

GIEC Normand

Thème : Changement climatique et Aléas météorologiques

O. Cantat (LETG Caen), B. Laignel (M2C Rouen),
Z. Nouaceur (IDDES M2C), S. Costa (LETG Caen)

Introduction

La détermination de l'impact du changement climatique constitue aujourd'hui un enjeu mondial majeur de société à laquelle l'ensemble des acteurs (scientifiques, élus, gestionnaires et citoyens), quelle que soit l'échelle (internationale, nationale, régionale ou locale), doivent répondre, afin de permettre la mise en place de mesures conjointes d'atténuation et d'adaptation appropriées à chaque situation de chaque territoire. L'autorité scientifique est représentée par le GIEC ou IPCC (en anglais) 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 ou selon la nature des outils utilisés, les résultats de l'IPCC/GIEC (2007, 2013) montrent que le réchauffement climatique et ses conséquences sont sans équivoque. En effet, depuis l'époque préindustrielle, la température moyenne à la surface du globe pour la décennie 2006-2015 a été supérieure en moyenne de 0,87 °C (avec une fourchette probable comprise entre +0,75°C et +0,99°C) à la température moyenne pour la période 1850-1900. D'après le programme européen de surveillance de la Terre « Copernicus », les cinq dernières années, de 2015 à 2019, sont les plus chaudes jamais enregistrées avec un excédent entre 1,1 et 1,2 °C au-dessus de la température de l'ère préindustrielle (Fig. 1). La décennie 2010-2019 a également été la plus chaude depuis le début des mesures.

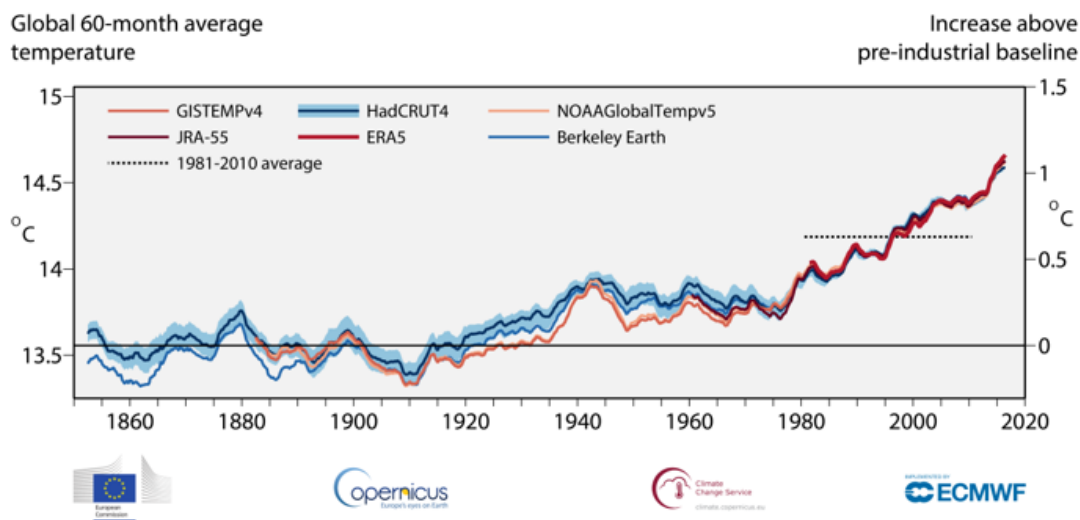


Figure 1 : Moyennes sur 60 mois de la température mondiale de l'air à une hauteur de deux mètres (axe de gauche) et des changements estimés depuis la période préindustrielle (axe de droite) selon différents ensembles de données : ERA5 (ECMWF Copernicus Climate Change Service, C3S) ; GISTEMPv4 (NASA) ; HadCRUT4 (Met Office Hadley Center) ; NOAA GlobalTempv5 (NOAA), JRA-55 (JMA) ; et Berkeley Earth. Source : Copernicus, 2020.

Les projections à l'horizon 2100 indiquent une élévation de cette température entre +1,6 et +4,3 °C selon les moyennes des scénarios et des modèles et de +0,9 à +5,4°C si l'on considère l'ensemble de la fourchette des scénarios et des modèles (IPCC, rapport spécial intermédiaire, 2019).

Les précipitations moyenne mondiale présentent 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 29 et 110 cm, 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...

Ces projections sont les conséquences de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère selon différents scénarios socio-économiques (Fig. 2). Quatre scénarios de trajectoire du forçage radiatif liés aux émissions de gaz à effet de serre ont été ainsi définis : les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway). Ceux-ci vont du plus optimiste, supposant la mise en application immédiate d'une politique climatique à l'échelle internationale (RCP 2.6), au plus pessimiste car sans politique climatique (RCP 8.5), en passant par des scénarios intermédiaires (RCP 4.5 et 6.0).

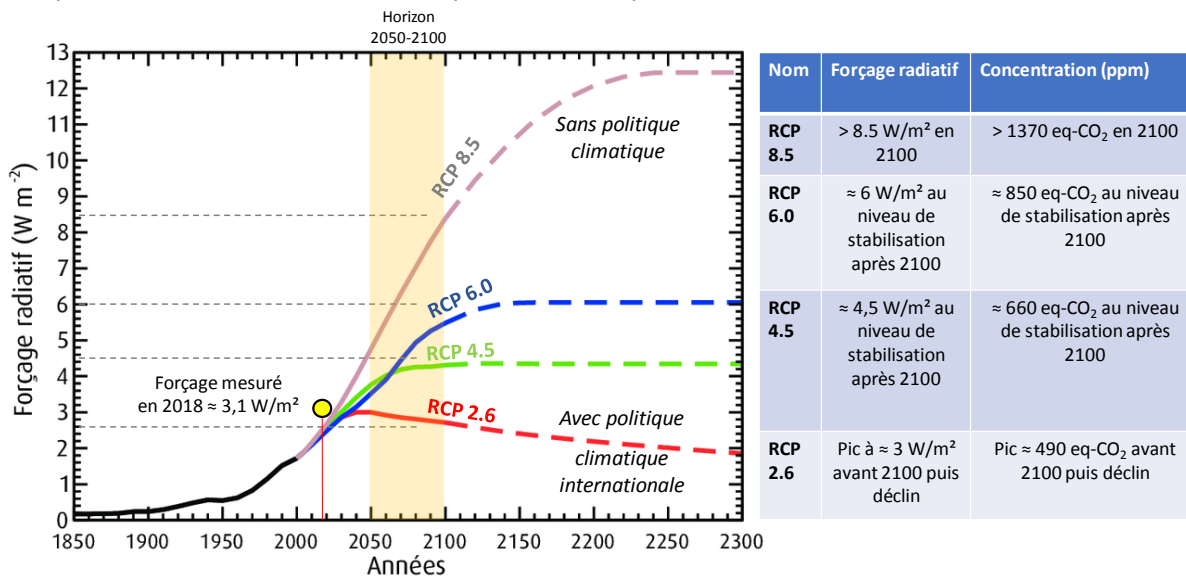


Figure 2 : Évolution du forçage radiatif total et global (W/m²) pour la période historique (1850-2005), valeur du forçage en 2018, les quatre scénarios RCP (2005-2100) et leurs extensions jusqu'à 2300. Le forçage radiatif est exprimé par rapport à l'année de référence 1750. Sources GIEC 2014 et Drias, complété et adapté (réalisation d'O. Cantat).

Encadré 1 : Quelques éléments de base sur les scénarios climatiques...

Scénario climatique : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/111>

Représentation vraisemblable et souvent simplifiée du futur climat, fondée sur un ensemble intrinsèquement cohérent de relations climatologiques, établie pour l'étude explicite des conséquences possibles des changements climatiques, et composante fréquente des modèles sur les incidences. Les projections climatiques constituent fréquemment la matière première des scénarios climatiques, mais, en général, ces derniers nécessitent des données complémentaires, de type données climatiques réelles. Un « scénario de changements climatiques » est la différence entre un scénario climatique et le climat réel (GIEC,2007)

Scénario de forçage radiatif : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/113>

Représentation plausible du futur développement du forçage radiatif associé, par exemple, à des changements de la composition de l'atmosphère ou des changements d'affectation des terres, ou à des facteurs externes tels que des variations de l'activité solaire. Les scénarios de forçage radiatif peuvent être utilisés comme données dans des modèles climatiques simplifiés pour le calcul de projections climatiques (GIEC,2007)

Qu'est-ce que le forçage radiatif ? <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/175>

Exprimé en W/m², un forçage radiatif est un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère (situé entre 10 et 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat – comme la concentration des gaz à effet de serre.

Scénarios RCP : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/175>

Les scénarios RCP sont quatre scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif (cf. figure et tableau ci-dessous) sur la période 2006-2300. Leur sélection a été effectuée par les scientifiques sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature. Le RCP 8.5, le plus pessimiste, n'est dépassé que par environ 10% des hypothèses envisagées, tandis que le plus favorable, le scénario RCP 2.6, ne dépasse que près de 10% d'entre elles.

Au plan national, le projet DRIAS (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 des régions françaises, sur la base des scénarios RCP du cinquième rapport du GIEC (IPCC/GIEC, 2013), 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).

Les études récentes menées à l'échelle de la Normandie¹ 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 ; Projet DRIAS...) synthétisées dans le cadre du GIEC normand, du GIEC de la Métropole Rouen Normandie (Laignel et Nouaceur, 2018 ; Laignel et al., 2020) 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 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 (1970-2019) incluant l'accélération du changement climatique contemporain amorcé dans la fin des années 1980, et pour le futur jusqu'à l'horizon 2100 sur les données de projections climatiques du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre proposés par le GIEC : 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.

