alors que « sous le vent » des collines du Bocage, les grandes Plaines agricoles de Caen en allant vers Alençon reçoivent des cumuls inférieurs à 800 mm, voire 650 mm autour d'Evreux du fait de la plus forte continentalité.

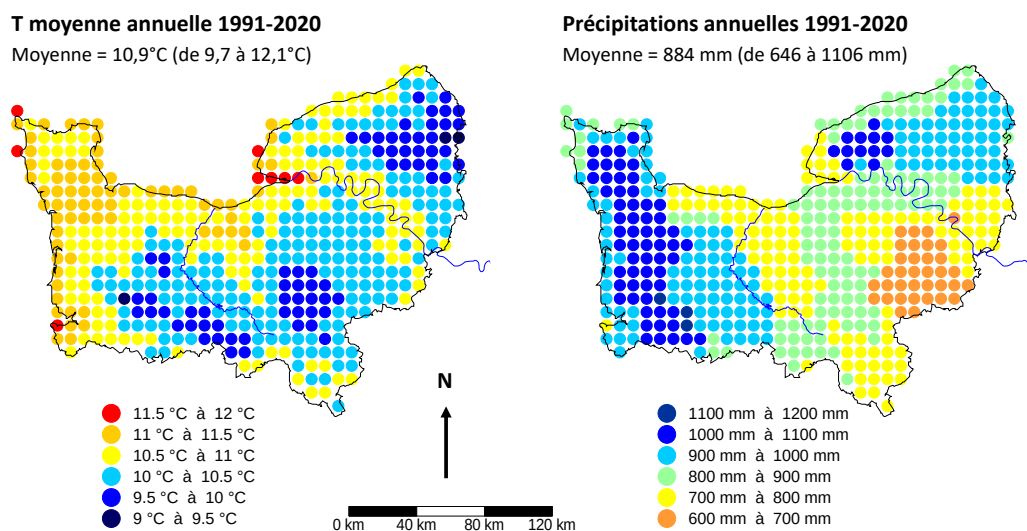


Figure 6 : Température moyenne annuelle et précipitations totales annuelles en Normandie sur la Normale climatique 1991-2020. Cartographie réalisée à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

D'après ces mêmes données spatialisées, le tableau 2 complète l'analyse pour un ensemble d'autres paramètres en plus de la température et des précipitations totales : évaporation réelle, évapotranspiration potentielle, précipitations efficaces et précipitations neigeuses. En relation avec le réchauffement climatique, on observe une augmentation des valeurs liées à l'évaporation (car plus d'énergie disponible) et *a contrario* une réduction des précipitations neigeuses (car moins de froid humide).

² Une présentation du climat normand dans sa diversité régionale est proposée sous la forme d'un texte de synthèse (annexe 1) et d'une carte (annexe 2). Travaux réalisés dans le cadre du fascicule « Le climat en Normandie » du Profil Environnemental Régional de Normandie (DREAL Normandie, 2020).

	T° moyenne	Précipitations	Evapo. réelle	Evapo. potentielle	Précip. efficaces	Précip. neigeuse
Moyenne 1970-2023	10.5°C	863.8 mm	537.1 mm	696.9 mm	326.6 mm	17.6 mm
Moyenne 1971-1990	10.1°C	837.4 mm	515.0 mm	663.9 mm	322.2 mm	19.2 mm
Moyenne 1991-2020	10.9°C	884.7 mm	557.2 mm	734.1 mm	327.5 mm	15.5 mm
écart entre 1991-2020 et 1971-1990	0.8°C	47.3 mm	42.2 mm	70.2 mm	5.3 mm	-3.7 mm

Valeurs décennales						
décennie -4 : 1971-1980	9.9°C	818.2 mm	508.5 mm	651.7 mm	309.7 mm	19.3 mm
décennie -3 : 1981-1990	10.3°C	854.6 mm	521.6 mm	676.1 mm	333.0 mm	19.0 mm
décennie -2 : 1991-2000	10.6°C	904.1 mm	556.1 mm	720.9 mm	348.1 mm	12.1 mm
décennie -1 : 2001-2010	10.8°C	870.9 mm	580.2 mm	774.4 mm	290.7 mm	21.7 mm
décennie 0 : 2011-2020	11.3°C	879.0 mm	535.5 mm	707.0 mm	343.6 mm	12.9 mm
écart entre décennies 2011-2020 et 1971-1980	1.4°C	60.9 mm	27.0 mm	55.2 mm	33.9 mm	-6.4 mm

Tableau 2 : Moyenne sur 54 ans (1970-2023), moyenne vicennale (1971-1990), normale climatique actuelle (1991-2020) et valeurs décennales et inter décennales des principaux paramètres climatiques, calculées à partir des données spatialisées pour les 494 points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Sur les 54 années consécutives composant cette chronique, le réchauffement est très net (Fig. 7) : la tendance linéaire qui résume synthétiquement cette évolution met en évidence un gain de +1,8°C entre le début de la période d’analyse (1970) et actuellement (2023).

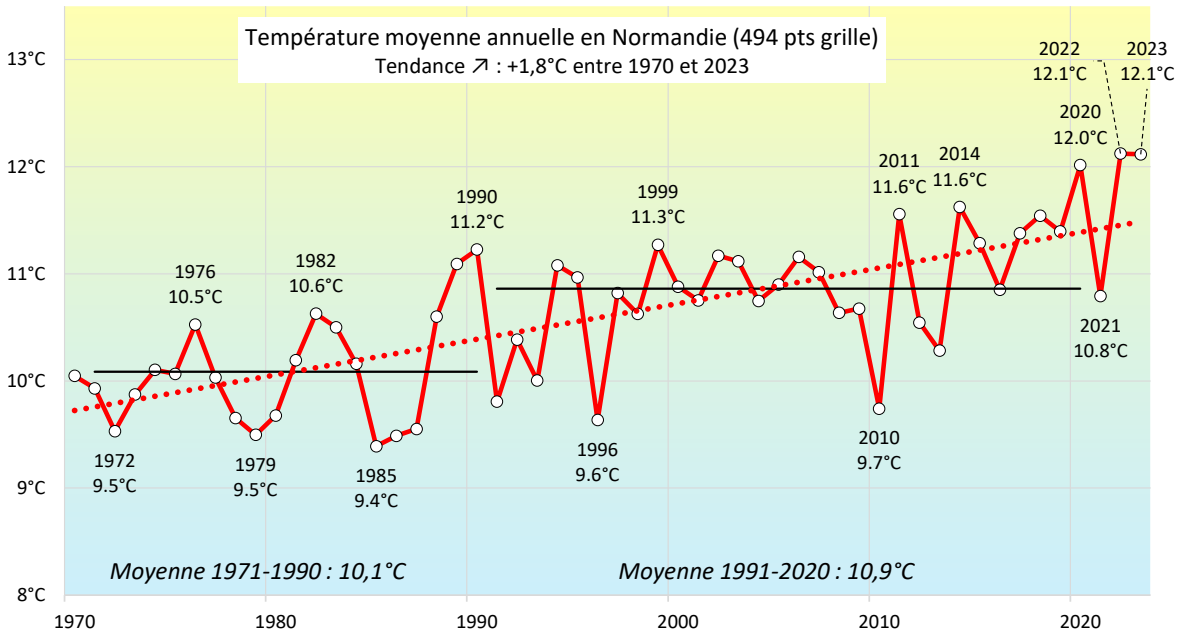


Figure 7 : Evolution de la température moyenne annuelle en Normandie entre 1970 et 2023, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

La représentation sous forme d’écart à la Normale 1991-2020 traduit plus concrètement encore le phénomène (Fig. 8). Pour la période antérieure à 1990, si les fluctuations interannuelles sont marquées, elles sont toutes colorées en bleu (sauf 1989), c’est-à-dire représentatives de températures inférieures à la Normale actuelle, même pour les années les plus chaudes de l’époque comme 1976. A contrario, à l’exception de 2021, les dix dernières années sont toutes en orange, preuve tangible d’un réchauffement climatique en cours rapide et marqué. Cette observation pose également la question sur l’usage du concept de « normale » climatique puisqu’une moyenne sur trente années successives paraît de nos jours trop longue pour caractériser objectivement les composantes d’un climat en changement rapide...

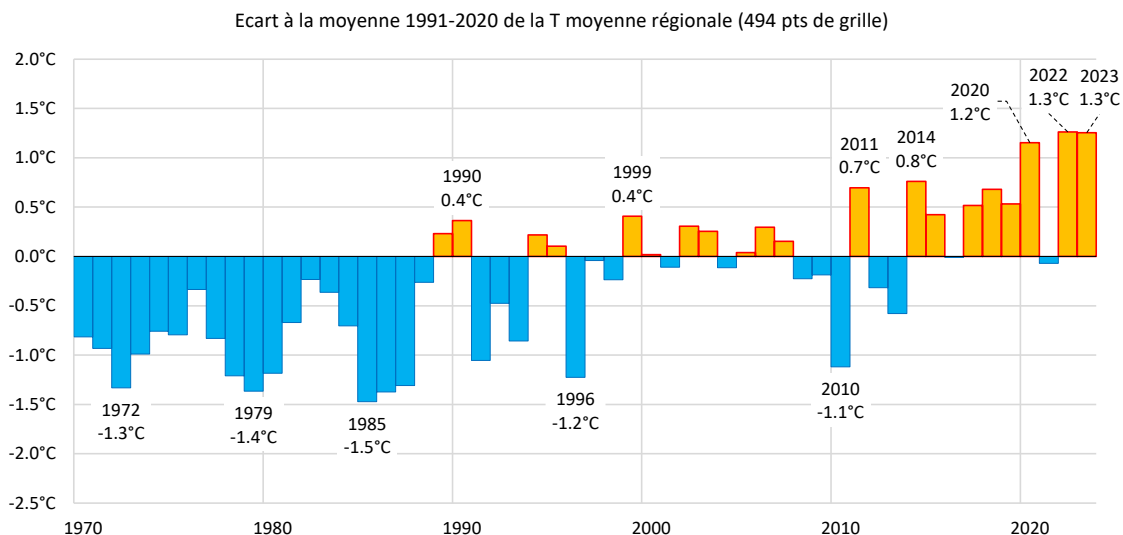


Figure 8 : Evolution de l'écart de la température moyenne annuelle en Normandie par rapport à la Normale climatique 1991-2020, calculée à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Pour être plus précis dans l'analyse statistique (Fig. 9), un traitement montre que la chronique se décompose en deux sous-périodes : une phase de températures globalement stables de 1970 à 1988 (qui n'empêche pas des années chaudes et froides mais avec compensation entre celles-ci), et une phase de réchauffement marqué de 1989 à 2023 (avec toujours une forte variabilité interannuelle mais couplée à une réduction progressive de la fréquence et de l'intensité des années froides au profit des années chaudes, toujours plus chaudes).

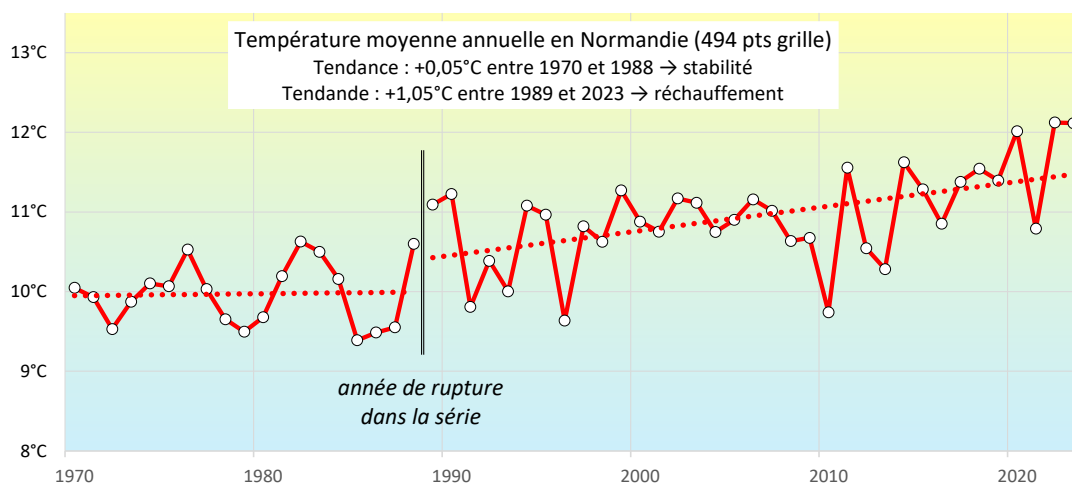


Figure 9 : Evolution de la température moyenne annuelle en Normandie entre 1970 et 2023 et décomposition en deux sous périodes distinctes, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

La décomposition des températures moyennes de l'année en ses différents mois (Fig. 10) démontre que le changement climatique affecte toutes les saisons, avec une intensité de réchauffement légèrement plus forte en été et au printemps (tendance de +2,0°C entre 1970 et 2023) qu'en automne (+1,7°C) et en hiver (+1,4°C). Le second élément marquant de cette chronique est la grande variabilité des températures d'une année à l'autre. Le phénomène est surtout marqué en hiver où le jeu des masses d'air est susceptible de proposer des contrastes importants entre la douceur apportée par des flux atlantiques durables (1975, 1990, 1995, 2007, 2016 ou 2020) et la froidure relative des années affectées par des coulées polaires récurrentes (1979, milieu des années 1980, 1991, 2009 et 2010). En été, la variabilité est moins grande mais quelques années remarquables émergent au sein de cette évolution régulière vers des températures plus chaudes. Ainsi, la stagnation durant plusieurs semaines d'air chaud et sec apporté par la remontée des anticyclones

tropicaux est à l'origine d'été marqués par des épisodes caniculaires et la sécheresse (la mémoire retient principalement les étés 1976, 2003 et 2022).

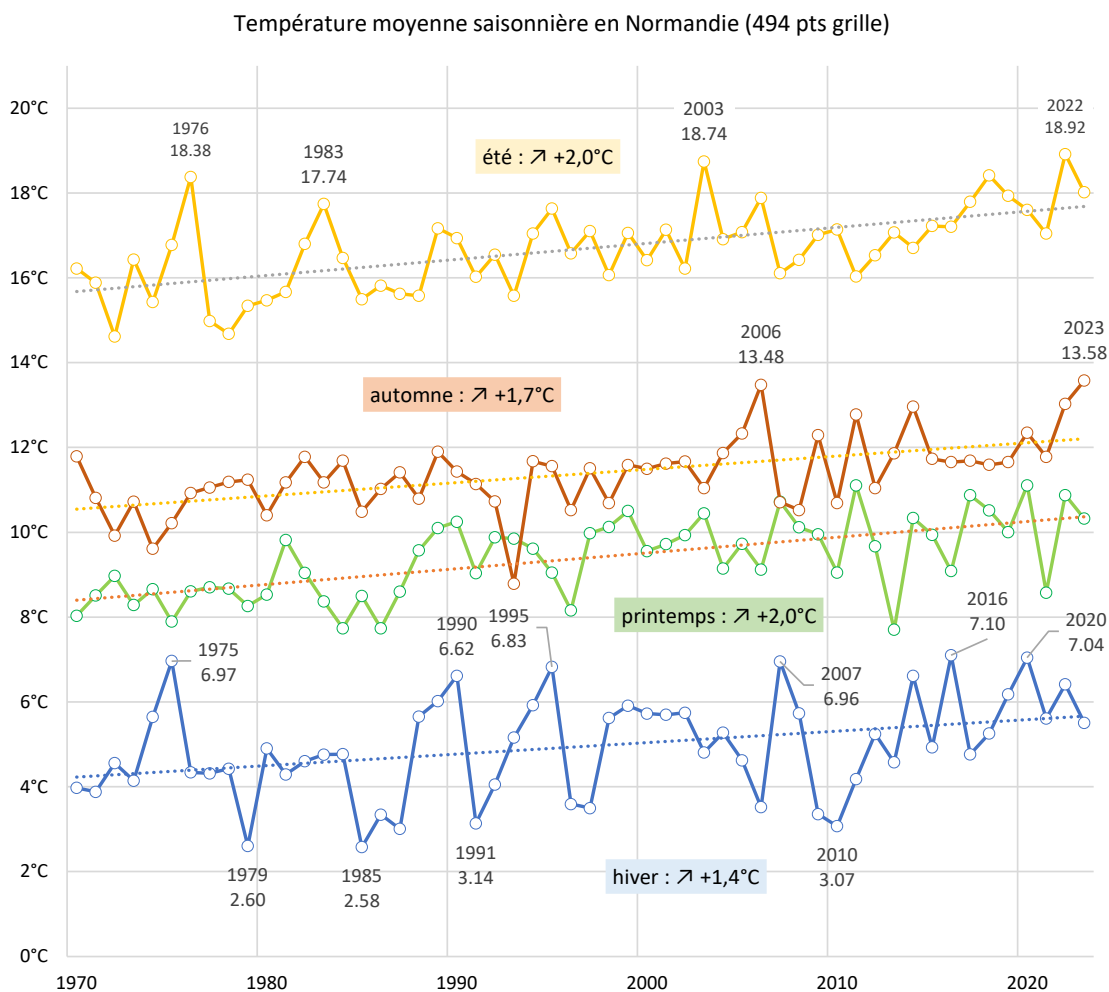


Figure 10 : Evolution de la température moyenne saisonnière en Normandie entre 1970 et 2023, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Pour les précipitations, le signal est plus difficile à discerner du fait de la grande variabilité interannuelle de ce paramètre (Fig. 11). L'étagement irrégulier des moyennes décennales (traits horizontaux noirs) traduit cette absence de tendance significative sur le long terme. D'une année à l'autre, le cumul peut varier du simple au double, avec des valeurs moyennes régionales oscillant entre 600 et 1200 mm.

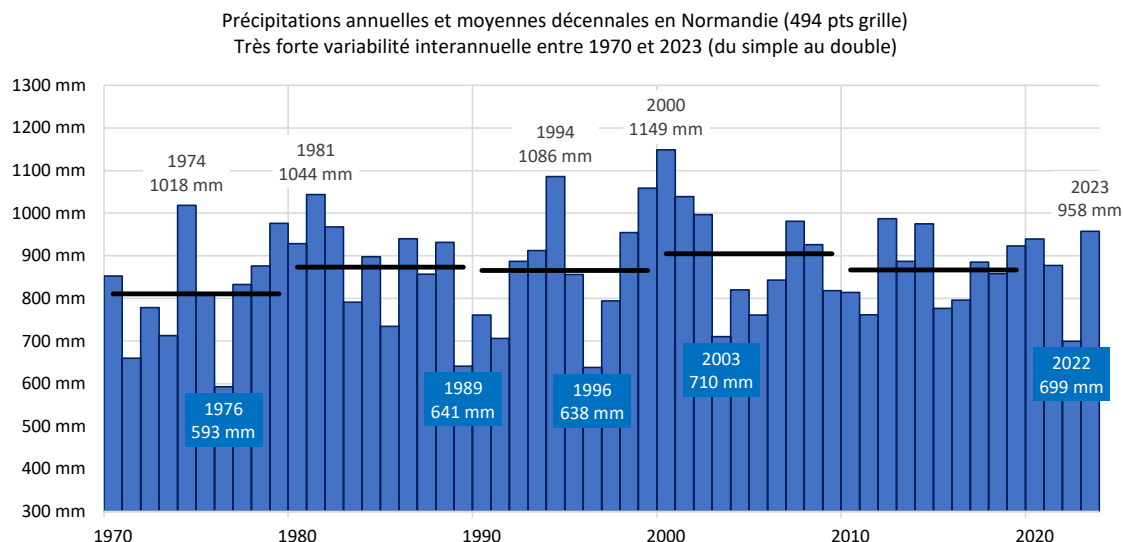


Figure 11 : Evolution des précipitations totales annuelles en Normandie entre 1970 et 2023, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Les écarts maxima possibles par rapport à la Normale 1991-2020 sont de l'ordre de plus ou moins 30% (Fig. 12) entre les années très déficitaires (1976 : 593 mm, -33%) et celles exceptionnellement arrosées (2000 : 1149 mm, +30%). S'il ne se dessine pas de tendance sur le long terme, en revanche on remarque des blocs d'années aux caractères très pluvieux (cf. 5 années autour de l'an 2000) à l'origine potentiellement de problèmes de ruissellement et d'inondations, ou très secs (cf. 3 années autour de 1990) à l'origine de contraintes agricoles.

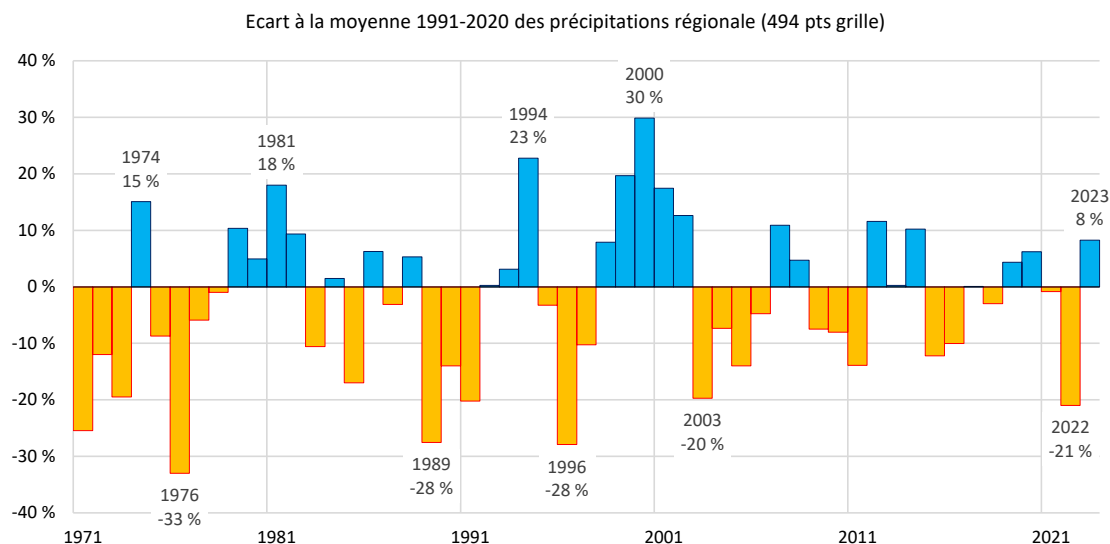


Figure 12 : Evolution de l'écart des précipitations totales annuelles en Normandie par rapport à la Normale climatique 1991-2020, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

1.2. Présentation globale du climat à partir des données des stations de Météo-France

1.2.1. Evolution de la température atmosphérique

Depuis la fin des années 1980, la température a augmenté rapidement dans toutes les stations météorologiques normandes, de l'ordre de +1°C entre la période de référence actuelle 1991-2020 et 1961-1990 (selon la méthodologie utilisée par le GIEC/IPCC pour la définition des anomalies de température).

Comme pour les données simulées Safran Isba, les tendances linéaires³ sur 7 stations normandes bénéficiant de longues séries continues et fiables (Fig. 13) mettent en évidence une augmentation moyenne de la température de l’ordre de +1,9°C entre 1970 et 2023 (Tabl. 3). Soit une valeur proche de celle fournie par les 494 points de grilles du modèle Safran Isba (+1,8°C). Sur cette même période de 54 ans, l’écart entre la période décennale initiale 1971-1980 (le « passé ») et la période actuelle 2011-2020 (le « présent ») montre une élévation de +1,5°C. Ces deux indicateurs n’étant pas ceux utilisés par le GIEC/IPCC pour définir les anomalies de températures, il convient de ne pas comparer directement ces résultats avec ceux de l’organisme intergouvernemental.



Figure 13 : Localisation des 7 stations météorologiques servant de références pour l’analyse classique du changement climatique sur la période 1970-2023. Source : Flappiefh, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons (modifiée et complétée, O. Cantat)

	Caen Carpiquet	Rouen Boos	Alençon	Evreux Huest	Cherbourg Gonneville	Dieppe	Le Havre La Hève	Région
Moyenne 1970-2023	11.2°C	10.6°C	11.1°C	10.8°C	10.8°C	11.1°C	11.5°C	11.0°C
<i>tendance linéaire</i>	+1.7°C	+2.2°C	+1.8°C	+2.2°C	+1.7°C	+1.9°C	+2.1°C	+1.9°C
Valeur décennale								
décennie 1 : 1971-1980	10.4°C	9.7°C	10.4°C	9.9°C	10.1°C	10.3°C	10.7°C	10.2°C
décennie 2 : 1981-1990	11.0°C	10.0°C	10.7°C	10.4°C	10.4°C	10.7°C	11.0°C	10.6°C
décennie 3 : 1991-2000	11.3°C	10.6°C	11.0°C	10.8°C	10.7°C	11.0°C	11.5°C	11.0°C
décennie 4 : 2001-2010	11.4°C	10.9°C	11.2°C	11.1°C	11.1°C	11.3°C	11.8°C	11.3°C
décennie 5 : 2011-2020	11.7°C	11.5°C	11.7°C	11.5°C	11.3°C	11.8°C	12.2°C	11.7°C
<i>décennie 5 - décennie 1</i>	+1.3°C	+1.8°C	+1.3°C	+1.6°C	+1.2°C	+1.5°C	+1.5°C	+1.5°C

Tableau 3 : Evolution de la température moyenne de l’air sur 54 ans (de 1970 à 2023), calculée à partir de tendances linéaires et des valeurs moyennes décennales pour 7 stations météorologiques régionales. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

³ Par souci de clarté dans les tableaux et les graphiques et de simplicité dans les commentaires, dans la mesure où cela ne change pas le message de fond, les traitements statistiques en tendance linéaire sont réalisés sur la période continue 1970-2023, sans prise en compte du point de rupture de la fin des années 1980.

L'évolution régionale au pas de temps annuel montre que huit années les plus chaudes ont eu lieu au cours des dix dernières années, avec comme trio de tête 2022, 2020 et 2023 dont les valeurs sont nettement au-dessus des précédents records. Est-ce le signe d'une accélération du changement climatique ? Cette hypothèse sera à confirmer dans les prochaines années. Par ailleurs, on observe que ce réchauffement est légèrement plus prononcé sur les valeurs de températures maximales (se produisant généralement en milieu d'après-midi) avec $+2,2^{\circ}\text{C}$, que sur les valeurs de températures minimales (communément en fin de nuit) avec $+1,8^{\circ}\text{C}$ (Fig. 14).

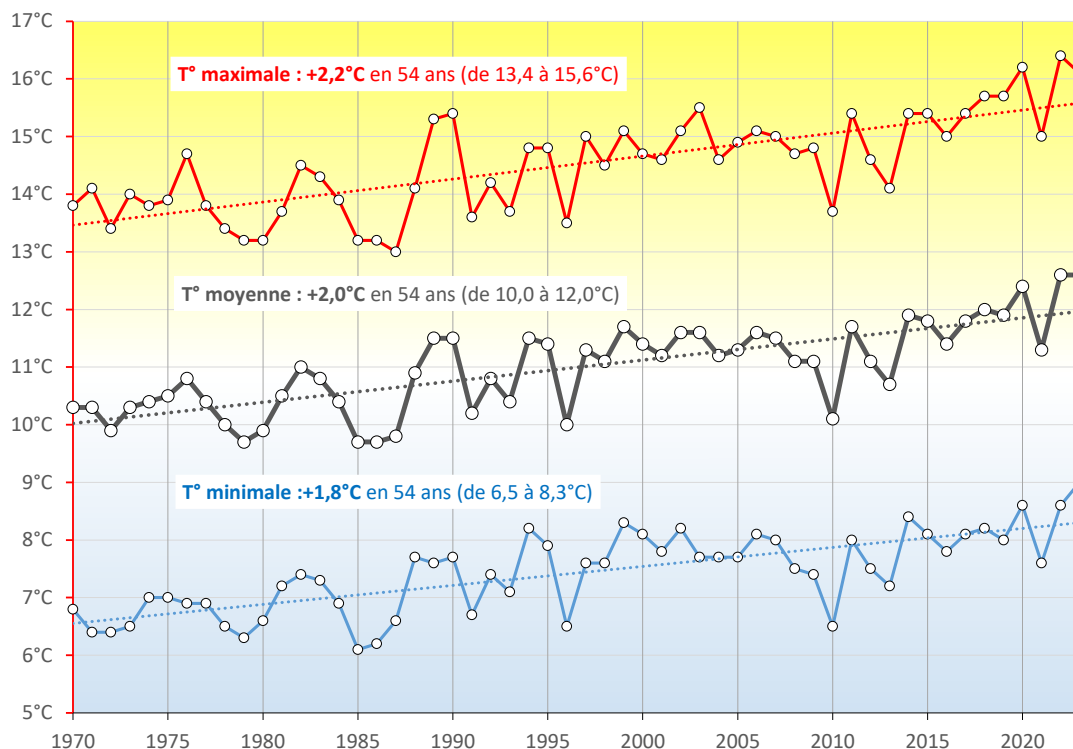


Figure 14 : Température de l'air annuelle et tendance entre 1970 et 2023. Moyennes des valeurs minimale (bleu), moyenne (gris foncé) et maximale (rouge) des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

La distinction en chacune des sept stations météorologiques permet de voir un signal identique pour le réchauffement climatique (Fig. 15), avec des nuances d'intensité relativement faibles autour de la valeur centrale voisine de $+2^{\circ}\text{C}$. La carte de synthèse associée aux graphiques révèle un réchauffement plus marqué sur l'Est de la région (Rouen et Evreux) que sur sa partie Ouest (Cherbourg et Caen).

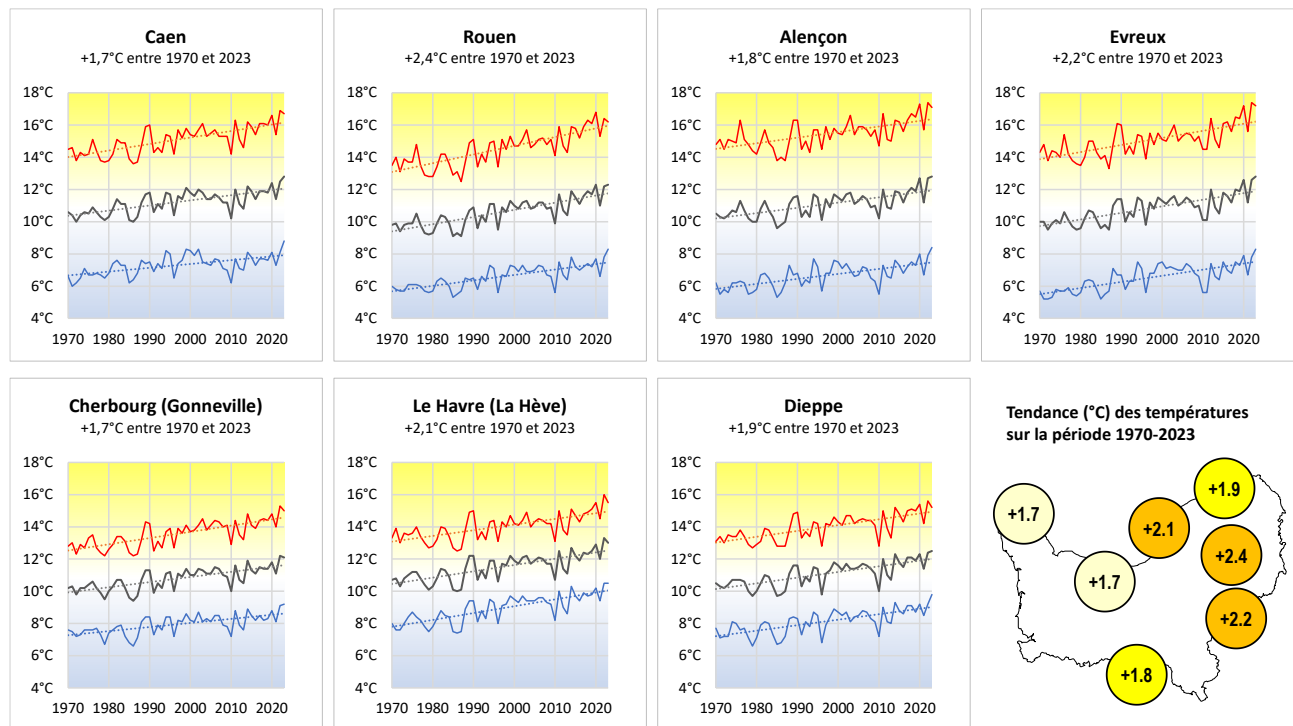


Figure 15 : Température de l'air moyenne annuelle et tendance entre 1970 et 2023. Valeurs minimale (bleu), moyenne (gris foncé) et maximale (rouge) pour les 7 stations de référence. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

La chronique année après année des écarts à la moyenne, calculés sur plus d'un demi-siècle (1970-2023), souligne un changement à partir de la fin des années 1980, avec des valeurs qui deviennent quasiment toujours positives traduisant visuellement l'apparition des années les plus chaudes (Fig. 16). Statistiquement, la date de rupture correspondrait aux années 1987-1988, comme partout en France (comme évoqué précédemment à partir des données simulées Safran Isba). On note un léger fléchissement du réchauffement autour de 2010, puis une nouvelle accélération sur les dernières années de la série : les huit années les plus chaudes depuis 1970 sont toutes postérieures à 2014 (2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023). Les années 2022 et 2023 paraissent les plus remarquables de toute la série, avec un excédent de +1,3°C.

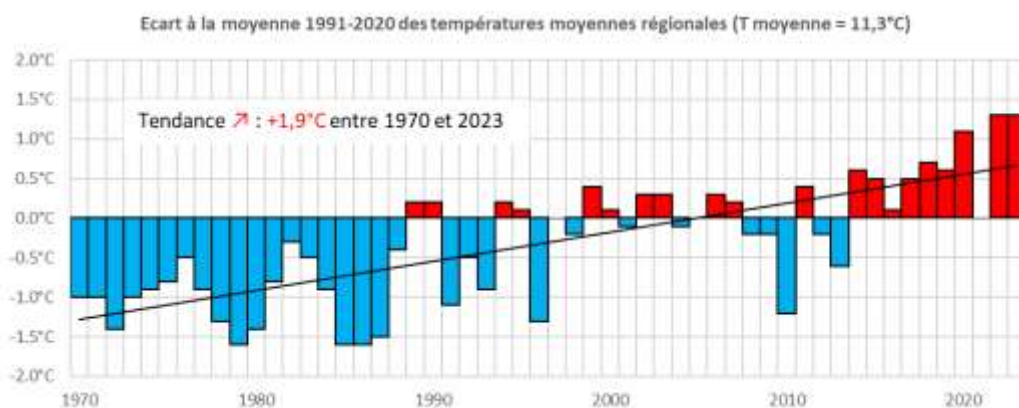


Figure 16 : Ecart à la Normale climatique actuelle 1991-2020 des températures de l'air moyennes annuelles. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

La décomposition de la température moyenne régionale en ses valeurs minimales et maximales (Fig. 17) confirme l'ampleur d'un phénomène plus accentué sur les données diurnes que sur les données nocturnes.

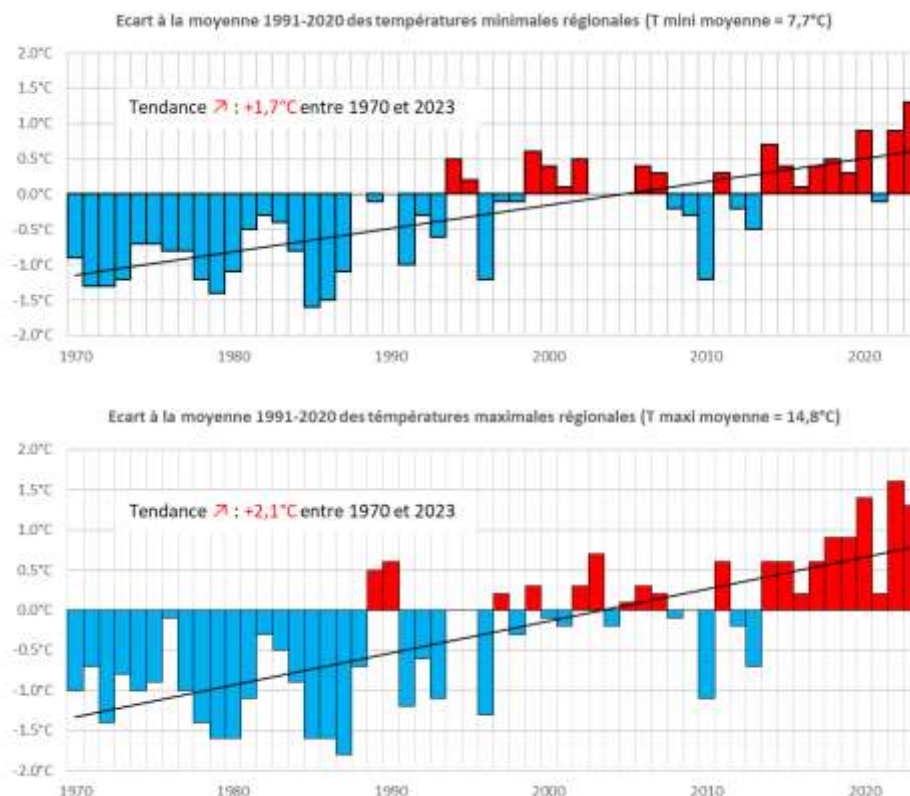


Figure 17 : Ecart à la Normale climatique actuelle 1991-2020 des températures de l'air minimales (en haut) et maximales (en bas). Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

1.2.2. Evolution du nombre de jours de chaleur et de gel

Le réchauffement climatique se traduit par une nette augmentation du nombre de jours de *chaleur* (valeur maximale supérieure ou égale à 25°C), de *forte chaleur* ($\geq 30^\circ\text{C}$) et de *très forte chaleur* ($\geq 35^\circ\text{C}$), et *a contrario* par une réduction du nombre de jours de *froid* (valeur minimale inférieure ou égale à 0°C), de *grand froid* ($\leq -5^\circ\text{C}$) et de *très grand froid* ($\leq -10^\circ\text{C}$). A titre d'exemples, les données des stations de Caen-Carpique et de Rouen-Boos entre 1971 et 2023 soulignent ces tendances régionales au cours des cinq dernières décennies.

La chaleur

Pour la *chaleur* la tendance croissante est très nette (Fig. 18), avec par exemple le passage entre 1971 et 2023 d'environ 15 à 30 jours avec plus de 25°C dans la journée à Caen, et de 15 à 40 jours à Rouen. Sur ce paramètre, la pente de la droite de régression plus redressée de Rouen traduit le réchauffement plus marqué de ce secteur intracontinental comparativement à Caen. En effet, par son éloignement de la Manche, Rouen est naturellement plus concernée par la chaleur que Caen qui peut bénéficier de l'intervention rafraîchissante en été des brises de mer. A des seuils encore plus élevés, on constate également l'augmentation significative des *fortes chaleurs* et l'apparition plus récurrente des *très fortes chaleurs*. A Caen, depuis le début du 21^e siècle, la valeur de 35°C a ainsi été franchie 16 fois, alors que cet aléa n'avait été observé qu'à 2 reprises dans les trente années précédentes (1971-2000). A Rouen, l'évolution est nette aussi avec un passage de 1 à 20 jours sur les mêmes périodes, dont 11 occurrences dans les cinq dernières années. A noter que ces valeurs ne rendent pas directement compte des sensations torrides vécues dans le cœur des villes (surtout pour Rouen, en fond de vallée de la Seine, dont les conditions vécues sont beaucoup plus étouffantes que sur le plateau éventé de Boos). Lors du pic de chaleur de l'été 2019, de très nombreux records absolus de chaleur furent battus en France et la station urbaine de Rouen-Jardin enregistra alors 43,0°C, contre 41,3°C à Boos. Lors de la canicule de juillet 2022, la surchauffe du centre-ville était d'environ 3°C : maximum de 40,1°C le 18 et de 41,8°C le 19, contre « seulement » 37,0°C et 38,8°C à la station Météo-France sur le plateau. En dehors des événements extrêmes, le phénomène le plus marquant est l'accumulation ces dernières années de chaleur persistant longtemps dans la saison : plus de 40 jours par an dépassant les 25°C à Caen observés 4 fois uniquement sur le 21^e siècle (2003, 2006, 2018 et 2023) et 12 fois à Rouen, dont la moitié des cas sur les 7 dernières années. Ce qui était exceptionnel dans le passé (cf. 1976 et 2003) devient de nos jours presque ordinaire.