Le modèle retenu ici pour illustrer les changements climatiques du futur – en l'état actuel des connaissances scientifiques – est Aladin (expérience Météo-France CNRM 2014) dont les données sont toutes disponibles sur le portail Drias, les futurs du climat. Les analyses prospectives sont issues de la comparaison des « normales climatiques » des horizons moyen (2041-2070) et 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 1976 et 2100.

Pour l'analyse des changements contemporains sur la période 1970-2019, les données Météo-France utilisées sont celles de huit stations fiables et représentatives de la diversité climatique régionale : Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. Des précisions sont apportées pour les stations de Caen-Carpiquet et de Rouen-Boos.

¹ Indépendamment du changement climatique contemporain et à venir au cours du 21^e siècle, une présentation globale du climat normand dans sa diversité régionale est proposée sous la forme d'un texte de synthèse (annexe 1) et d'une carte de synthèse (annexe 2). Travaux réalisés dans le cadre de la préparation du fascicule « Le climat en Normandie » du Profil environnemental de Normandie (DREAL Normandie, 2020).

1. Evolution du climat en Normandie au cours des dernières décennies : analyse des données historiques

1.1. Evolution des températures atmosphériques

Depuis les années 1980, la température a augmenté sur toutes les stations météorologiques normandes, de l'ordre de +0,6 à +0,8°C entre la période de référence actuelle 1981-2010 et la précédente 1951-1980 (selon la méthodologie utilisée par le GIEC pour la définition des anomalies de température).

L'utilisation d'un autre indicateur, fondé sur la réalisation de tendance linéaire sur 8 stations normandes bénéficiant de longues séries continues et fiables (Fig. 3), met en évidence une augmentation moyenne de la température de +1,7°C entre 1970 à 2019 (Tabl. 1 et Fig. 4). Sur cette même période de 50 ans, l'écart entre la période décennale 1970-1979 (le « passé ») et 2010-2019 (le « présent ») montre une élévation de +1,3°C. Ces deux indicateurs n'étant pas ceux utilisés par le GIEC pour définir les anomalies de températures, il convient de pas comparer directement ces résultats avec ceux du GIEC.

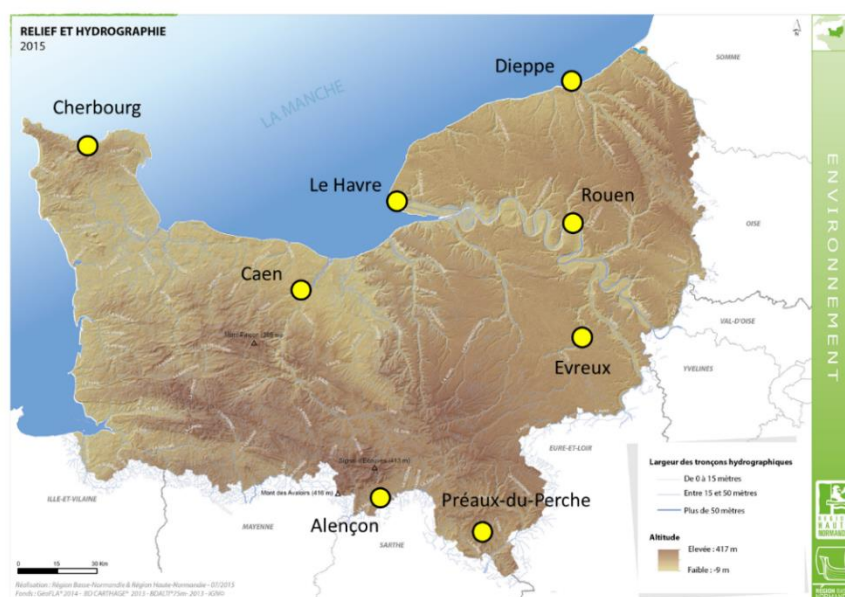


Figure 3 : Localisation des 8 stations météorologiques servant de références pour le calcul de la moyenne régionale sur la période 1970-2019. Source : fond topographique Région Normandie.

	Caen	Rouen	Alençon	Evreux	Cherbourg	Préaux	Dieppe	La Hève	Région
moyenne 1970-2019	11.1°C	10.5°C	11.0°C	10.7°C	10.7°C	10.7°C	11.0°C	11.4°C	10.9°C
tendance linéaire	+1.2°C	+2.0°C	+1.4°C	+1.7°C	+1.8°C	+1.6°C	+1.4°C	+1.9°C	+1.7°C
écart interdécennal	+1.1°C	+1.4°C	+1.0°C	+1.3°C	+1.0°C	+1.8°C	+1.1°C	+1.3°C	+1.3°C
valeur décennale									
décennie 1 : 1970-1979	10.4°C	9.8°C	10.5°C	9.9°C	10.1°C	9.7°C	10.4°C	10.7°C	10.2°C
décennie 2 : 1980-1989	10.8°C	9.8°C	10.5°C	10.3°C	10.3°C	10.1°C	10.5°C	10.9°C	10.4°C
décennie 3 : 1990-1999	11.3°C	10.5°C	11.0°C	10.8°C	10.8°C	10.9°C	11.0°C	11.5°C	11.0°C
décennie 4 : 2000-2009	11.6°C	11.0°C	11.4°C	11.2°C	11.2°C	11.3°C	11.5°C	11.9°C	11.4°C
décennie 5 : 2010-2019	11.5°C	11.2°C	11.5°C	11.2°C	11.1°C	11.5°C	11.5°C	12.0°C	11.5°C

Tableau 1 : Evolution de la température de l'air sur 50 ans (de 1970 à 2019), calculée à partir de tendances linéaires et des valeurs moyennes décennales pour 8 stations météorologiques régionales. Données Météo-France (traitement d'O. Cantat).

La tendance régionale montre un réchauffement légèrement plus marqué sur les valeurs maximales (se produisant généralement en milieu d'après-midi) avec $+1,9^{\circ}\text{C}$, que sur les valeurs minimales (en fin de nuit généralement) avec $+1,6^{\circ}\text{C}$.

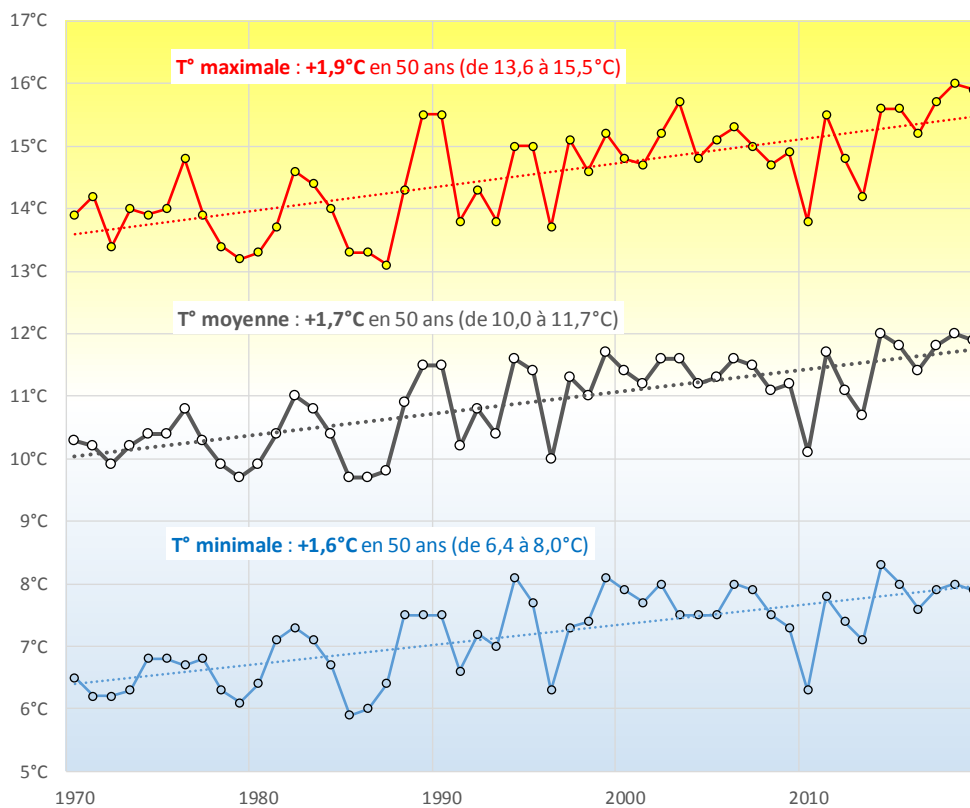


Figure 4 : Température de l'air moyenne annuelle et tendance entre 1970 et 2019. Moyennes des valeurs minimale (bleu), moyenne (gris foncé) et maximale (rouge) des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

La chronique année après année des écarts à la moyenne cinquantennale 1970-2019 souligne un changement à partir de la fin des années 1980, avec des valeurs qui deviennent quasiment toujours positives traduisant l'apparition des années les plus chaudes (Fig. 5). On note un léger fléchissement du réchauffement autour de 2010 et une nouvelle accélération sur les dernières années de la série : les cinq années les plus chaudes depuis 1971 sont toutes postérieures à 2014 (2014, 2015, 2017, 2018, 2019).