A noter que dans le cadre de la variabilité interannuelle du climat, certaines années récentes peuvent encore être dépourvues de phases de chaleur durable, comme en 2007. Ainsi, à Caen, les 25°C ne furent atteints que 5 fois durant cet été-là et 10 fois à Rouen

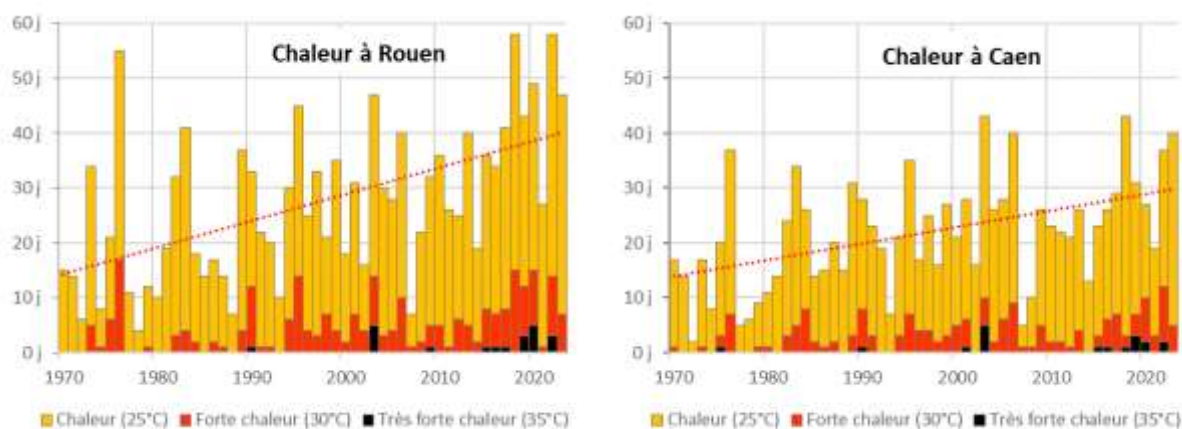


Figure 18 : Evolution du nombre de jours de chaleur (T° maximale journalière de l'air $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (orangé), $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (rouge), $\geq 35^{\circ}\text{C}$ (noir)) à Rouen-Boos et à Caen-Carpiquet entre 1970 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Les canicules

Depuis 2004, en retour d'expérience de la canicule de 2003, les épisodes caniculaires ne sont plus définis uniquement par la valeur maximale de la température dans la journée et la durée du phénomène (pic supérieur à 35°C durant 3 jours consécutifs). Le concept intègre maintenant les valeurs minimales, dans la mesure où celles-ci rendent compte de la phase de récupération physiologique nocturne qui intervient beaucoup dans l'explication de la surmortalité. En France, la fréquence de ce phénomène a augmenté dans les dernières décennies (<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/canicules> ; Cantat, 2005a).

A l'échelle de la Normandie, les véritables canicules sont rares grâce à l'ouverture de la région sur les eaux fraîches de la Manche, ce qui limite en intensité et surtout en durée ces épisodes extrêmes (Cantat, 2005b). Bien que brefs, ces épisodes très chauds ne sont pas inconnus en Normandie et sans contraintes importantes pour une population pas coutumière de l'aléa et peu préparée à ses effets. L'océanité entraîne des vécus très différents entre le NO et le SE de la région, à l'image de l'été 2003 durant lequel sur 10 jours consécutifs début août l'écart moyen des températures maximales dépassa 14°C entre le nord du Cotentin (inférieur à 24°C) et certains secteurs confinés (supérieur à 36°C) (Fig. 19)⁴. Une région, deux ambiances !

⁴ Pour proposer une bonne représentativité spatiale, la cartographie s'appuie sur les 494 points de grille simulés par le modèle Safran Isba. Il ne s'agit pas ici des températures maximales journalières instantanées (comme dans les stations météorologiques) mais des valeurs maximales des 24 températures horaires. Les valeurs sous évaluent donc légèrement l'intensité de la canicule.

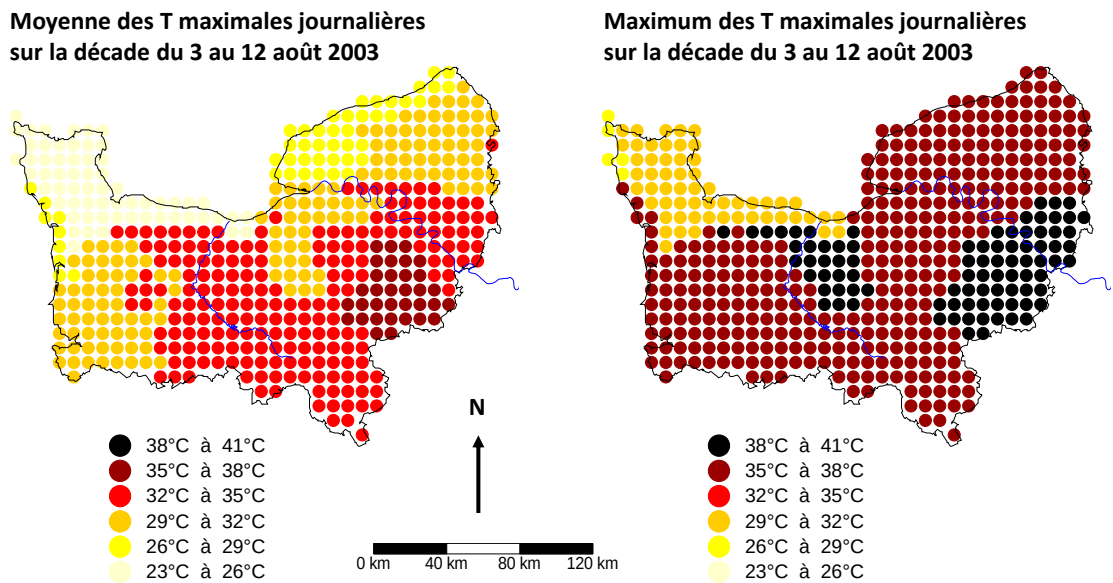


Figure 19 : Température maximales de l’air sur 10 jours consécutifs en Normandie durant la canicule de 2003. Cartographie réalisée à partir des 494 données points de grille régionaux (température maximale des 24 températures horaires). Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

En ne prenant pas en compte la durée consécutive de 3 jours minimum, l’aléa « très forte chaleur diurne et nocturne » varie de 1 à 21 jours en 54 ans, des côtes vers les confins continentaux de la région (Tabl. 4a). Et même en appliquant les seuils thermiques départementaux (*Le Monde*, 2019) - tenant compte du contexte climatique local plus frais - les cas sont rares et traduisent bien le rôle majeur de l’océanité : de 7 à 29 jours en 54 ans, du Cotentin et du Pays de Bray vers le Perche et les Plaines de l’Eure (Tabl. 4b).

Nombre total d'observations entre 1970 et 2023 (entre parenthèses : décomposition 1970-1996 / 1997-2023)									
	a) seuil thermique national commun / canicule				b) seuil thermique relatif au contexte départemental				
	condition 1 min >= 20°C	condition 2 max >= 33°C	2 conditions simultanées	condition 3 3 j de suite	seuils T mini et T maxi	condition 1	condition 2	2 conditions simultanées	condition 3 3 j de suite
Cherbourg (50)	3 (0+3)	5 (0+5)	1 (0+1)	non retenue	18°C et 31°C	36 (10+26)	17 (2+15)	7 (2+5)	non retenue
Caen (14)	5 (3-2)	45 (8+37)	2 (0+2)	non retenue	18°C et 31°C	74 (23+51)	127 (42+85)	14 (4+10)	non retenue
Dieppe (76)	22 (4+18)	20 (4+16)	3 (0+3)	non retenue	19°C et 34°C	61 (14+47)	20 (4+16)	7 (0+7)	non retenue
Rouen (76)	13 (4+9)	114 (46+68)	7 (1+6)	non retenue	19°C et 34°C	48 (20+28)	74 (14+60)	22 (8+14)	non retenue
Alençon (76)	11 (3+8)	105 (30+75)	8 (2+6)	non retenue	19°C et 34°C	137 (48+89)	63 (18+45)	27 (10+17)	non retenue
Evreux (27)	26 (8+18)	112 (26+86)	15 (4+11)	non retenue	19°C et 34°C	71 (20+51)	68 (14+54)	29 (7+22)	non retenue
Le Havre (76)	89 (31+58)	27 (8+19)	21 (6+15)	non retenue	19°C et 34°C	171 (65+106)	27 (8+19)	22 (6+16)	non retenue

Tableau 4 : Evolution des épisodes de très forte chaleur diurne et nocturne en Normandie sur la période 1970-2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat)

Le froid

Pour le *froid*, la tendance est inverse (Fig. 20). A Rouen, la réduction des jours de gel est spectaculaire avec une perte d’environ 25 occurrences par an entre 1971 et 2023 (passage d’environ 58 jours à 35). Le phénomène est également net à Caen, mais dans des proportions plus adoucies (perte d’une dizaine de jours, de 37 occurrences à 26). Parallèlement, les *fortes gelées* (minimum inférieur à -5°C) déclinent nettement en chutant d’environ un tiers des cas entre la période 1971-1990 et la période actuelle 2001-2020 : de 155 cas à 97 à Rouen, et de 90 cas à 67 à Caen. Dans le même temps, les *très grands froids* (minimum inférieur à -10°C) ne sont plus observés sur la région, notamment dans les secteurs plus océanisés comme Caen (passage de 10 cas à 2, dont le dernier remonte déjà au 11 février 2012 avec -

10,3°C). A Rouen, si cet aléa est naturellement plus facilement observable du fait de la continentalité qui accentue l'intensité des vagues de froid, la réduction de fréquence est également sensible : d'un total de 22 cas entre 1971 et 1990 à 6 actuellement de 2001 à 2020, et une dernière apparition également en février 2012 (-12,1°C le 12 février).

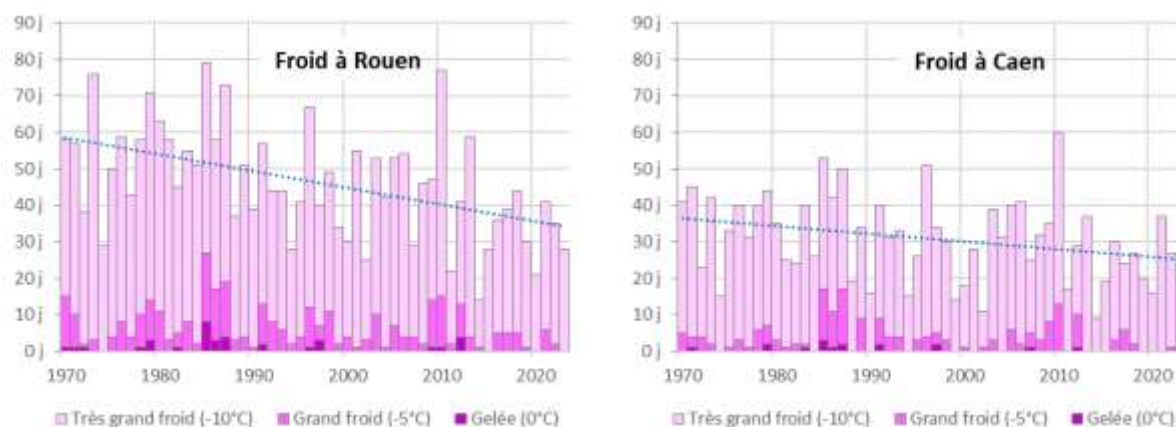


Figure 20 : Evolution du nombre de jours de froid (T° minimale journalière de l'air $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (rose), $\leq -5^{\circ}\text{C}$ (parme), $\leq -10^{\circ}\text{C}$ (violet) à Rouen-Boos et Caen-Carpiquet entre 1971 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Pour illustrer la géographie des froids intenses et durables sur la région⁵, l'exemple de la vague de froid de janvier 1985 est significatif des différences possibles entre les littoraux du nord-ouest profitant de la tiédeur des eaux de la Manche et la froidure des secteurs les plus continentaux de part et d'autre de la vallée de la Seine et du Bocage normand (Fig. 21).

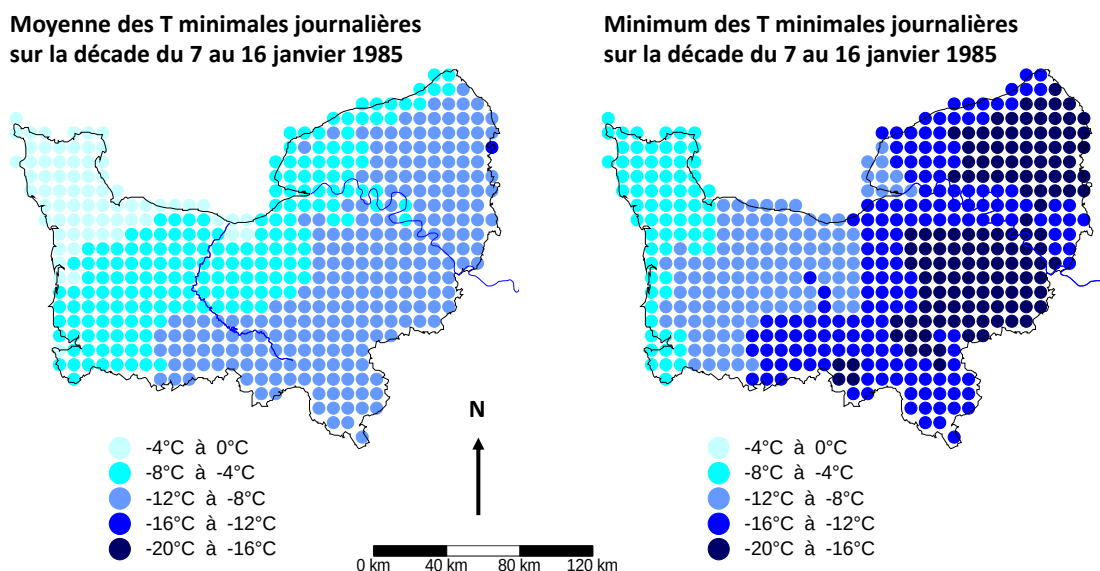


Figure 21 : Température minimale de l'air en Normandie durant la vague de froid de janvier 1985. Cartographie réalisée à partir des 494 données points de grille régionaux (température minimale des 24 températures horaires). Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

⁵ Pour proposer une bonne représentativité spatiale des vagues de froid, la cartographie s'appuie sur les 494 points de grille simulés par le modèle Safran Isba. Il ne s'agit donc pas ici des températures minimales journalières instantanées (comme dans les stations météorologiques) mais des valeurs minimales des 24 températures horaires. Les valeurs sous évaluent donc légèrement l'intensité de la vague de froid.

A une échelle plus fine encore, les données mesurées dans les fonds de vallée peuvent être nettement plus basses encore que celles simulées par les points de grille Safran Isba. Ainsi, dans la vallée de la rivière Oudon à une quarantaine de kilomètres de Caen, le 8 janvier le rayonnement nocturne sur le sol enneigé par temps clair et calme a provoqué une chute exceptionnelle de la température jusqu'à $-26,5^{\circ}\text{C}$ à la station de Lieury. Idem ce matin-là à la station de Vire. Au même moment, en plein de cœur de cette vague de froid polaire, les températures minimales n'étaient que modérément négatives sur les côtes du Cotentin : $-4,0^{\circ}\text{C}$ à la Pointe de La Hague, $-5,8^{\circ}\text{C}$ à Cherbourg et $-6,0^{\circ}\text{C}$ à Gatteville-le-Phare.

1.2.3. Evolution des précipitations

Dans l'ensemble, les stations météorologiques normandes ne montrent aucune tendance statistiquement significative pour les cumuls annuels et mensuels de précipitations (Cantat et Gires, 2003 ; Mesquita, 2009 ; Laignel et al., 2010 ; Laignel, 2012 ; Cantat *in* DREAL 2015 ; Ricquier et al., 2018). Ici, domine une forte variabilité entre les années comme entre les mois. Pour cette raison, la moyenne sur la période 1970-2020 remplacera la droite de régression qui était associée aux graphiques sur les températures.

La moyenne annuelle régionale calculée à partir des cumuls de précipitations mesurés dans les 8 stations normandes de référence (Fig. 22) indique clairement la succession de phases pluvieuses et sèches entre 1970 et 2023. Le phénomène le plus marquant est depuis 2003 la diminution de la très grande variabilité interannuelle des précipitations : alors que sur la fin du 20^e siècle les cumuls pouvaient osciller du simple au double d'une année à l'autre (approximativement entre 500 et 1000 mm par an), depuis le début du 21^e siècle les valeurs présentent une amplitude beaucoup plus réduite (approximativement entre 650 et 850 mm, à l'image de nos dernières années 2022 et 2023).

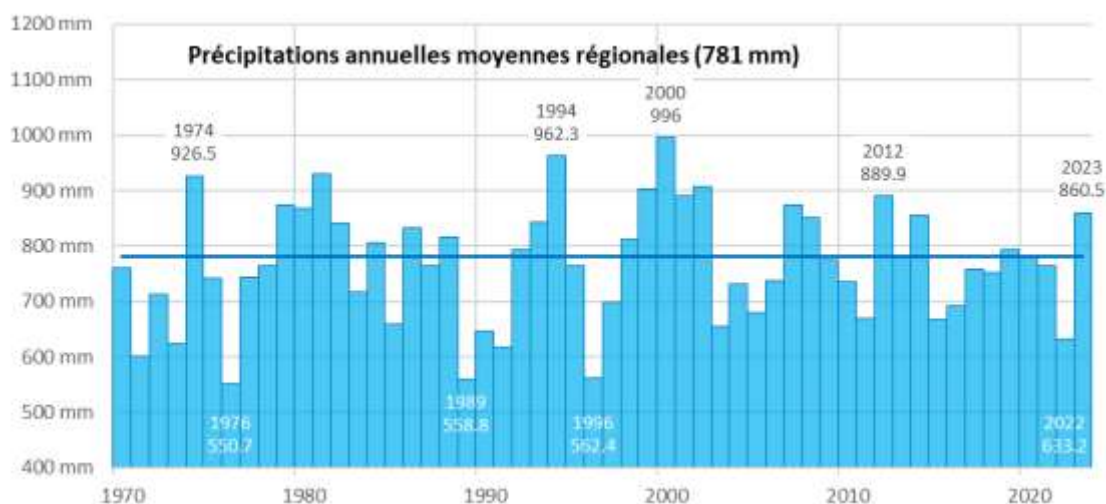


Figure 22 : Précipitations moyennes annuelles entre 1970 et 2023. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Autour de la valeur moyenne annuelle de 781 mm, les écarts varient ainsi entre les années les plus sèches et les années les plus arrosées d'environ $\pm 30\%$ (Fig. 23). Cette fourchette se réduit à $\pm 15\%$ à partir de 2003. Sur la période la plus ancienne des cinquante dernières années, la mémoire a conservé de ces années pluviométriques très contrastées des images fortes faisant alterner des enjeux divers pour l'environnement et la société. Rappelons notamment la Grande sécheresse de 1976 (-30%), très préjudiciable à l'agriculture et à l'élevage normands, et celle des trois années consécutives 1989-1990-1991 (-28% , -14% , -20%) qui impacta à long terme la sylviculture par les déficits cumulés d'une année à l'autre. A l'opposé, le souvenir des conséquences des gros excédents pluviométriques de 1999 à 2002 est encore vivace également pour ceux qui subirent des inondations sévères d'origines diverses. Succession d'inondations « classiques » hivernales liées aux débordements des rivières, prolongés par des remontées de nappes persistant sur des mois – parfois jusqu'à l'été – en certains points de la région habituellement épargnés (Cantat et al., 2002).

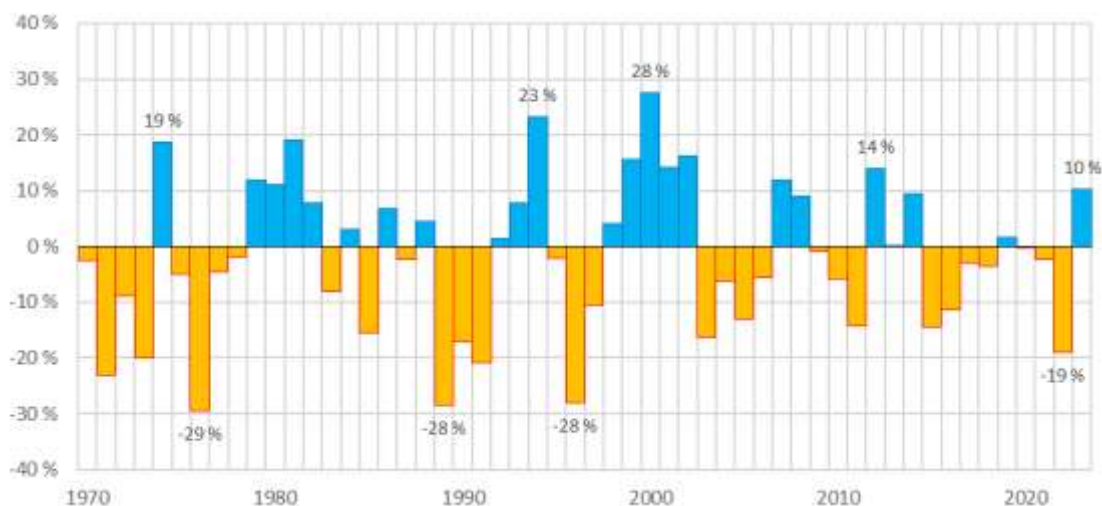


Figure 23 : Ecart à la moyenne 1970-2023 des précipitations moyennes annuelles (en %). Moyenne des stations d’Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

En décomposant l’information pour les sept stations (Fig. 24), la grande diversité spatiale de ce paramètre se confirme, à l’image de Cherbourg (près de 1000 mm par an), comparativement à Evreux (moins de 600 mm par an).

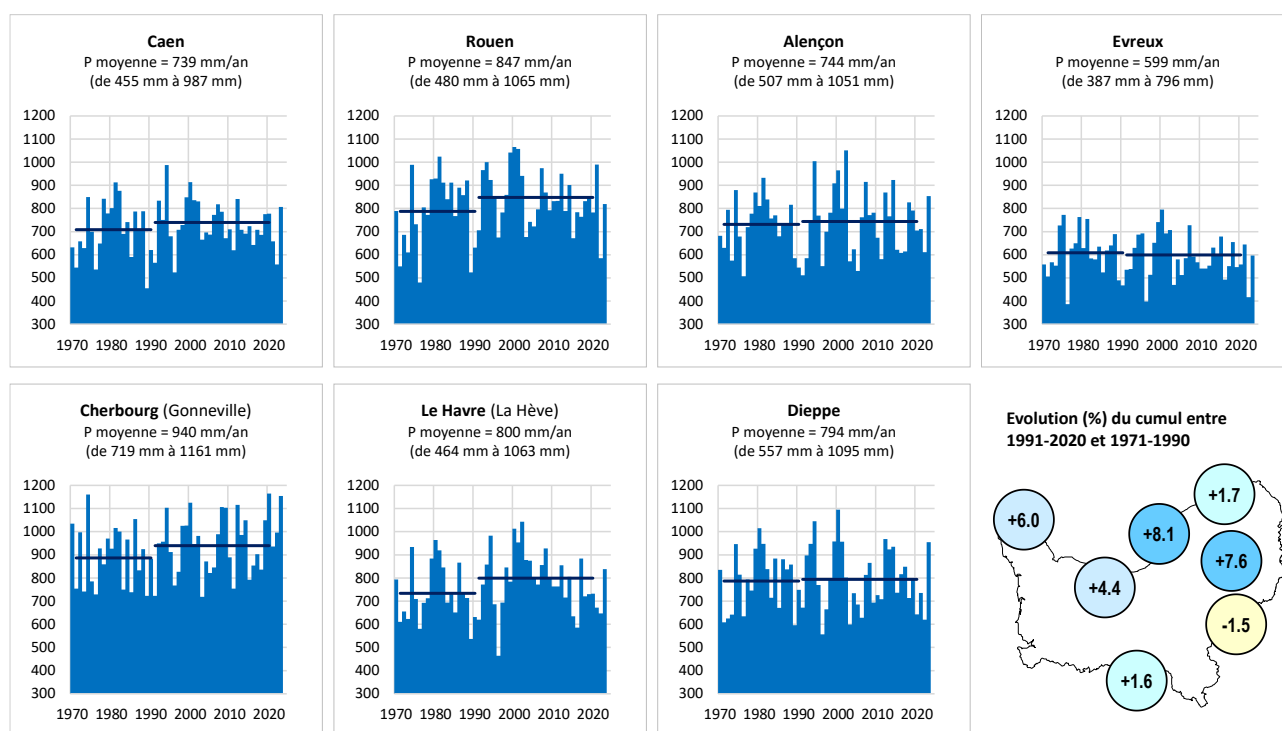


Figure 24 : Précipitations totales annuelles, moyenne 1971-1990 et Normale 1991-2020 pour les 7 stations de référence. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

L’évolution du nombre de jours de fortes précipitations (seuil de 20 mm par jour, soit 20 litres par m²) traduit également la variabilité interannuelle du climat normand (Fig. 25) : les valeurs oscillent fortement autour d’une moyenne de l’ordre de 3,5 cas par an, un peu plus dans les terres (aux conditions naturellement plus instables) que sur les côtes. La succession aléatoire de pics (maxima de 7 à 9 jours par an) et de creux très prononcés (minima de 0 à 2 jours par an) ne se prête pas à la mise en évidence d’une tendance statistiquement significative. Ces phénomènes pluviométriques intenses sont à surveiller car ils participent directement à la genèse des crues et inondations, ainsi qu’à la pollution des

eaux de surface et souterraines (notamment dans le Pays-de-Caux, à cause du réseau karstique ; Laignel et al., 2006 ; Massei et al., 2003 ; Mouhri et al., 2008 ; Valdès et al., 2005, 2007, 2014...).

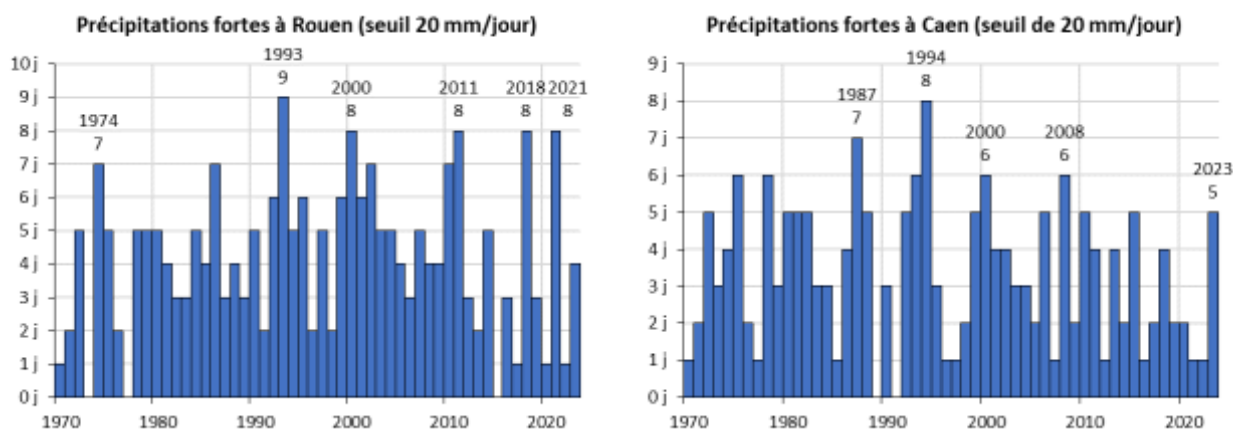


Figure 25 : Evolution du nombre de jours de fortes précipitations (≥ 20 mm/j) à Rouen-Boos et Caen-Carpique entre 1971 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

1.2.4. Evolution du nombre de jours de neige et de brouillard

Jours de neige

Le réchauffement de la température de l'air s'accompagne d'une diminution de la fréquence des précipitations sous forme de neige (Fig. 26). La tendance linéaire suit celle du nombre de jours de froid, dans le cadre d'une forte variabilité interannuelle. Par exemple, en 2010, le froid et l'humidité de l'hiver ont ainsi occasionné une année remarquablement neigeuse sur la Normandie, dans un contexte où le phénomène devient de plus en plus rare.

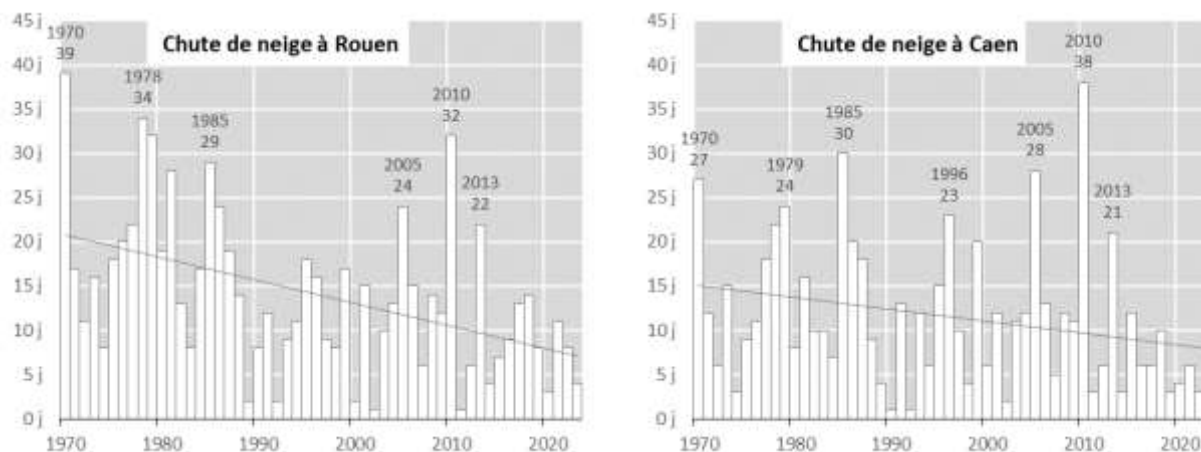


Figure 26 : Evolution de la fréquence annuelle des chutes de neige à Rouen-Boos et à Caen-Carpique entre 1970 et 2023. Valeur annuelle (bâton) et tendance linéaire (ligne). Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Jours de brouillard

Le nombre de jours de brouillard présente une évolution plus complexe qu'une simple régression linéaire ne peut retranscrire robustement (Fig. 27). Par ailleurs, le caractère très marqué des ruptures est certainement à mettre en relation avec des changements de protocoles d'observation de ce paramètre (cf. arrêt des observations de nuit, nouvelle technique d'appréciation par installation de diffusomètres...), plus que la seule traduction d'un changement du climat (température plus élevée donc baisse de l'humidité relative, donc diminution de la fréquence des brouillards). A Rouen, on observe une diminution de la fréquence en 3 paliers successifs : après quatre années avec un nombre important

supérieur à 120 jours (près d'un jour sur trois !), les occurrences se stabilisent autour de 80 jours par an entre 1974 et 1989, puis oscillent autour de 55 jours depuis. Pour Caen, après le pic des 3 premières années (moyenne de 80 jours), le nombre de jours de brouillard oscille autour de 45 jours par an en moyenne, avec des valeurs communément comprises entre 30 et 60 jours.

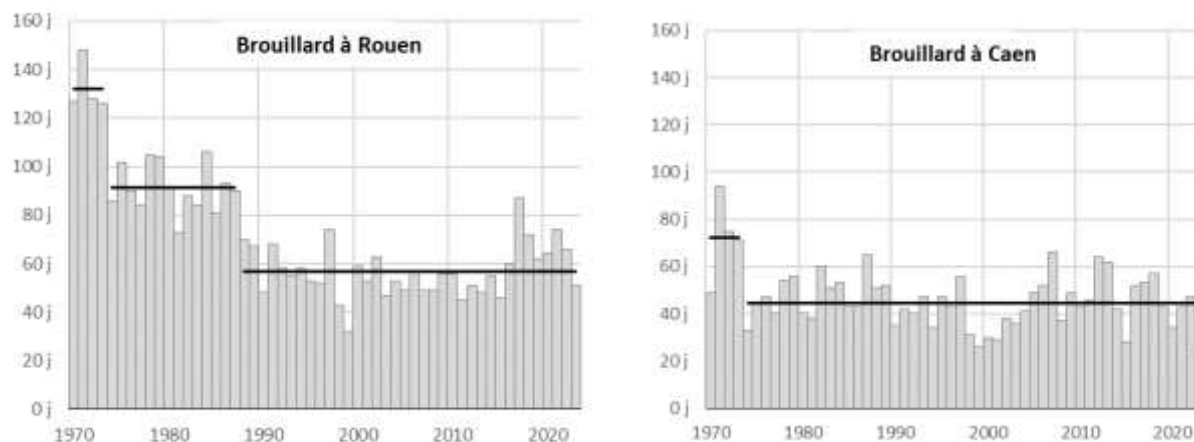


Figure 27 : Evolution du nombre de jours de brouillard (visibilité horizontale < 1000 m) à Rouen-Boos et à Caen-Carpique entre 1970 et 2023. Valeur annuelle (bâton gris) et moyennes sur plusieurs années (trait). Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

1.2.5. Evolution du nombre de jours de vent fort et des tempêtes

Pour des raisons d'homogénéité des séries de données, l'analyse est limitée à la période 1981-2020 (Fig. 28). Pour rendre compte des conditions singulières sur les sites les plus exposés du littoral, la station du Cap de La Hève a été ajoutée à Rouen et Caen.

Les différences observées entre les trois stations sont liées à l'éloignement de la mer, le continent venant « casser » la force du vent dès l'interface terre/mer. Sur ces quatre décennies, le phénomène le plus marquant est la réduction du nombre de jours de vent fort (rafales > 58 km/h) au cours des années 2010, mais il convient de rester prudent dans les conclusions. S'agit-il d'une évolution durable ou d'une simple ondulation négative dans un cycle pluri-décennal que la profondeur temporelle disponible ici ne permet pas encore d'évaluer avec plus de certitude ? La reprise du début des années 2020 militerait en ce sens. Concernant les tempêtes (rafales > 102 km/h), celles-ci ont présenté un maximum d'occurrences dans les années 1980 et 1990, en lien avec des circulations zonales puissantes en hiver. L'année la plus tempétueuse est 1990, avec 30 occurrences à La Hève mais encore 12 à Caen et 6 à Rouen (à titre de comparaison, on enregistra aussi 31 à La Pointe de La Hague et 25 à Granville sur des littoraux très exposés, contre 6 et 7 sur les vastes plateaux dégagés d'Evreux et d'Alençon mais loin de la mer).

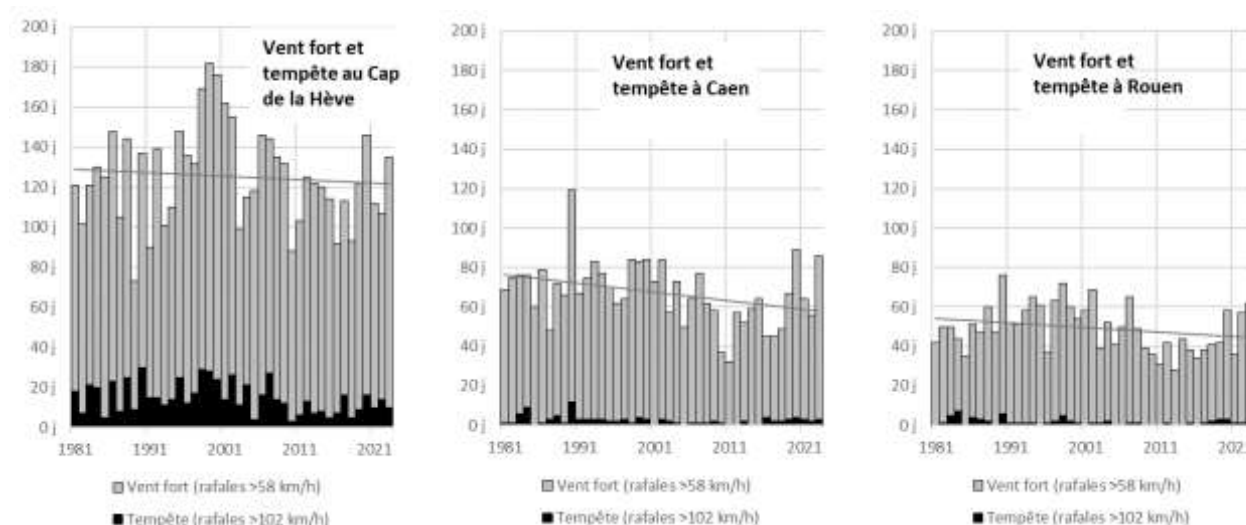


Figure 28 : Evolution du nombre de jours de vent fort (rafale > 58 km/h, bâton gris) et de tempête (rafales > 102 km/h, bâton noir) au Cap de La Hève, à Caen-Carpique et à Rouen-Boos entre 1981 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

2. Projections sur l'évolution du climat en Normandie à l'horizon 2100

L'analyse des différents paramètres climatiques à l'horizon 2100 repose sur le traitement des données modélisées DRIAS-2020 selon deux scénarios d'émission de GES du GIEC/IPCC proposant une enveloppe des « possibles ». Le scénario bas ou « optimiste » RCP 2.6 – vers lequel nous devrions tendre dans le cadre d'une application des accords de la COP21 de Paris – est considéré aujourd'hui comme peu réaliste si les mesures pour limiter les émissions et stocker les GES ne sont pas renforcées immédiatement. A noter qu'en 2022 le forçage radiatif total à l'échelle du globe était de $+3,4 \text{ W/m}^2$ par rapport à la période préindustrielle, alors que le scénario RCP 2.6 correspond, par définition, à un forçage de $+2,6 \text{ W/m}^2$ à l'horizon 2100 (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>).

2.1. Evolution de la température atmosphérique

Les projections à l'horizon 2100 des différents modèles disponibles indiquent que l'élévation de la température de l'air moyenne en Normandie pourrait être contenue à environ $+1^\circ\text{C}$ en cas d'application immédiate de l'accord de Paris visant à réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (scénario RCP 2.6), alors que sans politique climatique internationale (scénario RCP 8.5) elle pourrait dépasser les $+3^\circ\text{C}$ (Fig. 29).

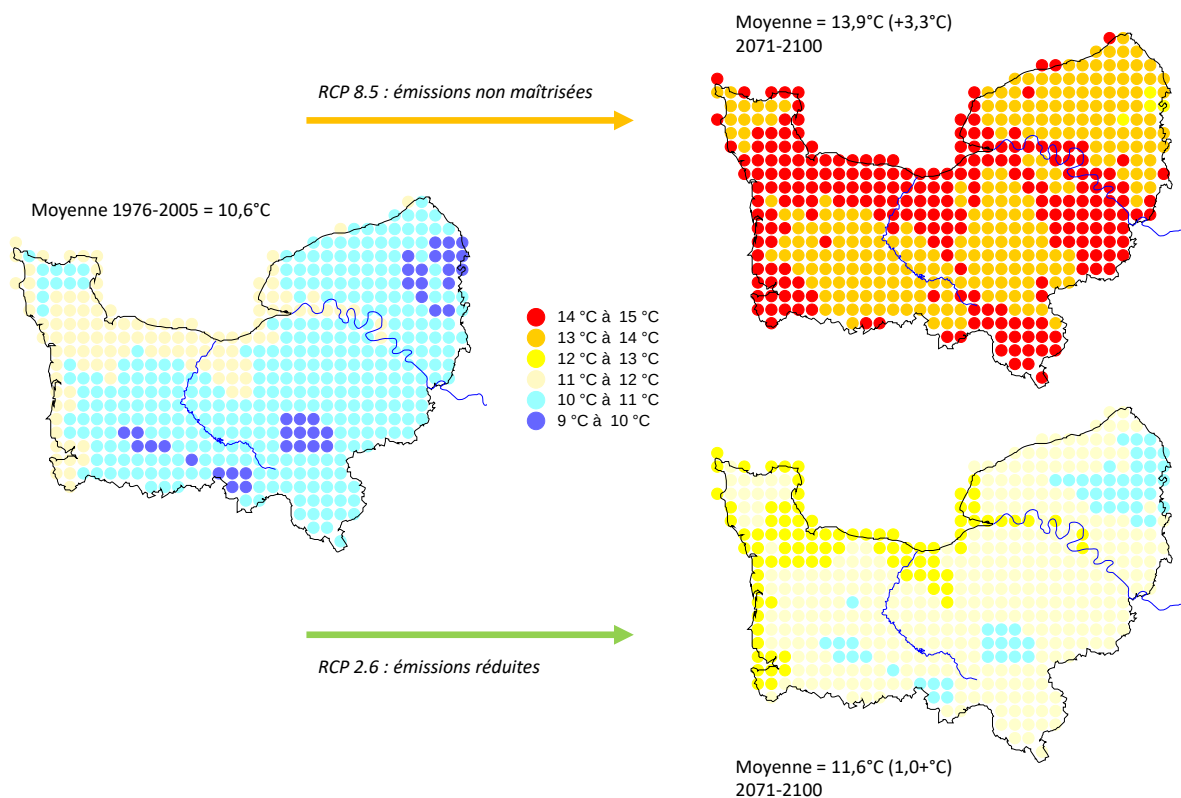


Figure 29 : Évolution attendue des températures de l'air moyennes annuelles en Normandie (à droite). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

En termes d'évolution, les disparités géographiques sont toutefois importantes (Fig. 30). Le littoral serait moins rapidement et intensément touché par le réchauffement que l'intérieur des terres, avec un très fort gradient dès les premiers kilomètres dans le cas d'une absence de politique climatique. Pour le scénario « pessimiste » RCP 8.5, la température moyenne annuelle de l'air pourrait s'élever de près de 4°C dans les secteurs les plus continentaux au sud-est de la Région (Perche, Plaine de Saint-André, Vexin Normand), contre 2 à 3°C dans les secteurs les plus océanisés de l'ouest (Cotentin, Coutançais, Avranchin) et même moins de 2°C sur les franges littorales. Pour le scénario « optimiste » RCP 2.6, les contrastes sont assez faibles mais soulignent l'importance de la continentalité sur la frange sud-est de la région.

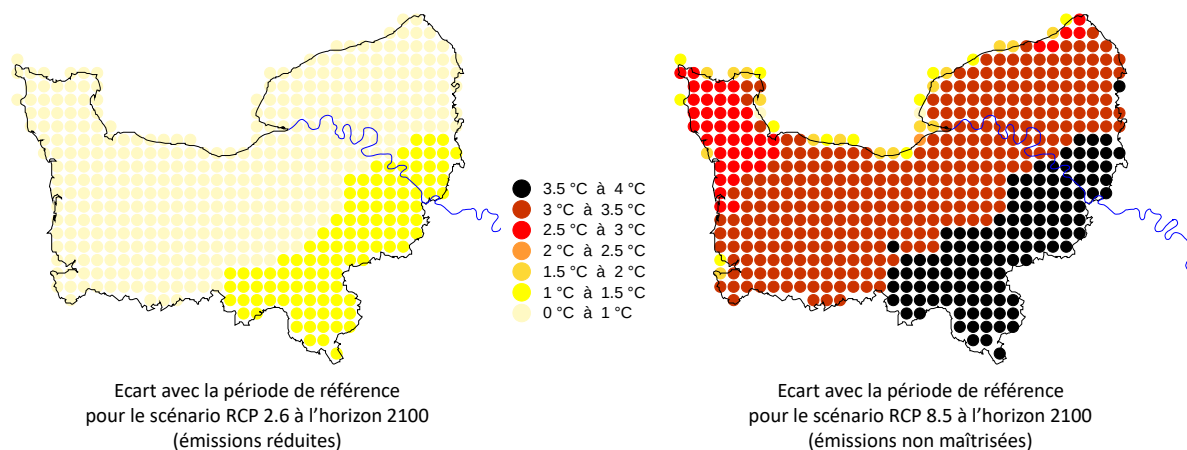


Figure 30 : Évolution attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 pour les températures moyennes annuelles de l'air en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Placé dans le continuum temporel de 1970 et 2100 (Fig. 31), le réchauffement futur se caractériserait par une différenciation des scénarios très nette après 2060. Pour le scénario RCP 2.6, les températures tendraient à plafonner puis même à amorcer une légère baisse après 2070 (diminution de 0,2°C entre les normales successives 2041-2070 et 2071-2100). Dans le même temps, le scénario RCP 8.5 se caractériserait par des températures en élévation régulière et rapide depuis le début des projections, dans le prolongement de la courbe des données simulées sur la période historique depuis la fin des années 1980.

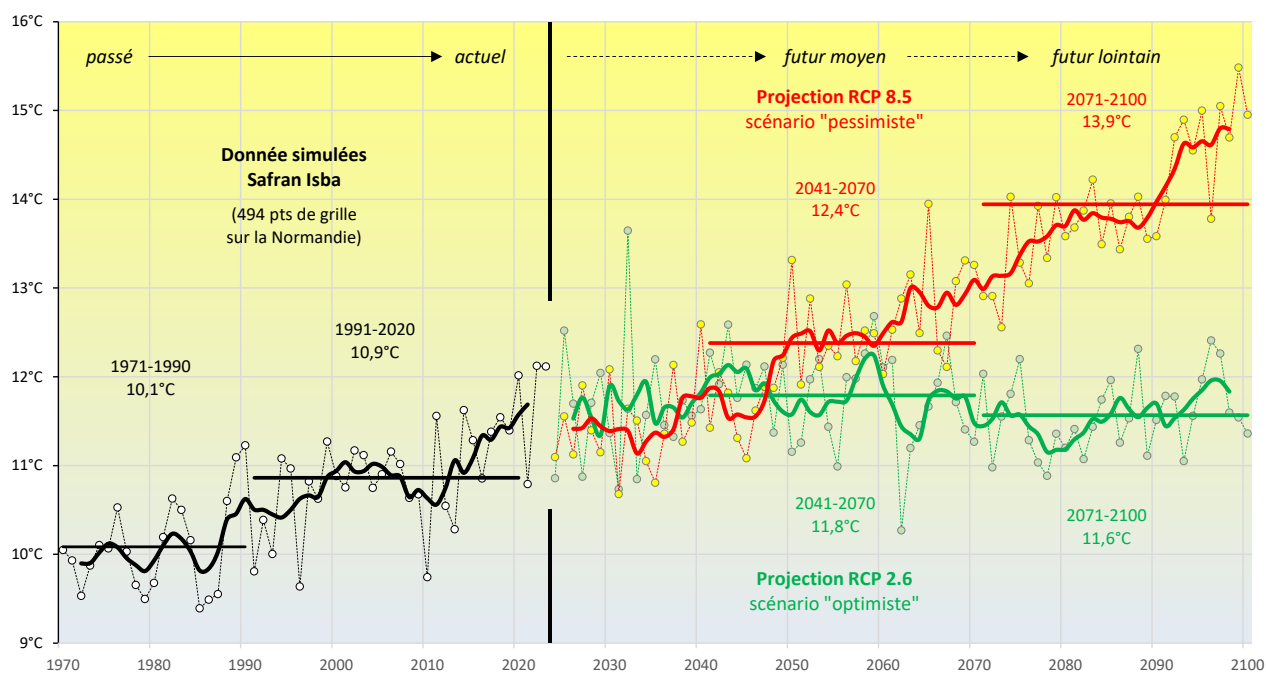


Figure 31 : Evolution des températures moyennes annuelles de l'air en Normandie entre 1970 et 2100. Courbes établies à partir de des données simulées Safran Isba sur la période historique et des projections sur les 494 points de grille correspondants sur la période 2024-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Rond (valeur annuelle) ; trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Météo-France et Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Pour une approche saisonnière de la dynamique du climat, la comparaison de la période de références et des deux scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 est proposée au pas de temps mensuel sous forme de vignettes (Fig. 32). Pour un meilleur confort de lecture et une analyse plus précise, ces cartes sont présentées en taille normale en annexe 3 a,b,c.

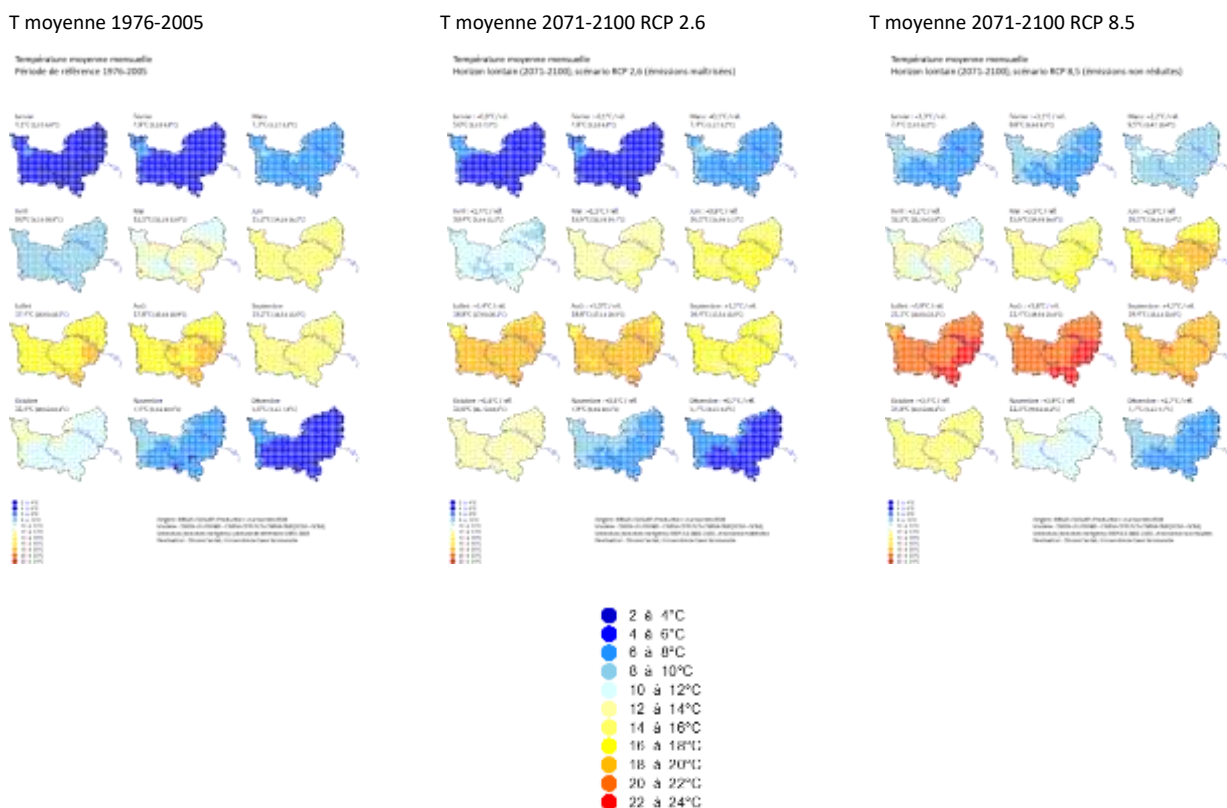


Figure 32 : Évolution attendue des températures de l'air moyennes mensuelles en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 3 en pleine page.

Cette présentation offre toutefois l'avantage de proposer une vue globale de l'évolution à l'horizon 2100. En balayant du regard ces cartes de la gauche vers la droite (du présent vers le futur lointain) et de haut en bas (à travers les saisons de l'hiver à l'automne en passant par le printemps et l'été), le changement des couleurs traduit un réchauffement qui affecte tous les mois de l'année. Il en ressort sans surprise que le bleu profond des cartes hivernales de la période de référence disparaît et qu'apparaît au contraire du rouge sur les cartes estivales. Cette vision est complétée par le tableau et les graphiques associés de la figure ci-après (Fig. 33). Avec le scénario RCP 2.6, on constate le faible réchauffement durant la période froide (même inexistant en février et mars) et des valeurs fluctuant entre +1°C et +1,5°C entre avril et octobre. Avec le scénario RCP 8.5, le réchauffement très présent sur tous les mois de l'année oscillerait toutefois entre +2°C et +4°C, avec des valeurs globalement plus fortes entre juillet et septembre et un léger fléchissement certains mois de la période froide (+2,2°C en mars et +2,7°C en décembre).

	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AN
Réf. 1976-2005	4.1°C	4.9°C	7.3°C	9.0°C	12.1°C	15.2°C	17.4°C	17.8°C	15.2°C	11.4°C	7.4°C	5.0°C	10.6°C
RCP 2.6 2071-2100	5.0°C	4.8°C	7.4°C	10.4°C	13.6°C	16.1°C	18.8°C	18.8°C	16.4°C	13.0°C	7.9°C	5.7°C	11.5°C
évolution RCP 2.6	0.9	-0.1	0.1	1.4	1.5	0.9	1.4	1.0	1.2	1.6	0.5	0.7	0.9
RCP 8.5 2071-2100	7.4°C	8.0°C	9.5°C	12.2°C	15.6°C	18.1°C	21.3°C	21.4°C	19.4°C	14.8°C	11.3°C	7.7°C	13.9°C
évolution RCP 8.5	3.3	3.1	2.2	3.2	3.5	2.9	3.9	3.6	4.2	3.4	3.9	2.7	3.3

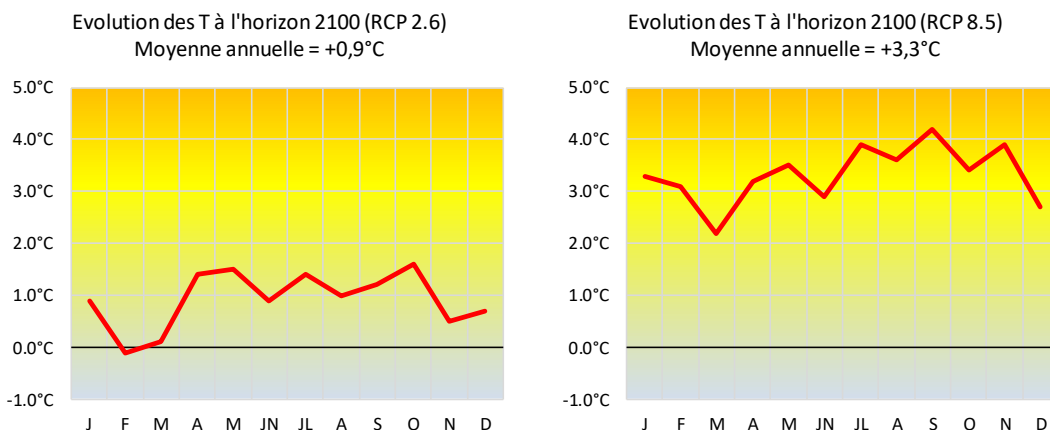


Figure 33 : Évolution attendue des températures moyennes mensuelles en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

2.2. Evolution du nombre de jours de chaleur et de froid

Jours de chaleur

Sans politique internationale de réduction des émissions de gaz à effet de serre (scénario RCP 8.5), on assisterait à une augmentation importante de la fréquence des jours de chaleur. La valeur de 25°C au plus chaud de la journée passerait d'environ 15 jours par an actuellement à près de 50 jours à l'horizon 2100 (Fig. 34). De très fortes disparités régionales apparaîtraient, entre les littoraux, relativement épargnés par cet aléa (notamment le Cotentin, véritable îlot de fraîcheur, mais également les côtes cauchoises), et les secteurs les plus éloignés de la Manche qui enregistreraient de l'ordre de 60 à 90 jours de chaleur par an à la fin de ce siècle, soit autant que le domaine méditerranéen français actuellement.

Avec une politique climatique efficace (RCP 2.6), en raison de l'inertie du système climatique, l'augmentation des jours de chaleur serait toujours présente mais elle se limiterait à environ une dizaine de jours supplémentaires par an à l'horizon 2100, avec un accroissement de l'ordre de 5 à 15 jours des côtes vers l'intérieur des terres.

Pour une approche saisonnière de la dynamique du climat, la comparaison de la période de référence et des deux scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 est proposée au pas de temps mensuel sous forme de vignettes (Fig. 35). Pour un meilleur confort de lecture et une analyse plus précise, ces cartes sont présentées en taille normale en annexe 4 a,b,c.

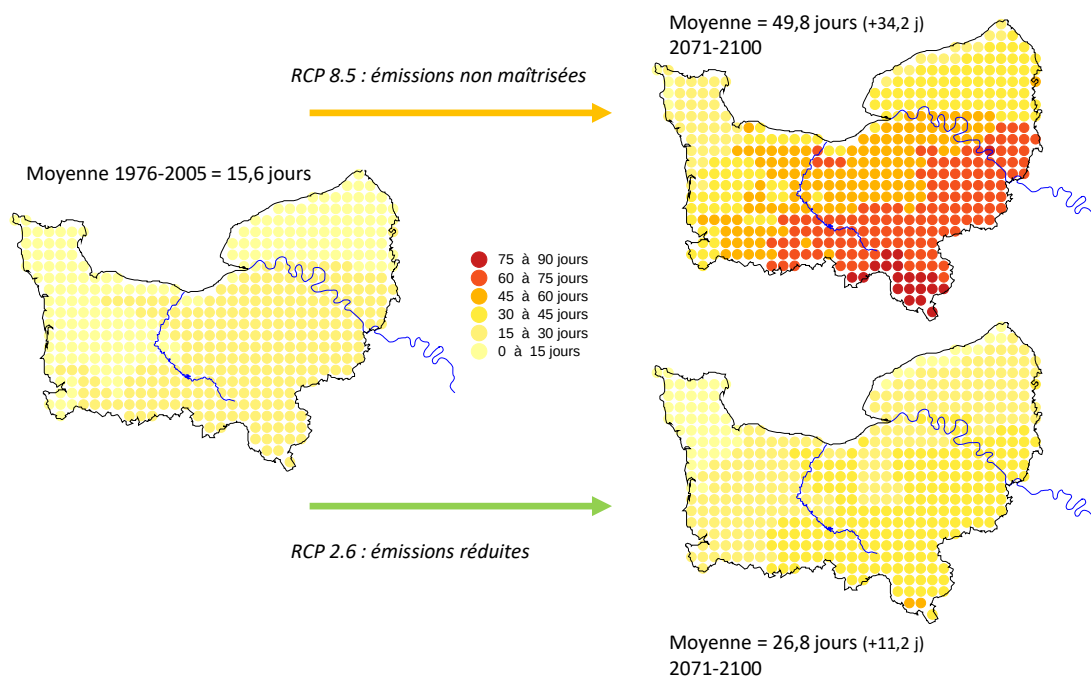


Figure 34 : Évolution attendue du nombre de jours de chaleur en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

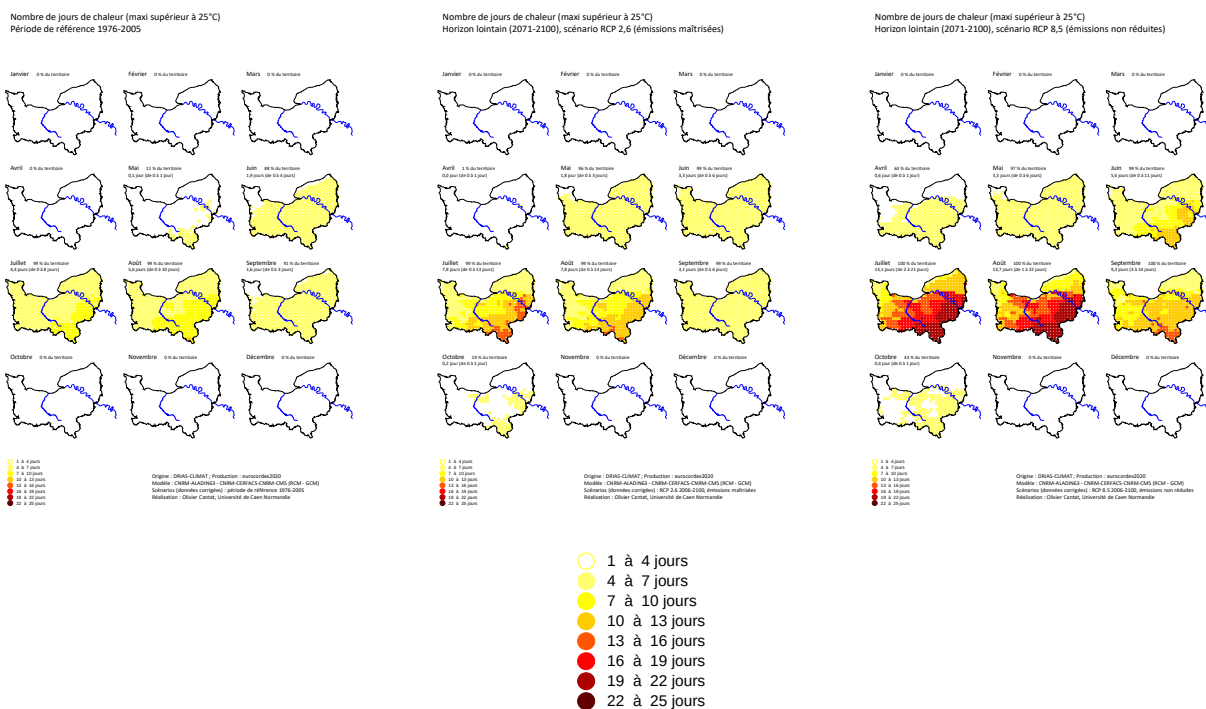


Figure 35 : Évolution attendue du nombre de jours de chaleur par mois en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 4 en plein page.

Jours de froid

Le constat pour le froid est logiquement à l'opposé de celui présenté pour la chaleur (Fig. 36). Sans politique internationale de réduction des gaz à effet de serre (RCP 8.5), on assisterait à une baisse importante de la fréquence des gelées (environ 20 jours de moins), passant de 30 jours par an actuellement à moins de 10 jours à l'horizon 2100. Les littoraux au nord-ouest de la région verraient cet aléa quasiment disparaître, alors que les secteurs traditionnellement les plus froids de l'Orne, du Pays d'Ouche et du Pays de Bray n'enregistreraient plus que de l'ordre de 10 à 20 jours de gel par an à la fin de ce siècle, contre plus de 50 actuellement.

Avec une politique climatique efficace (RCP 2.6), la réduction se limiterait en moyenne à environ 3 jours de moins par an, avec une perte en hiver de l'ordre d'une dizaine de jours dans l'intérieur des terres.

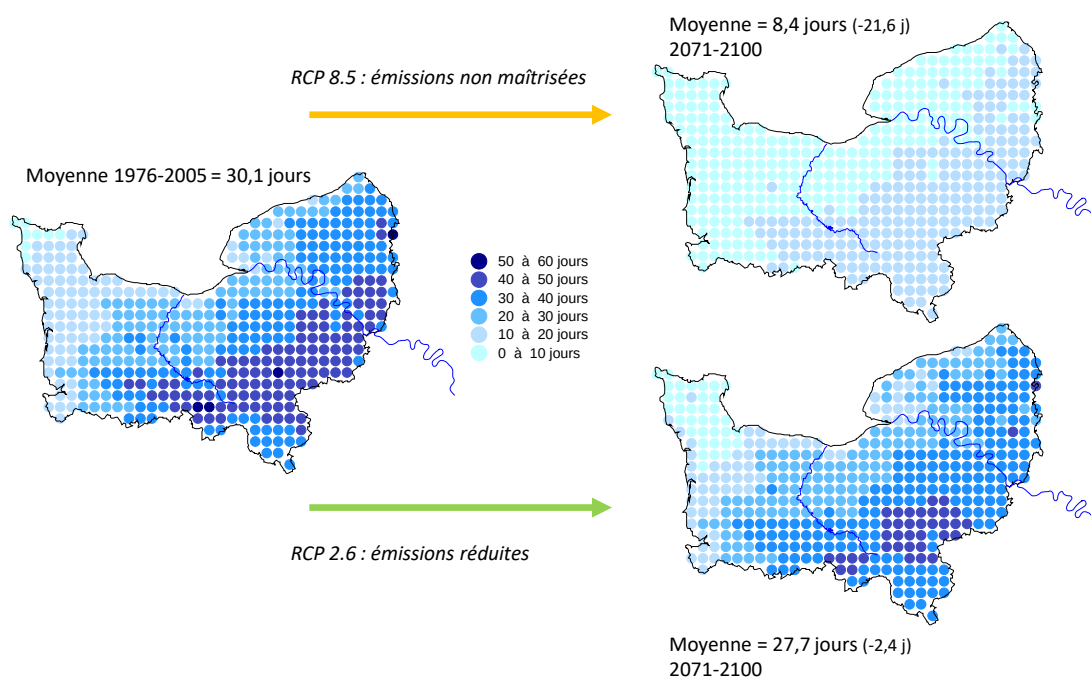


Figure 36 : Évolution attendue des gelées en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

2.3. Evolution des précipitations

Evolution des précipitations moyennes annuelles

Attention : les précipitations sont le paramètre dont l'incertitude est la plus importante en termes de projections. Les informations présentées ci-dessous sont donc à interpréter avec une grande prudence et l'usage du conditionnel est à recommander avec encore plus d'insistance. En effet, de par sa position géographique à l'interface entre les effets d'augmentation (au nord) et de diminution (au sud) des précipitations déterminés par les modèles globaux, les différents modèles régionaux et leurs réactualisations successives peuvent faire basculer la Normandie d'un côté ou de l'autre de la frontière. A titre d'exemple, d'après le modèle Aladin63 CNRM CM5 utilisé dans ce document, on passerait d'un cumul annuel en diminution (-10%) avec les données DRIAS-2014 à un cumul plus important avec les données DRIAS-2020 (+8%). Toutefois, concernant la saisonnalité des précipitations – élément clé pour une analyse des conséquences sur l'environnement et la société des différences d'apport en eau au cours de l'année – les principales conclusions de la précédente synthèse sont toujours d'actualité car on retrouve les mêmes tendances pour l'hiver (augmentation) et pour l'été (diminution).

Concernant l'évolution des précipitations à l'horizon 2100, en tenant compte des réserves exprimées ci-dessus, on tendrait vers une augmentation des cumuls annuels dans le cas du scénario RCP 8.5 et vers une certaine stabilité dans le cas du scénario RCP 2.6 (fig. 37). Sans politique de réduction des gaz à effet de serre, la région verrait son cumul pluviométrique annuel augmenter d'environ 8%, passant pour la moyenne régionale des 494 points de grille de 841 mm sur la période de référence 1976-2005 proposée par DRIAS-2020 à 912 mm par an (+71 mm).

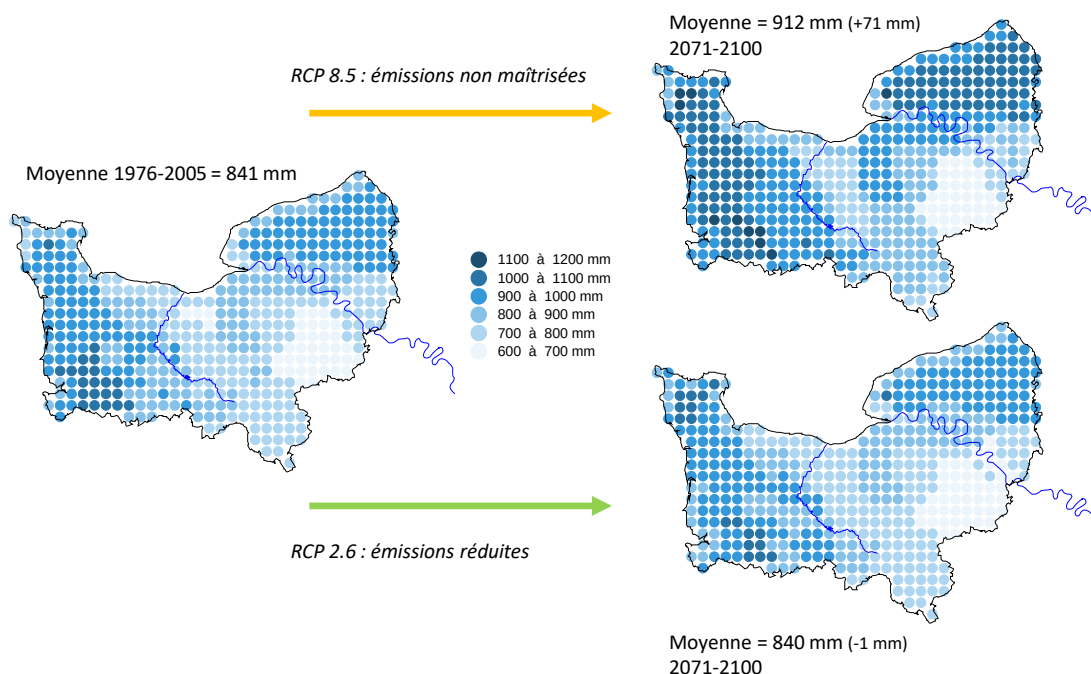


Figure 37 : Évolution attendue du cumul pluviométrique annuel en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Le continuum temporel de 1970 et 2100 exprime la grande variabilité interannuelle des précipitations sur l'ensemble de la période étudiée (fig. 38). La tendance est opposée entre le scénario RCP 2.6 (réduction d'environ -50 mm par an entre les Normales 2041-2070 et 2071-2100) et le scénario RCP 8.5 (augmentation d'environ +40 mm par an entre les mêmes Normales). Notons que pour ce graphique nous avons choisi ici de prendre comme référence pour la période actuelle les données simulées Safran Isba sur la Normale 1991-2020, plus révélatrices du climat actuel que les données modélisées DRIAS fournies sur la période 1976-2005.

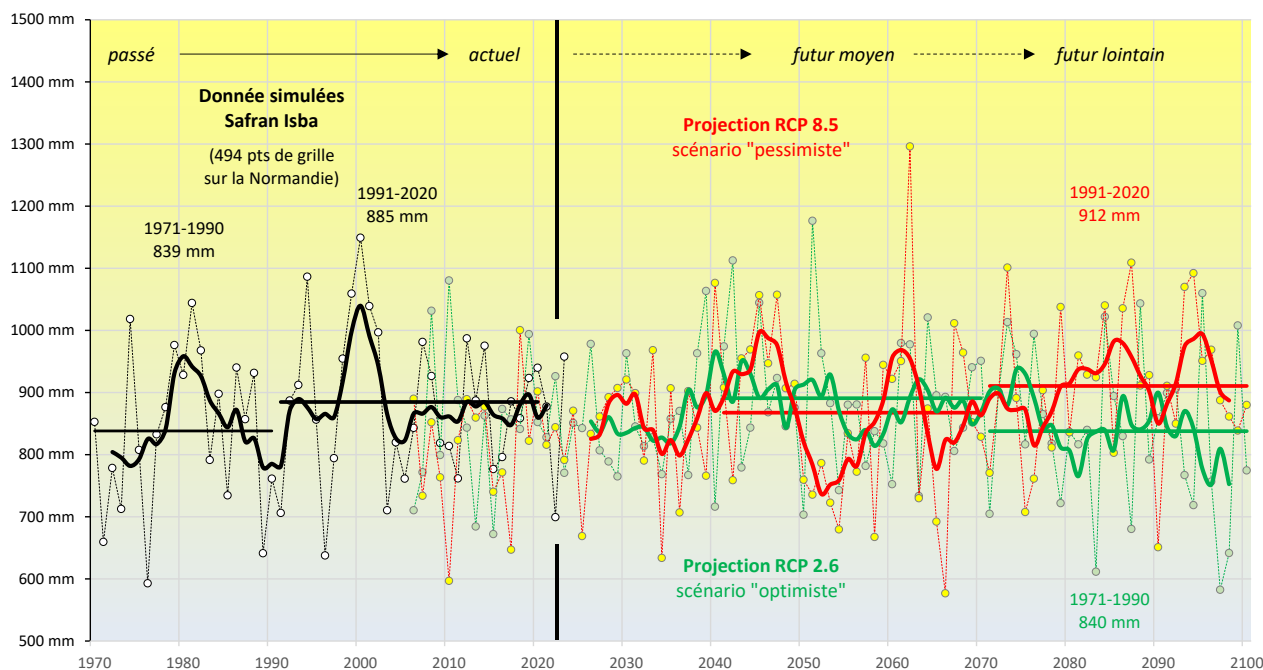


Figure 38 : Evolution du cumul annuel de précipitations en Normandie entre 1970 et 2100. Courbes établies à partir des données simulées Safran Isba sur la période historique 1970-2023 et des projections sur les 494 points de grille correspondants sur la période 2024-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Rond (valeur annuelle) ; trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Météo-France et Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Evolution des précipitations saisonnières

Les cumuls annuels de précipitations masquent des comportements saisonniers qui peuvent être très contrastés (Fig. 39), impactant de façon importante le fonctionnement des écosystèmes et des géosystèmes (notamment par les phénomènes de ruissellement et d'érosion en saison froide, et par les problèmes liés à la ressource en eau disponible en saison chaude pour le développement de la flore, donc les activités liées à l'agriculture et l'élevage, par exemple).

Ainsi, pour le modèle Aladin63 et selon le scénario RCP 8.5 du GIEC/IPCC à l'horizon 2100, dans un contexte annuel régional globalement plus arrosé d'environ 9%, une opposition très nette apparaîtrait entre un hiver qui recevrait beaucoup plus d'abats (+25 %) et un été nettement plus sec (-14%). Au sein de ces tendances moyennes sur la région, des disparités géographiques importantes seraient présentes et différentes selon les saisons. En hiver, l'augmentation des précipitations semble assez homogène sur le territoire mais toutefois plus marquée sur le nord-est. En été, dans un contexte globalement moins arrosé, l'évolution serait plus contrastée, notamment entre des franges méridionale et occidentale fortement touchées (moins de -30% localement) et le nord-est de la région. Pour l'automne et le printemps, le signal est moins net mais tendrait vers une augmentation des précipitations (+7% et +10%), avec une différenciation spatiale entre une accentuation plus sensible des cumuls sur les littoraux au printemps et dans les confins méridionaux de la région en automne.

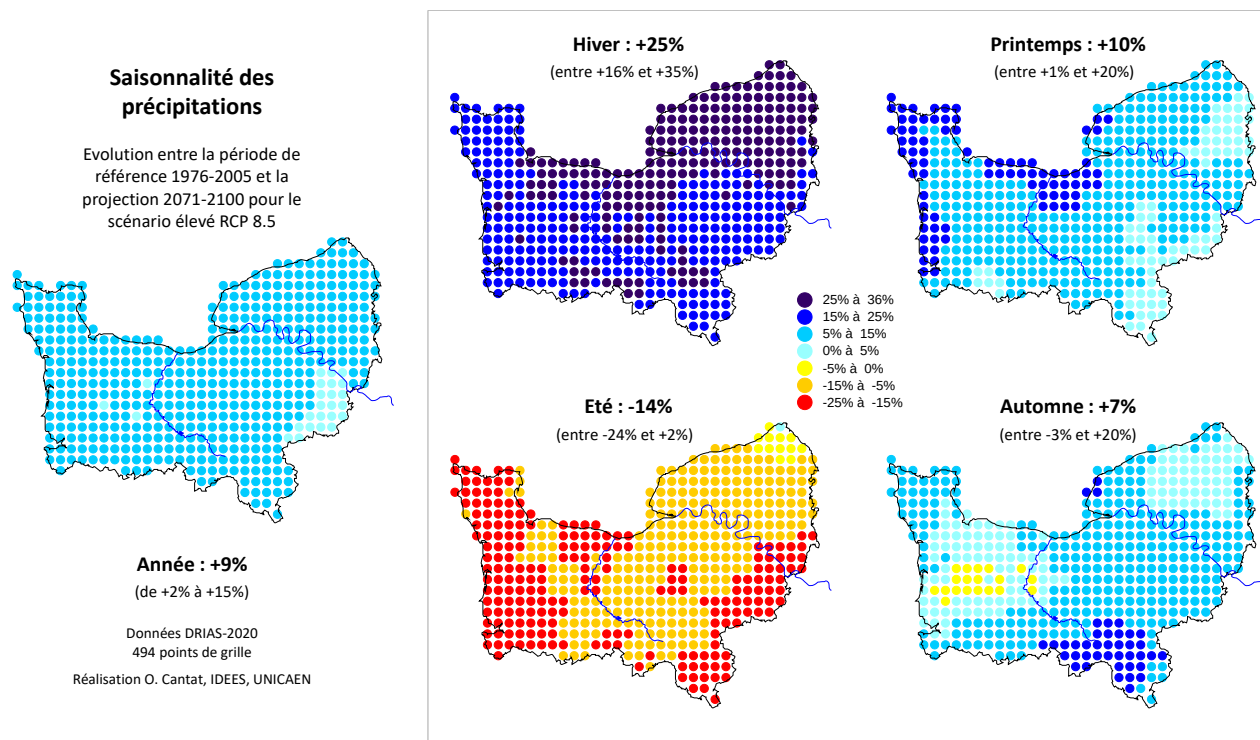


Figure 39 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 (en %) de la pluviométrie en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Pour une approche plus fine de la dynamique saisonnière du climat, comme pour les températures moyennes, la comparaison de la période de référence et des deux scénarios à l'horizon 2100 est proposée ci-dessous au pas de temps mensuel sous forme de vignettes (Fig. 40). Ces cartes sont présentées en taille normale pleine page en annexe 5 a,b,c.

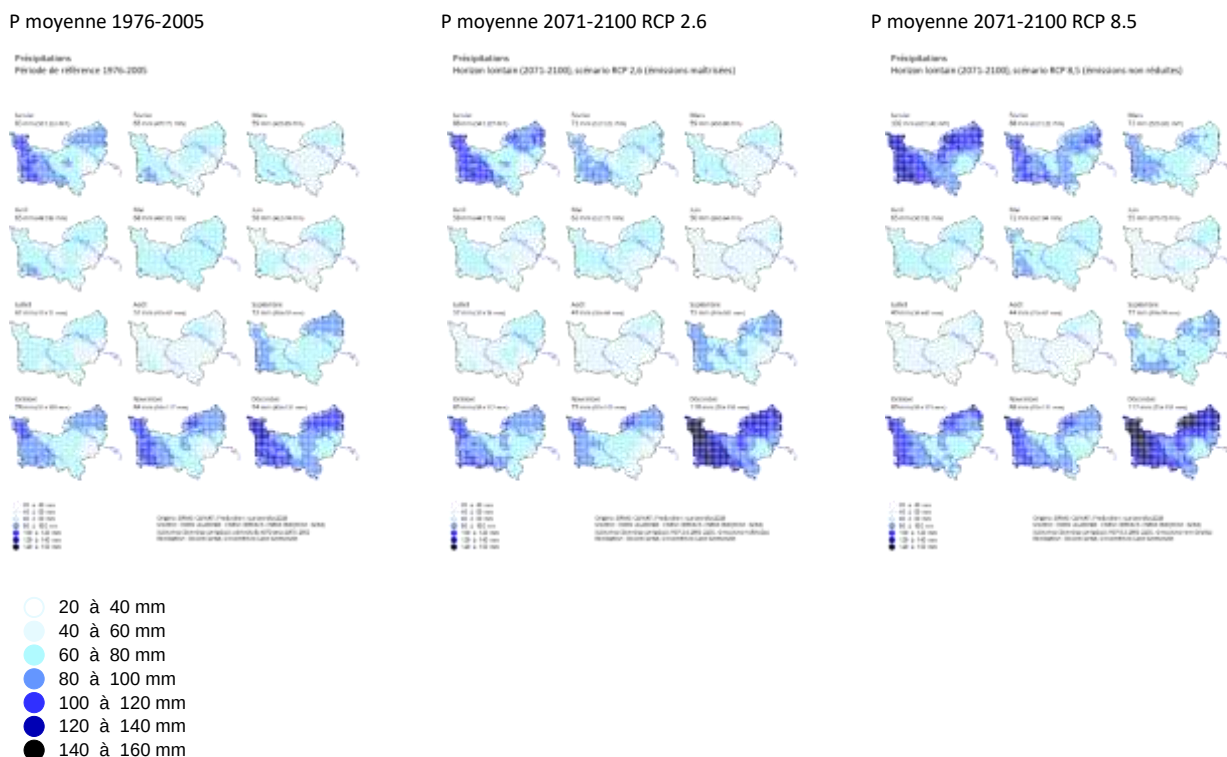


Figure 40 : Évolution attendue des cumuls moyens mensuels de précipitations en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 5 en pleine page.

La vue globale de ces cartes et des tableaux et graphiques de la figure ci-après (Fig. 41) soulignent principalement deux faits : (i) avec le scénario RCP 2.6, le peu de variation sur l'ensemble des mois de l'année (léger surplus en hiver, plus marqué en décembre avec +17%, et faible déficit étalé du printemps à l'été) et (ii) avec le scénario RCP 8.5, l'accentuation des contrastes saisonniers avec la forte augmentation des cumuls en hiver (plus de 20% supplémentaires entre décembre et mars) et les pertes estivales (21% de moins en juillet et 15% de moins en août).

	J	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D
Réf. 1976-2005	83 mm	65 mm	59 mm	65 mm	68 mm	58 mm	62 mm	52 mm	73 mm	78 mm	84 mm	94 mm
RCP 2.6 2071-2100	88 mm	71 mm	59 mm	58 mm	63 mm	50 mm	57 mm	49 mm	75 mm	85 mm	75 mm	110 mm
évolution RCP 2.6	6.0%	9.2%	0.0%	-10.8%	-7.4%	-13.8%	-8.1%	-5.8%	2.7%	9.0%	-10.7%	17.0%
RCP 8.5 2071-2100	102 mm	88 mm	73 mm	65 mm	72 mm	55 mm	49 mm	44 mm	77 mm	89 mm	86 mm	112 mm
évolution RCP 8.5	22.9%	35.4%	23.7%	0.0%	5.9%	-5.2%	-21.0%	-15.4%	5.5%	14.1%	2.4%	19.1%

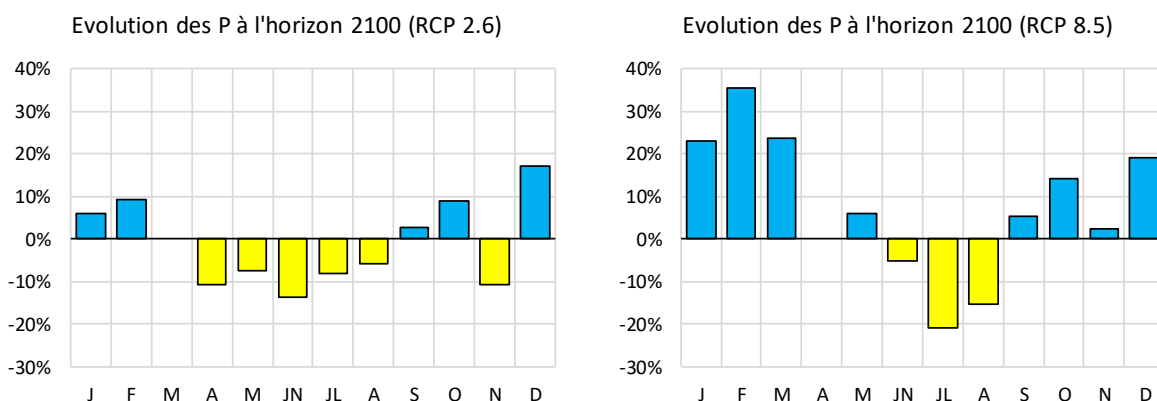


Figure 41 : Évolution attendue des cumuls moyens mensuels de précipitations en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

3. Aléas météorologiques (forte chaleur et grand froid, neige, sécheresses, précipitations intenses, tempêtes)

3.1. Fortes chaleurs et canicules

Avec le changement climatique, les vagues de chaleur - *nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale de 5°C à la température maximale quotidienne de référence (1976-2005), dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs* - verraient leurs fréquences augmenter considérablement, passant d'environ 4 jours sur la période de référence à 14 jours avec le scénario RCP 2.6 et à plus de 50 jours avec le scénario RCP 8.5 (Fig. 42). Dans le même temps, la température des 10% des jours les plus chauds s'élèverait de près de 2°C (de 22°C à 24°C) avec le scénario RCP 2.6 et de plus de 4°C (de 22°C à 26°C) avec le scénario RCP 8.5 (Fig.43). Globalement, l'écart devrait se creuser entre l'intérieur des terres qui subirait des vagues de chaleur plus intenses et plus durables, susceptibles de commencer sur la fin du printemps et de déborder sur le début de l'automne, et les espaces océanisés qui résisteraient davantage à l'augmentation de fréquence de cet aléa.