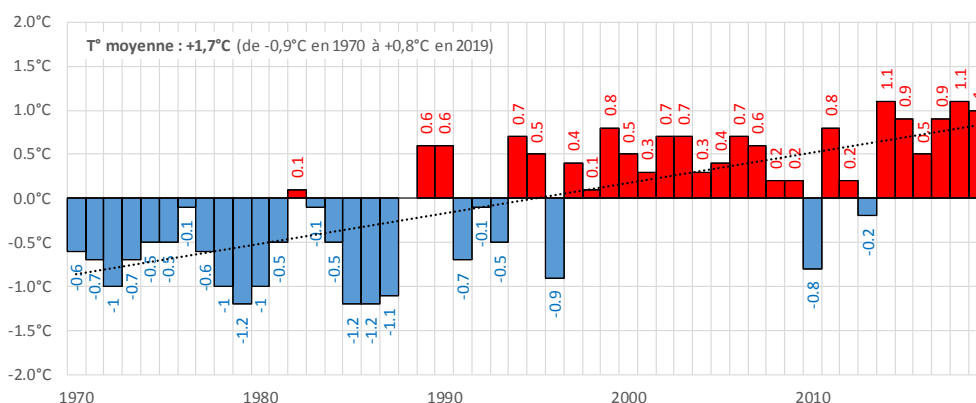


Figure 5 : Ecart à la moyenne 1970-2019 des températures de l'air moyennes annuelles. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

La décomposition de la température moyenne régionale en ses valeurs minimales et maximales (Fig. 6) confirme l'ampleur d'un phénomène plus accentué sur les données diurnes - avec des écarts à la moyenne 1970-2019 jusqu'à +1,5°C ces deux dernières années - que sur les données nocturnes (jusqu'à +1,1°C).

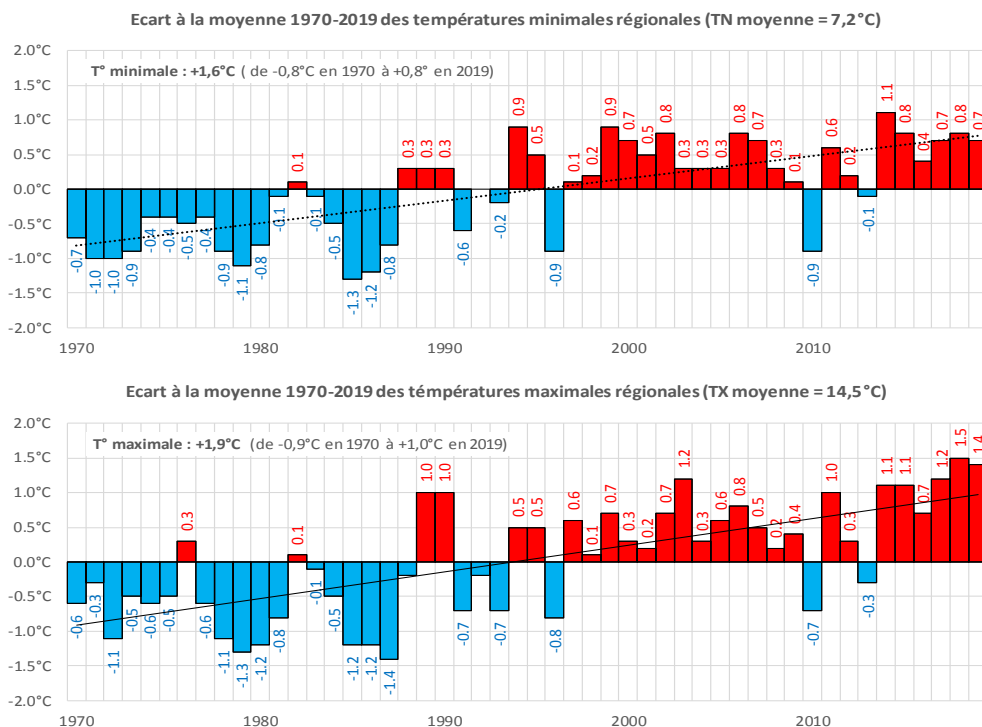


Figure 6 : Écart à la moyenne 1970-2019 des températures de l'air minimales (en haut) et maximales (en bas). Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

1.2. 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 2019 soulignent ces tendances régionales au cours des cinq dernières décennies.

La chaleur

Pour la *chaleur* la tendance croissante est très nette (Fig. 7), avec par exemple le passage entre 1971 et 2019 d'environ 15 à 28 jours avec plus de 25°C dans la journée à Caen, et de 15 à 35 jours à Rouen. Sur ce paramètre, la pente de la droite de régression plus redressé de Rouen traduit bien ici aussi le réchauffement plus marqué de ce secteur intracontinentale 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, durant ces vingt dernières années, la valeur de 35°C a ainsi été franchie 12 fois, alors que cet aléa n'avait été observé qu'à 2 reprises dans les trente années précédentes (1971-2000). A Rouen, entre la période de pré-réchauffement contemporain 1971-1990 et la période actuelle de même durée 2000-2019, les *fortes chaleurs* ont plus que doublé de fréquence (de 58 à 121 fois). Pour les *très fortes chaleurs*, sur les deux mêmes périodes, l'occurrence est passée de 1 fois (en 1990) à 12 fois (dont la moitié des cas durant ces 5 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, et dont les conditions vécues sont beaucoup plus étouffantes que sur le plateau éventé de Boos). Lors du pic de la canicule de l'été 2019, de très nombreux records absolus de chaleur furent battus en France et la station urbaine de Rouen-Jardin enregistra 43,0°C, contre 41,3°C à Boos, et « seulement » 39,7°C sur l'aéroport de Caen.

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 dans l'été et 10 fois à Rouen. Mais le phénomène le plus marquant est bien l'accumulation ces dernières années de chaleur persistant longtemps : 40 jours ou plus dépassant les 25°C à Caen observés 3 fois et uniquement sur le 21^e siècle (2003, 2006 et 2018), et 9 fois à Rouen en 1976, 1983, 1995, 2003, 2006, 2013 et de façon consécutive ces 3 dernières années (2017-2018-2019).

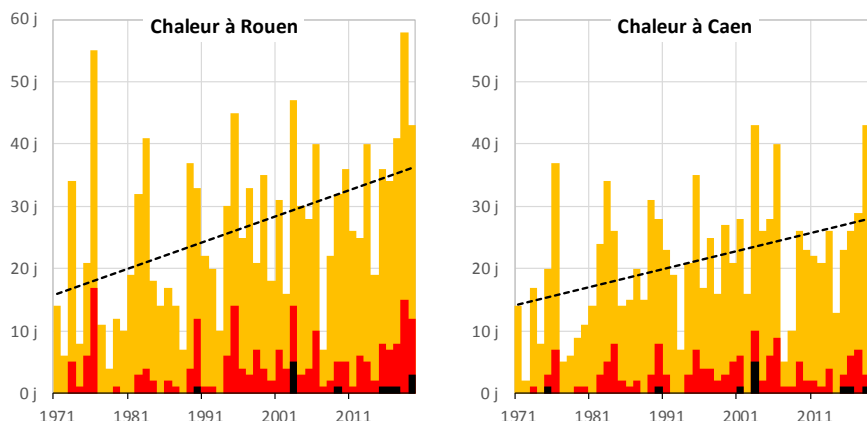


Figure 7 : Evolution du nombre de jours de chaleur (T° maximale journalière de l'air $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (orangé), $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (rouge), $\geq 35^{\circ}\text{C}$ (noir)) à Rouen-Boos et à Caen-Carpique entre 1971 et 2019. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

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), mais le concept intègre maintenant les valeurs minimales, dans la mesure où celles-ci conditionnent la phase de récupération physiologique nocturne. 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 la Manche, ce qui limite en intensité et en durée ces épisodes extrêmes (Cantat, 2005b). Du fait de l'océanité, les écarts entre le NO et le SE de la région peuvent être considérables, à l'image de l'ex Basse-Normandie durant l'été 2003 où sur 10 jours consécutifs le différentiel moyen des températures maximales dépassa 12°C entre le nord du Cotentin (24°C) et le Perche (36°C) (Fig. 8).

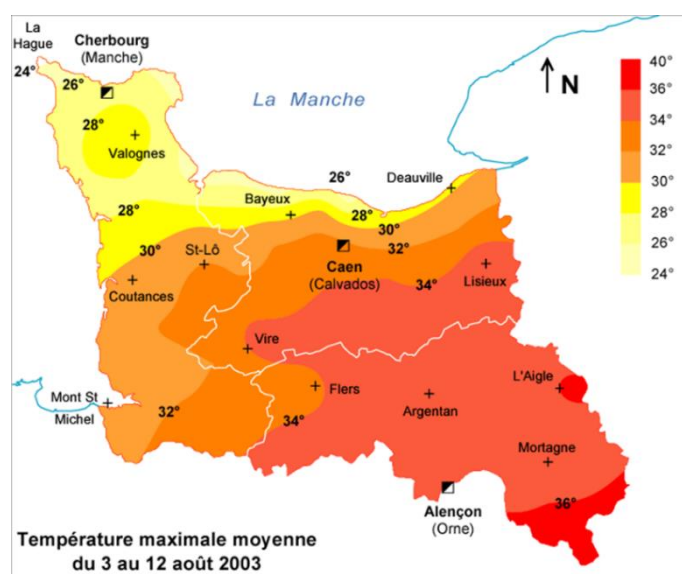


Figure 8 : Température de l'air maximale moyenne sur 10 jours consécutifs en ex Région Basse-Normandie durant la Canicule de 2003. Données Météo-France (Cantat, 2005b)

En ne prenant pas en compte la durée consécutive de 3 jours minimum de pic de température supérieure à 35°C, l'aléa canicule varie de 0 à 11 jours en 50 ans, des côtes vers les confins continentaux de la région (Tabl. 2a). Et même en appliquant les seuils thermiques départementaux - tenant compte du contexte climatique local plus frais - les cas sont rares et traduisent bien le rôle majeur de l'océanité : de 5 à 23 jours en 50 ans, du Cotentin vers le Perche (Tabl. 2b).

Nombre total d'observations entre 1970 et 2019 (et entre parenthèses décomposition 1970-1994 / 1995-2019)									
	a) seuil thermique national commun / canicule					b) seuil thermique relatif au contexte départemental			
	<u>condition 1</u> min >=20°C	<u>condition 2</u> max >= 33°C	2 conditions simultanées	<u>condition 3</u> 3 j de suite	seuils T mini et T maxi	<u>condition 1</u>	<u>condition 2</u>	2 conditions simultanées	<u>condition 3</u> 3 j de suite
Cherbourg	2 (0+2)	2 (0+2)	0 (0+0)	non retenue	18°C et 31°C	28 (7+21)	12 (3+9)	5 (2+3)	non retenue
Caen	4 (2+2)	33 (6+27)	1 (0+1)	non retenue	18°C et 31°C	61 (20+41)	104 (33+71)	12 (3+9)	non retenue
Evreux	20 (7+13)	85 (23+62)	11 (3+8)	non retenue	19°C et 34°C	59 (15+44)	51 (14+37)	23 (7+16)	non retenue

Tableau 2 : Evolution des canicules en Normandie sur la période 1970-2019. Données Météo-France (traitement d'O. Cantat)

Le froid

Pour le *froid*, la tendance est inverse (Fig. 9). A Rouen, la réduction des jours de gel est spectaculaire avec une perte d'environ 20 occurrences par an entre 1971 et 2019 (passage d'environ 58 jours à 38). Le phénomène est également net à Caen, mais dans des proportions plus adoucies (perte d'une dizaine de jours, de 37 occurrences à 27). 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 2000-2019 : de 155 cas à 101 à Rouen, et de 90 cas à 63 à Caen. Dans le même temps, les *très grands froids* (minimum inférieur à -10°C) sont en voie de disparition 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 2000 à 2019, et une dernière apparition également en février 2012 (-12,1°C le 12 février).

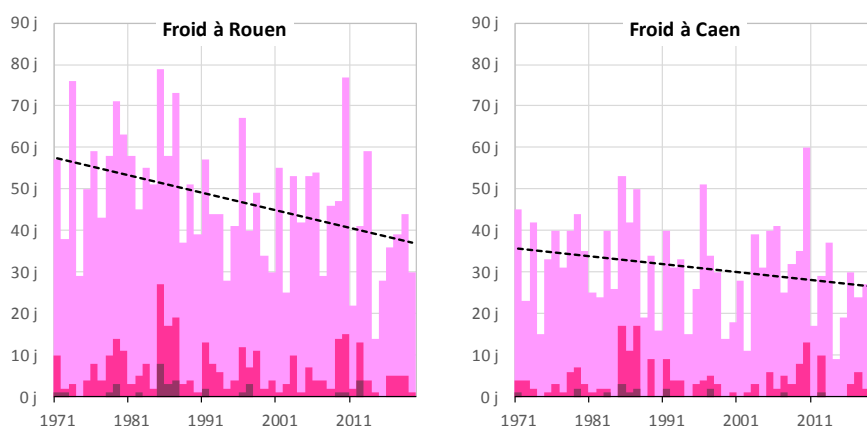


Figure 9 : Evolution du nombre de jours de froid (T° minimale journalière de l'air $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (rose), $\leq -5^{\circ}\text{C}$ (parme), $\leq -10^{\circ}\text{C}$ (violet) à Rouen-Boos et Caen-Carpique entre 1971 et 2019. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

1.3. Evolution des précipitations

Dans l'ensemble, les stations météorologiques normandes ne montrent aucune tendance statistiquement significative pour les précipitations moyennes annuelles et mensuelles (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 1971-2019 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. 10) indique clairement la succession de phases pluvieuses et sèches entre

1970 et 2019. Le phénomène le plus marquant est depuis 2003 la diminution de la 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).

Autour de la valeur moyenne annuelle de 765 mm, les écarts varient ainsi entre les années les plus sèches et les années les plus arrosées d'environ +/- 30% (Fig. 11). Cette fourchette se réduit à +/- 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 (-27%, -17%, -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, parfois 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).

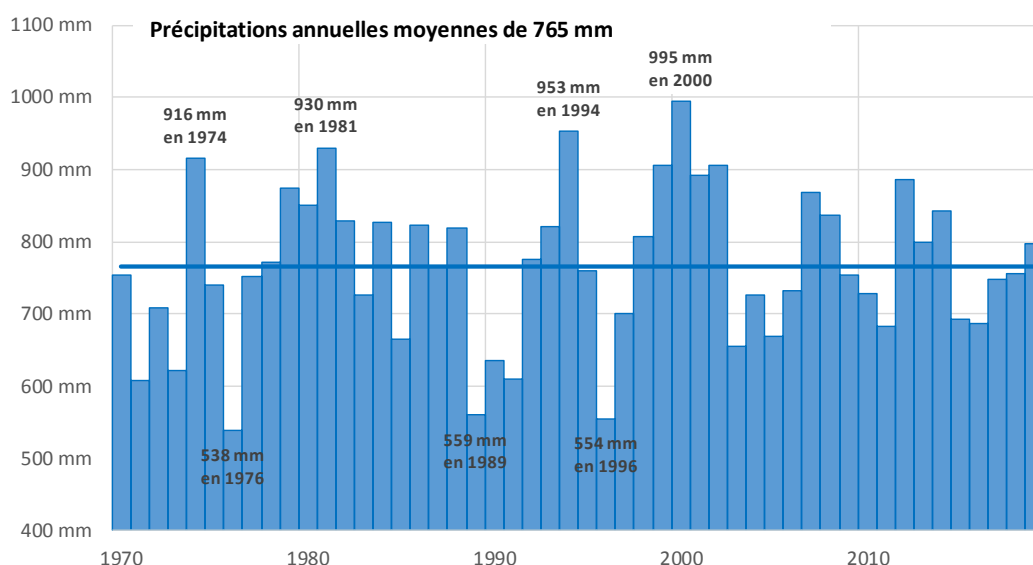


Figure 10 : Précipitations moyennes annuelles entre 1970 et 2019. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

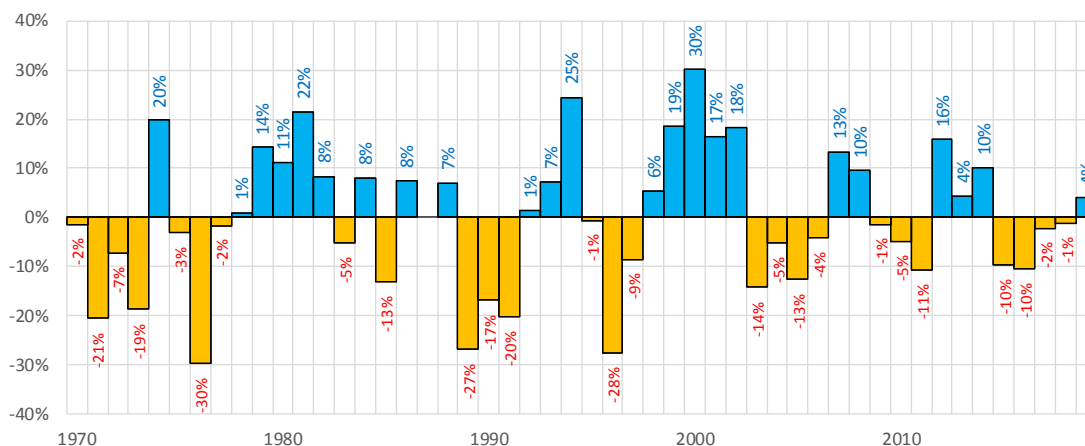


Figure 11 : Écart à la moyenne 1970-2019 des précipitations moyennes annuelles (en %). Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

L'évolution du nombre de jours de fortes précipitations (seuil de 10 mm par jour, soit 10 litres par m²) traduit également et avant tout la variabilité interannuelle du climat normand (Fig. 12) : les valeurs oscillent fortement autour d'une moyenne de l'ordre d'une vingtaine de 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 30 à 35 jours par an) et de creux très prononcés (minima de 5 à 10 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...).

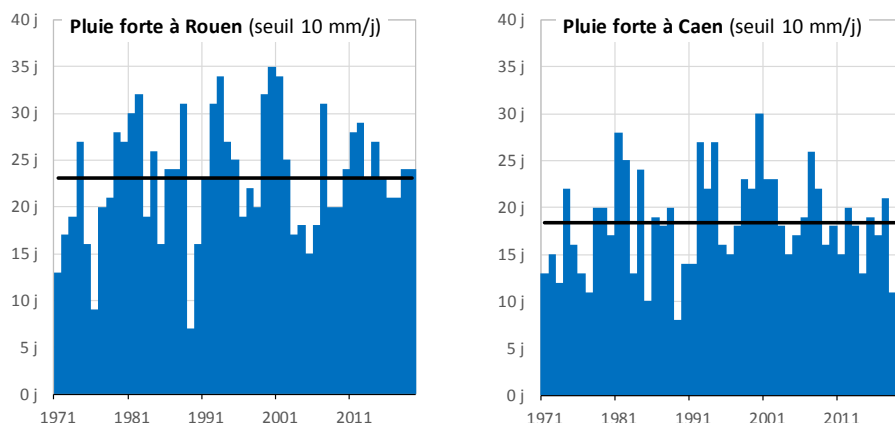


Figure 12 : Evolution du nombre de jours de fortes précipitations (≥ 10 mm/j) à Rouen-Boos et Caen-Carpique entre 1971 et 2019. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

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

Jours de neige

Le réchauffement de la température de l'air s'accompagne logiquement d'une diminution de la fréquence des précipitations sous forme de neige (Fig. 13). 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.