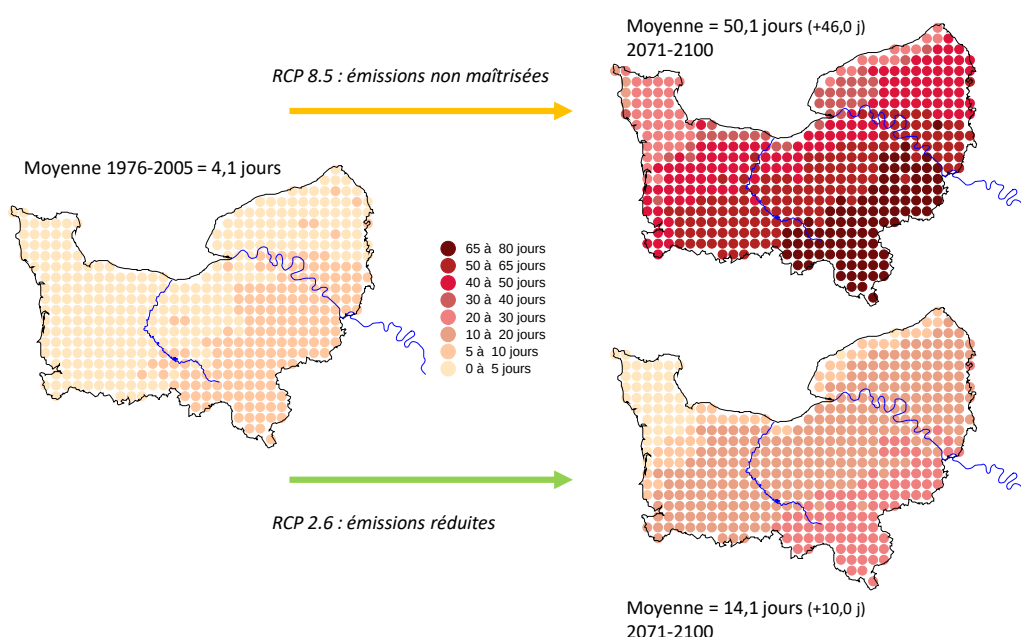


Figure 42 : Évolution attendue du nombre de jours de vague de chaleur en Normandie (nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale de 5°C à la température maximale quotidienne de référence (1976-2005), dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

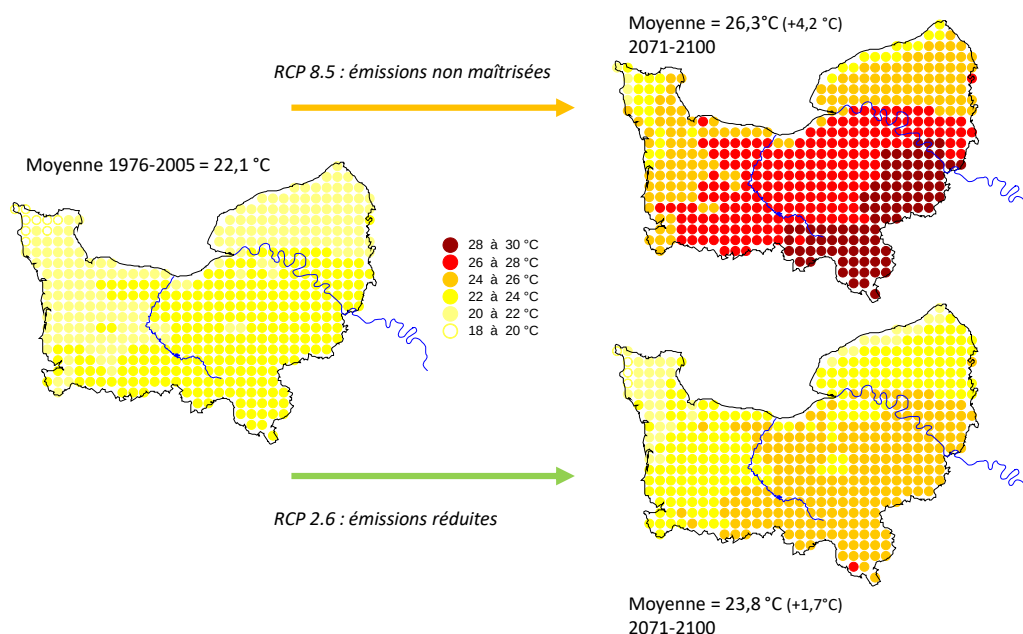


Figure 43 : Évolution attendue des extrêmes chauds en Normandie (10% des jours les plus chauds). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Au regard des conditions les plus extrêmes, le nombre de jours de très forte chaleur (plus de 35°C dans la journée) illustre l’aggravation du risque d’hyperthermie sévère sur la Normandie si rien n’est fait à l’échelle mondiale pour freiner l’augmentation de la quantité de gaz à effet de serre dans l’atmosphère (Fig. 44). Sur la période de référence 1976-2005, le risque n’est présent en moyenne sur la région qu’une fois tous les dix ans et épargne même toute les parties ouest et nord de la région, influencées par l’inertie thermique des eaux fraîches de la Manche. Avec le scénario RCP 8.5, à l’horizon 2100 il devient observable sur l’ensemble du territoire, présentant un gradient très net du littoral vers l’intérieur des terres, jusqu’à en moyenne 6 à 10 jours par an sur la partie sud-est de la région.

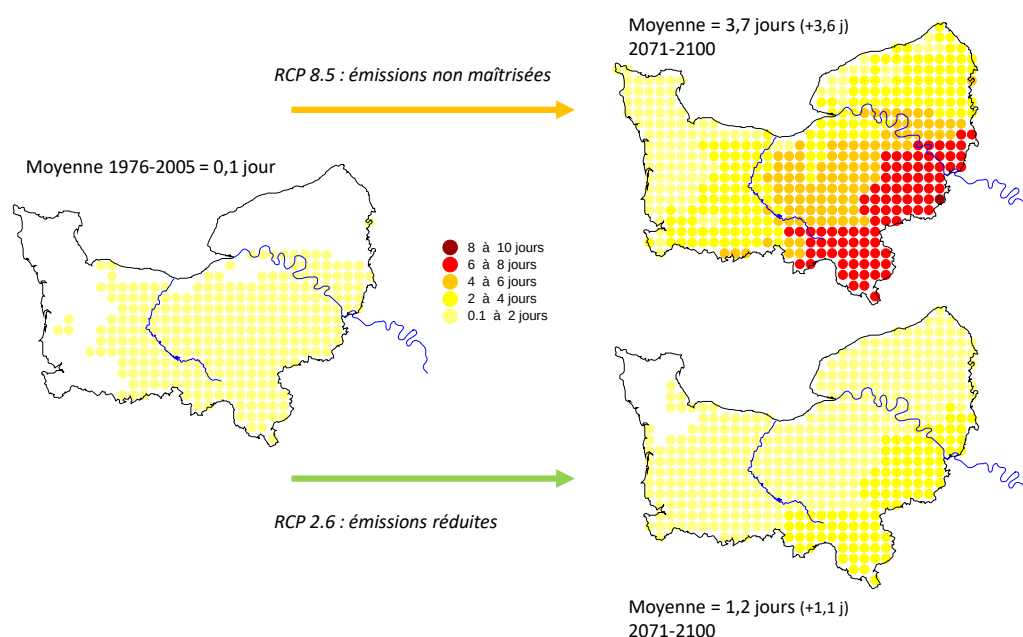


Figure 44 : Évolution attendue du nombre de jours de très forte chaleur en Normandie (température maximale supérieure à 35°C). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Le tracé du continuum temporel pour les très fortes chaleurs en Normandie entre 1970 et 2100 montre les différentes étapes dans la progression des conditions estivales les plus extrêmes (Fig. 45). Le caractère exceptionnel de ces épisodes sur la période antérieure à l'an 2000 se manifeste par la présence de quelques années isolées (n'atteignant pas dans le pire des cas une valeur moyenne régionale de 2 jours). Les projections font ensuite apparaître des épisodes progressivement plus nombreux et regroupés par blocs de 5 à 10 ans, quel que soit le scénario. Pour le scénario RCP 2.6, après un pic dans la décennie centrée autour de 2030, la tendance serait ensuite à un plafonnement de la fréquence de ces très fortes chaleurs, avant de regagner un peu en occurrences à la fin du siècle. Pour le scénario RCP 8.5, une augmentation brutale du phénomène pourrait survenir dans la dernière décennie du 21^e siècle. La valeur moyenne cartographiée sur la figure 45 pour la normale 2071-2100 (3,7 jours) sous évaluerait donc fortement les conditions possiblement observables entre 2090 et 2100.

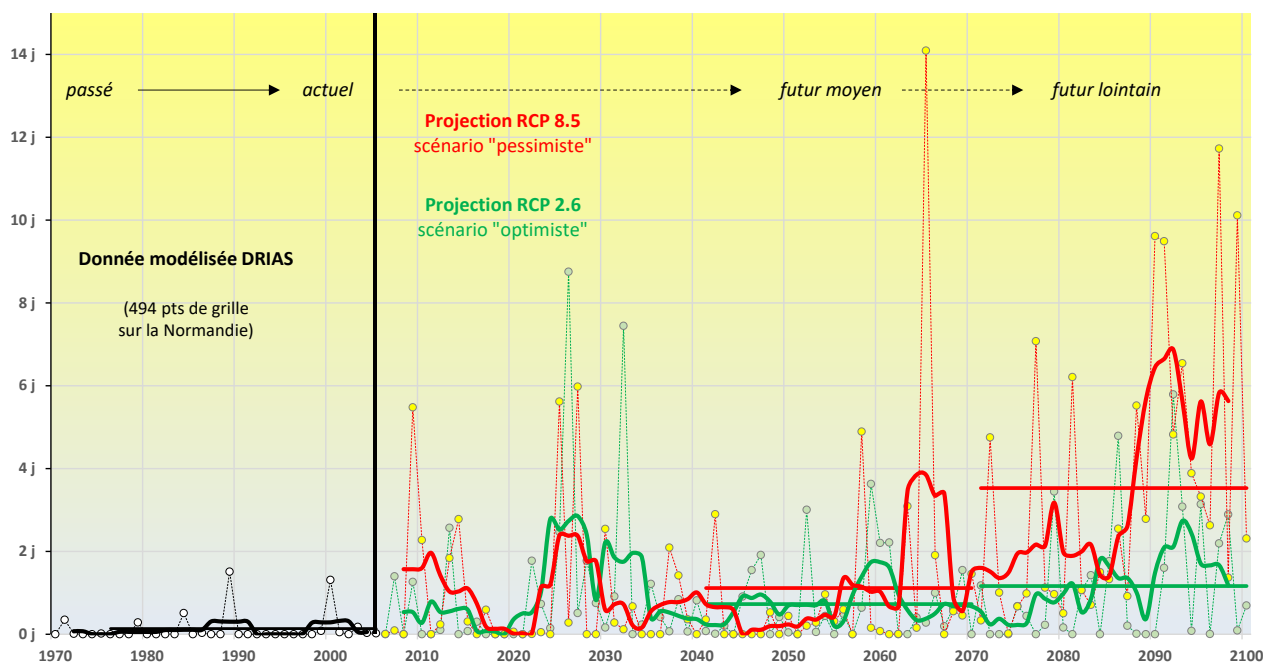


Figure 45 : Evolution des jours de très forte chaleur (35°C) en Normandie de 1970 à 2100. Courbes établies à partir des données modélisées Drias sur la période historique 1970-2005 et des projections sur les 494 points de grille correspondants sur la période 2006-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Rond (valeur annuelle) ; trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Pour envisager plus globalement les conséquences de la chaleur sur la santé, il convient également de s'intéresser aux conditions nocturnes. Le phénomène de « nuit tropicale » (température minimale de l'air relevée sous abri ne descendant pas sous 20°C, engendrant des difficultés de récupération physiologique) en est un marqueur représentatif. Comme pour les très fortes chaleurs, l'occurrence du phénomène est très faible sur la période de référence avec une moyenne régionale d'environ une fois tous les trois ans (Fig. 46). Si une politique climatique internationale efficace est mise en place très rapidement (RCP 2.6), le phénomène pourrait cependant affecter une plus grande partie de la région, tout en épargnant toujours le Cotentin. Il resterait toutefois contenu à moins de 8 cas par an pour les secteurs les plus touchés, c'est-à-dire le sud-est de la région et le long de la vallée de la Seine. En revanche, si les émissions de GES ne sont pas maîtrisées (RCP 8.5), ces mêmes secteurs verraient une dégradation notable des conditions nocturnes (entre 20 et 30 nuits tropicales), ce qui pourrait poser de graves problèmes de santé, notamment entre Rouen et le Havre du fait de la concentration de population et du caractère très minéral de l'environnement des villes qui aggrave le phénomène (voir partie 4).

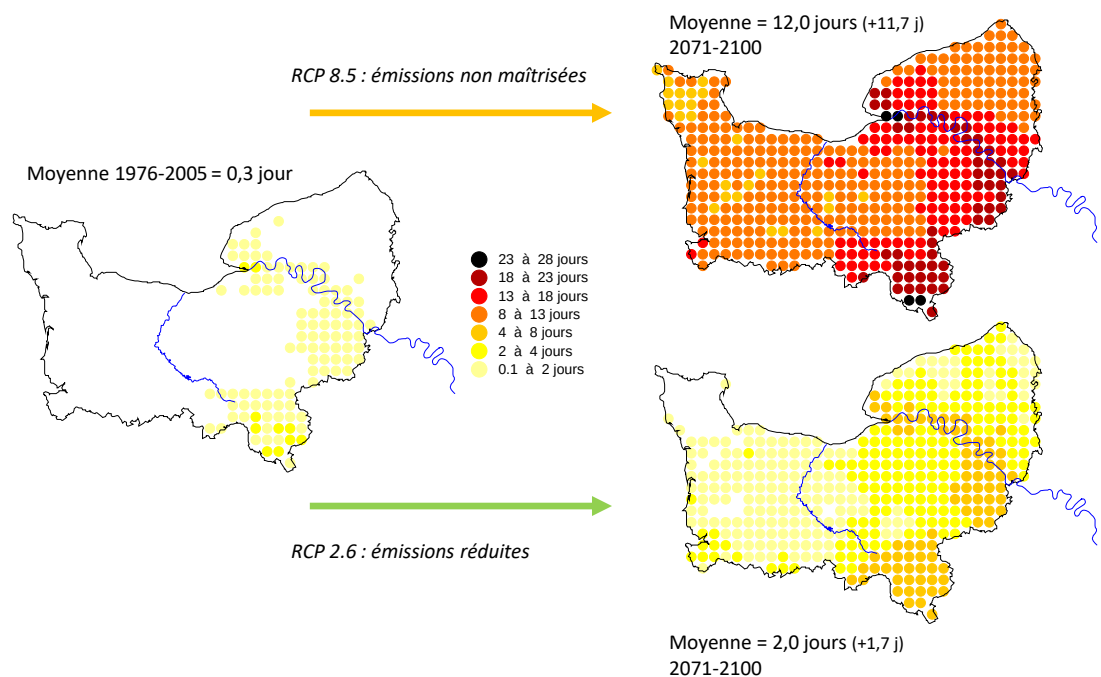


Figure 46 : Évolution attendue du nombre de nuits tropicales en Normandie (nombre de jours avec une température minimale supérieure à 20°C). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Pour « personnaliser » davantage ces informations, le tableau ci-dessous fournit les valeurs simulées aux points de grille correspondant géographiquement aux sept stations dont les mesures ont été prises comme repères dans l’analyse précédente (Tabl. 5). Leur représentativité de la diversité climatique normande permet d’apprécier plus concrètement le rôle des facteurs géographiques dans la fréquence et l’évolution des valeurs extrêmes caractérisant la chaleur diurne et nocturne. En plus de la simple chaleur (dépassement du seuil de 25°C dans la journée), sont ici présentés les nombres de jours correspondant à la *très forte chaleur*, aux *nuits tropicales* et aux *vagues de chaleur*, à l’horizon 2100 et selon les deux scénarios RCP 2.6 et 8.5 du GIEC/IPCC.

		Nombre jours chaleur (maxi >= 25°C)			Nombre jours très forte chaleur (maxi >= 35°C)			Nombre nuits tropicales (mini >= 20°C)			Nombre jours vagues chaleur		
		Réf. 1976- 2005	2071-2100		Réf. 1976- 2005	2071-2100		Réf. 1976- 2005	2071-2100		Réf. 1976- 2005	2071-2100	
			RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5
littoral	Cherbourg	4	7	20	0	0.03	0.4	0	0	8	0	2	24
	le Havre	12	19	36	0.03	0.9	2.6	5	5	25	3	9	31
	Dieppe	6	11	23	0.03	0.7	2.3	2	2	11	2	5	28
inter- médiaire	Caen	20	33	61	0.3	1.4	3.9	1	1	12	4	14	46
	Rouen	20	33	59	0.17	1.5	4.9	4	4	19	5	16	51
continental	Evreux	26	42	72	0.3	2.6	7.5	4	4	18	5	20	65
	Alençon	26	44	77	0.3	2.2	6.7	4	4	19	7	21	66

Tableau 5 : Évolution attendue de la chaleur (maxi >= 25°C), de la très forte chaleur (maxi >= 35°C), des nuits tropicales (mini >= 20°C) et des vagues de chaleur en Normandie (nombre de jours) pour 7 points de grille. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Le tableau fait ressortir une coupure franche entre les sites influencés par la Manche (Cherbourg, Le Havre et Dieppe) et les sites continentaux (Evreux et Alençon). Caen et Rouen servant de transition entre ces deux entités bien distinctes. Au seuil de 35°C, les cas sont extrêmement rares sur la région pour la période de référence 1976-2005 (de 0 à 0,3 jour par an de Cherbourg à Evreux et Alençon). Avec la mise en application d'une politique climatique (RCP 2.6), les valeurs évolueraient peu sur le littoral (toujours quasi inconnu à Cherbourg et moins de 1 jour à Dieppe et au Havre) mais deviendraient un peu plus significatives dans l'intérieur des terres, avec entre 2 et 3 jours à Alençon et Evreux. Caen et Rouen se plaçant logiquement en position médiane avec 1,5 jour. Sans politique climatique (RCP 8.5), le seuil des 35°C serait atteint 7 à 8 fois par an à Alençon et Evreux, 4 à 5 fois à Caen et Rouen et 2 à 3 fois par an sur le littoral, excepté sur le « finistère » cotentinois (0,4 jour à Cherbourg), permettant à ce secteur géographique de conserver son caractère d'îlot de fraîcheur estival (David *et al.*, 2019).

Avec ce scénario pessimiste, le seuil des 40°C pourrait être dépassé – et même largement dépassé par endroit – dans les parties les plus continentales de la région (maximum absolu de 49,2°C à Evreux et de plus de 45°C à Rouen, Caen et Alençon), et cela avec une récurrence non négligeable (75 fois en 30 ans à Evreux et plus de 30 fois à Rouen et Alençon durant la période 2071-2100). Le contraste est fort avec le littoral (Fig. 47) : en 30 années, 10 fois plus de 40°C à Dieppe, 8 fois au Havre et seulement 2 fois à Cherbourg (et certainement jamais si nous avions représenté un point de grille tout au nord-ouest de la presqu'île du Cotentin).

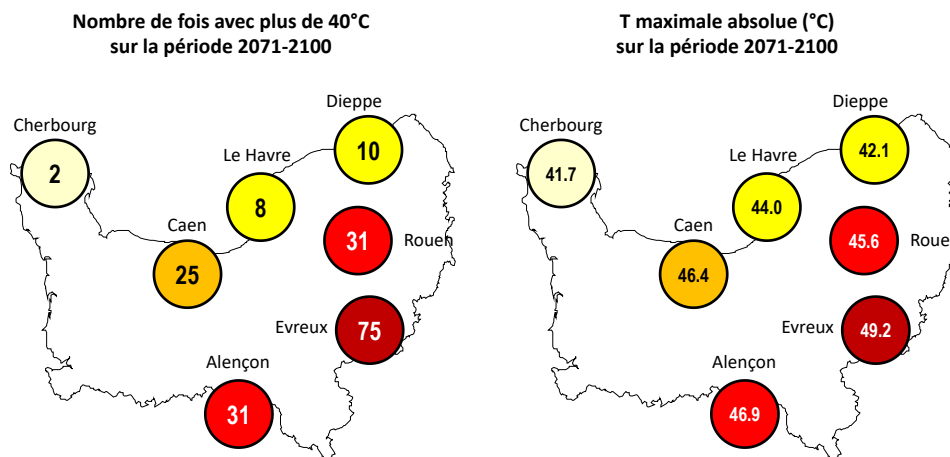


Figure 47 : Fréquence et intensité des températures extrêmes chaudes sur la Normandie pendant la Normale 2071-2100. Scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

En corollaire, les vagues de chaleur présentent une logique spatiale identique mais encore plus accentuée. Sans politique climatique, Evreux et Alençon passeraient ainsi d'environ 6 jours par an à plus de 65 ; Caen et Rouen d'environ 5 jours à près de 50 et Cherbourg, Le Havre et Dieppe de quelques jours à environ 25 à 30. Toutes ces données confirment que les secteurs continentaux seraient beaucoup plus affectés dans la journée par les excès de chaleur que les littoraux qui bénéficient de la proximité d'une masse d'eau peinant à se réchauffer en période estivale et de l'établissement possible dans la journée de brises de mer qui font baisser la température très rapidement (perte de 5 à 10°C en quelques minutes à la renverse du vent).

Pour les nuits tropicales, la répartition géographique est plus complexe car sur les littoraux le refroidissement nocturne est conditionné en grande partie par la température de la mer : ainsi, au contact des eaux peu profondes et par conséquent plus chaudes de l'estuaire de la Seine, la température nocturne de l'air peinerait à s'abaisser sous les 20°C au Havre (25 jours), contrairement à Dieppe et Cherbourg, sites baignés par des eaux du large plus fraîches (11 et 8 jours). Pour Alençon, Evreux et Rouen, malgré la rapidité du refroidissement nocturne dû à la faible inertie thermique des surfaces continentales, on serait proche quand même des 20 nuits tropicales par an car certains jours la chaleur torride de la journée n'aurait pas le temps de se dissiper au cours de la nuit (notamment en cas de vent ou d'arrivée de nuages freinant le rafraîchissement par rayonnement nocturne). Les épisodes actuels de chaleur extrême préfigurent ce genre de situation, à l'image de la nuit du 18 au 19 juillet 2022 durant laquelle les températures ne sont pas descendues sous les 20°C dans la plupart des stations météorologiques régionales : 22,5°C à Rouen et Evreux, 21,7°C à Alençon et 21,6°C à Caen par exemple. L'effet des eaux chaudes de l'estuaire de la Seine a lui été remarquable durant la vague de chaleur tardive du mois de septembre 2023, avec 6 nuits tropicales entre le 4 et le 10 du mois pour la station du Cap-de-La-Hève, contre aucune à Dieppe et Cherbourg, comme sur les stations continentales.

3.2. Grands froids et chutes de neige...

Si le *froid*, et *a fortiori* les *grands froids* et *très grands froids*, ne sont pas une composante première du climat tempéré océanique normand, la présence d'épisodes aux températures fortement négatives et/ou de précipitations neigeuses peut engendrer des problèmes environnementaux et sociétaux majeurs, d'autant plus pénalisant que la région n'y est pas préparée. Avec le réchauffement climatique, la fréquence et l'intensité de ces aléas serait en forte diminution en Normandie (Cantat, 2006) comme sur le reste de la France (<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/grands-froids> ; Cantat, 2019).

Les deux cartes suivantes traduisent à l'échelle régionale ces évolutions pour le nombre de jours de vagues de froid (Fig. 48) - *nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale de 5°C à la température minimale quotidienne de référence (1976-2005), dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs* - et la valeur des extrêmes froids (Fig. 49) pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100, en comparaison de la période de référence 1976-2005.

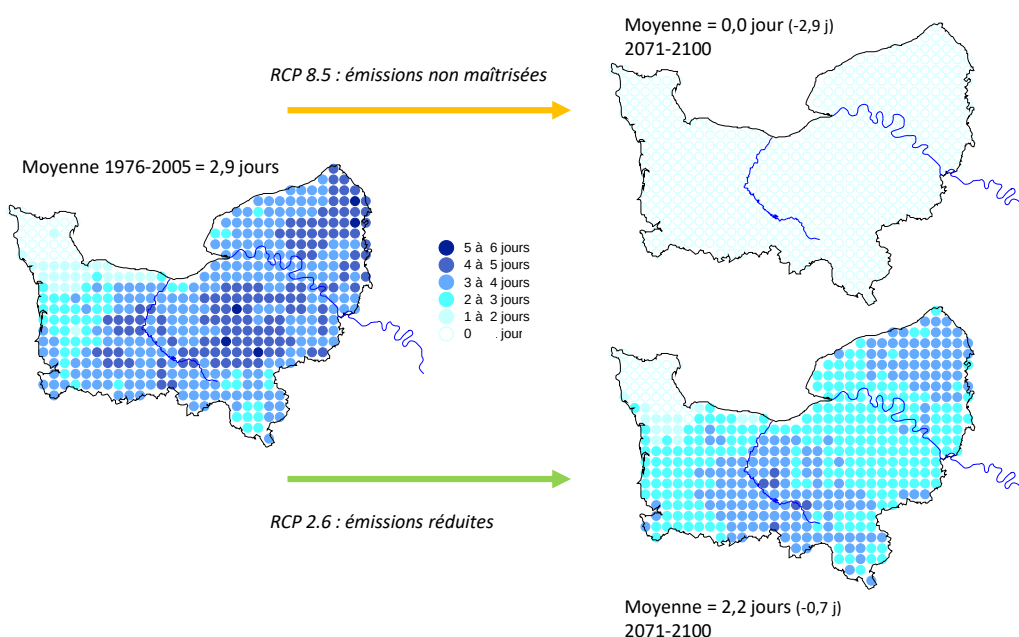


Figure 48 : Évolution attendue du nombre de jours de vague de froid en Normandie (nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale de 5°C à la température minimale quotidienne de référence (1976-2005), dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

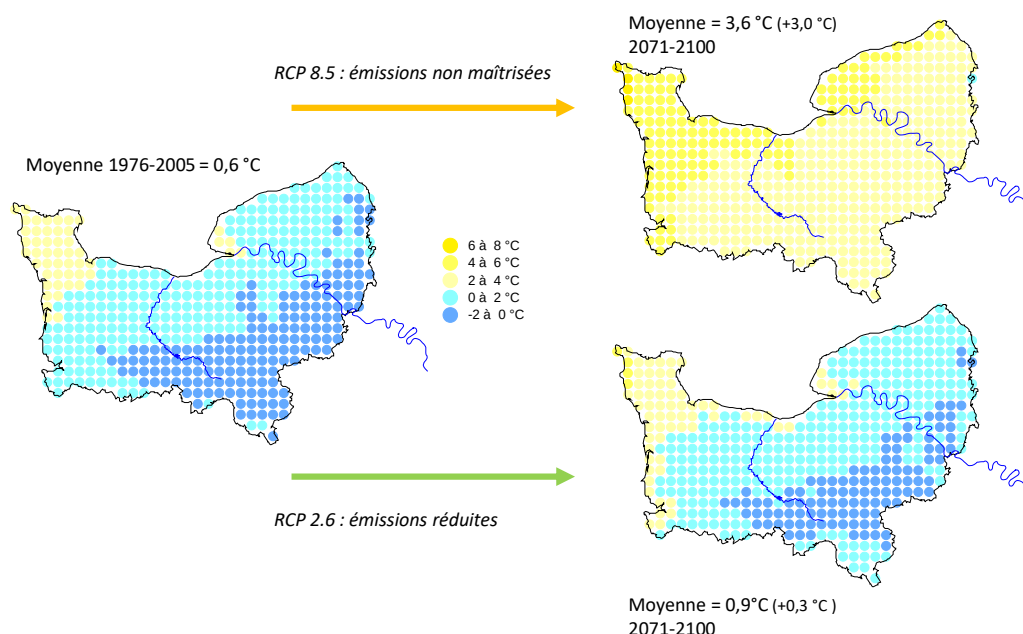


Fig. 49 : Évolution attendue des extrêmes froids en Normandie (10% des jours les plus froids). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

A l'horizon 2100, sans politique climatique (RCP 8.5) le constat est sans appel concernant les *très grands froids* (minimum inférieur à -10°C) : plus aucune partie de la région ne connaîtrait ce phénomène. Idem pour les journées sans dégel et les vagues de froid qui disparaîtraient elles aussi. Les *grands froids* (minimum inférieur à -5°C) deviendraient très rares et n'apparaîtraient plus tous les ans, même dans les secteurs continentaux traditionnellement les plus rigoureux en hiver. Le scénario RCP 2.6 marque une légère réduction des manifestations du froid, dans le prolongement d'une période hivernale un peu moins affectée par le réchauffement climatique que les autres saisons.

Le tableau et la figure suivante traduisent localement ces changements durant la saison froide pour nos sept villes repères (Tabl. 6 et Fig. 50).

		Nombre jours froid (mini $\leq 0^{\circ}\text{C}$)			Nombre jour sans dégel (maxi $\leq 0^{\circ}\text{C}$)			Nombre jours vagues froid		
		Réf. 1976-2005	2071-2100		Réf. 1976-2005	2071-2100		Réf. 1976-2005	2071-2100	
			RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5
littoral	Cherbourg	8	5	1	0	0	0	0	0	0
	le Havre	11	10	2	0	0	0	3	2	0
	Dieppe	20	19	5	2	2	0	3	3	0
inter-médiaire	Caen	22	21	5	1	1	0	3	3	0
	Rouen	28	25	7	2	2	0	3	2	0
continental	Evreux	40	36	11	5	5	0	3	2	0
	Alençon	37	33	10	4	3	0	3	3	0

Tableau 6 : Évolution attendue du froid (mini $\leq 0^{\circ}\text{C}$), de l'absence de dégel (maxi $\leq 0^{\circ}\text{C}$) et des vagues de froid en Normandie pour 7 points de grille (nombre de jours). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

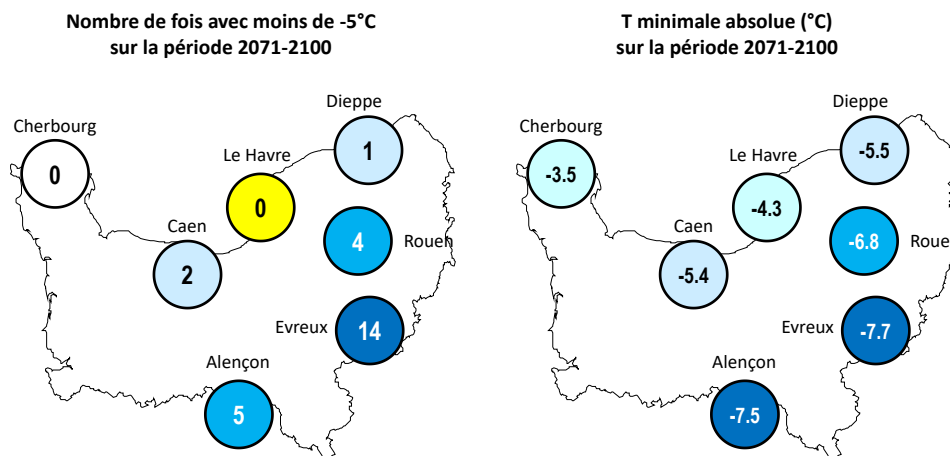


Figure 50 : Occurrences totales et intensité des températures extrêmes froides sur la Normandie durant la Normale 2071-2100. Scénario RCP 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Dans le contexte plus chaud du 21^e siècle, la neige se ferait logiquement plus rare en Normandie, en fréquence d’apparition comme en quantité (Tabl. 7). A l’horizon 2100, avec le scénario RCP 8.5 les chutes de neige ne seraient plus observées que 5 à 9 fois chaque année pour nos 7 villes de référence (contre 8 à 16 jours sur la période de référence). La hauteur cumulée de neige tombée durant la saison froide serait de moins de 5 cm pour tous les points de grille sélectionnés, contre 5 à 18 cm sur la période de référence, soit une réduction de 60 à 80% en fonction des secteurs. Notons qu’il ne s’agit pas ici de l’épaisseur maximale du tapis de neige observée car ces chutes ne tiennent pas souvent au sol et, si c’est le cas, la fonte intervient généralement entre deux épisodes. Avec une maîtrise des GES (RCP 2.6), l’atténuation moins prononcée du froid durant la période froide permettrait aux précipitations solides de se produire avec une fréquence et des cumuls assez proches de la période de référence.

		Nombre jours avec des chutes de neige (>0 mm)			cumul des hauteurs de neige (en mm eau)		
		Réf. 1976-2005	2071-2100		Réf. 1976-2005	2071-2100	
			RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5
littoral	Cherbourg	7.9	7.0	5.6	7.4	4.7	1.9
	Le Havre	9.8	9.4	8.9	5.6	5.3	1.4
	Dieppe	10.9	8.9	5.0	10.1	9.6	1.7
inter-médiaire	Caen	12.8	12.2	7.1	8.4	8.7	2.8
	Rouen	16.4	14.0	8.0	11.6	12.9	4.0
continental	Evreux	15.5	12.8	5.1	17.6	18.7	5.0
	Alençon	13.7	11.4	5.1	16.3	14.7	4.6

Tableau 7 : Évolution attendue du nombre de jours avec chute de neige et hauteur cumulée en Normandie pour la période 2071-2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 pour les 7 points de grille (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

3.3. Sécheresses atmosphériques

3.3.1 Evolution des sécheresses atmosphériques

Les périodes sèches correspondent au nombre maximum de jours consécutifs avec un cumul de précipitations inférieur à 1 mm. Ces épisodes montrent une augmentation de leur durée pour les deux scénarios (Fig. 51). La contrainte serait un peu plus prononcée en cas d’absence de politique climatique internationale, avec un allongement moyen de +3,3 jours à l’horizon 2100 (de 19,5 à 22,8 jours) contre +2,9 jours pour le scénario « optimiste » (de 19,5 à 22,4 jours).

Les collines du sud de la région subiraient en été des séquences sèches d'une durée cumulée voisine d'un mois, ce qui pourrait être préjudiciable pour les herbages dont dépend une partie de l'activité économique locale. La situation serait assez semblable pour les grandes plaines céréalières (Caen, Falaise, Argentan, Alençon pour la partie axiale de la Région, et tout autour d'Evreux dans sa partie orientale), mais ici les conséquences pour les cultures pourraient être en partie contrer par l'avancement de la saison végétale (pour le blé, par exemple, la sécheresse intervenant après la fin du cycle de la plante, ou en fin de cycle quand les besoins en eau sont moins importants) (Beauvais et al., 2019).

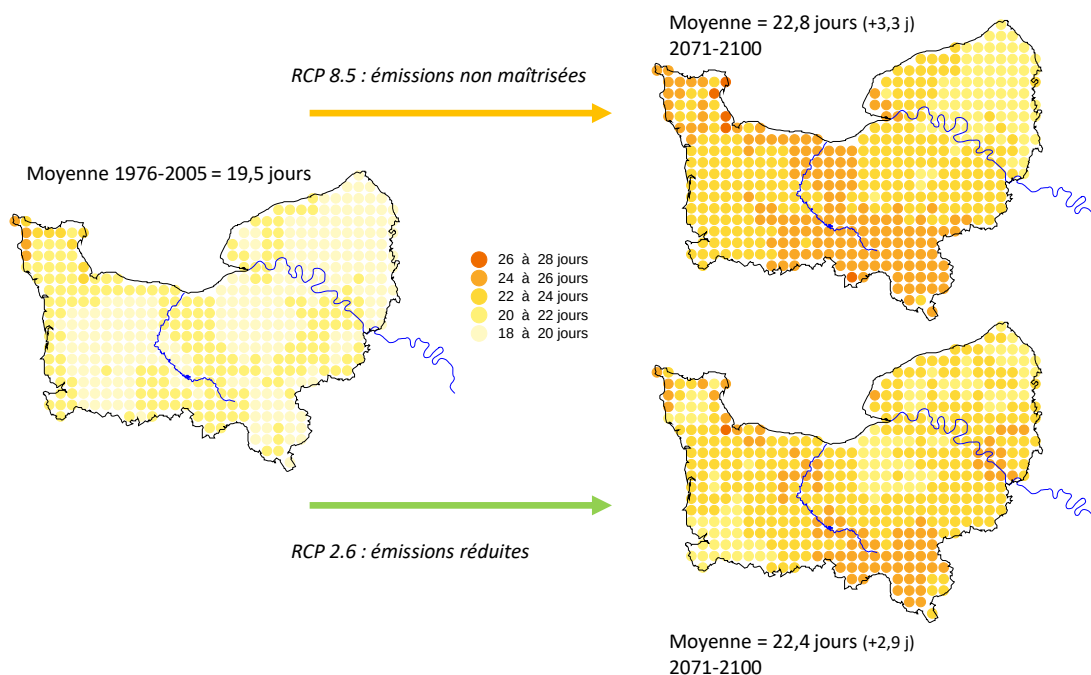


Figure 51 : Évolution attendue de la durée maximale des périodes de sécheresse en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

3.3.2 Evolution de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle (ETP) offre une approche énergétique plus révélatrice des contraintes liées au changement climatique, en corrélation directe avec le réchauffement⁶. Les 3,3°C supplémentaires du scénario RCP 8.5 s'accompagnerait d'une augmentation de 21% de la demande atmosphérique en eau pour satisfaire les besoins des différents écosystèmes, aggravant de fait la sécheresse estivale liée à la diminution des précipitations à cette saison (Fig. 52). Dans le cas d'un scénario RCP 2.6, avec environ 1°C de plus, la hausse de l'ETP serait limitée à environ 10%.

⁶ L'évapotranspiration potentielle (ETP) dépend essentiellement de 4 paramètres atmosphériques : la température de l'air, la sécheresse de l'air, le rayonnement solaire et le vent. Un temps beau, chaud, sec et venteux est particulièrement favorable à une forte demande évapotranspiratoire (comme on le constate empiriquement en faisant sécher du linge en plein air). Dans ce cas, la demande en eau peut ne pas être satisfaite si l'offre du milieu n'est pas suffisante. Pour la végétation, cela entraîne une phase de stress hydrique préjudiciable au bon développement de la plante, voire à son dépérissement si la période se prolonge au-delà de ses réserves internes. La nature des sols intervient alors pour moduler le diagnostic climatique : pour des sols épais, de texture argilo-limoneuse, riches en matières organiques et dépourvus de cailloux, la « réserve utile maximale » (RUM) peut compenser un déficit d'eau pluviale équivalent à plus de 200 mm, contrairement à des sols maigres, de texture sableuse, pauvres en matières organiques et caillouteux dont la RUM est généralement inférieure à 50 mm. Cette opposition pédologique entre les « bonnes terres » et les « petits sols » est un élément clé de l'agriculture. Sous un climat globalement identique, cette opposition est visible par exemple entre le sud-est de la Plaine de Caen qui souffre rapidement de la sécheresse dès le printemps en cas d'absence de pluie, et le nord-ouest de celle-ci où l'accumulation d'eau dans le sol à la sortie de l'hiver permet de compenser le manque d'apport atmosphérique, tout en profitant des conditions ensoleillées favorables à la photosynthèse. Comme le dit un exploitant agricole local : « année de sécheresse, année de richesse », dicton d'autant plus vrai que la diminution de production sur les « petites terres » est un facteur de montée des prix.