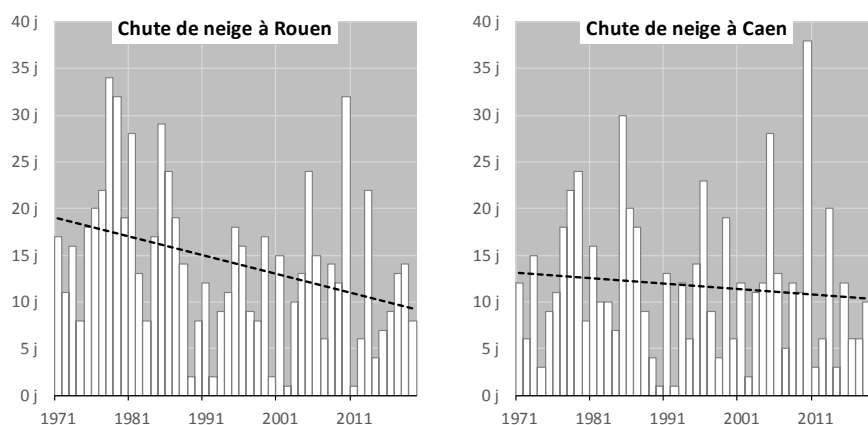


Figure 13 : Evolution de la fréquence annuelle des chutes de neige à Rouen-Boos et à Caen-Carpique entre 1971 et 2019. Valeur annuelle (bâton blanc) et tendance linéaire (tiret). Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Jours de brouillard

Le nombre de jours de brouillard présente une évolution plus complexe qu'une simple régression linéaire ne peut retranscrire robustement (Fig. 14). A Rouen, on observe une diminution de la fréquence en 3 paliers successifs : après trois années avec un nombre important supérieur à 120 jours (1971-1972-1973), 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.

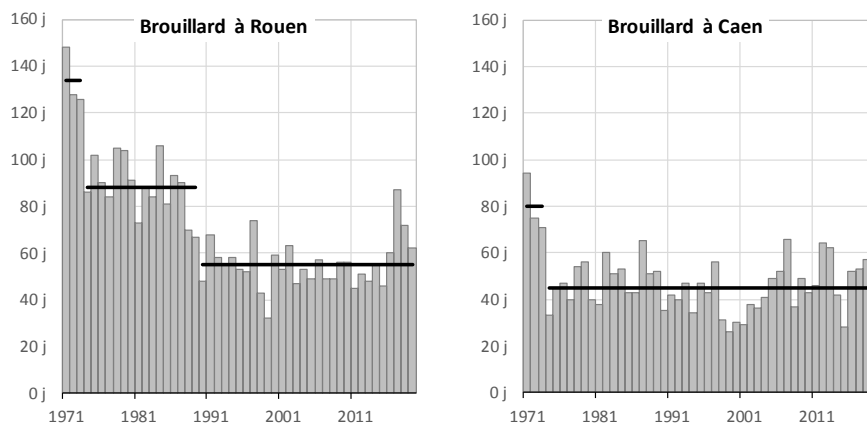


Figure 14 : Evolution du nombre de jours de brouillard (visibilité horizontale < 1000 m) à Rouen-Boos et à Caen-Carpiquet entre 1971 et 2019. Valeur annuelle (bâton gris) et moyennes sur plusieurs années (trait). Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

1.5. 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 1981-2019 (Fig. 15). Les différences observées entre les deux stations servant de référence sont naturellement liées à l'éloignement de la mer plus grand pour Rouen par rapport à Caen. Le phénomène marquant est la réduction du nombre de jours de vent fort (rafales > 58 km/h) au cours des dix dernières années, 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 ? Concernant les tempêtes (rafales > 100 km/h), celles-ci ont présenté un maximum d'occurrences dans les années 1980, en lien avec des circulations zonales puissantes en hiver.

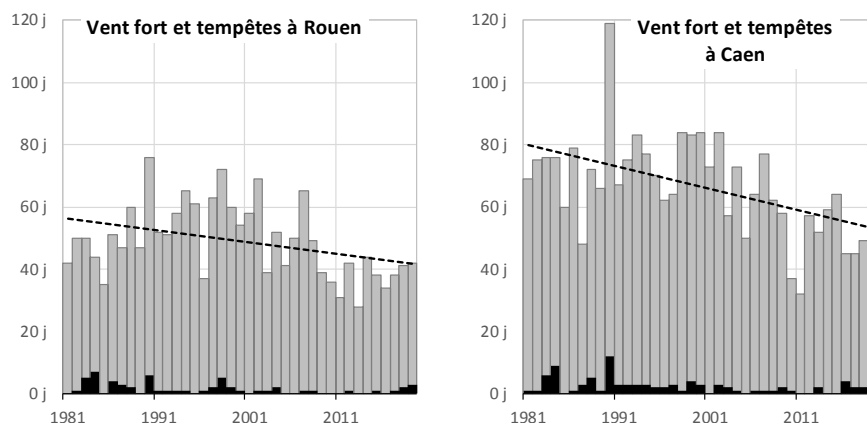


Figure 15 : Evolution du nombre de jours de vent fort (rafales > 58 km/h, bâton gris) et de tempête (rafales > 100 km/h, bâton noir) à Rouen-Boos et Caen-Carpiquet entre 1981 et 2019. Données Météo-France (traitement et réalisation d'O. Cantat).

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

L'analyse repose sur le traitement des données modélisées des différents paramètres climatiques selon deux scénarios d'émission de GES du GIEC/IPCC - RCP 2.6 et RCP 8.5 - proposant une enveloppe des « possibles ». Cependant, le scénario optimiste RCP 2.6 vers lequel nous devrions tendre dans le cadre de la COP21, est considéré aujourd'hui comme peu réaliste si les mesures pour limiter et stocker les gaz à effet de serre ne sont pas renforcées immédiatement. A noter qu'en 2018 le forçage radiatif total à l'échelle du globe par rapport à la période préindustrielle était de $3,1 \text{ W/m}^2$ (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>), alors que le scénario RCP 2.6 correspond par définition à un forçage de $2,6 \text{ W/m}^2$ (rappel Fig. 2).

2.1. Evolution de la température atmosphérique

Les projections à l'horizon 2100 des différents modèles disponibles indiquent que l'élévation de la température atmosphérique 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 (scénario RCP 2.6), alors que sans politique climatique internationale (scénario RCP 8.5) elle pourrait dépasser $+3,5^\circ\text{C}$ (Fig. 16).

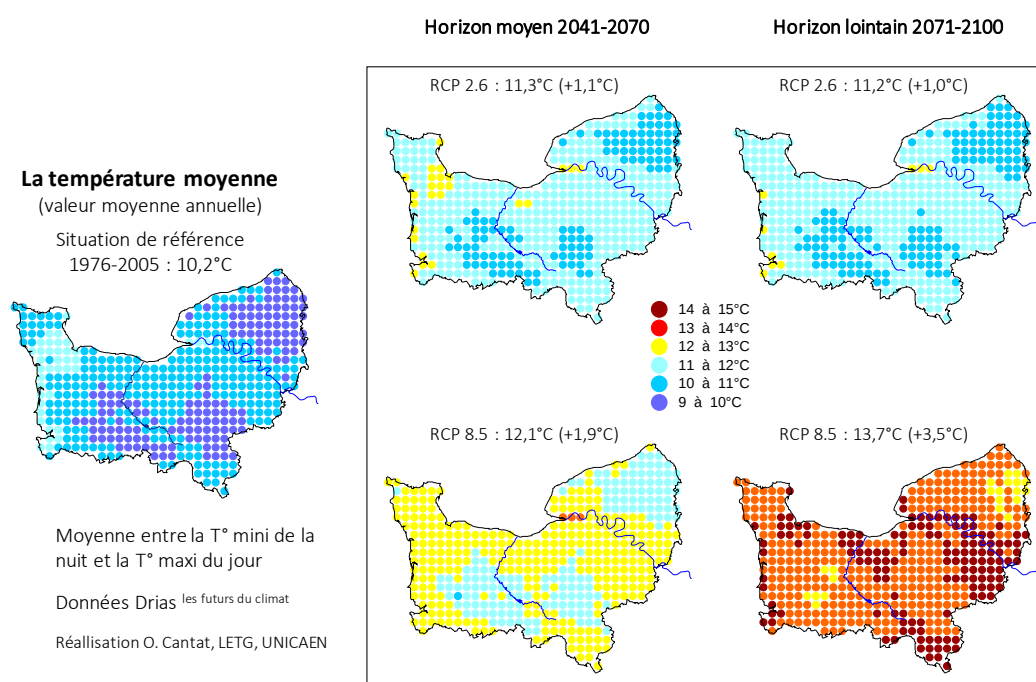


Figure 16 : Évolution attendue des températures de l'air moyennes annuelles en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Les disparités géographiques sont néanmoins assez importantes (Fig. 17). Le littoral serait *a priori* un peu moins rapidement et intensément touché par le réchauffement que l'intérieur des terres. Pour le scénario RCP 8.5, la température pourrait s'élever jusqu'à plus de 4°C dans les secteurs les plus continentaux au sud-est de la Région (Perche, Plaine de Saint-André, Vexin Normand), contre moins de 3°C dans les secteurs les plus océanisés de l'ouest (Cotentin, Coutançais, Avranchin).

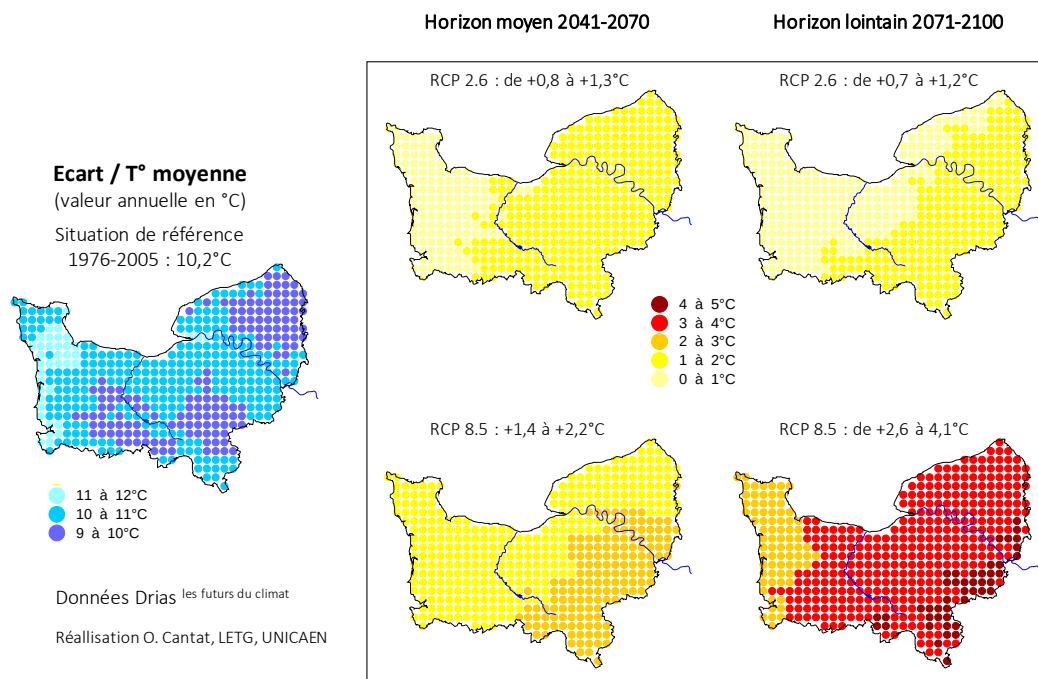


Figure 17 : Évolution attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 pour les températures de l'air moyennes annuelles de l'air en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Placé dans son continuum temporel de 1970 et 2100 (Fig. 18), le réchauffement futur se caractériserait par une différenciation des scénarios assez peu marquée avant 2050, puis très nette après 2060 (écart entre les courbes verte et rouge). On note par ailleurs le biais froid du modèle Aladin, les valeurs des deux scénarios partant d'un niveau plus bas d'environ 0,5°C par rapport au niveau actuel observé des températures. Ce phénomène correspond à une sous-estimation de la température post-rupture de 1987 (constat également fait sur la Normandie par Beauvais *et al.* (2019) et Dubreuil *et al.* (2019) pour la Bretagne).

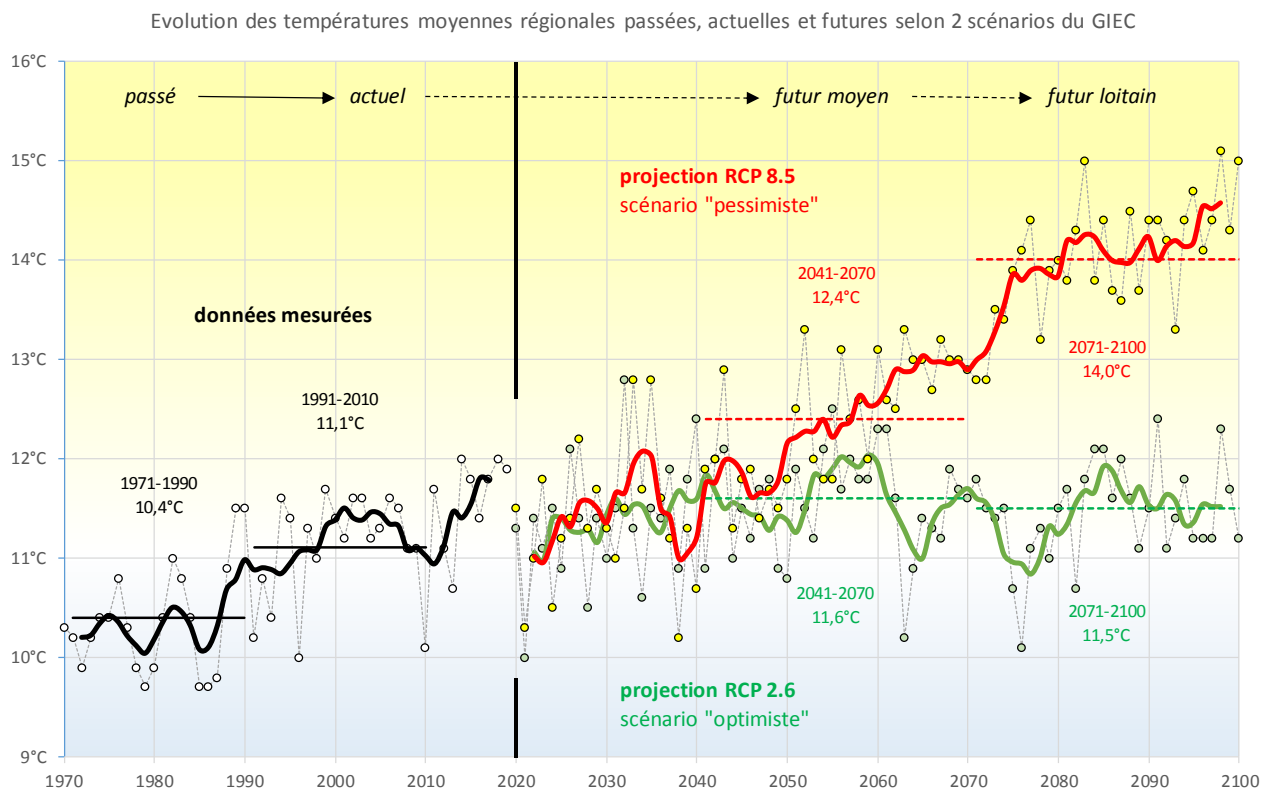


Figure 18 : Evolution des températures moyennes annuelles de l'air en Normandie entre 1970 et 2100. Courbes établies à partir de la moyenne des 8 stations de références sur la période de mesure (1970-2019) et des projections sur les points de grille correspondants sur la période 2020-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : 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 (traitement et réalisation d'O. Cantat).

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

Jours de chaleur

Sans politique internationale de réduction des 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 de moins de 15 jours par an actuellement à plus de 40 jours à l'horizon 2100 (Fig. 19). 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 actuellement.

Avec une politique climatique efficace (RCP 2.6), l'augmentation des jours de chaleur se limiterait en moyenne à un peu moins d'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.

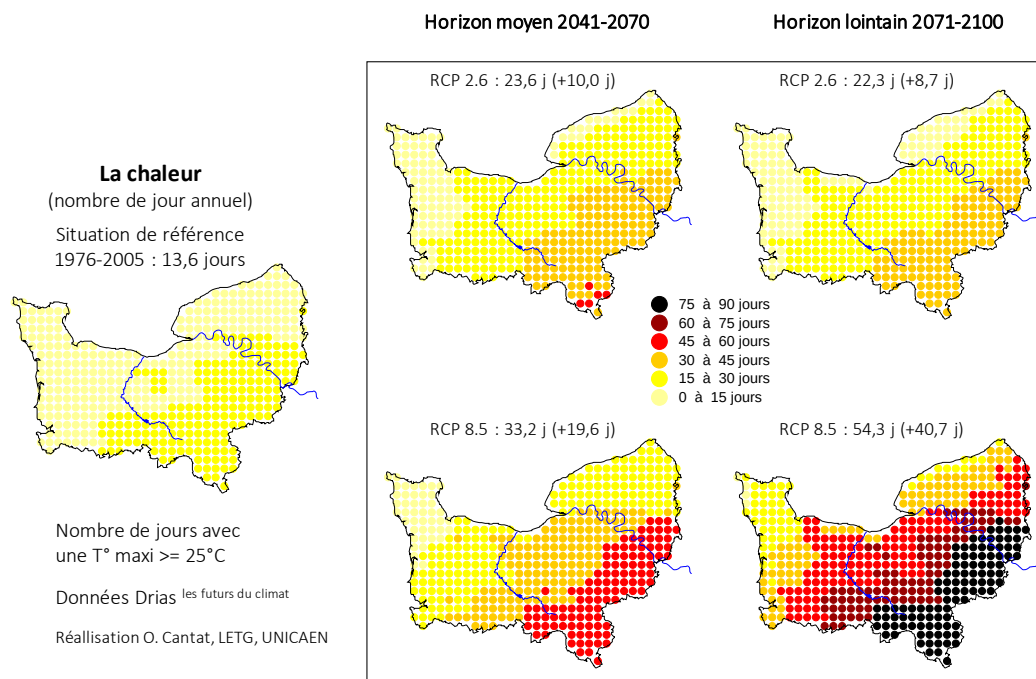


Figure 19 : Évolution attendue du nombre de jours de chaleur en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat)

Jours de froid

Le constat pour le froid est à l'opposé de celui présenté pour la chaleur (Fig. 20). 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, passant d'environ 35 jours par an actuellement à moins de 12 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 20 à 30 jours de gel par an à la fin de ce siècle, contre plus de 60 actuellement.

Avec une politique climatique efficace (RCP 2.6), la réduction se limiterait en moyenne à environ 8 jours de moins par an, avec une perte en hiver de l'ordre de 10 à 15 jours dans l'intérieur des terres.