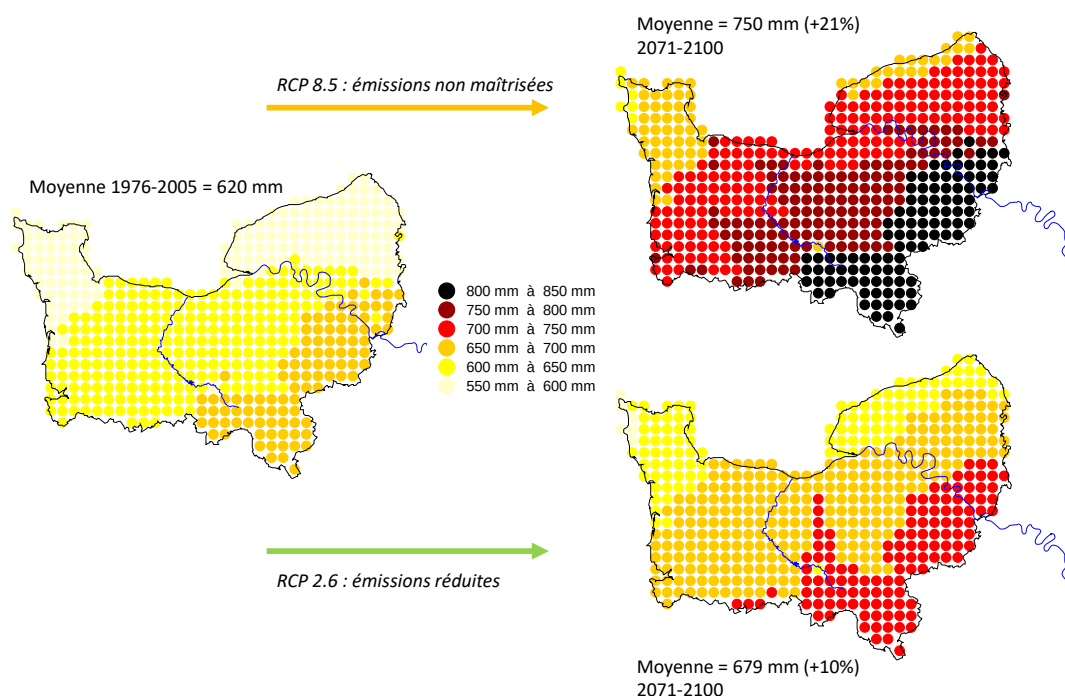


Figure 52 : Évolution attendue de l'évapotranspiration potentielle en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

L'organisation spatiale de l'évolution de l'ETP par rapport à la période de référence (Fig. 53) souligne l'importance majeure de la continentalité, dans la mesure où celle-ci conditionne l'augmentation de la température. A l'horizon 2100, pour le scénario RCP 8.5, les Plaines agricoles au sud d'Evreux connaîtraient ainsi une hausse de plus de 25% de l'ETP alors que le nord-ouest du Cotentin limiterait à environ 10% le phénomène. Ce constat pourrait garantir une meilleure résilience des environnements côtiers face au changement climatique.

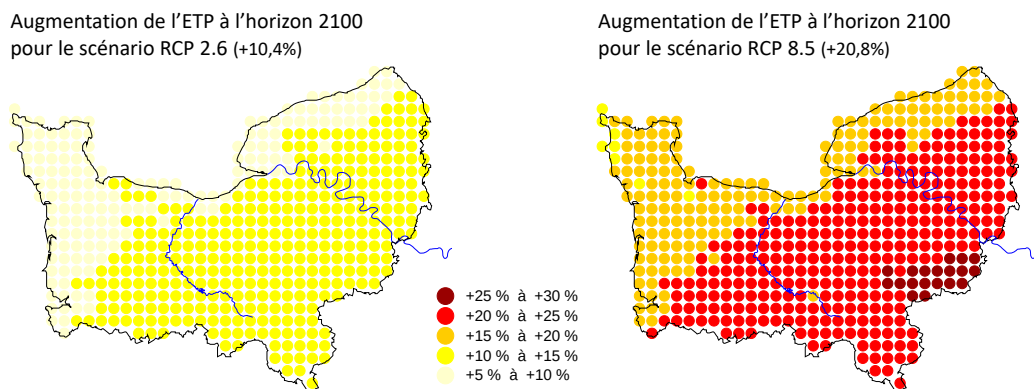


Figure 53 : Évolution attendue des écarts à la référence 1976-2005 de l'évapotranspiration potentielle en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Les points de grille correspondant à nos sept stations de repères normandes illustrent ces remarques et les complètent en y greffant l'évolution de la fréquence des épisodes fortement évaporatoires (Tabl. 8). En considérant les journées très desséchantes (plus de 5 mm), avec le scénario RCP 8.5 Evreux verrait son total annuel passer de 8 à 30 jours tandis

que Cherbourg serait concerné en moyenne par moins de 3 jours par an, ponctionnant donc de façon très différente la réserve en eau disponible pour l'environnement comme pour les besoins domestiques et industriels.

		ETP cumulée (mm)			Nombre jours évaporant (≥ 3 mm/j)			Nombre jours très évaporant (≥ 5 mm/j)		
		Réf. 1976-2005	2071-2100		Réf. 1976-2005	2071-2100		Réf. 1976-2005	2071-2100	
			RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5		RCP 2.6	RCP 8.5
<i>littoral</i>	Cherbourg	546.8	606.6	659.3	24.9	39.7	57.8	0.3	1.3	2.8
	Le Havre	595.0	647.6	702.1	38.3	55.2	68.1	2.5	7.2	9.6
	Dieppe	575.3	622.9	676.3	31.4	45.0	57.8	1.6	5.9	8.5
<i>inter-médiaire</i>	Caen	638.3	695.7	769.2	64.2	84.2	105.3	4.1	9.2	13.6
	Rouen	632.9	696.1	770.1	66.1	85.0	106.7	4.5	12.4	18.6
<i>continental</i>	Evreux	658.5	732.5	822.6	78.1	97.5	119.2	7.8	18.9	30.0
	Alençon	668.5	740.0	821.5	81.5	100.2	121.2	7.7	18.3	28.7

Tableau 8 : Évolution attendue de l'évapotranspiration potentielle (en mm) et du nombre de jours évaporants et très évaporants en Normandie pour 7 points de grille. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

3.4. Indicateurs bioclimatiques

La partie ci-dessous va s'attacher à présenter quelques éléments bioclimatiques, c'est-à-dire proposer une lecture systémique de la ressource en eau et en énergie que le climat offre aux êtres vivants. A la fin de l'hiver, la reprise d'activité végétale est conditionnée principalement par le retour de températures plus clémentes, sous réserve qu'il y ait suffisamment d'eau disponible dans les sols. Avec le réchauffement climatique, la saison végétative devrait donc démarrer plus tôt dans l'année et changer les calendriers culturels pour les agriculteurs en fonction des diverses productions, voire changer de types de productions si la demande en chaleur et en eau n'est plus compatible avec le développement de la plante. Cela concerne également les éleveurs dont les animaux sont susceptibles de vivre une partie de l'année dans les champs.

Les sous parties suivantes s'intéresseront d'abord à l'entrée thermique prise isolément des autres paramètres conditionnant le développement des plantes (reprise de végétation, sortie d'hiver, quantité de chaleur disponible) puis combineront cette ressource en énergie avec les apports d'eau pluviale (indice bioclimatique).

3.4.1 Reprise de végétation pour la prairie

En considérant une somme de température de 200°C en base 0°C depuis le 1^{er} janvier, la prairie serait susceptible de produire une activité photosynthétique 2 à 3 semaines plus tôt dans l'année en cas de scénario RCP 8.5, passant de la mi-février à la fin du mois de janvier (Fig. 54). L'anticipation est naturellement plus limitée avec le RCP 2.6 (4 jours plus précoce en moyenne) car les températures hivernales sont relativement peu affectées avec ce scénario.

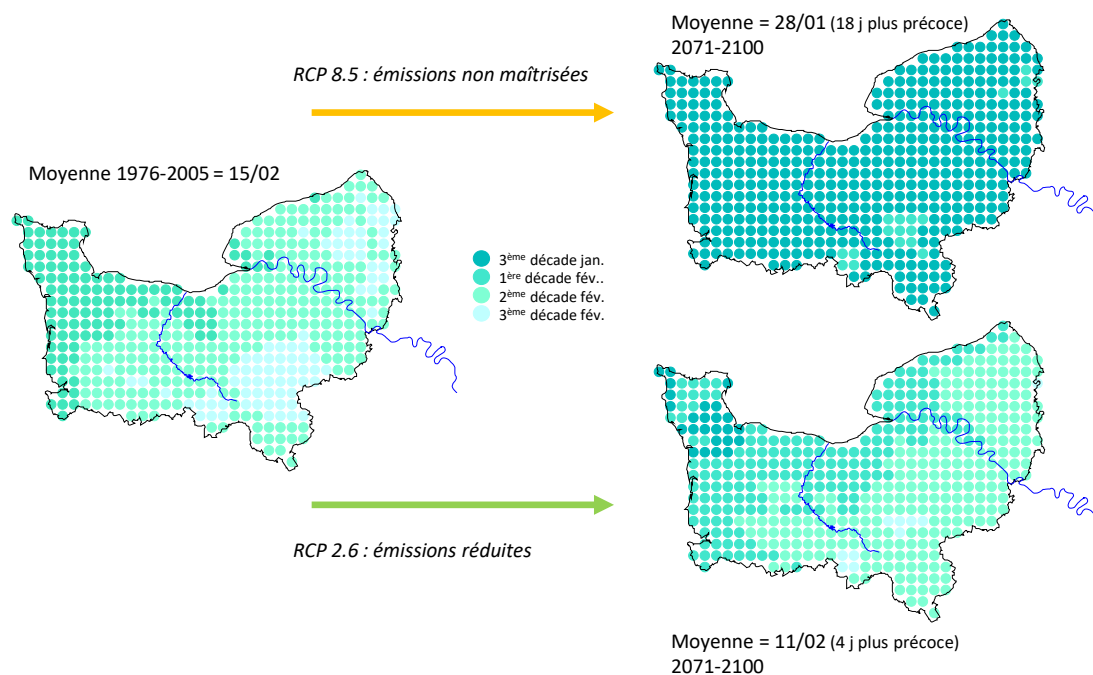


Figure 54 : Évolution attendue de la date moyenne de reprise de végétation pour la prairie en Normandie (1^{er} jour où le seuil de 200°C est atteint : somme de température base 0°C depuis le 1^{er} janvier). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

3.4.2 « Sortie d'hiver » ou date de la dernière gelée

Si l'on considère la sensibilité au gel de certaines plantes, le réchauffement climatique serait susceptible d'avancer considérablement la sortie d'hiver avec le scénario RCP 8.5 (plus d'un mois de précocité) (Fig. 55). La dernière gelée pourrait se produire en moyenne sur la région vers la mi-février alors que sur la période de référence il fallait généralement attendre la fin mars. Bien entendu, on retrouve des différences importantes entre les littoraux déjà peu touchés par cet aléa et l'intérieur des terres où les frimas peuvent se produire tard dans la saison, à la faveur des masses d'air froid et calme au printemps qui permettent un fort refroidissement nocturne, particulièrement dans les vallées. À noter que derrière cette avancée spectaculaire des valeurs moyennes sur 30 ans, se cacheraient possiblement des années avec des gelées très tardives, à l'image des gelées printanières qui ont impacté beaucoup de régions françaises jusque fin avril, voire début mai, ces dernières années.

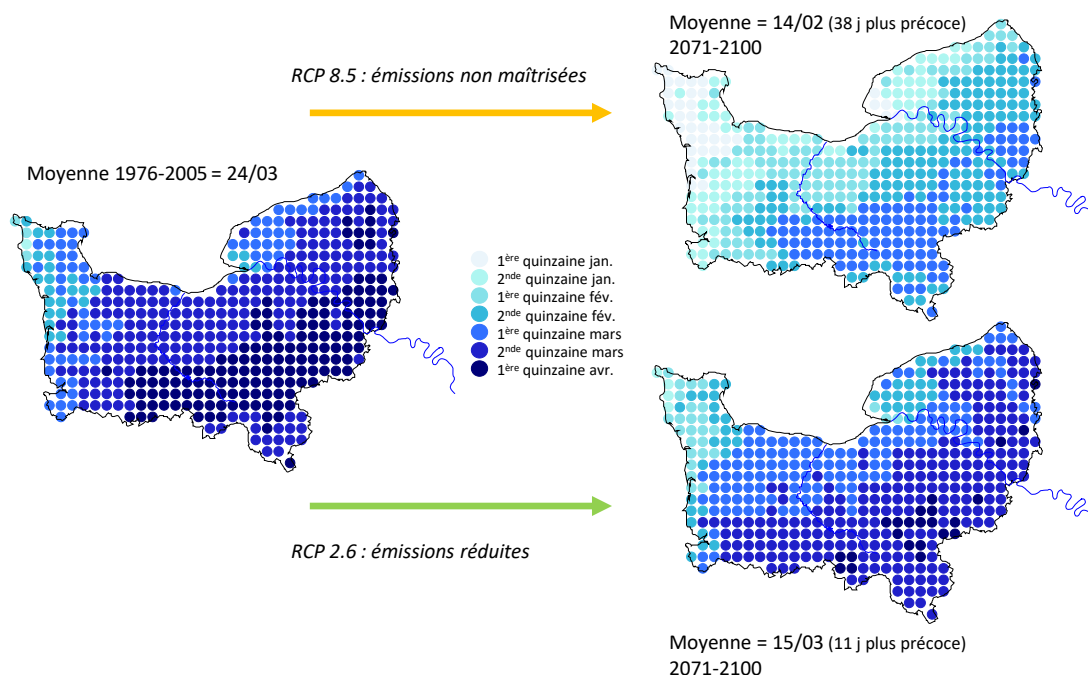


Figure 55 : Évolution attendue de la date moyenne de dernière gelée en Normandie (« sortie d’hiver »). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

3.4.3 Évolution de l’indice bioclimatique (rapport des précipitations moyennes sur la température moyenne durant le printemps et l’été)

Les conséquences d’un assèchement des milieux, induit par l’augmentation des températures et la réduction des précipitations en période estivale, peuvent être évaluées plus précisément par le calcul d’un indice bioclimatique durant la période végétative combinant température et précipitations (Fig. 56). Sur la période de référence 1976-2005, l’indice moyen est de 5,4, valeur caractéristique d’une ambiance humide. Le contraste régional est important entre les espaces humides, voire hyper-humides de l’ouest du bocage normand et du Pays de Caux, et la légère déficience observée dans les plaines de Caen et d’Evreux notamment.

Avec le scénario RCP 2.6, la péjoration des conditions serait assez peu marquée : l’indice fléchirait de quelques dixièmes (-0,6) et passerait dans la catégorie subhumide. Pour le scénario RCP 8.5, des modifications plus importantes se produiraient avec l’apparition d’une large bande déficiente dans la partie axiale de la région pouvant impacter le développement des grandes cultures céréalières, alors que dans le même temps sur les départements de la Manche et de la Seine-Maritime les conditions humides deviendraient subhumides. Ces modifications ne seraient bien sûr pas sans conséquences sur les paysages végétaux naturels et les cultures de la région. La question se pose notamment pour le maintien des hêtres, arbres profitant jusqu’à maintenant des conditions fraîches et humides des collines bocagères. Qu’en serait-il à l’horizon 2100 si le scénario RCP 8.5 venait à se réaliser ? De même, certaines productions en limite d’aire de culture seraient-elles en mesure de résister sans irrigation face à un assèchement notable du milieu à des périodes décisives dans leur croissance (exemple du maïs qui bénéficierait de plus de chaleur durant le cycle mais de moins de précipitations en été à un moment où la plante a des besoins en eau très élevés) ?

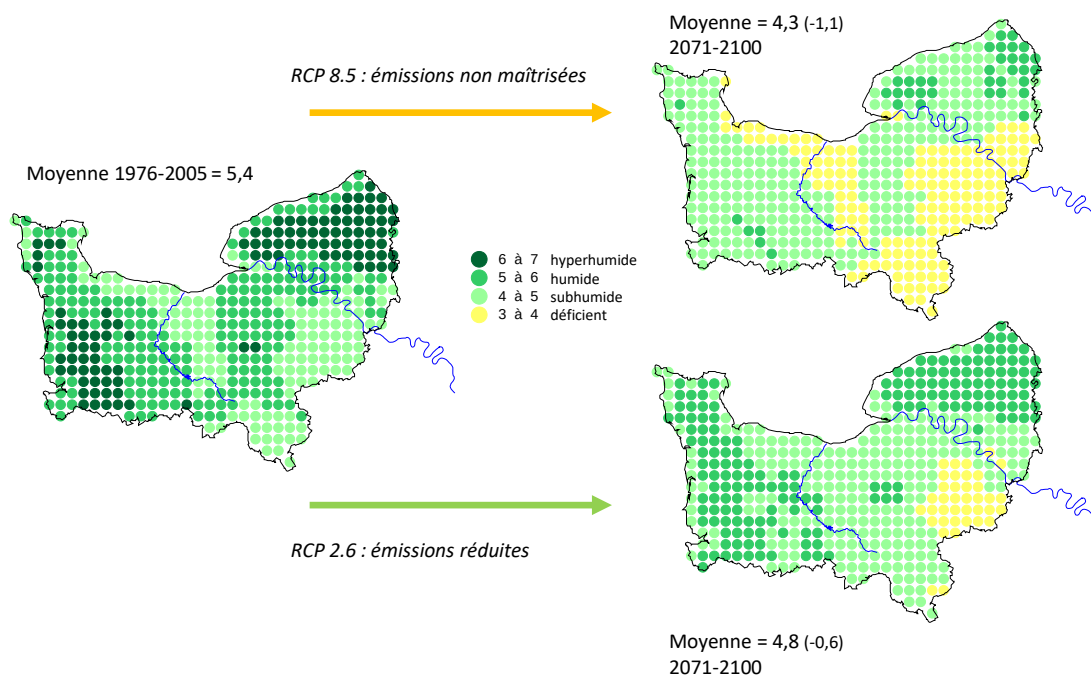
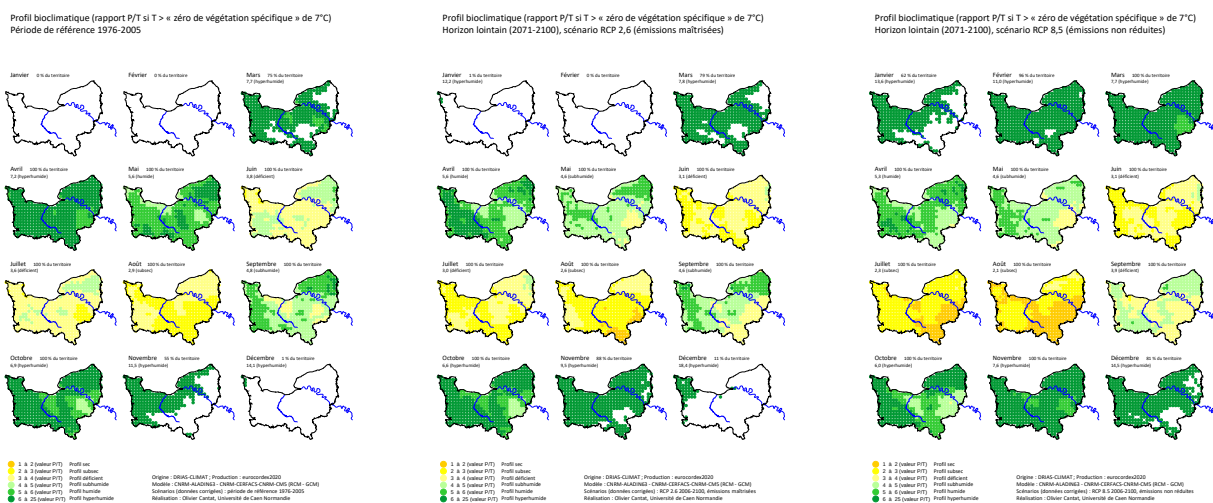


Figure 56 : Évolution attendue de l'indice bioclimatique en Normandie (calcul du rapport des précipitations sur les températures moyennes sur la période végétative d'avril à octobre). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

La décomposition mensuelle de l'indice de végétation permet de voir la durée effective de la saison végétative pour des espèces dont le « zéro de végétation » est ici de 7°C (Fig. 57). Sur ces vignettes (reproduites en grande taille dans l'annexe 6 a,b,c), on voit à l'horizon 2100 un allongement conséquent de la période végétative avec le scénario RCP 8.5 et donc en corollaire une réduction de la période de repos dont les plantes ont besoin pour accomplir correctement leurs cycles de développement. Ainsi nous passerions d'au minimum 3 mois de repos végétatif sur la période de référence (le blanc sur les cartes de décembre à février, débordant même en novembre et en mars dans les secteurs les plus continentaux), à aucun mois sur l'essentiel du territoire à l'horizon 2100. Dans l'optique de ce scénario pessimiste, la fraction de territoire en repos se limiterait à 19% en décembre, 38% en janvier et 4% en février, en relation avec les espaces les plus froids de Normandie (collines du Perche et du Pays de Bray).



1 à 2 (valeur P/T)	Profil sec
2 à 3 (valeur P/T)	Profil subsec
3 à 4 (valeur P/T)	Profil déficient
4 à 5 (valeur P/T)	Profil subhumide
5 à 6 (valeur P/T)	Profil humide
6 à 25 (valeur P/T)	Profil hyperhumide

Figure 57 : Évolution attendue de l'indice bioclimatique moyen mensuel en Normandie pour un zéro de végétation de 7°C. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 6 en pleine page.

3.5. Précipitations intenses...

Le nombre de jours de très fortes précipitations (cumul dépassant 20 mm par jour, soit 20 litres/m²) représente un aléa climatique rare en Normandie, avec en moyenne 3,7 jours par an (Fig. 58). Une nette opposition intrarégionale apparaît, avec entre 2 à 4 jours par an seulement dans la partie axiale de la région et sur le secteur d'Evreux (qui bénéficie de l'effet d'abri du Bocage Normand d'une part et des collines des Pays d'Auge et d'Ouche d'autre part), et jusqu'à plus de 8 jours sur les hauteurs du sud-ouest de la région (qui subissent l'ascendance forcée d'un air chargé d'humidité provenant de la mer).

L'évolution de ce paramètre au cours du 21^{ème} siècle traduit une forte augmentation de sa fréquence pour le scénario RCP 8.5, avec une moyenne régionale passant de 3,7 à 6,3 jours (+2,9 jours), tandis que pour le scénario RCP 2.6 la hausse serait limitée (+0,9 jour). Dans les deux cas, la géographie des différences régionales serait conservée.

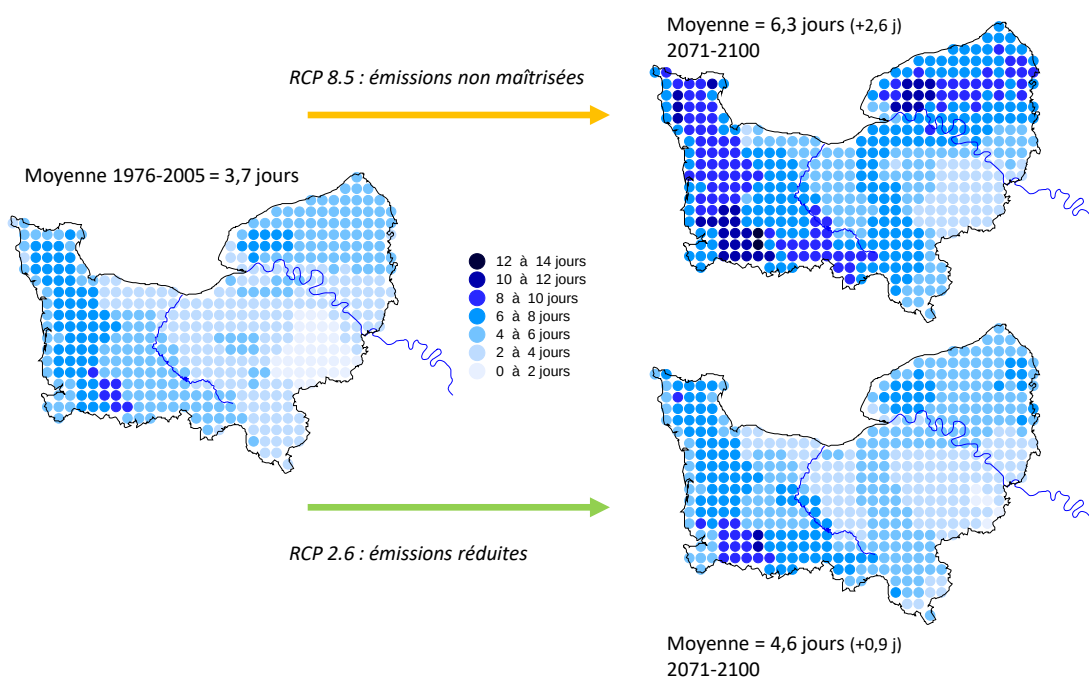


Figure 58 : Évolution attendue du nombre de jours de fortes précipitations (seuil de 20 mm/jour) en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

L'analyse des précipitations extrêmes (Fig. 59) confirme l'augmentation d'autant plus marquée des risques de ruissellement, d'érosion des sols et d'inondations en cas d'absence de politique climatique (+2,4 jours par an avec le scénario RCP 8.5), le sud et le nord-est de la région paraissant plus exposés. Elle souligne également que le phénomène serait légèrement plus présent qu'actuellement même en appliquant les Accords de Paris (+0,8 jour par an).

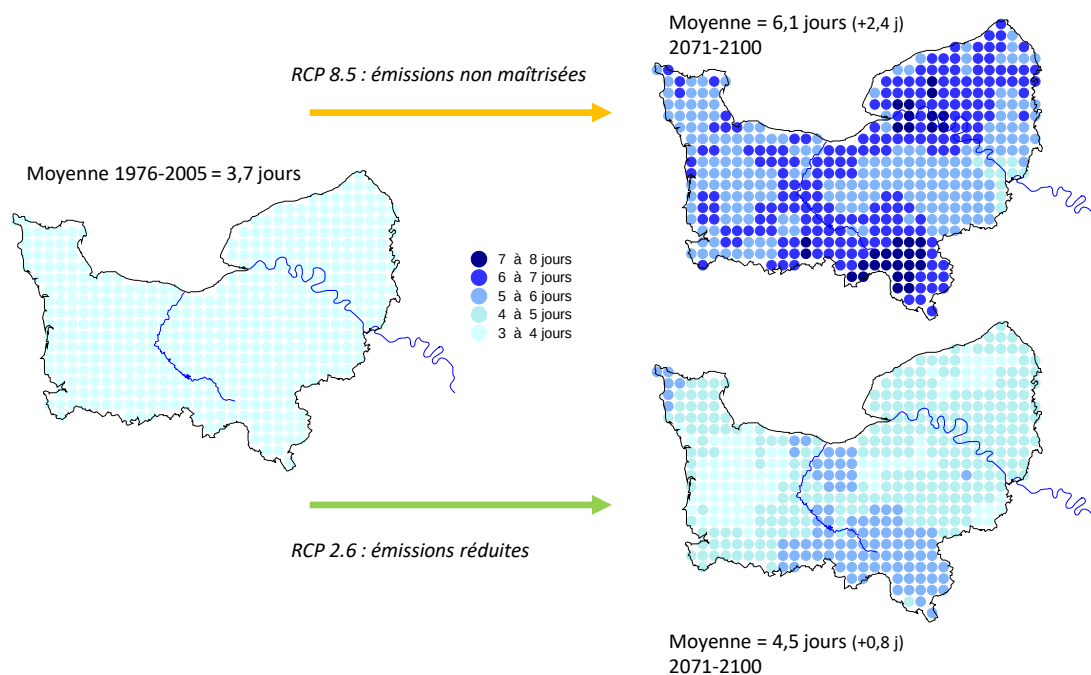


Figure 59 : Évolution attendue du nombre de jours de précipitations extrêmes en Normandie (nombre de jours où les précipitations quotidiennes dépassent le 99^e centile des précipitations totales de la période considérée). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Ces éléments sont corroborés par l’augmentation de près de 4% de la fraction des précipitations quotidiennes intenses pour le scénario RCP 8.5 et de plus de 2% pour le scénario optimiste RCP 2.6 (Fig. 60). A l’échelle de la région, la partie sud étant toujours plus affectée.

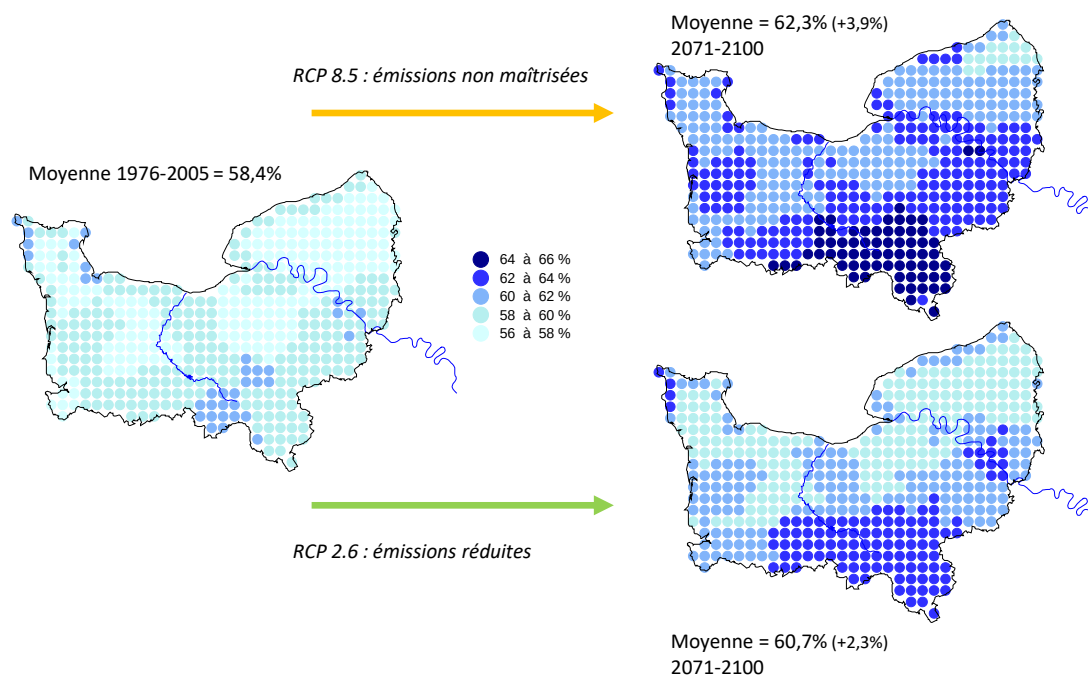


Figure 60 : Évolution attendue de la fraction des précipitations quotidiennes intenses en Normandie (90^e centile). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Du point de vue de l'**évolution saisonnière**, selon le scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (Fig. 61), toutes les périodes de l'année seraient concernées par une augmentation plus ou moins sensible des précipitations intenses. Ces épisodes intenses seraient plus marqués en hiver, notamment en Seine-Maritime, et en automne sur le sud de l'Orne. Dans les zones escarpées de ces espaces vallonnés, à une époque de l'année où les phénomènes évapotranspiratoires sont très limités et les sols agricoles dépourvus de végétation, cela pourrait accentuer les phénomènes de ruissellement et d'inondations. En été et surtout au printemps l'évolution serait moins marquée

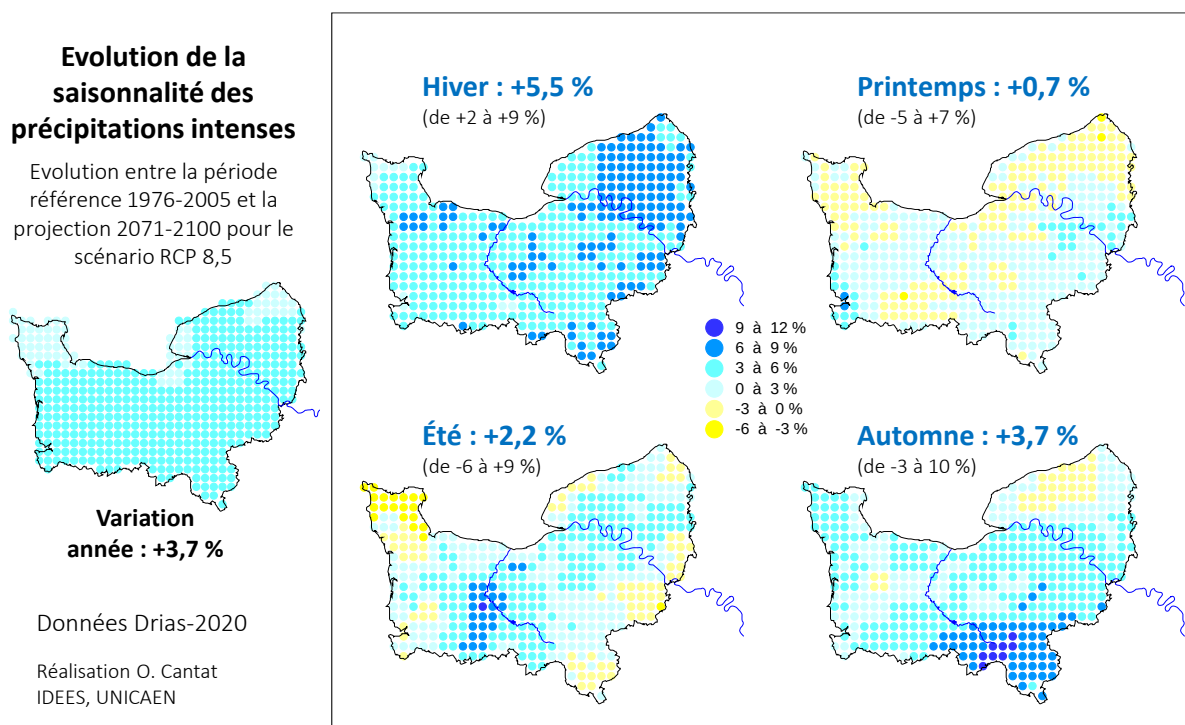


Figure 61 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne (en %) des précipitations intenses (au-dessus du 90ème centile annuel) en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l'horizon lointain 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

3.6. Tempêtes

Les modèles actuels de projections climatiques n'apportent pas de conclusions nettes sur l'évolution du nombre et de l'intensité des tempêtes hivernales sur le territoire français dans le futur (Ouzeau et al., 2014). Le continuum temporel pour le nombre de jours de tempête (rafales supérieures à environ 100 km/h) pour un point de grille très exposé de notre région (Cap de La Hève) ne traduit pas de tendance affirmée pour les deux scénarios proposés avec les données les plus récentes du Drias-2020 (Fig. 62).

En considérant l'intensité des vents forts (valeur du 98^e centile des vitesses de vent), la cartographie souligne également une absence de modification significative à l'horizon 2100 pour les deux scénarios (Fig. 63). On constate une augmentation de seulement 0,1 et 0,2 m/s (moins de 1 km/h) de la moyenne normande. Les contrastes sont toujours aussi marqués entre les littoraux du nord-ouest du Cotentin qui subissent de plein fouet les tempêtes atlantiques (de 13 à 14 m/s, soit environ 50 km/h) et l'intérieur des terres plus correspondant approximativement au département de l'Orne (de 7 à 8 m/s, soit environ 25 à 30 km/h). Bien entendu, ces données en points de grille ne sont pas capables de restituer les effets de la topographie locale sur le vent, avec notamment les différences entre les fonds abrités des vallées et les sommets éventés des collines.

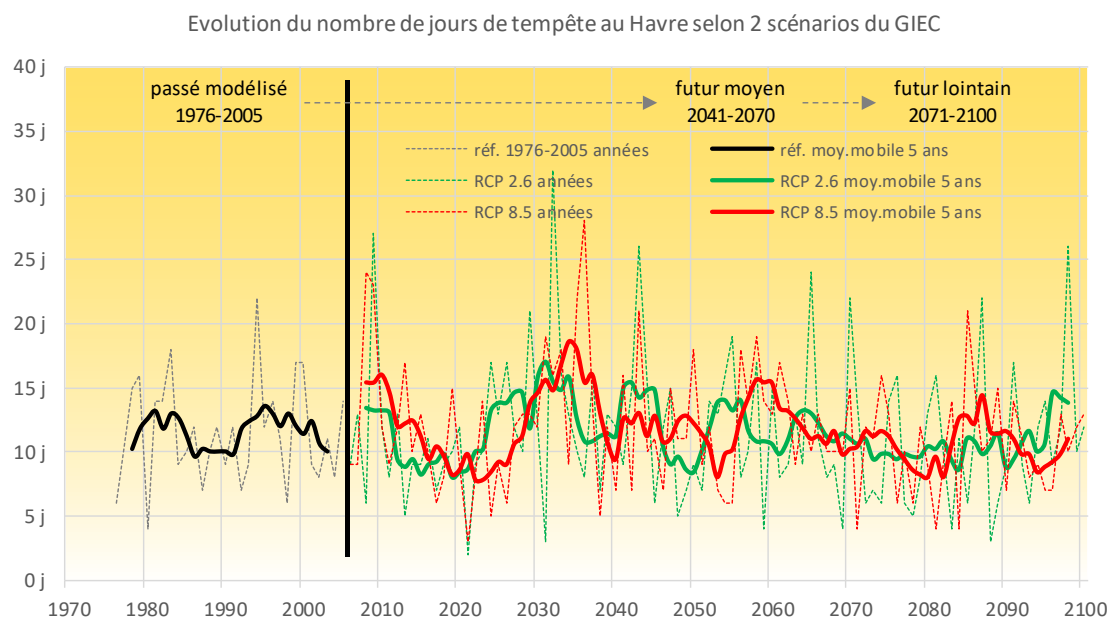


Figure 62 : Évolution attendue du nombre de jours de tempête (rafales supérieures à 100 km/h) sur le point de grille correspondant au site exposé du Havre Cap de La Hève de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

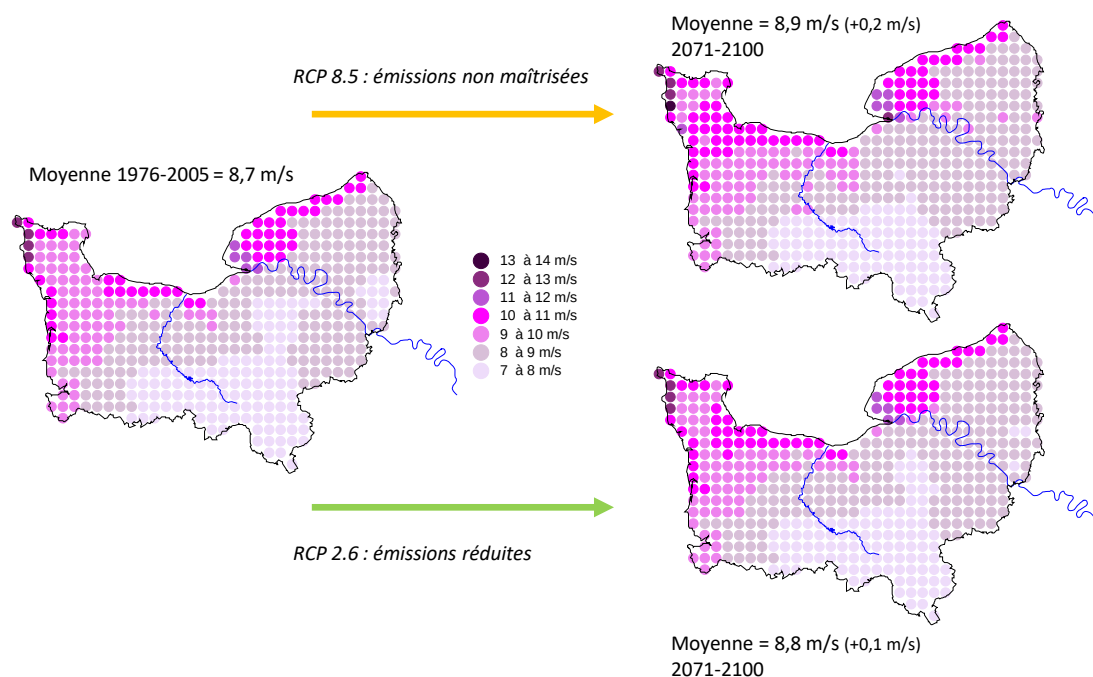


Figure 63 : Évolution attendue de l'intensité des vents forts en Normandie (valeur du 98^e centile des vitesses du vent). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Cependant, à une échelle beaucoup plus large et selon le GIEC/IPCC (2021), l'activité des cyclones tropicaux intenses aurait augmenté dans l'Atlantique Nord, et les projections à l'horizon 2100 indiqueraient que l'intensité des cyclones et tempêtes devrait continuer à augmenter dans cette région.

4. Le changement climatique et la ville

Etat des connaissances sur les îlots de chaleur (ICU) en Normandie.

La présence d'une ville entraîne la modification locale du bilan d'énergie en raison de l'extension des surfaces minérales imperméables emmagasinant facilement l'énergie solaire et du dégagement de chaleur des diverses activités (industrie, chauffage/climatisation, circulation). La principale conséquence est la création d'un îlot de chaleur. Cette surchauffe urbaine vient se superposer à la surchauffe d'échelle mondiale imposée par le changement climatique, rendant en été les conditions de vie plus difficiles dans le cœur des villes. En période de canicule, le phénomène d'ICU peut même occasionner une surmortalité chez les personnes les plus fragiles (accentuation du risque d'hyperthermie dans les espaces urbains confinés peu ventilés et temps de récupération physiologique très limité de nuit). Pour répondre aux objectifs du développement durable, il faut donc penser la ville de demain dans le cadre global du réchauffement planétaire et dans le cadre local de l'atténuation des ICU. Ceci nécessite de développer des programmes d'aménagement privilégiant des formes de bâti plus écologiques et intégrant notamment davantage d'espaces naturels (plans d'eau, parcs), formant de véritables îlots de fraîcheur urbains (IFU). Les projets reposant sur les solutions fondées sur la nature contribuent ainsi à limiter les ICU et participent aussi plus largement à rendre la vie des citoyens plus agréable (nombreux services écosystémiques).

Dans le prolongement du Grenelle 2 de l'environnement de novembre 2010, la réglementation impose aux villes la prise en compte du phénomène dans leurs plans d'aménagements, ce qui conduit à des initiatives et à des méthodes d'observation et de « lutte » contre l'ICU variables d'une collectivité à une autre (Bigot et al, 2023). La mise en œuvre de moyens d'atténuation suppose au préalable la connaissance précise d'un phénomène dont l'intensité, la durée et l'extension spatiale changent d'une ville à l'autre, en relation avec la fréquence des situations météorologiques les plus propices à sa formation (temps clair et calme) et les spécificités géographiques de chaque site.