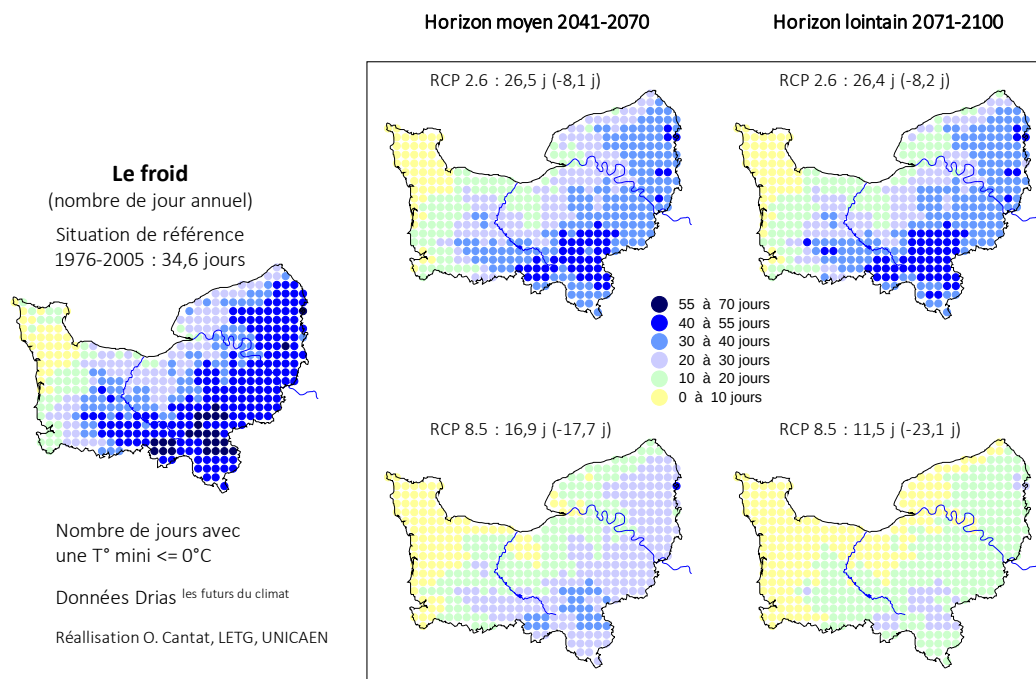


Figure 20 : Évolution attendue des gelées en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

2.3. Evolution des précipitations

Evolution des précipitations moyennes annuelles

Concernant l'évolution des cumuls annuels de précipitations, jusqu'à 2041-2070 les différents scénarios aboutissent à des résultats peu différents de la période de référence 1976-2005 (Fig. 21 et 22). En revanche, à l'horizon 2100, on tendrait vers une nette diminution dans le cas du scénario RCP 8.5 et une certaine stabilité dans le cas du scénario RCP 2.6.

Ainsi, le seul signal fort des projections climatiques est proposé par le scénario RCP 8.5 du GIEC à l'horizon 2100. Sans politique de réduction des gaz à effet de serre, la région verrait son cumul pluviométrique annuel se réduire d'environ 10%, passant de 859 à 775 mm par an (-84 mm). L'ouest de la Région serait proportionnellement le plus touché, avec un déficit atteignant jusqu'à 15%, du Coutançais à l'Avranchin et sur les rebords occidentaux collinéens du Bocage Normand, mais aussi plus ponctuellement de part et d'autre de la partie aval de l'Orne. Les Plaines autour d'Evreux (Neubourg et Saint-André) atteindraient des niveaux remarquablement bas, souvent inférieurs à 600 mm par an, avec un même constat, mais de façon un peu plus atténuée, autour de Caen.

Pour les autres scénarios et horizons, l'évolution est encore très incertaine sur la Normandie, avec de faibles écarts à la normale, de l'ordre de -4 à +4 % selon les secteurs. Toutefois, une partition géographique intra-régionale semble se dessiner avec des précipitations légèrement plus abondantes sur la moitié sud-est de la région, et un petit peu moins présentes sur la moitié nord-ouest.

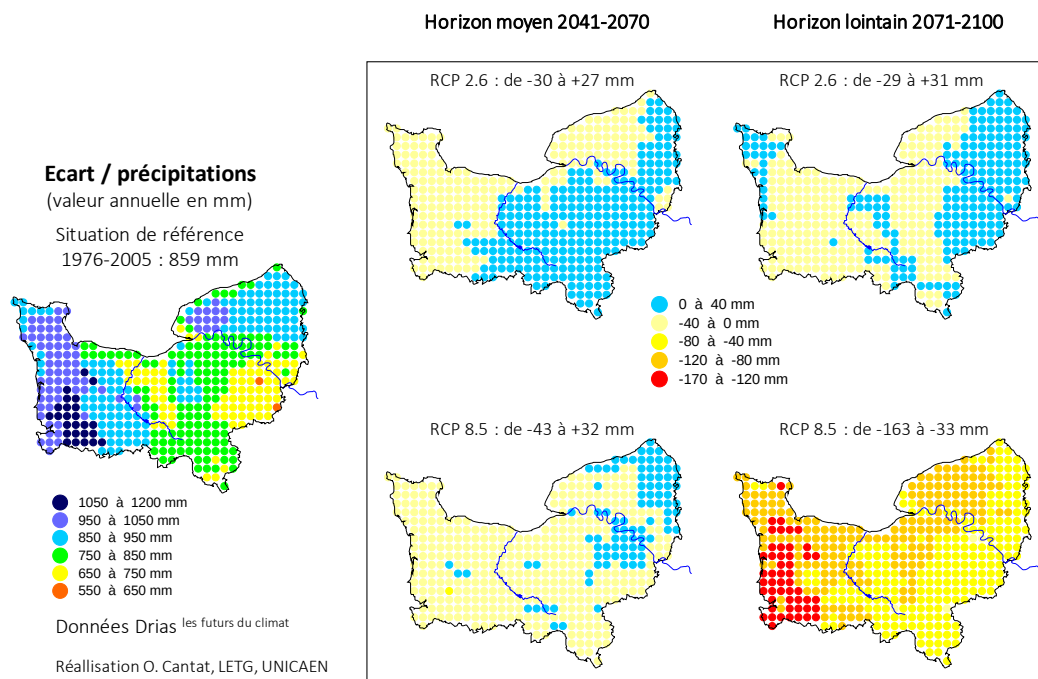


Figure 21 : Évolution attendue des écarts à la moyenne (en mm) du cumul pluviométrique annuel en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

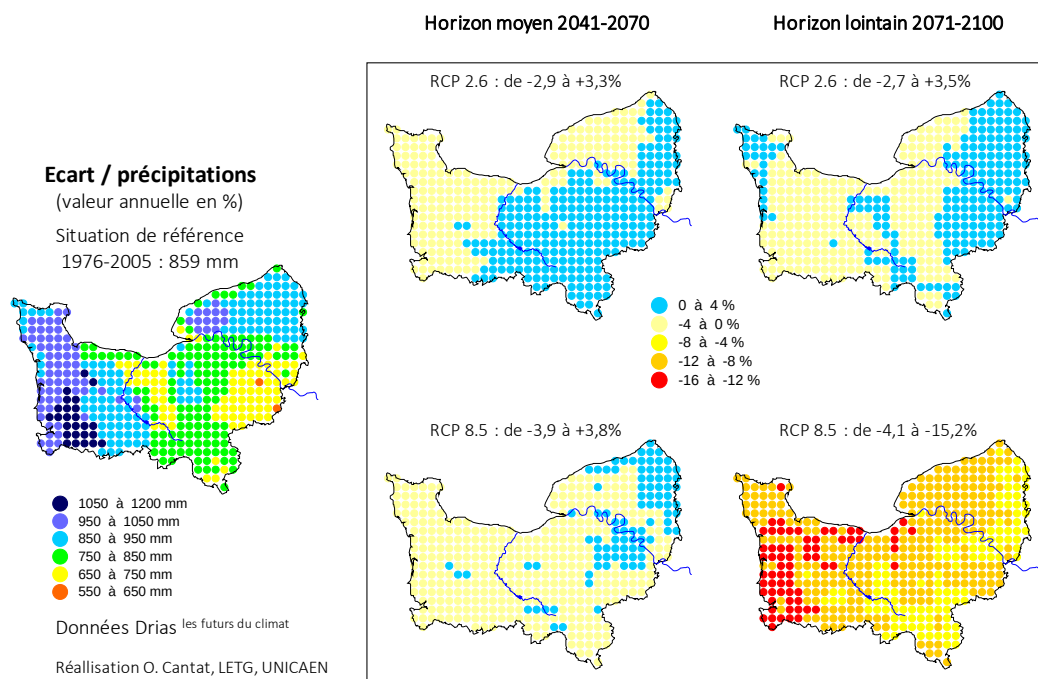


Figure 22 : Évolution attendue des écarts à la moyenne (en %) du cumul pluviométrique annuel en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Le continuum temporel de 1970 et 2100 traduit un décrochement net des cumuls annuels de précipitations pour le scénario RCP 8.5 vers les années 2070 (Fig. 23) avec une variabilité interannuelle légèrement plus marquée sur la période 2071-2100 (l'écart-type est de 122 mm, contre des valeurs autour de 110 mm sur toutes les autres périodes).