Qu'en est-il en Normandie ?

L'analyse la plus avancée s'appuie actuellement sur le développement depuis deux ans d'un réseau de mesures dans l'agglomération caennaise par le laboratoire universitaire IDEES Caen (Cantat, David et Beauvais, 2024). De nouvelles expérimentations sont en cours sur des agglomérations de tailles différentes (Bayeux, 12.700 habitants et Colomby-Anguerny, 1.300 habitants) et un projet sur Rouen pourrait prochainement voir le jour (Fig. 64).



Place de la Résistance à Caen
(réf. petit espace vert herbacé urbain)



Centre-ville de Bayeux
(réf. urbaine)



Cour de la mairie d'Anguerny
(réf. urbaine, espace confiné)

Figure 64 : Exemples de stations météorologiques expérimentales dans différents contextes urbains normands. Réseau IDEES Caen, Caen la mer, Ville de Bayeux et Ville de Colomby-Anguerny (photographies O. Cantat).

Sur Caen, les premiers résultats montrent la présence d'un ICU dont l'intensité est très variable en fonction des conditions météorologiques qui président à son établissement (Fig. 65). L'intensité du phénomène peut atteindre 3°C

durant la nuit par temps clair et calme, et parfois même dépasser 5 à 6°C. Ce fut le cas notamment lors de la canicule de juillet 2022 où, après les 40°C de la journée, une chaleur étouffante persista durant la nuit dans le cœur de la ville (27°C), alors qu'à quelques centaines de mètres la température descendait sous les 20°C sur la Prairie et au Jardin des Plantes. Inversement, en début de matinée la ville peut enregistrer des valeurs légèrement plus basses que la campagne car les ombres projetées par les façades et l'inertie des matériaux urbains ralentissent le réchauffement, tandis que les espaces ouverts bénéficient des rayons du soleil dès les premières heures du jour.

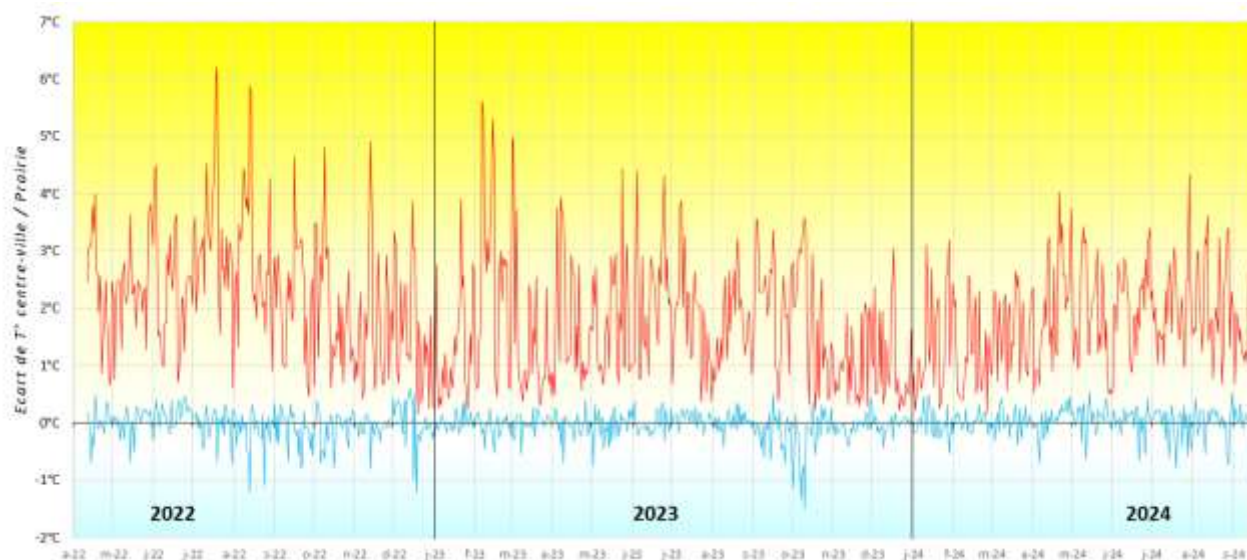


Figure 65 : Intensité journalière maximale et minimale de l'îlot de chaleur urbain à Caen entre le 22 avril 2022 et le 15 septembre 2024. Ecart de la température sous abri entre la Place Bouchard et la Prairie. Réseau d'observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

En raison de la restitution différée de l'énergie solaire emmagasinée sous forme de chaleur dans les matériaux de construction et les revêtements urbains, l'ICU caennais présente un rythme journalier très affirmé par temps clair et calme, alors que le phénomène s'efface presque totalement par temps nuageux et/ou venteux (Fig. 66).

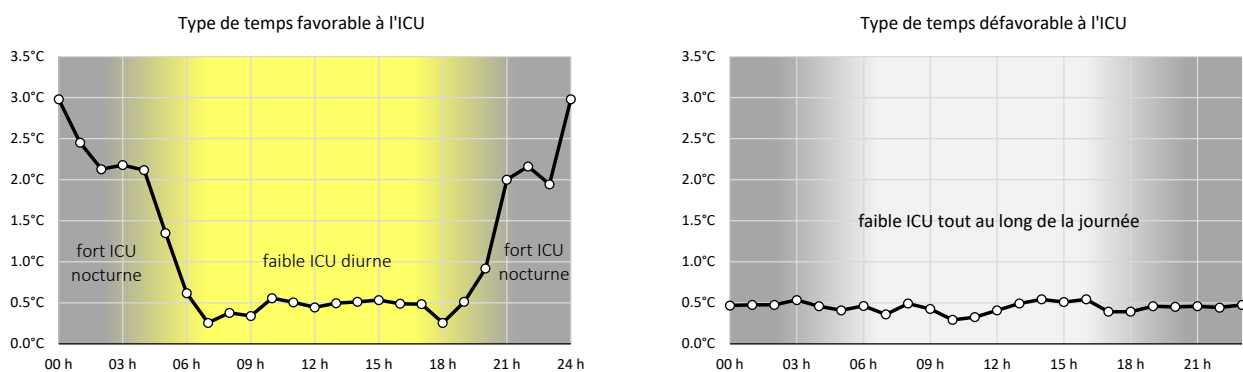


Figure 66 : Rythme et intensité de l'îlot de chaleur urbain caennais en fonction des types de temps. Comparaison de l'écart entre la ville (Place Bouchard) et la campagne (Prairie) lors d'un épisode clair et calme (du 29 au 31 mai 2022) et lors d'un épisode couvert et venteux (du 27 au 29 avril 2022). Réseau d'observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

La climatologie des latitudes moyennes de la façade atlantique européenne est régie par le balancement saisonnier de l'anticyclone des Açores vers le nord en été et de la dépression d'Islande vers le sud en hiver. De ce fait, l'occurrence moyenne des temps clairs et calmes est plus élevée en été qu'en hiver. Il est donc logique de retrouver en moyenne un ICU plus marqué à la « belle saison » que durant les mois perturbés de la « mauvaise saison ». Sur la période 2001-2023, d'après les observations de la station Météo-France de Caen-Carpique, l'occurrence des types de temps globalement favorables à la formation d'un ICU passe de 7% en hiver à 41% en été (Fig. 67).

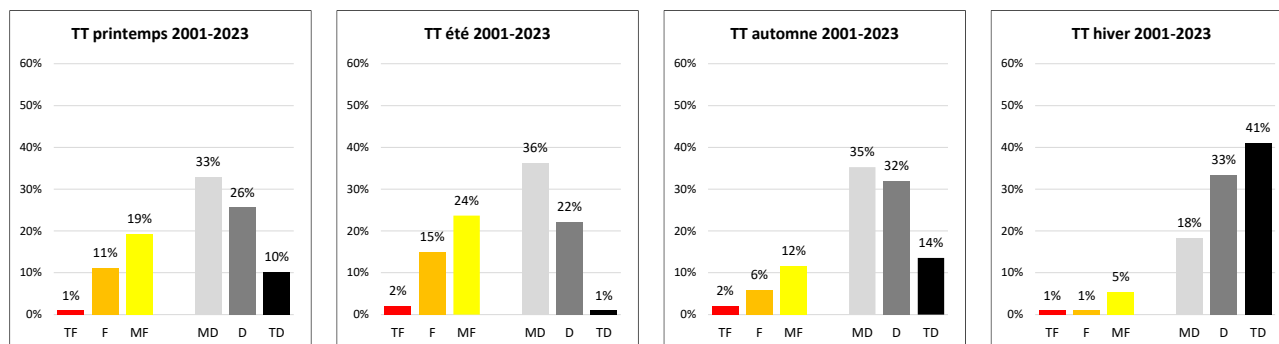


Figure 67 : Pourcentage des types de temps favorables et défavorables à la formation des ICU à Caen sur la période 2001-2023. Dénombrement des combinaisons simultanées entre l'état du ciel et la vitesse du vent (le critère « très favorable » (TF) correspond à une fraction d'insolation journalière supérieure à 66% et un vent moyen journalier inférieur à 3 m/s). Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

La forme de l'ICU caennais est sous la dépendance de la topographie du site : la ville profite du couloir formé par l'Orne et le canal qui permet l'entrée d'air plus frais en provenance de la campagne ou de la mer. Au gré de la direction des brises qui apparaissent lors des temps clair et calme favorable à l'ICU, les quartiers dans le prolongement de la Prairie récupèrent de la fraîcheur élaborée sur ce grand espace vert. A minuit le 13 avril 2024, la Place Foch était 3°C plus fraîche que le centre-ville ; de l'air plus frais avait également gagné la station du Pont W. Churchill (Fig. 68). En dehors de l'agglomération, rue du Québec on pouvait observer des températures encore plus basses en raison d'un relief en creux favorisant l'accumulation d'air froid par densité (« trou à froid »). Le Jardin des Plantes favorise la fraîcheur nocturne pour les mêmes raisons topographiques mais à un niveau moindre de par sa taille et sa position intra-urbaine.

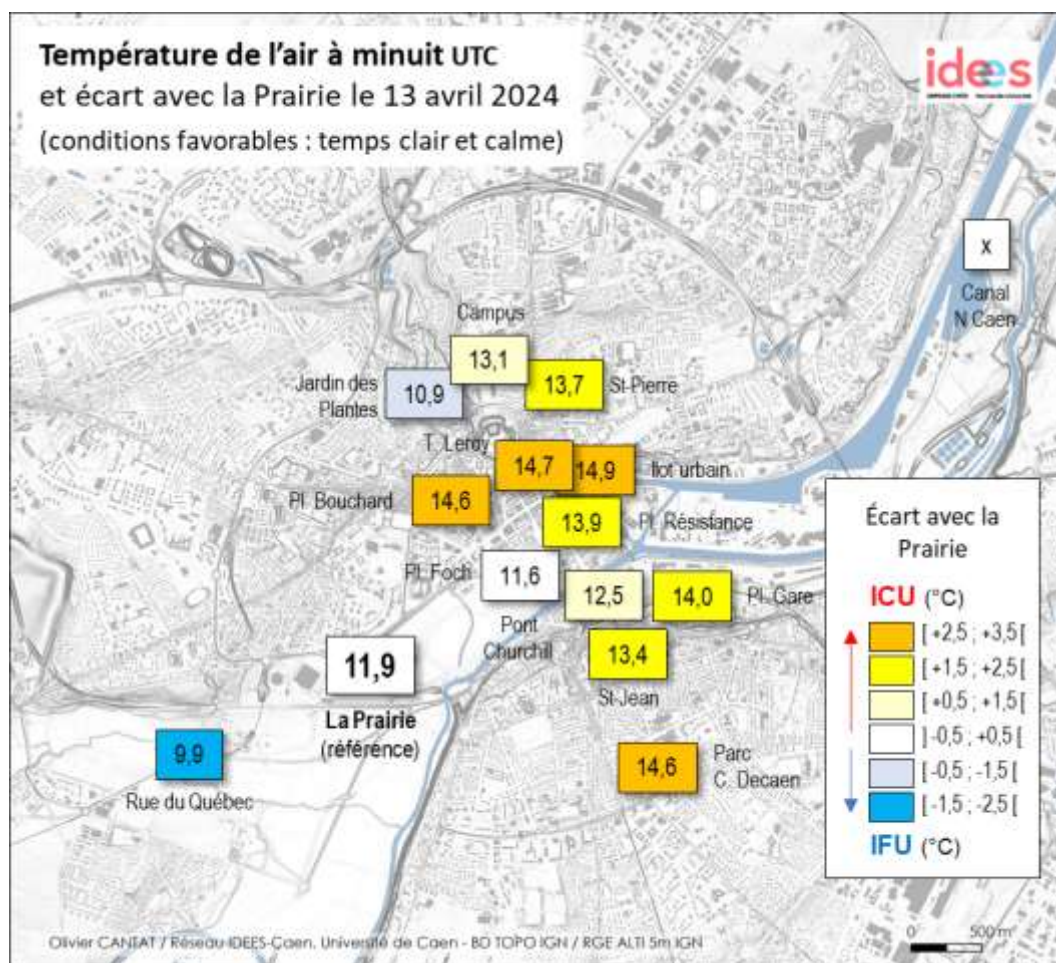


Figure 68 : Température de l'air sous abri et écart avec la valeur de référence de la Prairie dans la nuit du 13 avril 2024 sur l'agglomération caennaise. Réseau d'observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

De par la taille relativement réduite de l'agglomération, l'ICU caennais est par ailleurs très réactif. L'effacement de l'ICU sur certains secteurs de l'agglomération peut se faire en quelques minutes (Fig. 69). Durant la nuit du 22 juillet 2022, la température de la Place Foch reproduit fidèlement celle du centre-ville jusqu'à 2 heures du matin, puis chute brutalement au niveau de celle enregistrée sur la Prairie. Cette évolution est en accord avec les indications de vent sur la Prairie montrant une bascule d'orientation à partir de minuit. Deux heures plus tard, à la faveur de la brise de campagne, l'air frais formé sur la Prairie pénètre en ville (jusqu'à la reprise d'un vent d'est soutenu à 4 heures du matin qui homogénéise la masse d'air et disperse les effets géographiques locaux à l'interface sol/air).

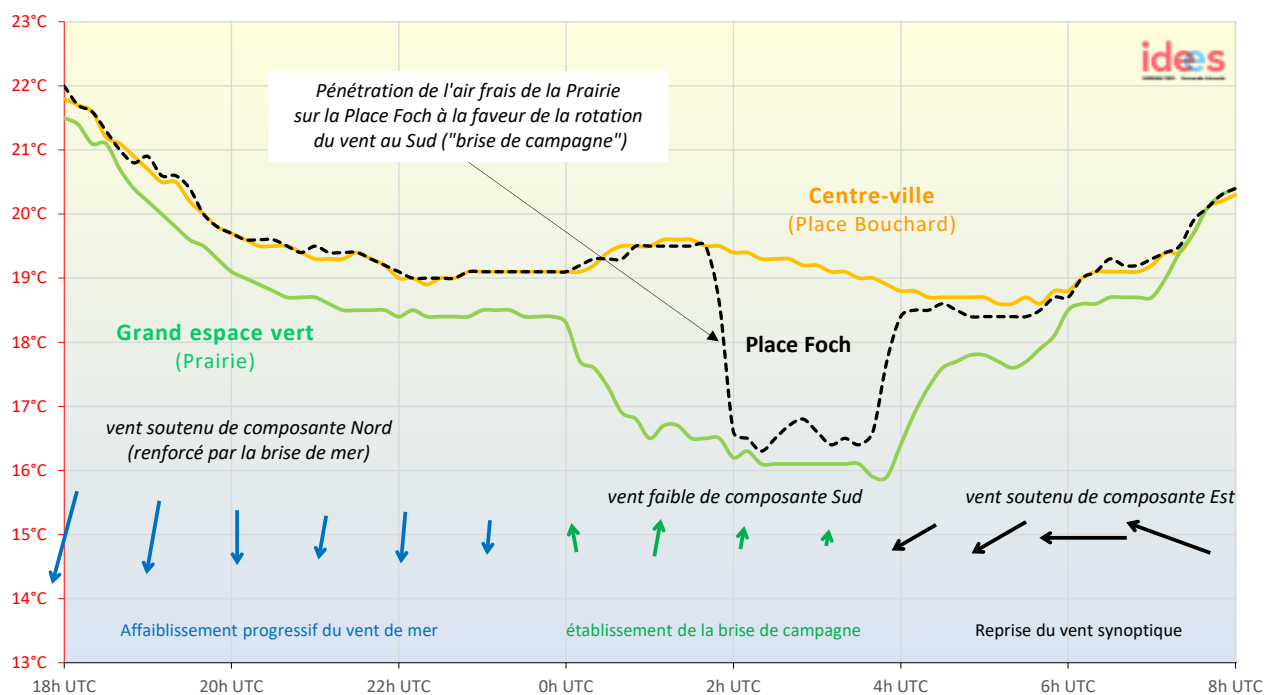


Figure 69 : Température de l'air sous abri pour 3 stations représentatives de l'agglomération caennaise. Evolution entre le 21 juillet 2022 à 18 h UTC et le 22 juillet 2022 à 8 h UTC et le 13 avril 2024 à 9 h UTC. Réseau d'observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

Ainsi, depuis quelques années les politiques d'aménagement se préoccupent de plus en plus des excès de chaleur diurne et nocturne en ville, et pas uniquement pour les métropoles de dimension mondiale. Toutes les villes sont sujettes au phénomène d'ICU, à des degrés et sous des formes divers qu'il convient de préciser pour trouver les moyens les plus adaptés pour agir efficacement. La Normandie est donc concernée, depuis les grandes agglomérations comme Rouen, Le Havre et Caen jusqu'aux plus petits villages qui composent la trame urbaine régionale. La démarche est appelée à se poursuivre et se développer car les risques induits devraient augmenter avec le réchauffement climatique d'échelle planétaire, et notamment la multiplication des « nuits tropicales » préjudiciables à la santé (Fig. 70) dont la fréquence et l'intensité sont aggravées en milieu urbain.

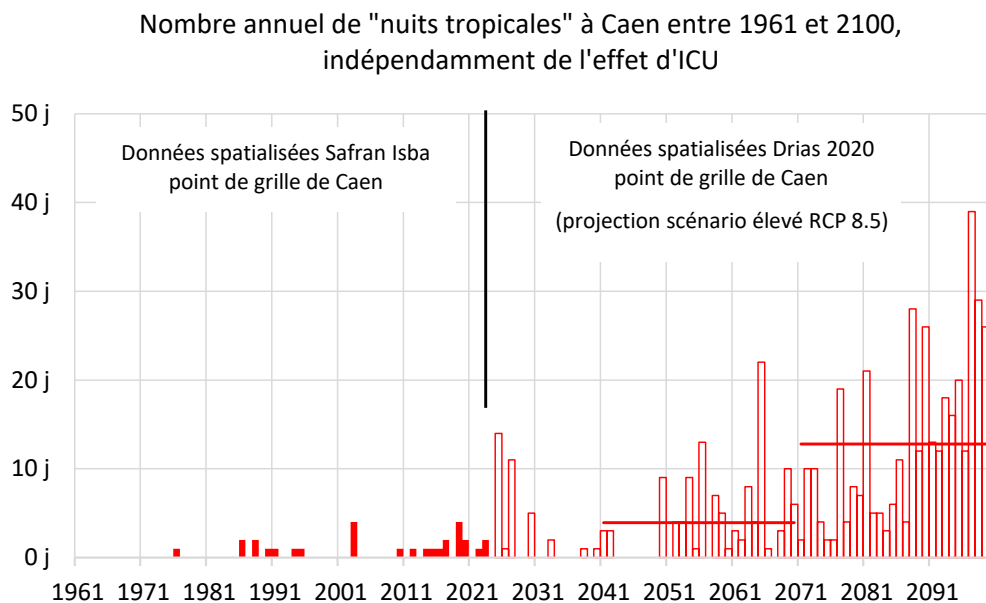


Figure 70 : Nombre de « nuits tropicales » (minimum supérieur à 20°C) à Caen entre 1961 et 2023 selon la simulation Safran Isba et projection à l’horizon 2100 selon le scénario élevé RCP 8.5 (point de grille n° 1048, expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Conclusion

Ce travail sur le changement climatique et les aléas météorologiques, mené dans le cadre du GIEC normand, repose à la fois sur une synthèse des études précédentes réalisées à l'échelle de la Normandie, mais également sur le traitement de données de Météo-France pour la période historique (1970-2023) et sur les données de projections climatiques du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) pour le futur jusqu'à l'horizon 2100. Dans ce cadre, deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre proposés par le GIEC/IPCC ont été utilisés : l'un « optimiste », RCP 2.6, supposant la mise en application immédiate d'une politique climatique internationale (type « Accords de Paris ») ; l'autre « pessimiste », RCP 8.5, reposant sur l'absence de politique climatique.

Le modèle retenu pour illustrer les changements climatiques du futur est Aladin (expérience Météo-France CNRM 2020) dont les données sont toutes disponibles sur le portail DRIAS les futurs du climat. Les projections résultent d'un seul modèle pour l'horizon lointain (2071-2100). Toutefois, signalons que les autres modèles traduisent globalement une même évolution, même si certaines valeurs et temporalités peuvent présenter quelques différences.

Pour l'analyse des **changements climatiques contemporains en Normandie sur la période 1970-2023**, les données de Météo-France ont été analysées à partir d'informations spatialisées issues du modèle Safran Isba et de données enregistrées sur sites pour sept stations normandes fiables et représentatives de la diversité climatique régionale.

Les résultats de ce travail indiquent clairement que le changement climatique est déjà une réalité en Normandie. En effet, la température a augmenté sur toutes les stations météorologiques normandes, de l'ordre de +1,0°C entre la période de référence actuelle 1991-2020 et la précédente 1961-1990. L'utilisation d'un autre indicateur, fondé sur la réalisation de tendance linéaire met en évidence une augmentation moyenne de la température d'environ +2°C entre 1970 à 2023.

Le réchauffement climatique se traduit logiquement par une augmentation du nombre de jours de *chaleur* ($\geq 25^{\circ}\text{C}$), de *forte chaleur* ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) et de *très forte chaleur* ($\geq 35^{\circ}\text{C}$), et *a contrario* par une réduction du nombre de jours de *froid* ($\leq 0^{\circ}\text{C}$), de *grand froid* ($\leq -5^{\circ}\text{C}$) et de *très grand froid* ($\leq -10^{\circ}\text{C}$). Les précipitations ne présentent pas, quant à elle, de tendance statistiquement significative mais une succession de phases pluvieuses et sèches entre 1970 et 2023. En revanche, le réchauffement de la température de l'air s'accompagne d'une diminution de la fréquence des précipitations sous forme de neige et du nombre de jours de brouillard.

Les projections concernant l'évolution du climat en Normandie selon deux scénarios d'émission en GES du GIEC/IPCC (RCP 2.6 et 8.5) sont résumées dans le tableau 9, pour les indicateurs de températures et de précipitations.

Si on se fixe sur l'horizon lointain 2100, les projections indiquent que l'élévation de la température atmosphérique en Normandie pourrait être contenue à environ +1°C en cas d'application immédiate de l'accord de Paris visant à réduire la quantité de gaz à effet de serre (RCP 2.6), alors que sans politique climatique internationale (RCP 8.5) elle pourrait dépasser les +3°C. Selon ce scénario élevé, l'élément le plus marquant serait la multiplication des épisodes de chaleur, avec une augmentation de plus d'un mois des jours dépassant les 25°C (passage d'environ 15 jours à 50 jours pour la moyenne régionale). Le phénomène serait très marquant dans l'intérieur des terres (passage d'environ 27 à 75 jours par an dans le Perche), alors qu'il serait atténué proche du littoral et avec des différences prononcées en fonction de l'exposition des côtes (passage d'environ 2 à 10 jours sur le nord-ouest du Cotentin hyperocéanisé, de 5 à 24 jours sur le littoral cauchois et de 12 à 43 jours sur le littoral calvadosien). Pour le scénario bas RCP 2.6, l'élévation d'environ 1°C de la température moyenne s'accompagnerait d'un gain d'une dizaine de jours de chaleur (passage d'environ 15 jours à 26 jours pour la moyenne régionale, variant d'environ 4 jours sur le nord-ouest du Cotentin à plus de 40 dans le Perche).

Avec le scénario élevé RCP 8.5, l'évolution du climat à l'horizon 2100 s'affirmerait également par un changement notable dans le régime pluviométrique, avec des pluies moins fréquentes (-7 jours) mais apportant un cumul plus abondant (+9%). En somme, le crachin normand laisserait un peu plus de place à des systèmes d'averses dont l'intensité pourrait être plus forte en raison d'une instabilité et d'une teneur en eau dans l'atmosphère plus fortes induites par le réchauffement. Toutefois, l'élément le plus important serait la création d'une grande opposition pluviométrique entre un hiver beaucoup plus arrosé (+25%) et un été nettement plus sec (-14%). Ce renforcement de la saisonnalité impacterait le fonctionnement des écosystèmes et des géosystèmes. Pour le scénario bas RCP 2.6, on observerait une certaine stabilité pour le cumul annuel (-0,1%), accompagnée toutefois par une légère tendance à la concentration des précipitations.

Concernant les aléas météorologiques, à l’horizon 2100 et avec le scénario élevé RCP 8.5 :

- les vagues de chaleur deviendraient beaucoup plus intenses et durables (moyenne régionale passant de 4 jours sur la période de référence à près de 50 jours) et seraient susceptibles d’apparaître dès la fin du printemps et se prolonger sur le début de l’automne. Le phénomène serait plus marqué dans les terres (jusqu’à plus de 70 jours localement), tandis que les espaces océanisés résisteraient davantage à l’augmentation de fréquence de cet aléa estival (moins de 15 jours sur les secteurs les plus influencés par la mer, au nord-ouest de la région) ;
- le nombre de jours de très fortes précipitations (cumul dépassant 20 mm par jour, soit 20 litres/m²) augmenterait d’environ 3 jours par an par rapport à la période actuelle. Dans le même temps, la fraction du volume apporté par les précipitations intenses augmenterait sensiblement, passant de 58,5% à 62,3%. *In fine*, l’ensemble de ces modifications dans le régime pluviométrique entraînerait davantage de risques de ruissellement et d’inondation.

Des précautions doivent être toutefois prises à la lecture des résultats. Il est ainsi important de noter que :

- il s’agit ainsi d’une contribution réalisée en l’état actuel des connaissances scientifiques sur le fonctionnement de l’atmosphère, fondée sur le rapport AR6 de l’IPCC/GIEC de 2021 et sur les scénarios RCP dans la mesure où les SSP ne sont pas encore disponibles à notre échelle régionale de travail ;
- nous ne disposons pas de données suffisantes en nombre et fiables pour réaliser une étude à l’échelle régionale avant 1970. Or la période 1970 à 2023 est reconnue comme la deuxième période du réchauffement climatique après celle des années 1910 à 1940, et il n’est donc pas possible, à l’instar du GIEC/IPCC, de faire une comparaison avec la période préindustrielle non touchée par le réchauffement climatique d’origine humaine ;
- le changement climatique présente une saisonnalité parfois marquée mais masquée dans les présentations usuelles en moyennes annuelles (notamment sur le régime des précipitations en Normandie, positif en hiver et négatif en été ; mais aussi sur les températures avec un réchauffement estival plus prononcé que le réchauffement hivernal...) ;
- pour certains paramètres, il y a encore beaucoup d’inconnues en raison de facteurs parfois antagonistes (notamment pour le vent et les tempêtes) ;
- des phénomènes de seuils, avec rétroactions positives (ou négatives) sont encore mal appréhendés (comme par exemple sur le niveau des océans...).

Néanmoins, concernant les projections, cette note de synthèse a le mérite de présenter une "enveloppe" des scénarios possibles entre :

- i) une humanité vertueuse avec un scénario « optimiste » RCP 2.6 (mise en place rapide d’une politique climatique internationale, prolongement de l’accord de Paris 2015...) ;
- ii) un monde qui continue à fonctionner sur ses logiques économiques et environnementales actuelles avec le scénario « pessimiste » RCP 8.5.

Les changements évoqués ne seront pas sans conséquences sur le territoire normand et ses écosystèmes continentaux, marins et littoraux, sur la santé et l’économie, mais de nombreuses incertitudes demeurent qu’il faudra lever au travers d’un renforcement des études scientifiques.

Il serait par exemple important de mieux comprendre les effets combinés des précipitations intenses, des tempêtes et de l’élévation du niveau marin sur les inondations, le recul du trait de côte, la salinisation des aquifères littoraux... et ainsi de mieux appréhender les multi-aléas et les multirisques sur le territoire normand. Ce travail devrait permettre d’entamer une réflexion profonde sur les mesures d’atténuation et d’adaptation à mettre en œuvre sur notre territoire et proposer notamment des solutions en matière de sécurité, d’aménagement et de gestion de l’environnement au sens large...

	REFERENCE			SCENARIO RCP 2.6 émissions réduites			SCENARIO RCP 8.5 émissions non maîtrisées		
	1976-2005			horizon lointain (2071-2100)			horizon lointain (2071-2100)		
	Moy.	Mini région.	Max région.	Moy.	Mini région.	Max région.	Moy.	Mini région.	Max région.
TEMPERATURE									
T moyenne annuelle (°C)	10.7	9.5	11.9	11.8	10.5	12.7	13.9	12.9	14.9
				1.1	écart / 1976-2005		3.2	écart / 1976-2005	
Nb de jours de chaleur (TX>=25°C)	15.6	1.3	28	26.5	2.6	45.7	49.0	8.2	78.2
				10.9	écart / 1976-2005		33.4	écart / 1976-2005	
Nb de jours de très forte chaleur (TX>=35°C)	0.1	0.0	0.4	1.2	0.0	2.7	3.5	0.2	8.1
				1.1	écart / 1976-2005		3.4	écart / 1976-2005	
Nb de jours de vague de chaleur	4.4	0.5	7.8	14.0	1.7	23.3	49.3	12.2	73.4
				9.6	écart / 1976-2005		44.9	écart / 1976-2005	
Nb de nuits tropicales (TN>=20°C)	0.7	0.0	2.4	2.5	0.4	6.4	12.5	6.1	26.9
				1.8	écart / 1976-2005		11.8	écart / 1976-2005	
Nb de jours de gelée (TN<=0°C)	29.5	3.4	53.8	27.2	2.1	49.3	8.6	0.3	18.6
				-2.3	écart / 1976-2005		-20.9	écart / 1976-2005	
Nb de jours sans dégel (TX<=0°C)	4.2	0.1	12.5	3.4	0	10.2	0.5	0	2
				-0.8	écart / 1976-2005		-3.7	écart / 1976-2005	
Nb de jours de vague de froid	3.4	0.3	5.2	2.7	0	4.6	0.1	0	0.6
				-0.7	écart / 1976-2005		-3.3	écart / 1976-2005	
PRECIPITATIONS									
Précipitations annuelles (mm)	838.4	635.4	1085	837.7	611.8	1070.6	910.5	655.1	1171.2
				-0.1%	écart / 1976-2005		8.6%	écart / 1976-2005	
Nb de jours de précip. (RR>=1 mm)	136.9	125.3	147.9	131.7	119.4	144.4	129.7	117.4	144.4
				-5.2	écart / 1976-2005		-7.2	écart / 1976-2005	
Nb de jours de fortes précip. (RR >=20 mm)	4.2	1.5	9.4	5.0	1.6	10.1	6.7	2.2	12.4
				0.8	écart / 1976-2005		2.5	écart / 1976-2005	
Fraction des précip. intenses (%)	58.5	56.5	60.7	60.7	58.0	63.9	62.3	59.0	65.7
				2.2	écart / 1976-2005		3.8	écart / 1976-2005	
Précip. extrêmes (valeur du 99e centile) (mm)	19.8	14.8	25.5	21.2	15.0	26.8	23.7	16.4	30.3
				1.4	écart / 1976-2005		3.9	écart / 1976-2005	

Tableau 9 : Synthèse sur l'évolution attendue de plusieurs paramètres climatiques en Normandie selon deux scénarios d'émission en GES du GIEC/IPCC (RCP 2.6 et 8.5) à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Et demain ?

Les pistes de progression dans la connaissance sur le changement climatique à échelle fine en Normandie

Depuis quelques années, le laboratoire IDEES Caen et le PNR Normandie-Maine ont entrepris un travail sur l'évolution du climat à échelle fine sur son territoire (Fontaine, 2021). Pour aller plus loin dans la connaissance, une descente d'échelle a été testée à partir du croisement des données initiales DRIAS-2020 dont la maille est de 8 km, avec les données de relief issues d'un MNT de l'IGN d'une maille de 25 m. La méthode s'appuie sur les lois de décroissance de température moyenne avec l'altitude et l'ajout des phénomènes d'exposition (Parey, 2024). Un travail similaire a été mené sur les précipitations. La méthode a été étendue cette année sur l'ensemble des Parcs naturels régionaux normands. Voici un exemple de production cartographique sur le PNR du Perche pour illustrer le gain d'informations (Fig. 71) : à gauche la cartographie de base issue des points DRIAS-2020, distribués sur 3 classes de température moyenne annuelle pour la période de référence 1976-2005 ; au centre une opération de spatialisation par krigeage sur les données DRIAS-2020 ; à droite, ajout d'un traitement rendre compte à échelle fine de l'influence de l'altitude et de l'exposition.

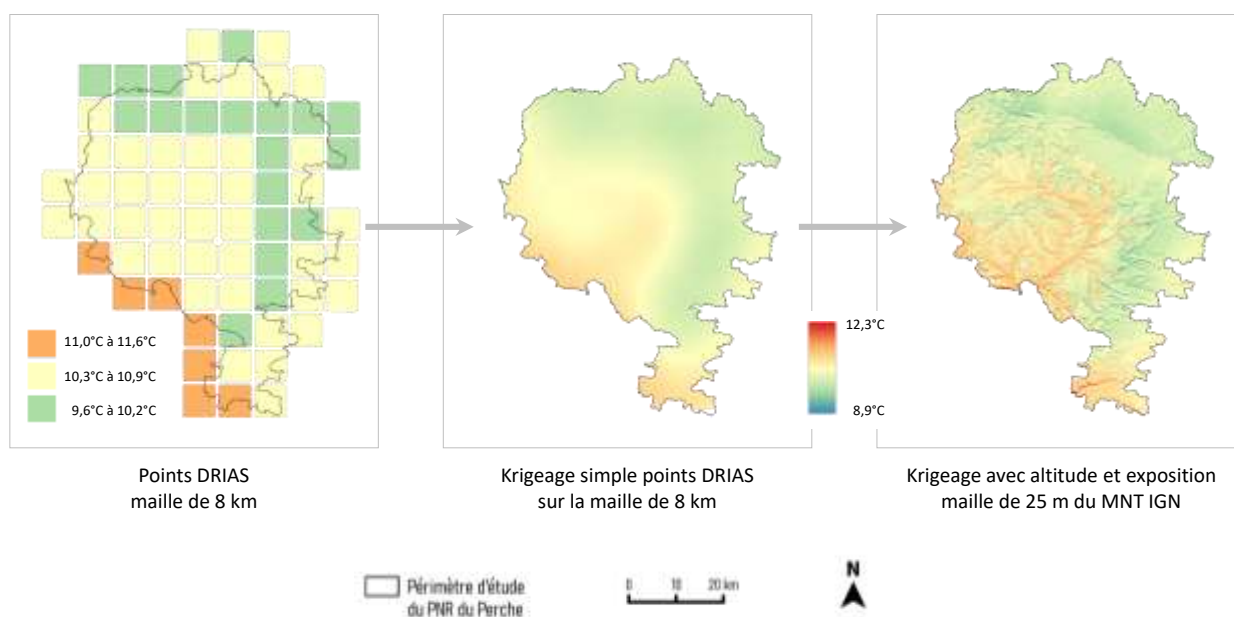


Figure 71 : Descente d'échelle pour la température moyenne annuelle du PNR du Perche sur la période de référence 1976-2005. Données DRIAS-2020 CNRM Météo France et IGN (réalisation L Parey, Master GAED Environnement, Université de Caen Normandie et PNR du Perche).

Les résultats visent à sensibiliser les acteurs locaux et à fournir des outils d'aide à la décision pour anticiper les impacts du changement climatique. Avec ces cartographies, les PNR pourront élaborer des stratégies adaptées pour la gestion durable de leurs territoires.

Ci-dessous, une représentation en 3D de la température moyenne annuelle du Parc naturel régional des Boucles de la Seine pour la période de référence 1976-2005 (en haut) et la projection de ce même territoire à l'horizon 2100 (en bas), pour le scénario élevé RCP 8.5 (Parey, 2024).



Figure 72 : Vue 3D de la température moyenne annuelle du PNR des Boucles de la Seine sur la période de référence 1976-2005 et à l'horizon 2100 selon le scénario RCP 8.5. Données DRIAS-2020 CNRM Météo France et IGN (réalisation L Parey, Master GAED Environnement, Université de Caen Normandie et PNR du Perche).

Bibliographie

- ADEME, 2021. Transition(s) 2050 - Choisir maintenant - Agir pour le climat. Rapport d'étude, 687 pages, <https://www.vie-publique.fr/rapport/282712-transition-2050-agir-pour-le-climat-rapport-de-l-ademe>. [Google Scholar]
- Beauvais F., Cantat O., Madeline P., Le Gouée P., Brunel-Muguet S., Medjkane M., 2019 : Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? Etude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie*, 32 p.
- Beauvais F., Cantat O., Le Gouée P., Madeline P., Brunel-Muguet S., Boulonne L., Gaillard H., Jolivet C., Bataille M-P., Medjkane M., 2022. Changement climatique et culture du blé tendre d'hiver en France aux horizons 2070 et 2100 : étude phénoclimatique et géographique à partir des données issues du modèle ALADIN-Climat. *Cybergeo : European journal of geography*, pp 1-34.
- Beauvais F., 2021. Approches géographiques et agro-climatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de Normandie : constat et étude d'impact prospective appliqués au blé tendre d'hiver. Thèse de doctorat de Normandie Université, 532 p.
- Beauvais F., 2022. Approches géographiques et agroclimatologiques des conséquences du changement climatique sur l'agrosystème céréalier de la Plaine de Caen (Normandie) aux horizons 2050 et 2100 : analyse comparative des résultats tirés des indicateurs agroclimatiques et phénoclimatiques. *Climatologie* 19, 3.
- Bigot S., Ullmann A., Cantat O., Briche E., 2023. Editorial du Numéro Thématique 'Changement climatique : les territoires acteurs des trajectoires d'adaptation et de transition écologique'. *Climatologie*, 20, 1.
- Cantat O., 2004 : Analyse critique sur les tendances pluviométriques au 20ème siècle en Basse-Normandie : réflexions sur la fiabilité des données et le changement climatique. *Climatologie*, vol. 1, pp. 11-32.
- Cantat O., 2005a : Dynamique spatio-temporelle d'un événement météo-climatique extrême. La canicule de l'été 2003 en Europe de l'Ouest. *Climatologie*, vol. 2, pp. 99-135.
- Cantat O., 2005b : La canicule de l'été 2003 : un épisode météorologique « hors normes » ? Expertise d'un risque climatique en Basse-Normandie. *Cahiers de la MRSH*, n°42, Université de Caen Basse-Normandie, pp. 83-101.
- Cantat O., 2006 : Les « caprices » du climat en Normandie. La variabilité des températures et ses conséquences dans une région « tempérée » non dénuée d'excès. Actes des Journées de climatologie 2006, Les apports du géographe-climatologue. ISSN : 1958-2773. Comité National Français de Géographie, Commission « Climat et Société », pp. 83-104.
- Cantat O., 2015 : La diversité spatio-temporelle du climat bas-normand et ses impacts environnementaux et sociétaux. Recueil d'études de climatologie régionale. HDR, Volume 2. 290 p.
- Cantat O., Cador J.-M., Agasse E., 2002 : L'originalité des inondations de 2000-2001 dans la Plaine de Caen. Quand la montée des nappes souterraines prolonge le débordement des rivières... *Annales de Géographie*, n° 625 ; pp. 246-264.
- Cantat O., Gires J.-O., 2003 : Réflexions à propos de la fiabilité des données et du changement climatique : 100 ans de précipitations en Basse-Normandie. *Dokumentacja Geograficzna*, n° 29, Polska Akademia Nauk, pp. 65-69. http://www.climato.be/aic/publis/vol1/article_CANTAT_vol.1_pages11-32.pdf
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., 2009 : Rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques en Normandie. Rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques en Normandie., Mar 2009, Besançon, France. pp. 81-100. (hal-00545222)
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., Savouret E., 2010a : Réflexions à propos des stratégies d'adaptation des systèmes agricoles au Changement climatique en Normandie : constat et perspectives à l'horizon 2010. *Environnement, Risques and Santé*, John Libbey Eurotext, 2010, pp.12-19. (hal-01108766)
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., Savouret E., 2010b : Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques., Sep 2010, Rennes, France. pp. 101-106. (hal-00545208)
- Cantat O., Savouret E., 2004 : La diversité géographique de la canicule de l'été 2003 en Basse-Normandie. Actes du 17ème colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... », pp. 135-138.

- Cantat O., Savouret E., Bensaid A, 2012 : Les types de temps et leur évolution dans le Grand Ouest de la France. Partie 1, chapitre 3 de l'ouvrage « Changement climatique dans l'Ouest. Evaluation, impacts, perceptions », ISBN 978-2-7535-2146-9, pp. 43-56.
- Cantat O., Savouret E., Brunet L., 2009 : Les anémomorphoses végétales : quelle signification géoclimatique réelle ? Climatologie, vol. 6, pp. 9-31.
- Cantat O., David M., Beauvais F., 2024 : « L'îlot de chaleur urbain à Caen : un phénomène d'intensité et de répartition géographique très variables, sous la dépendance des types de temps », in Atlas Social de Caen [En ligne], ISSN : 2779-654X, mis à jour le : 11/09/2024, URL : <https://atlas-social-de-caen.fr:443/index.php?id=1271>, DOI : <https://doi.org/10.48649/asdc.1271>.
- Cazenave, A., H. Dieng, B. Meyssignac, K. von Schuckmann, B. Decharme, and E. Berthier, 2014. The rate of sea level rise? Nature Climate Change, 4, 358-361.
- CEREMA, 2018. Dynamiques et évolution du littoral, Synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague (Fascicule 3) et du cap d'Antifer à la pointe du Hourdel (Fascicule 2). Catalogue sédimentaire national. Centre d'études et d'expertises sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.
- COPERNICUS, 2020 : <http://climate.copernicus.eu/copernicus-2019-was-second-warmest-year-and-last-five-years-were-warmest-record>
- Costa S., Cantat O., Pirazzoli P.A., Lemaitre M., Delahaye D. 2004. Vents forts et submersions de tempête en Manche Orientale : analyse météo-marine sur la période historique récente. Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat, mémoire du temps. Les relations climat-espace-société ». pp. 277-280.
- Dantec R., Roux J.-Y., 2019. Adapter la France aux dérèglements climatique à l'horizon 2050 : urgence déclarée. Rapport d'information du Sénat n 511 (2018–2019), 190 pages, <https://www.senat.fr/rap/r18-511/r18-511.html>. [Google Scholar]
- David M., Cantat O., Planchon O. (2020) : Types de circulations et fortes chaleurs en Normandie (1970-2019). Colloque international de l'AIC 2020, Rennes. Abstract (6 p.).
- Dodman D., Hayward B., Pelling M., Castan Broto V., Chow W., Chu E., Dawson R., Khirfan L., McPhearson T., Prakash A., Zheng Y., Ziervogel G., 2022. Cities, settlements and key Infrastructure. In: Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Portner et al., (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, 907–1040, doi:10.1017/9781009325844.008. [Google Scholar]
- Douvinet J., Planchon O., Cantat O., Delahaye D., Cador J.-M., 2009 : Variabilité spatio-temporelle des pluies de forte intensité à l'origine des « crues rapides » dans le Bassin parisien (France), Climatologie, vol. 6, pp. 47-72. http://www.climato.be/aic/publis/vol6/Douvinet_Climatologie_vol6_2009.pdf
- DREAL BN (Basse-Normandie), 2010. Étude sur l'adaptation au changement climatique en Basse-Normandie, Météo-France et DREAL BN, Mission SOCRATE.
- DREAL HN (Haute-Normandie), 2011. Étude sur la sensibilité et sur l'adaptation de la Haute-Normandie aux effets du changement climatique, Rapport réalisé par Explicit et SAFEGE, octobre 2011, 96 p.
- DREAL Normandie, 2015. La biodiversité. Profil Environnemental de Basse-Normandie, 119 p. ISBN : 978-2-11-151133 http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Partie_Biodiversite_v39_Web_cle21ec99.pdf
- DREAL Normandie, 2015. La mer et le littoral. Profil Environnemental de Basse-Normandie, 112 p. ISBN : 978-2-11-151133-0
- DREAL Normandie, 2015. Le climat. Profil Environnemental de Basse-Normandie, 75 p. ISBN : 978-2-11-151133-0 http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PartieClimat_v45_Web_200dpi_cle2c31a9.pdf
- DREAL Normandie, 2015. L'eau. Profil Environnemental de Basse-Normandie, 124 p. ISBN : 978-2-11-151133-0 http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Partie_Eau_v38_Web_cle583c1f.pdf
- DREAL Normandie, 2015. Les paysages. Profil Environnemental de Basse-Normandie, 59 p. ISBN : 978-2-11-151133-0 http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Partie_Paysages_v29_Web_cle032e6e.pdf
- DREAL Normandie, 2015. Les sols. Profil Environnemental de Basse-Normandie, 70 p. ISBN : 978-2-11-151133-0 http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Partie_Sols_v29_Web_cle0a2552.pdf

- DREAL Normandie, 2024. *Le climat en Normandie*. Collectif coordonné par la DREAL Normandie. Profil environnemental. Le climat en Normandie, 200 pages, novembre 2024. ISBN : 978-2-11-162599-0. Dépôt légal : décembre 2024. <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/le-profil-climat-a6000.html>
- Dubreuil V., Mème K., Bonnardot V., Aubert J.-F., Verger A. C., Melec D., 2019. Changement climatique et date de floraison des pommiers dans le Val de Rance (Bretagne). Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 32, 83-88. http://www.climato.be/aic/colloques/actes/Thessaloniki2019_actes.pdf
- Ducharne A, Habets F, Déqué M, Evaux L, Hachour A, Lepaillier A, Lepelletier T, Martin E, Oudin L, Pagé C, Ribstein P, Sauquet E, Thiéry D, Terray L, Viennot P, Boé J, Bourqui M, Crespi O, Gascoin S, Rieu J, 2009 - Rapport final du Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. www.sisyphe.jussieu.fr, 62 p. INVS, 2003. Impact sanitaire de la vague de chaleur en France survenue en août 2003 Website : http://www.invs.sante.fr/publications/2003/chaleur_aout_2003/index.html
- Fontaine H., 2021. Modélisation du changement climatique sur le PNR Normandie-Maine et risques naturels associés. Rapport de stage de fin d'études, Master 2 de géographie, GAED parcours « Environnement, risques et diagnostics territoriaux », sous la direction de Michel Ameline et Romain Louvet (PNR Normandie-Maine) et Olivier Cantat (Université de Caen, laboratoire IDEES).
- Graff K., 2020. Contribution à la cartographie multirisques de territoires côtiers : approche quantitative des conséquences potentielles et des concomitances hydrologiques (Normandie, France). Thèse de doctorat en géographie, Université de Caen-Normandie, Normandie Université, 376 p. http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Partie_Mer_et_littoral_v28_Web_cle7ecd4f.pdf
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. 35 p.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. 35 p.
- IPCC/GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. 34 p.
- IPCC/GIEC, 2018. Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p.
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Kopp, R. E., DeConto, R. M., Bader, D. A., Hay, C. C., Horton, R. M., Kulp, S., Oppenheimer, M., Pollard, D., & Strauss, B. H. (2017). Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections, *Earth's Future*, 5, 1217–1233,
- Kopp, R. E., Gilmore, E. A., Little, C. M., Lorenzo-Trueba, J., Ramenzoni, V. C., & Sweet, W. V. (2019). Usable science for managing the risks of sea-level rise. *Earth's Future*, 7, 1235-1269.
- Laignel B. et collaborateurs, 2010. Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux. Expertise collective sur l'estuaire de la Seine. Projet du programme Seine Aval, <http://seine-aval.crihan.fr/web/>, 58 p.
- Laignel B., 2012. Enregistrement et effets du climat sur les stocks d'eau de l'échelle globale à régional (bassin de la Seine). Bulletin des Sciences Géographiques, Alger, 27, 2-22.

- Laignel B., Dupuis E., Durand A., Dupont J.P., Hauchard E., Massei N. (2006). Erosion balance in the loamy watersheds of the Western Paris Basin from the continuous measurement in the surface water. *C. R. Geoscience*, 338, 556-564
- Laignel B., Nouaceur Z., 2018. Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.
- Laignel B., Nouaceur Z., 2024. Evolution du climat à l'échelle de la métropole Rouen Normandie. Fascicule du Giec local de la métropole de Rouen Normandie, 28 p.
- Laignel B., Nouaceur Z., Vallée B., Charrier F., Kazmierczak L., 2020. The local GIEC (IPCC) of the Metropolis of Rouen-Normandie: Evaluation of the climate change effects at an original scale. 5th World Summit on Climate Change and Global Warming, 17-18 février, Amsterdam.
- Lamy C., Cantat O., Le Gouée P., Dubreuil V., Bensaid A., Lemerrier B., Savouret E., 2012 : Sécheresse et réserve en eau des sols. Partie 3, chapitre 8 de l'ouvrage « Changement climatique dans l'Ouest. Evaluation, impacts, perceptions », ISBN 978-2-7535-2146-9, pp. 195-215.
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaid A., Goulet A., Delahaye D., 2011 : SCALES: An Original Model to Diagnose Soil Erosion Hazard and Assess the Impact of Climate Change on Its Evolution. Chapter 12, Soil Erosion Studies. InTech Publisher, ISBN 978-953-307-710-9, pp. 227-252. <http://hal.univ-nantes.fr/hal-00703107/>
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaid A., Savouret E., 2010a : Evaluation et cartographie de la sécheresse des sols forestiers normands à l'horizon 2100 : des connaissances nouvelles pour une gestion durable des forêts. Mappemonde, n°99. <http://mappemonde.mgm.fr/num27/fig10/fig10305.html>
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaid A., Savouret E., 2010b : La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique. La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique., 2010, Rennes, France. pp.331-336. (hal-00545221)
- Le Gouée P., Marie M., Cantat O., Bensaid A., 2010c : Quand le géographe fait du sol une interface essentielle entre agriculture durable, société et environnement exemple de deux études de cas traitées en Basse-Normandie (France). ISDA 2010, Jun 2010, Montpellier, France. (hal-00521286)
- Le Monde, 21 juin 2019 : Canicule : quel est le seuil d'alerte de votre département ? https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/07/19/a-partir-de-quelles-temperatures-peut-on-parler-de-canicule-dans-chaque-departement_5479799_4355772.html
- Letortu P., Costa S., Cantat O., 2016 : Conditions météo-marines responsables des inondations par la mer en Manche orientale française. La Houille Blanche. Revue internationale de l'eau, EDP Sciences, 2016, 2, pp.41-46
- Letortu P., Costa S., Cantat O., 2012 : Les submersions marines en Manche Orientale : approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer. Climatologie, vol. 9, pp. 31-57.
- Maquaire O., Beauvais F., Cador J.M., Cantat O., Delahaye D., et al. (2019) : Chapitre 3 - Facteurs hydrodynamiques. CEREMA. Dynamiques et évolution du littoral - Synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague, pp.62-143, 2019, 978-2-37180-313-8.
- Massei N., Wang H.Q., Dupont J.P., Rodet J., Laignel B., (2003). Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *Journal of Hydrology*, 275, 109-121.
- Mouhri A., Motelay-Massei A., Massei N., Fournier M., Laignel B. (2008). Polycyclic aromatic hydrocarbon transport processes on the scale of a flood event in the rural watershed of Le Bebec, France. *Chemosphere*, 73, 443-450.
- NOAA Center for Operational Oceanographic Products and Services. (2019) Sea level trends. [online: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/>] Accessed November 18, 2019.
- ONERC, 2015. Le littoral dans le contexte du changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement. Observatoire National sur les Effets du réchauffement Climatique. La Documentation française, Paris, 178 p.
- ONERC, 2023. Les vagues de chaleur dans un contexte de changement climatique. Rapport à la Première ministre et au Parlement. La Documentation Française, 262 p., https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_2023_VDC.pdf. [Google Scholar]
- Ouzeau G., Deque M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Vrac M., 2014. Scénarios régionalisés. Le climat de la France au XXI^e siècle, Volume 4, Rapport de la mission Jean Jouzel. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 62 p.

- Parey L., 2024 : Cartographie du réchauffement climatique sur le territoire des Parcs naturels régionaux normands. Modélisation de projections du GIEC à une échelle fine. Rapport de stage de fin d'études, Master 2 de géographie, GAED parcours « Environnement, risques et diagnostics territoriaux », sous la direction de Jonathan Allain (PNR du Perche) et de Olivier Cantat (Université de Caen, laboratoire IDEES), 352 p.
- Planton S., Le Cozannet G., Cazenave A. Costa S., Douez O., Gaufres P., Hissel F., Idier D., Laborie V., Petit V., Sergent P. 2015. Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises », in « le Climat de la France au XXI^e siècle (Vol. 5) ». Direction, Jean Jouzel. MEDDE. 68 p.
- Savouret E., Cantat O., 2008 : Identification et spatialisation des bioclimats normands. Les apports du couplage d'une approche naturaliste et de l'analyse des conditions climatiques. Actes des Journées de climatologie 2008, « Climat et végétation ». ISSN : 1958-2773. Comité National Français de Géographie, Commission « Climat et Société », pp. 29-44.
- Sweet, W.V., Kopp, R.E., Weaver, C.P., Obeysekera, T., Horton, R.M., Thieler, E.R., and Zervas, C. (2017). Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Tech. Rep. NOS CO-OPS 083. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD. 75pp.
- Técher M., Ait Haddou H., Aguejdad R., 2023. Îlot de chaleur urbain et application territoriale en France : revue des méthodes de simulation numérique. Climatologie, 20, 6
- Valdes D., Dupont J.P., Laignel B., Ogier S., Leboulanger T., Mahler B.J. (2007). A spatial analysis of structural controls on karst groundwater geochemistry at a regional scale. *Journal of Hydrology*, 340, (3-4): 244-255.
- Valdès D., Dupont J.P., Laignel B., Slimani S., Delbart C. (2014). Infiltration processes in karstic chalk investigated through a spatial analysis of the geochemical properties of the groundwater : the effect of the superficial layer of clay-with-flints. *Journal of Hydrology*, 519, 23-33.
- Valdés D., Dupont J.P., Massei N., Laignel B., Rodet J. (2005). Analysis of karst hydrodynamics through comparison of dissolved and suspended solids transport. *C. R. Geoscience*, 337, 15, 1365-1374.

ANNEXES

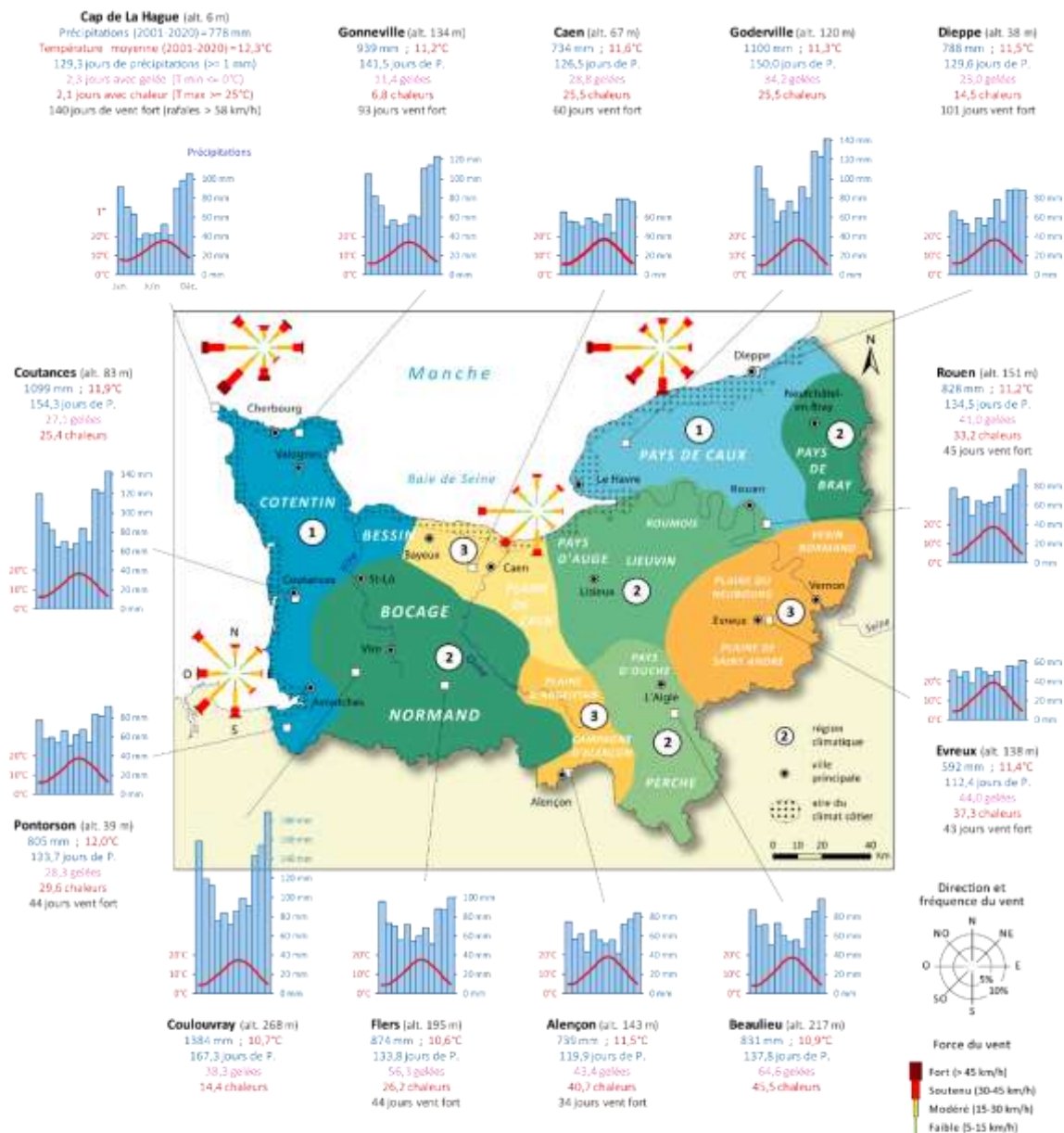
Annexe 1 : La diversité régionale du climat normand : présentation générale (Cantat, pour DREAL Normandie).

La Normandie est globalement marquée par les influences océaniques. Trois grands types de climats se distinguent, nuancés à échelle plus fine par les facteurs géographiques locaux. Les températures et les précipitations varient principalement selon la topographie, l'exposition aux flux humides provenant majoritairement de l'ouest et la distance à la mer. Enfin, le vent apparaît comme une composante particulièrement prégnante sur les littoraux.

Type 1 (ton bleu), climat maritime : le Cotentin et l'ouest du département de la Manche forment l'ensemble le plus « océanisé » de la région : frais, humide et pluvieux. Les conditions deviennent plus agréables en allant vers le sud : moins venteux, plus doux et plus ensoleillé. La frange littorale se distingue par son caractère très éventé et tempéré : gel et chaleur rares, précipitations moins fréquentes et moins abondantes. Les contrastes pluviométrique et thermique sont parfois très prononcés en quelques kilomètres quand le relief est marqué (ex. : La Hague sur la côte et Gonneville sur les hauteurs). Il en est de même pour le Pays de Caux, dans une ambiance globalement plus fraîche (ex. : Dieppe et Goderville).

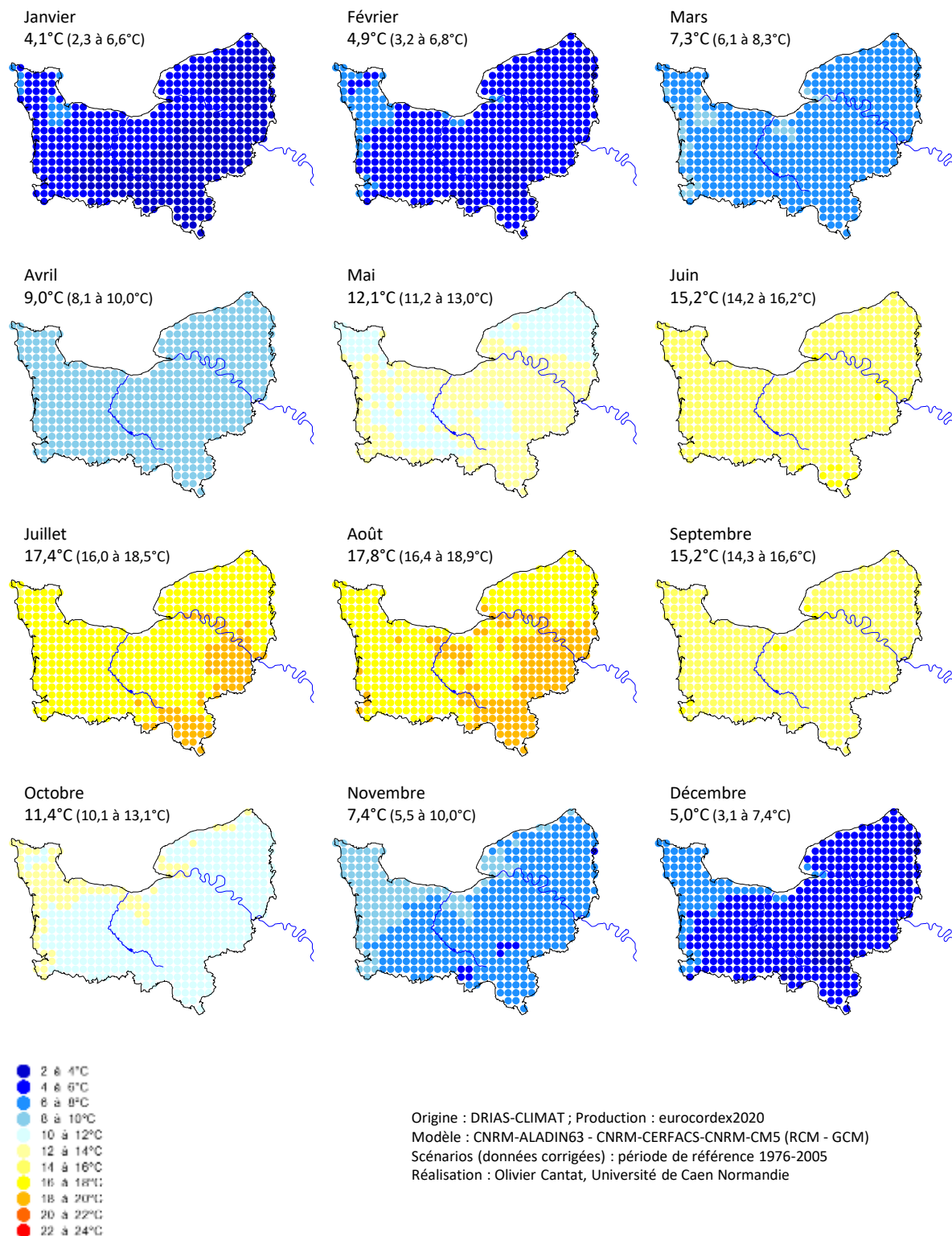
Type 2 (ton vert), climat contrasté des collines : le Bocage normand est bien arrosé, voire très arrosé sur les reliefs les plus exposés au flux d'ouest, et frais en raison de l'altitude. Cependant, il existe des contrastes notables entre les « zones basses » (fonds de vallées, dépressions... par ex. : Flers) et les hauteurs très pluvieuses (ex. : Coulouvray). On retrouve globalement les mêmes types de caractères dans le Pays de Bray, en plus frais. Moins directement soumis aux flux océaniques, le Pays d'Auge, le Lieuvin et le Roumois connaissent toutefois des précipitations assez marquées en raison des reliefs collinaires qui favorisent leur formation. Plus au sud, le Pays d'Ouche et le Perche bénéficient d'un caractère continental plus affirmé : précipitations atténuées et amplitudes thermiques plus fortes (ex. : Beaulieu).

Type 3 (ton orangé), climat des plateaux abrités : la Plaine agricole de Caen à Falaise, sous le vent des collines de Normandie et proche de la mer, se caractérise par une pluviométrie et des contraintes thermiques modérées (ex. : Caen). Dans la Campagne d'Alençon, par effet de continentalité, les températures sont plus contrastées avec communément 10 à 15 jours par an de plus de froid en hiver et de chaleur en été (ex. : Alençon). La situation thermique est semblable dans les plaines agricoles de l'Eure, mais la pluviométrie est beaucoup plus faible (localement moins de 600 mm/an contre environ 750 mm) en raison du double effet d'abri provoqué par les collines du Bocage normand et par celles qui s'étendent sur un axe du Pays d'Auge au Perche (ex. : Evreux).

Annexe 2 : La diversité régionale du climat normand : carte de synthèse (Cantat, pour DREAL Normandie, 2024).

Annexe 3a : Température moyenne mensuelle, période de référence (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

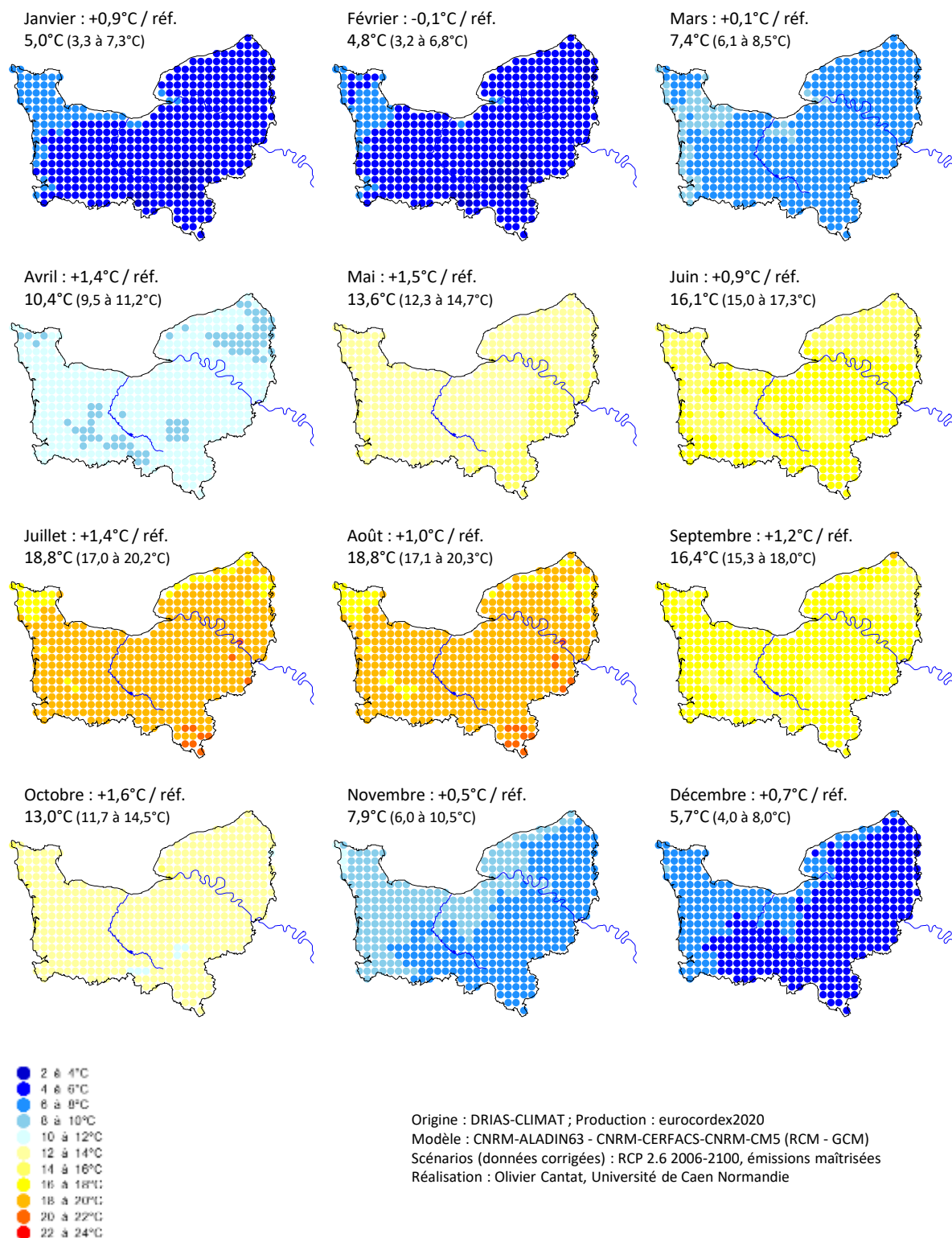
Température moyenne mensuelle
Période de référence 1976-2005



Annexe 3b : Température moyenne mensuelle, scénario RCP 2.6 horizon 2100 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

Température moyenne mensuelle

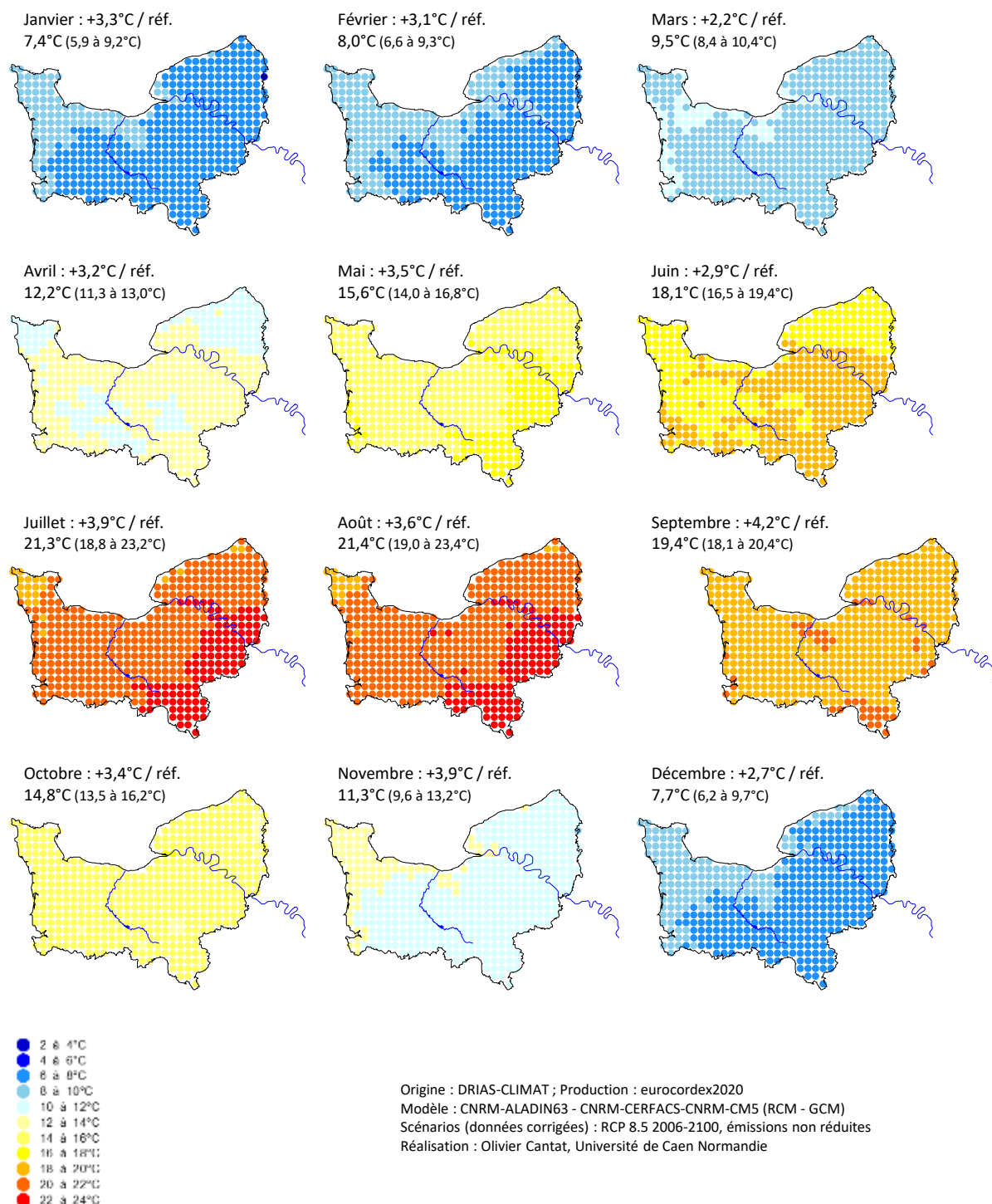
Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 2,6 (émissions maîtrisées)



Annexe 3c : Température moyenne mensuelle, scénario RCP 8.5 horizon 2100 (Cantat, pour DREAL Normandie 2004).

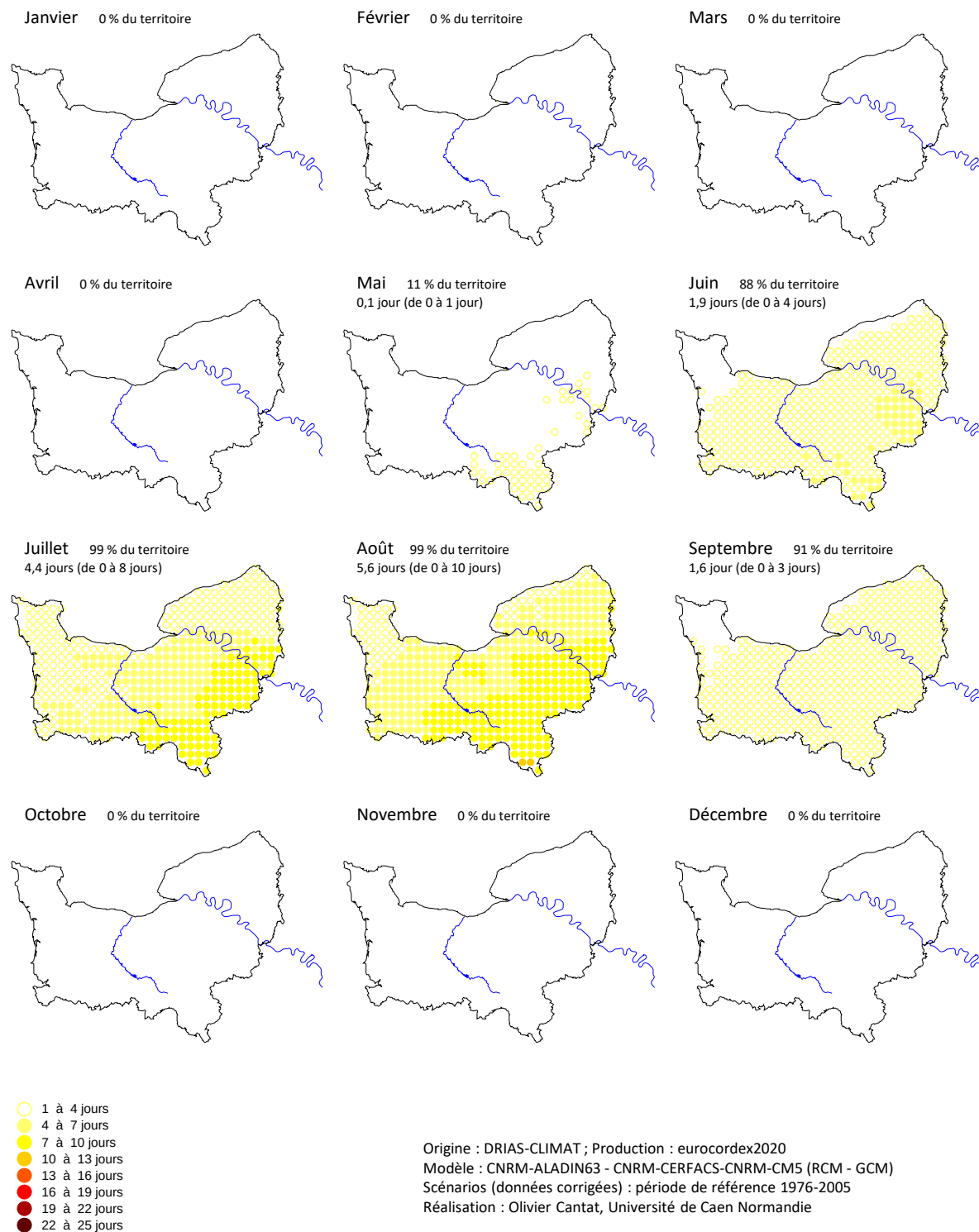
Température moyenne mensuelle

Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 8,5 (émissions non réduites)



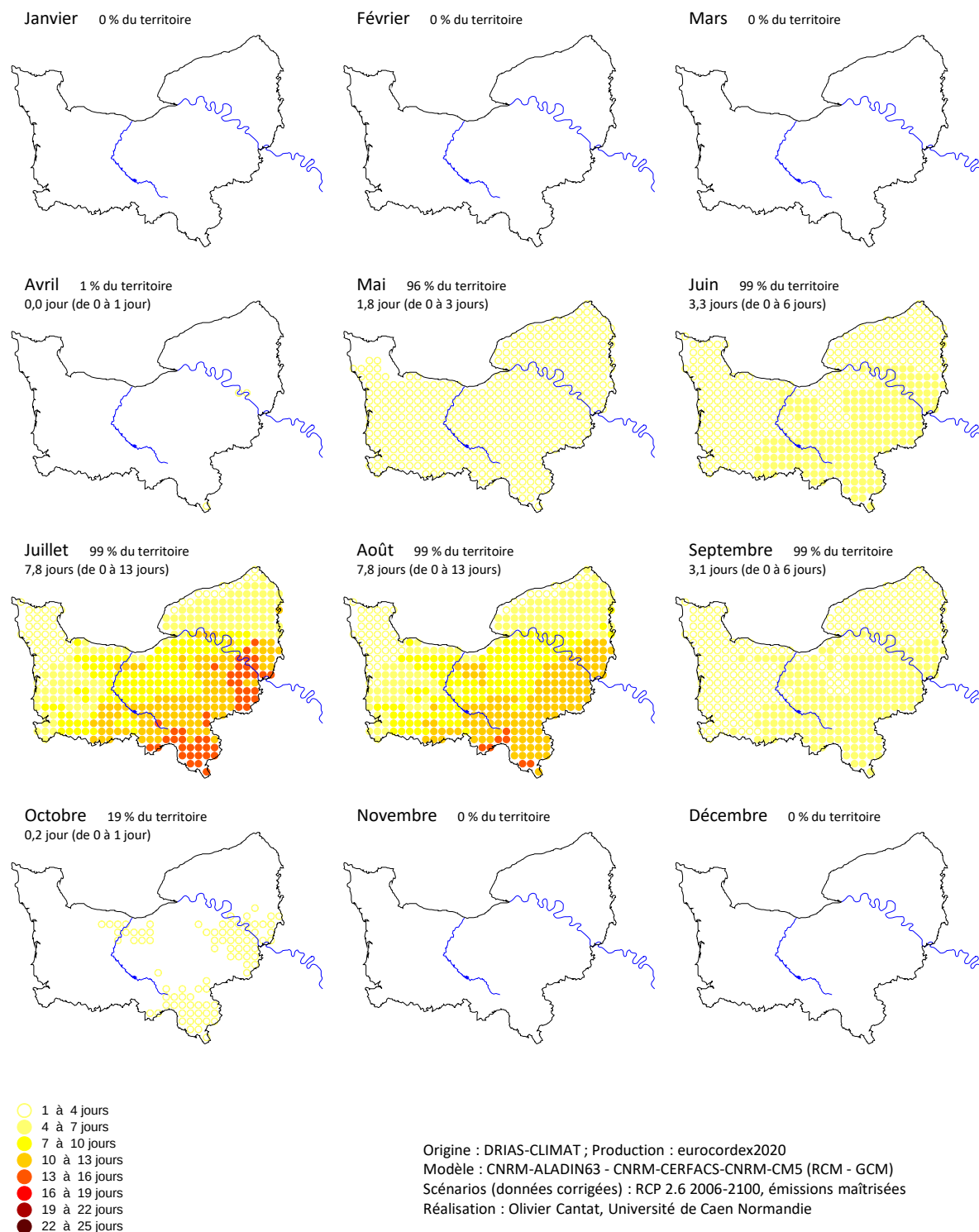
Annexe 4a : Nombre de jour de chaleur mensuel, période de référence (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

**Nombre de jours de chaleur (maxi supérieur à 25°C)
Période de référence 1976-2005**



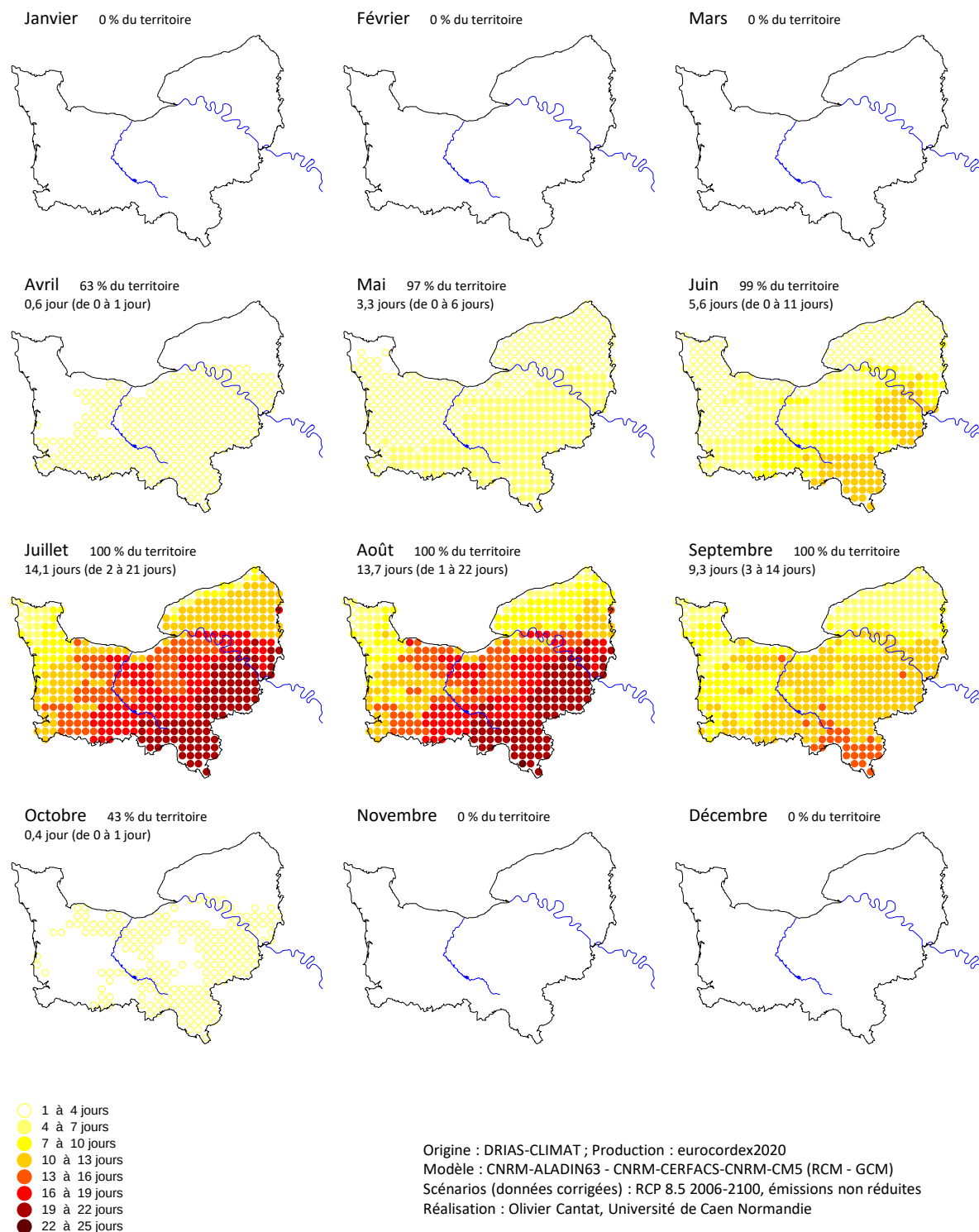
Annexe 4b : Nombre de jour de chaleur mensuel, scénario RCP 2.6 horizon 2100 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

**Nombre de jours de chaleur (maxi supérieur à 25°C)
Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 2,6 (émissions maîtrisées)**



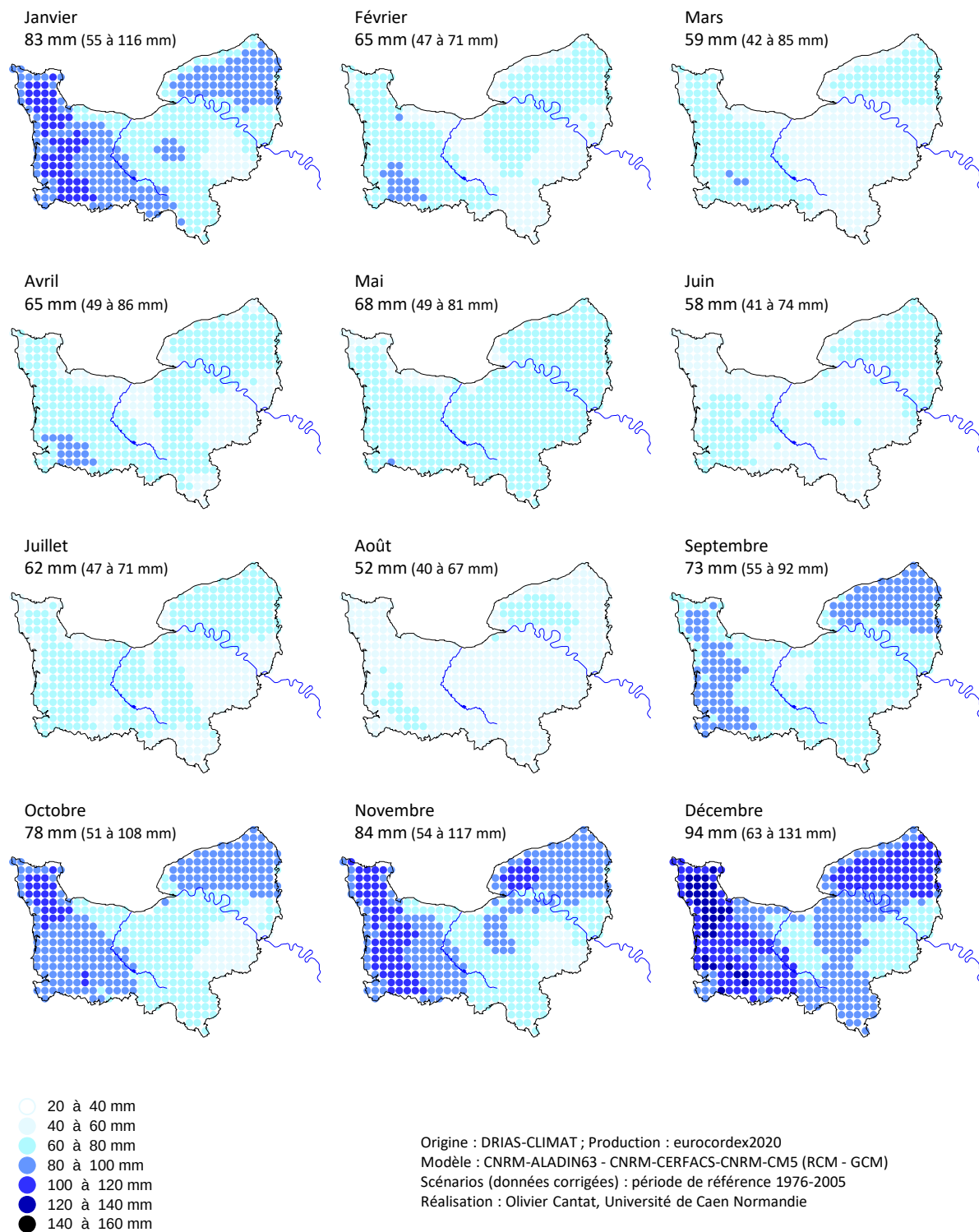
Annexe 4c : Nombre de jour de chaleur mensuel, scénario RCP 8.5 horizon 2100 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

**Nombre de jours de chaleur (maxi supérieur à 25°C)
Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 8,5 (émissions non réduites)**



Annexe 5a : Précipitations mensuelles, période de référence (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

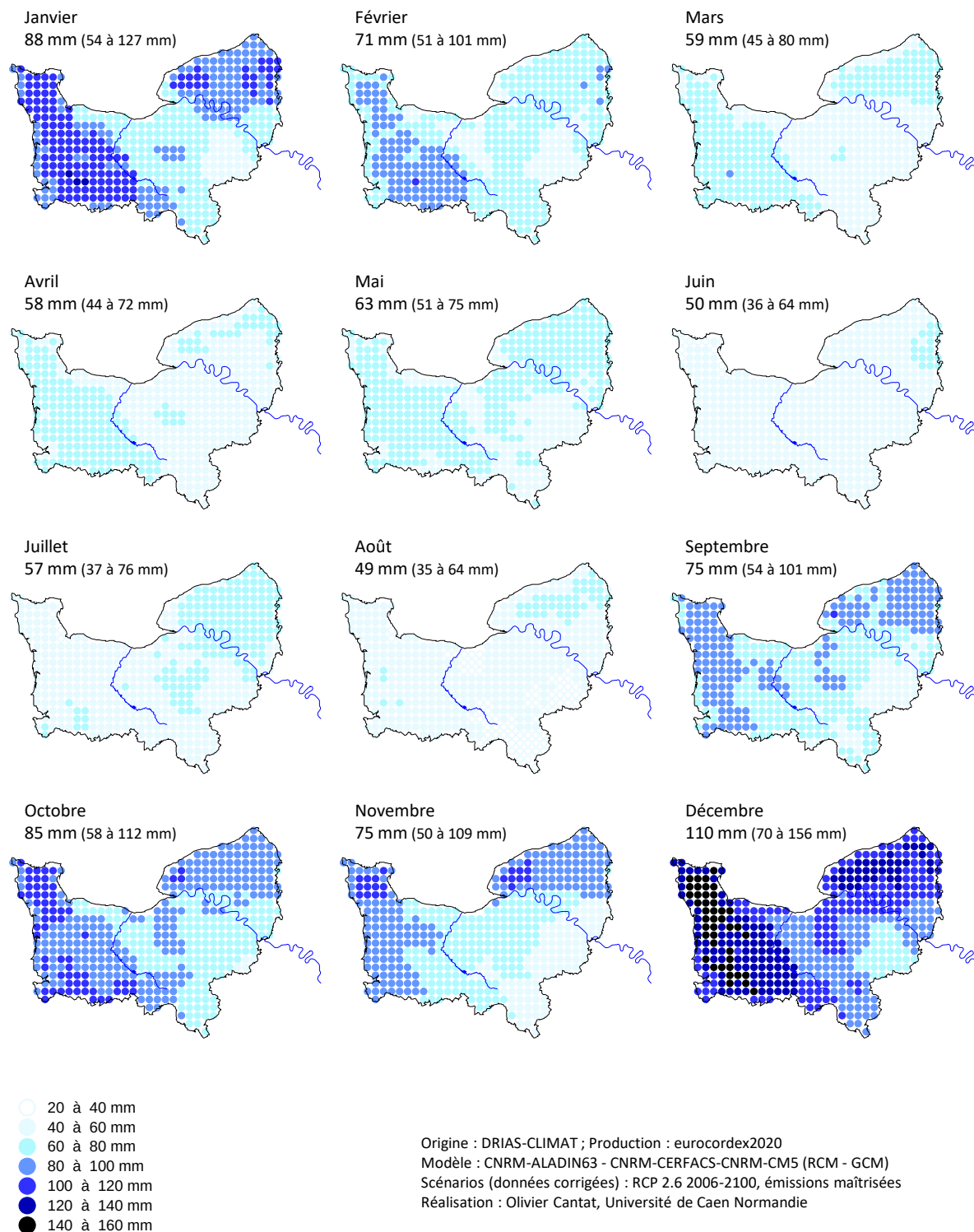
**Précipitations
Période de référence 1976-2005**



Annexe 5b : Précipitations mensuelles, scénario RCP 2.6 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024)

Précipitations

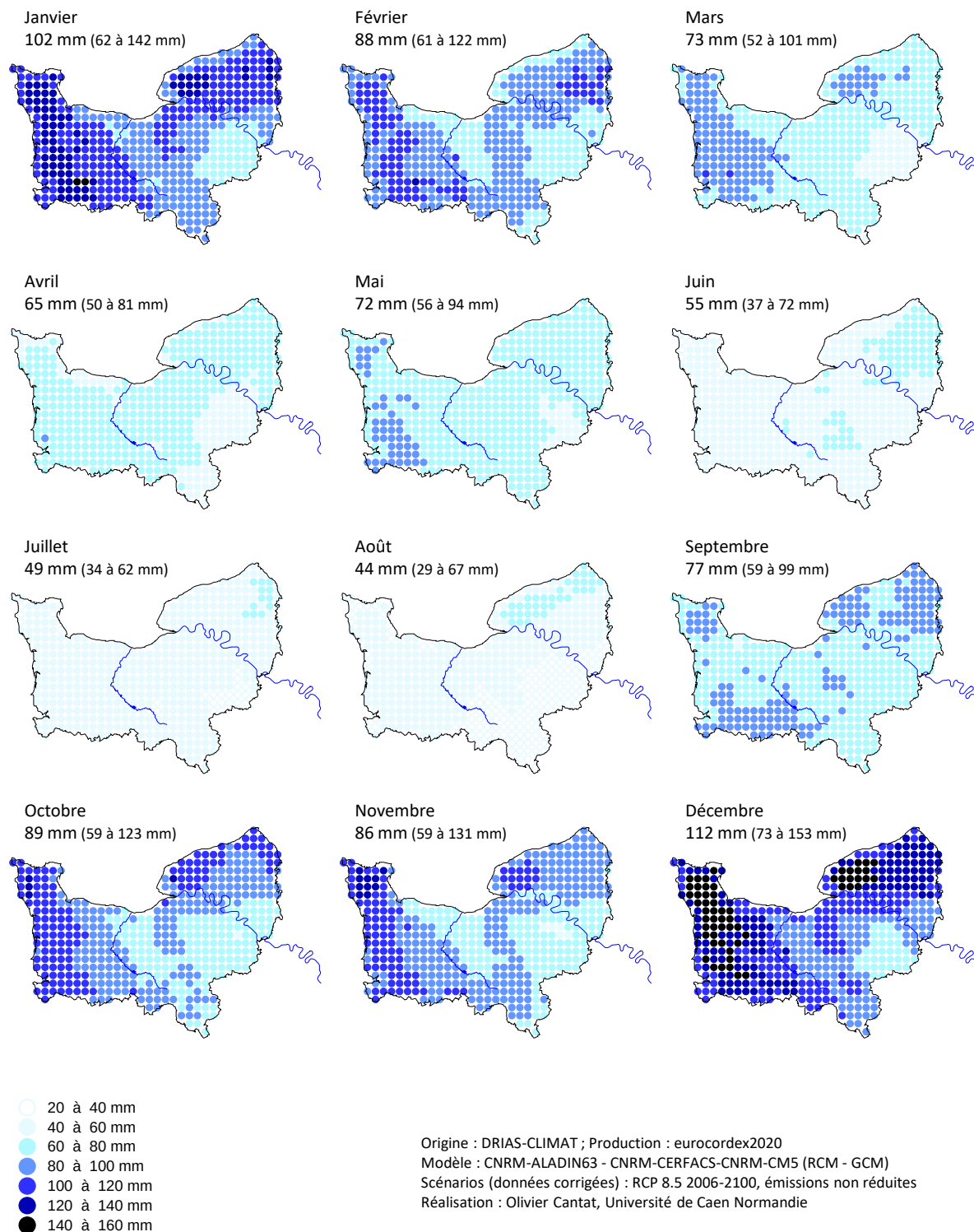
Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 2,6 (émissions maîtrisées)



Annexe 5c : Précipitations mensuelles, scénario RCP 8.5 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024)

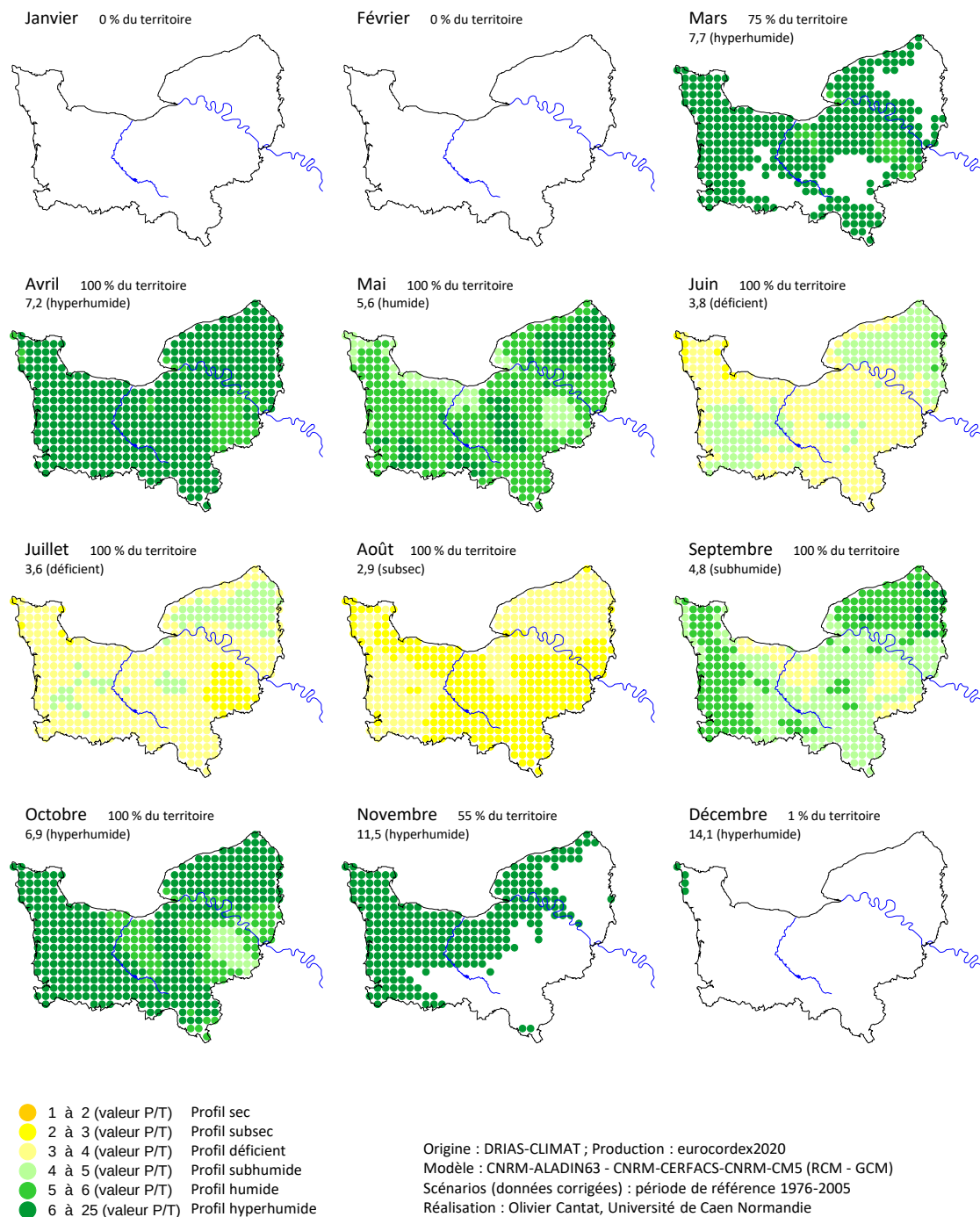
Précipitations

Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 8,5 (émissions non réduites)



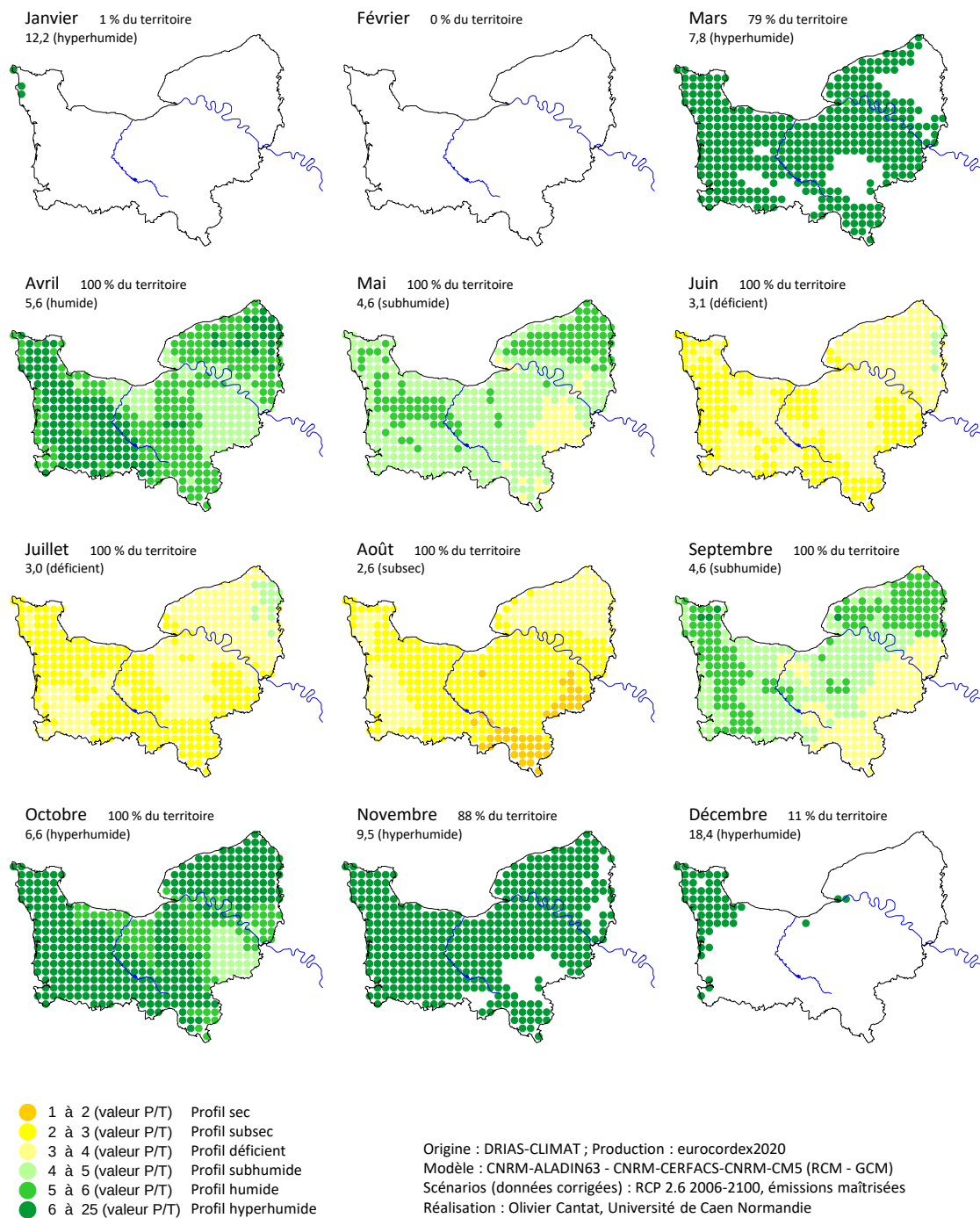
Annexe 6a : Indice bioclimatique mensuelle, période de référence (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

**Profil bioclimatique (rapport P/T si $T > \text{« zéro de végétation spécifique »}$ de 7°C)
Période de référence 1976-2005**



Annexe 6b : Indice bioclimatique mensuelle, scénario RCP 2.6 horizon 2100 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

Profil bioclimatique (rapport P/T si $T > \llcorner$ « zéro de végétation spécifique » de 7°C)
Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 2,6 (émissions maîtrisées)



Annexe 6c : Indice bioclimatique mensuelle, scénario RCP 8.5 horizon 2100 (Cantat, pour DREAL Normandie 2024).

Profil bioclimatique (rapport P/T si T > « zéro de végétation spécifique » de 7°C)
Horizon lointain (2071-2100), scénario RCP 8,5 (émissions non réduites)

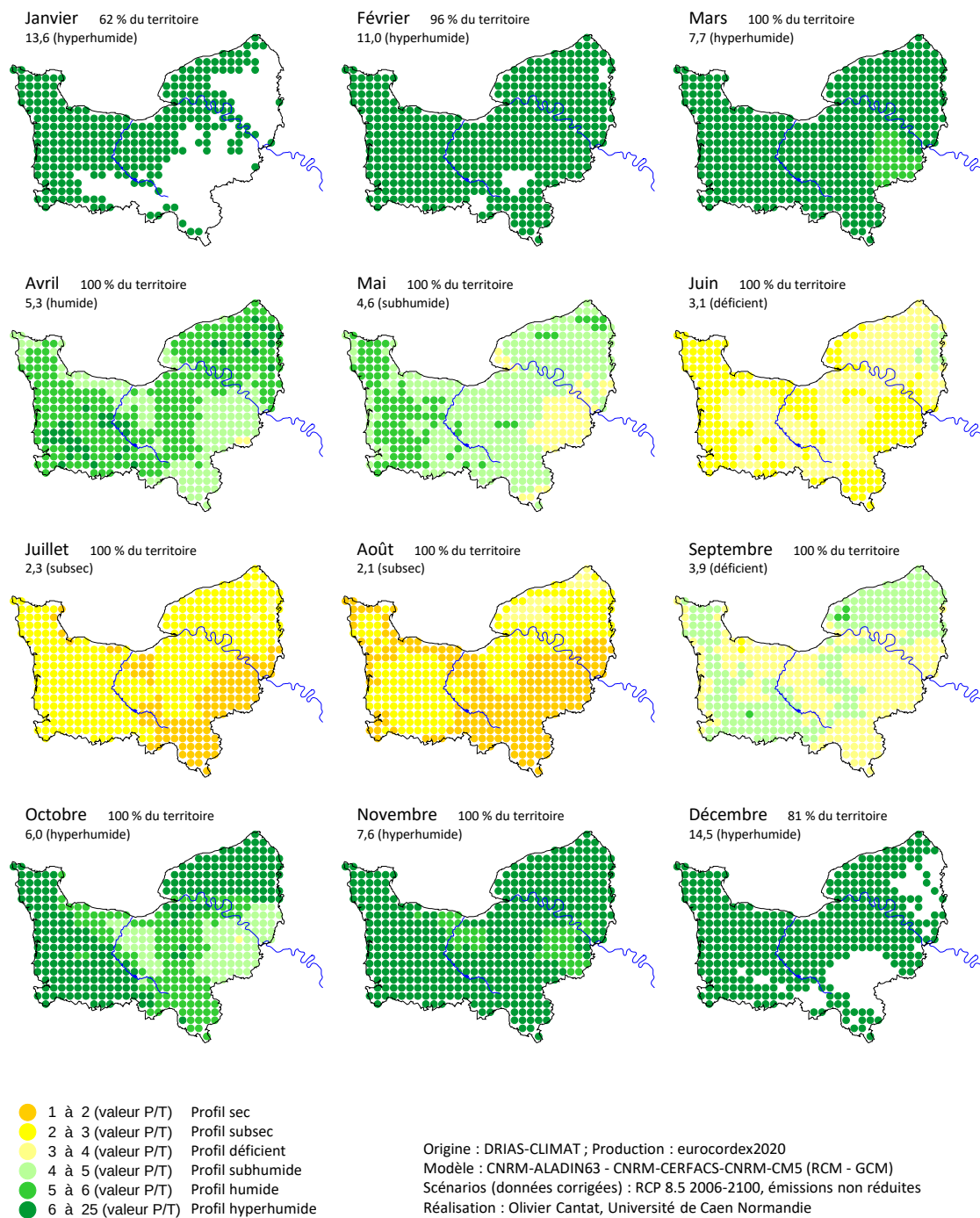


TABLE DES FIGURES (72)

GIEC Normand – Phase 2

Thème : Changement climatique et Aléas météorologiques

Figure 1 : Changements de la température de surface mondiale lors des 170 dernières années (ligne noire) par rapport à l'ère préindustrielle (1850-1900) et en moyenne annuelle, par rapport aux simulations du modèle climatique CMIP6 de la réponse de la température aux facteurs humains et naturels (rouge) et aux seuls facteurs naturels [soleil, volcanisme] (vert). Source : Copernicus, 2024.

Figure 2 : Augmentation de la température de l'air à la surface du globe par rapport à la moyenne de 1850-1900, la période de référence préindustrielle désignée, sur la base de plusieurs ensembles de données sur la température mondiale présentées sous forme de moyennes sur 5 ans depuis 1850 (à gauche) et de moyennes annuelles depuis 1967 (à droite). Crédit : C3S/ECMWF.

Figure 3 : Anomalie de la température de l'air en surface pour 2023 par rapport à la moyenne de la période de référence 1991-2020. Source des données : ERA5. Crédit : C3S/ECMWF.

Figure 4 : Synthèse de l'évaluation des changements observés dans les températures extrêmes et les fortes précipitations et confiance dans la contribution humaine aux changements observés dans les régions du monde. IPCC AR6 (p.48)

Tableau 1 : Evolution de la température de l'atmosphère à la surface de la Terre pour trois périodes de 20 ans au regard des cinq scénarios SSP étudiés par le GIEC/IPCC. Différences de température par rapport à la température moyenne de surface globale de la période 1850–1900. Source : *Résumé à l'intention des décideurs* du 1er volume de l'AR6, GIEC/IPCC, 2021.

Figure 5 : Cadre d'évaluation intégré AR6 sur le climat futur, ses impacts et son atténuation. IPCC AR6 (p.65).

Figure 6 : Température moyenne annuelle et précipitations totales annuelles en Normandie sur la Normale climatique 1991-2020. Cartographie réalisée à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Tableau 2 : Moyenne sur 54 ans (1970-2023), moyenne vicennale (1971-1990), normale climatique actuelle (1991-2020) et valeurs décennales et inter décennales des principaux paramètres climatiques, calculées à partir des données spatialisées pour les 494 points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 7 : Evolution de la température moyenne annuelle en Normandie entre 1970 et 2023, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 8 : Evolution de l'écart de la température moyenne annuelle en Normandie par rapport à la Normale climatique 1991-2020, calculée à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 9 : Evolution de la température moyenne annuelle en Normandie entre 1970 et 2023 et décomposition en deux sous périodes distinctes, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 10 : Evolution de la température moyenne saisonnière en Normandie entre 1970 et 2023, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 11 : Evolution des précipitations totales annuelles en Normandie entre 1970 et 2023, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 12 : Evolution de l'écart des précipitations totales annuelles en Normandie par rapport à la Normale climatique 1991-2020, calculées à partir des 494 données points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 13 : Localisation des 7 stations météorologiques servant de références pour l'analyse classique du changement climatique sur la période 1970-2023. Source : Flappieff, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons (modifiée et complétée, O. Cantat)

Figure 14 : Température de l'air annuelle et tendance entre 1970 et 2023. Moyennes des valeurs minimale (bleu), moyenne (gris foncé) et maximale (rouge) des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 15 : Température de l'air moyenne annuelle et tendance entre 1970 et 2023. Valeurs minimale (bleu), moyenne (gris foncé) et maximale (rouge) pour les 7 stations de référence. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 16 : Ecart à la Normale climatique actuelle 1991-2020 des températures de l'air moyennes annuelles. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 17 : Ecart à la Normale climatique actuelle 1991-2020 des températures de l'air minimales (en haut) et maximales (en bas). Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 18 : Evolution du nombre de jours de chaleur (T° maximale journalière de l'air $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (orangé), $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (rouge), $\geq 35^{\circ}\text{C}$ (noir)) à Rouen-Boos et à Caen-Carpiquet entre 1970 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 19 : Température maximales de l'air sur 10 jours consécutifs en Normandie durant la canicule de 2003. Cartographie réalisée à partir des 494 données points de grille régionaux (température maximale des 24 températures horaires). Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 20 : Evolution du nombre de jours de froid (T° minimale journalière de l'air $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (rose), $\leq -5^{\circ}\text{C}$ (parme), $\leq -10^{\circ}\text{C}$ (violet)) à Rouen-Boos et Caen-Carpiquet entre 1971 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 21 : Température minimale de l'air en Normandie durant la vague de froid de janvier 1985. Cartographie réalisée à partir des 494 données points de grille régionaux (température minimale des 24 températures horaires). Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 22 : Précipitations moyennes annuelles entre 1970 et 2023. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 23 : Ecart à la moyenne 1970-2023 des précipitations moyennes annuelles (en %). Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève) et Rouen. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 24 : Précipitations totales annuelles, moyenne 1971-1990 et Normale 1991-2020 pour les 7 stations de référence. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 25 : Evolution du nombre de jours de fortes précipitations ($\geq 20\text{ mm/j}$) à Rouen-Boos et Caen-Carpiquet entre 1971 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 26 : Evolution de la fréquence annuelle des chutes de neige à Rouen-Boos et à Caen-Carpiquet entre 1970 et 2023. Valeur annuelle (bâton) et tendance linéaire (ligne). Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 27 : Evolution du nombre de jours de brouillard (visibilité horizontale $< 1000\text{ m}$) à Rouen-Boos et à Caen-Carpiquet entre 1970 et 2023. Valeur annuelle (bâton gris) et moyennes sur plusieurs années (trait). Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 28 : Evolution du nombre de jours de vent fort (rafale $> 58\text{ km/h}$, bâton gris) et de tempête (rafales $> 102\text{ km/h}$, bâton noir) au Cap de La Hève, à Caen-Carpiquet et à Rouen-Boos entre 1981 et 2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 29 : Évolution attendue des températures de l'air moyennes annuelles en Normandie (à droite). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 30 : Évolution attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 pour les températures moyennes annuelles de l'air en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024)..

Figure 31 : Evolution des températures moyennes annuelles de l'air en Normandie entre 1970 et 2100. Courbes établies à partir de des données simulées Safran Isba sur la période historique et des projections sur les 494 points de grille correspondants sur la période 2024-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Rond (valeur annuelle) ; trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Météo-France et Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 32 : Évolution attendue des températures de l'air moyennes mensuelles en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat). Voir annexe 3 en pleine page.

Figure 33 : Évolution attendue des températures moyennes mensuelles en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 34 : Évolution attendue du nombre de jours de chaleur en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 35 : Évolution attendue du nombre de jours de chaleur par mois en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 4 en plein page.

Figure 36 : Évolution attendue des gelées en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 37 : Évolution attendue du cumul pluviométrique annuel en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 38 : Evolution du cumul annuel de précipitations en Normandie entre 1970 et 2100. Courbes établies à partir des données simulées Safran Isba sur la période historique 1970-2023 et des projections sur les 494 points de grille correspondants sur la période

2024-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Rond (valeur annuelle) ; trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Météo-France et Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 39 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 (en %) de la pluviométrie en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 40 : Évolution attendue des cumuls moyens mensuels de précipitations en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 5 en pleine page.

Figure 41 : Évolution attendue des cumuls moyens mensuels de précipitations en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 42 : Évolution attendue du nombre de jours de vague de chaleur en Normandie (nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale de 5°C à la température maximale quotidienne de référence (1976-2005), dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 43 : Évolution attendue des extrêmes chauds en Normandie (10% des jours les plus chauds). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 44 : Évolution attendue du nombre de jours de très forte chaleur en Normandie (température maximale supérieure à 35°C). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 45 : Evolution des jours de très forte chaleur (35°C) en Normandie de 1970 à 2100. Courbes établies à partir des données modélisées Drias sur la période historique 1970-2005 et des projections sur les 494 points de grille correspondants sur la période 2006-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Rond (valeur annuelle) ; trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 46 : Évolution attendue du nombre de nuits tropicales en Normandie (nombre de jours avec une température minimale supérieure à 20°C). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 47 : Fréquence et intensité des températures extrêmes chaudes sur la Normandie pendant la Normale 2071-2100. Scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 48 : Évolution attendue du nombre de jours de vague de froid en Normandie (nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale de 5°C à la température minimale quotidienne de référence (1976-2005), dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Fig. 49 : Évolution attendue des extrêmes froids en Normandie (10% des jours les plus froids). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Tableau 6 : Évolution attendue du froid (mini $\leq 0^{\circ}\text{C}$), de l'absence de dégel (maxi $\leq 0^{\circ}\text{C}$) et des vagues de froid en Normandie pour 7 points de grille (nombre de jours). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 50 : Occurrences totales et intensité des températures extrêmes froides sur la Normandie durant la Normale 2071-2100. Scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 51 : Évolution attendue de la durée maximale des périodes de sécheresse en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 52 : Évolution attendue de l'évapotranspiration potentielle en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 53 : Évolution attendue des écarts à la référence 1976-2005 de l'évapotranspiration potentielle en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 54 : Évolution attendue de la date moyenne de reprise de végétation pour la prairie en Normandie (1^{er} jour où le seuil de 200°C est atteint : somme de température base 0°C depuis le 1^{er} janvier). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 55 : Évolution attendue de la date moyenne de dernière gelée en Normandie (« sortie d’hiver »). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 56 : Évolution attendue de l’indice bioclimatique en Normandie (calcul du rapport des précipitations sur les températures moyennes sur la période végétative d’avril à octobre). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 57 : Évolution attendue de l’indice bioclimatique moyen mensuel en Normandie pour un zéro de végétation de 7°C. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024). Voir annexe 6 en pleine page.

Figure 58 : Évolution attendue du nombre de jours de fortes précipitations (seuil de 20 mm/jour) en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 59 : Évolution attendue du nombre de jours de précipitations extrêmes en Normandie (nombre de jours où les précipitations quotidiennes dépassent le 99^e centile des précipitations totales de la période considérée). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 60 : Évolution attendue de la fraction des précipitations quotidiennes intenses en Normandie (90^e centile). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 61 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne (en %) des précipitations intenses (au-dessus du 90^e centile annuel) en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l’horizon lointain 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 62 : Évolution attendue du nombre de jours de tempête (rafales supérieures à 100 km/h) sur le point de grille correspondant au site exposé du Havre Cap de La Hève de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 63 : Évolution attendue de l’intensité des vents forts en Normandie (valeur du 98^e centile des vitesses du vent). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l’horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat, DREAL 2024).

Figure 64 : Exemples de stations météorologiques expérimentales dans différents contextes urbains normands. Réseau IDEES Caen, Caen la mer, Ville de Bayeux et Ville de Colomby-Anguery (photographies O. Cantat).

Figure 65 : Intensité journalière maximale et minimale de l’îlot de chaleur urbain à Caen entre le 22 avril 2022 et le 15 septembre 2024. Ecart de la température sous abri entre la Place Bouchard et la Prairie. Réseau d’observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

Figure 66 : Rythme et intensité de l’îlot de chaleur urbain caennais en fonction des types de temps. Comparaison de l’écart entre la ville (Place Bouchard) et la campagne (Prairie) lors d’un épisode clair et calme (du 29 au 31 mai 2022) et lors d’un épisode couvert et venteux (du 27 au 29 avril 2022). Réseau d’observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

Figure 67 : Pourcentage des types de temps favorables et défavorables à la formation des ICU à Caen sur la période 2001-2023. Dénombrement des combinaisons simultanées entre l’état du ciel et la vitesse du vent (le critère « très favorable » (TF) correspond à une fraction d’insolation journalière supérieure à 66% et un vent moyen journalier inférieur à 3 m/s). Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Figure 68 : Température de l’air sous abri et écart avec la valeur de référence de la Prairie dans la nuit du 13 avril 2024 sur l’agglomération caennaise. Réseau d’observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

Figure 69 : Température de l’air sous abri pour 3 stations représentatives de l’agglomération caennaise. Evolution entre le 21 juillet 2022 à 18 h UTC et le 22 juillet 2022 à 8h h UTC et le 13 avril 2024 à 9h UTC. Réseau d’observation IDEES Caen (réalisation O. Cantat).

Figure 70 : Nombre de « nuits tropicales » (minimum supérieur à 20°C) à Caen entre 1961 et 2023 selon la simulation Safran Isba et projection à l’horizon 2100 selon le scénario élevé RCP 8.5 (point de grille n° 1048, expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Figure 71 : Descente d’échelle pour la température moyenne annuelle du PNR du Perche sur la période de référence 1976-2005. Données DRIAS-2020 CNRM Météo France et IGN (réalisation L Parey, Master GAED Environnement, Université de Caen Normandie et PNR du Perche).

Figure 72 : Vue 3D de la température moyenne annuelle du PNR des Boucles de la Seine sur la période de référence 1976-2005 et à l’horizon 2100 selon le scénario RCP 8.5. Données DRIAS-2020 CNRM Météo France et IGN (réalisation L Parey, Master GAED Environnement, Université de Caen Normandie et PNR du Perche).

TABLE DES TABLEAUX (9)

GIEC Normand – Phase 2

Thème : Changement climatique et Aléas météorologiques

Tableau 1 : Evolution de la température de l'atmosphère à la surface de la Terre pour trois périodes de 20 ans au regard des cinq scénarios SSP étudiés par le GIEC/IPCC. Différences de température par rapport à la température moyenne de surface globale de la période 1850–1900. Source : *Résumé à l'intention des décideurs* du 1er volume de l'AR6, GIEC/IPCC, 2021.

Tableau 2 : Moyenne sur 54 ans (1970-2023), moyenne vicennale (1971-1990), normale climatique actuelle (1991-2020) et valeurs décennales et inter décennales des principaux paramètres climatiques, calculées à partir des données spatialisées pour les 494 points de grille régionaux. Données Safran Isba, Météo-France (réalisation O. Cantat).

Tableau 3 : Evolution de la température moyenne de l'air sur 54 ans (de 1970 à 2023), calculée à partir de tendances linéaires et des valeurs moyennes décennales pour 7 stations météorologiques régionales. Données Météo-France (réalisation O. Cantat).

Tableau 4 : Evolution des épisodes de très forte chaleur diurne et nocturne en Normandie sur la période 1970-2023. Données Météo-France (réalisation O. Cantat)

Tableau 5 : Évolution attendue de la chaleur (maxi $\geq 25^{\circ}\text{C}$), de la très forte chaleur (maxi $\geq 35^{\circ}\text{C}$), des nuits tropicales (mini $\geq 20^{\circ}\text{C}$) et des vagues de chaleur en Normandie (nombre de jours) pour 7 points de grille. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Tableau 6 : Évolution attendue du froid (mini $\leq 0^{\circ}\text{C}$), de l'absence de dégel (maxi $\leq 0^{\circ}\text{C}$) et des vagues de froid en Normandie pour 7 points de grille (nombre de jours). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Tableau 7 : Évolution attendue du nombre de jours avec chute de neige et hauteur cumulée en Normandie pour la période 2071-2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 pour les 7 points de grille (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Tableau 8 : Évolution attendue de l'évapotranspiration potentielle (en mm) et du nombre de jours évaporants et très évaporants en Normandie pour 7 points de grille. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

Tableau 9 : Synthèse sur l'évolution attendue de plusieurs paramètres climatiques en Normandie selon deux scénarios d'émission en GES du GIEC/IPCC (RCP 2.6 et 8.5) à l'horizon 2100 (expérience Météo France CNRM 2020 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias-2020 (réalisation O. Cantat).