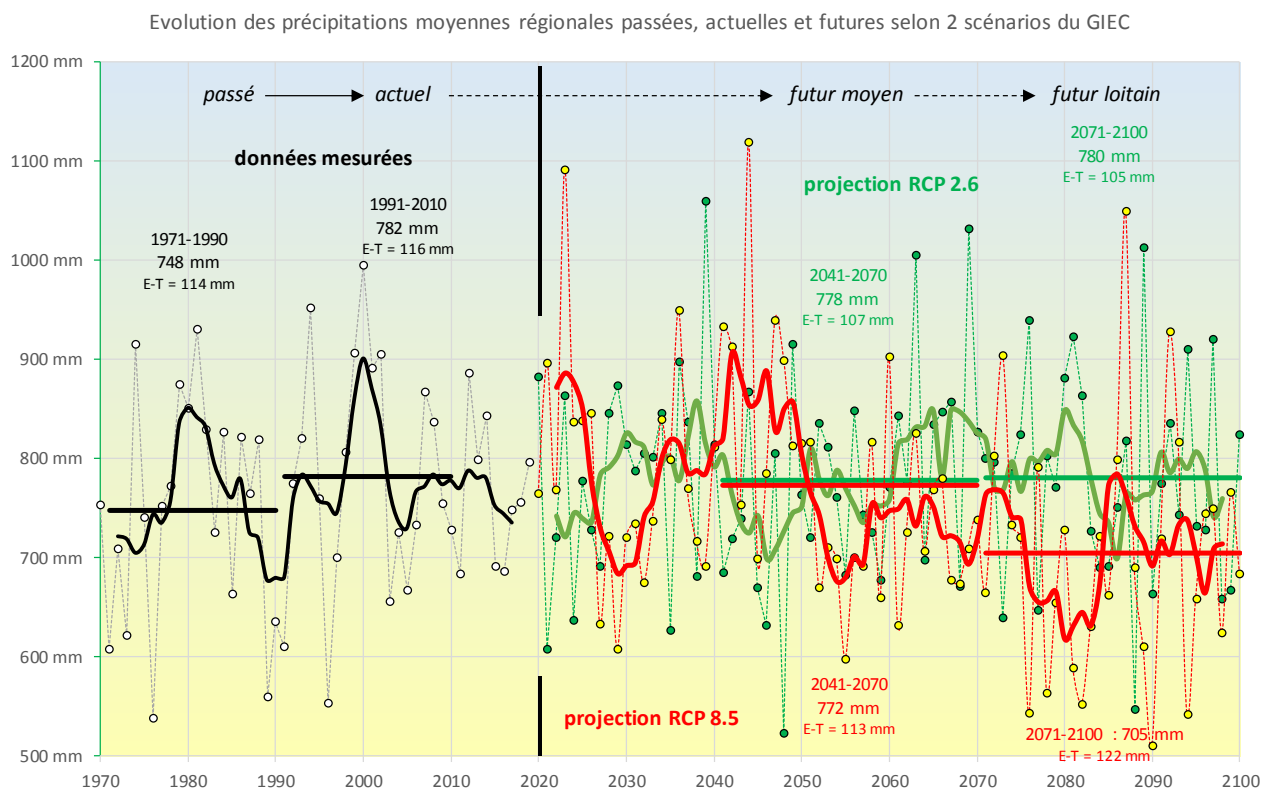


Figure 23 : Evolution du cumul annuel de précipitations en Normandie entre 1970 et 2100. Courbes établies à partir de la moyenne des 8 stations de références sur la période de mesure (1970-2019) et des projections sur les points de grille correspondants sur la période 2020-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Rond et trait fin (valeur annuelle), trait épais (moyenne mobile sur une période chevauchante de 5 ans) ; droite horizontale (moyenne sur différentes périodes). Données Météo-France et Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Evolution des précipitations saisonnières

Les cumuls annuels masquent des comportements saisonniers qui peuvent être très contrastés, et jouer de façon importante sur le fonctionnement des écosystèmes et des géosystèmes (impacts notamment sur les phénomènes érosifs, le développement de la flore et donc sur l'agriculture et l'élevage, etc.). Ainsi, selon le scénario RCP 8.5 du GIEC à l'horizon 2100, dans un contexte globalement plus sec d'environ 10%, une opposition nette apparaîtrait entre l'hiver qui recevrait plus d'abats (+13,6 %) et les autres saisons qui seraient moins arrosées, surtout l'été (-26,9%), mais avec des disparités régionales importantes (Fig. 24). En hiver, l'augmentation des précipitations serait ainsi nettement plus marquée au sud d'une diagonale allant du Bocage normand au Pays de Caux, avec des valeurs extrêmes s'étageant d'environ +5 à +27%. La forte réduction des précipitations en été présente en revanche une organisation géographique moins nette, avec des valeurs extrêmes de -20 à -35% environ.

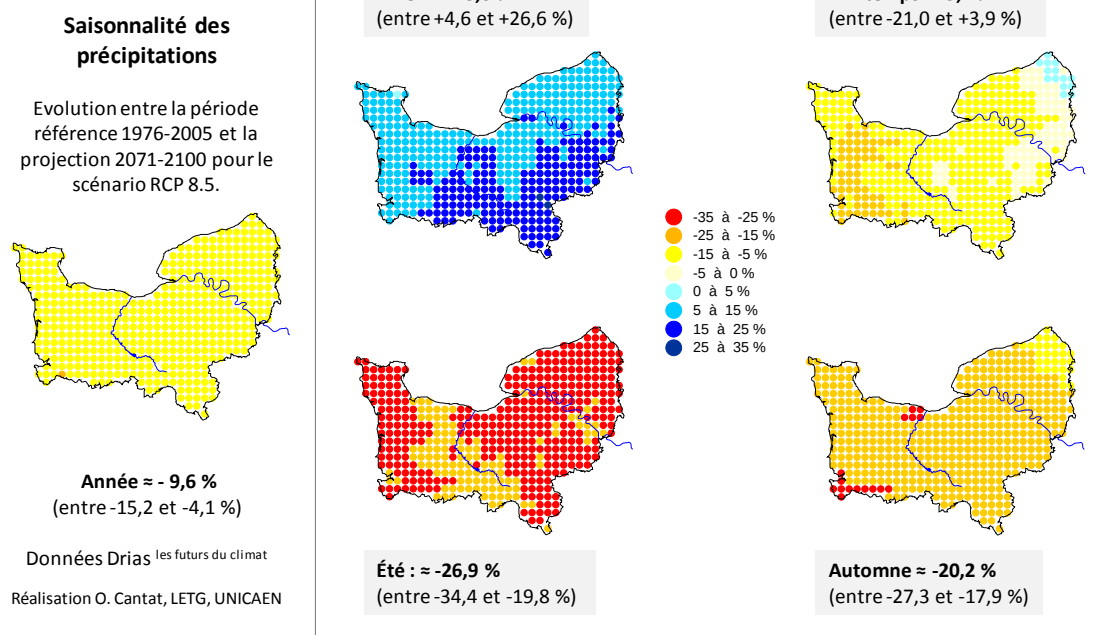


Figure 24 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne de référence 1976-2005 (en %) de la pluviométrie en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l'horizon lointain 2071-2100 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

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

Dans cette partie, nous nous concentrons sur les projections ; l'évolution des aléas météorologiques au cours des dernières décennies (période contemporaine de 1970 à 2019) ayant été déjà présentée dans la partie 1. Seront ainsi essentiellement analysées les données sorties du modèle Aladin-Climat pour les scénarios « optimiste » RCP 2.6 (avec politique climatique) et « pessimiste » RCP 8.5 (sans politique climatique), par comparaison avec la période de référence 1976-2005.

3.1. Fortes chaleurs et canicules

Les 8 points de grille représentatifs de la diversité climatique normande permettent d'apprécier le rôle des facteurs géographiques dans la fréquence et l'évolution des valeurs extrêmes caractérisant la chaleur (Tabl. 3). En plus de la chaleur « courante » précédemment évoquée (dépassement du seuil de 25°C dans la journée), sont ici présentés les nombres de jours correspondant à la *forte chaleur* ($\geq 30^\circ\text{C}$) et à la *très forte chaleur* ($\geq 35^\circ\text{C}$) à l'horizon 2100. Globalement, l'écart devrait se creuser entre l'intérieur des terres qui subiront des vagues de chaleur plus intenses et plus durables et les espaces océanisés qui résisteront davantage à l'augmentation de fréquence de cet aléa estival, susceptible de déborder sur la fin du printemps et le début de l'automne.

Au seuil de 30°C, les cas sont actuellement très peu présents sur la région (de 0 à 6 jours par an du littoral cotentinois vers le Perche), mais cependant en augmentation depuis le début du 21^e siècle. Avec la mise en application d'une politique climatique (RCP 2.6), les valeurs évolueraient peu sur le littoral, mais en revanche deviendraient plus fréquentes dans les terres, passant globalement de 5 à 10 jours pour les secteurs d'Evreux, Alençon et Préaux-du-Perche (Tabl. 3). Sans politique climatique (RCP 8.5), les 30°C deviendraient très fréquents en été dans l'intérieur des terres (30 à 40 jours par an à Evreux, Alençon et Préaux), alors que ce seuil de 30°C serait atteint moins fréquemment sur le littoral (autour de 10 jours, comme au Havre et à Dieppe), voire rarement sur le « finistère » cotentinois (4 jours à Cherbourg), permettant à ce secteur géographique de conserver son caractère d'îlot de fraîcheur estival (David *et al.*, 2019).

		jour chaleur ($\geq 25^\circ\text{C}$)			jour forte chaleur ($\geq 30^\circ\text{C}$)			jour très forte chaleur ($\geq 35^\circ\text{C}$)		
		1976-2005	2071-2100		1976-2005	2071-2100		1976-2005	2071-2100	
		Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5
littoral	Cherbourg	4.2	7.3	25.4	0.5	0.8	4.3	0.0	0.0	0.4
	Le Havre	13.2	13.2	35.2	2.8	2.8	10.7	0.3	0.3	2.4
	Dieppe	5.7	9.6	27.4	1.3	2.7	10.6	0.1	0.3	2.2
intermédiaire	Caen	14.7	21.8	58.6	2.6	3.9	18.2	0.3	0.5	4.2
	Rouen	16.5	26.7	63.1	3.7	6.3	26.6	0.3	0.9	8.8
continental	Evreux	23.5	36.1	78.9	5.1	9.1	34.9	0.3	1.1	11.0
	Alençon	26.5	43.0	85.2	5.5	10.9	36.2	0.9	2.1	13.6
	Préaux	27.1	44.2	87.7	5.8	11.9	39.2	0.8	2.0	14.2

Tableau 3 : Évolution attendue de la chaleur (seuils de 25°C, 30°C et 35°C) en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain pour les 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement d'O. Cantat).

Le continuum temporel régional de 1976 à 2100 (Fig. 25) montre clairement pour le scénario RCP 8.5 l'augmentation progressive des occurrences de forte chaleur jusqu'en 2070, puis « l'explosion » de cet aléa estival sur la période lointaine 2071-2100. A ce même horizon, pour le scénario RCP 2.6 on tendrait vers un nombre de jours de forte chaleur comparable à la fin de période actuelle, après une augmentation sensible vers 2060 et 2070.

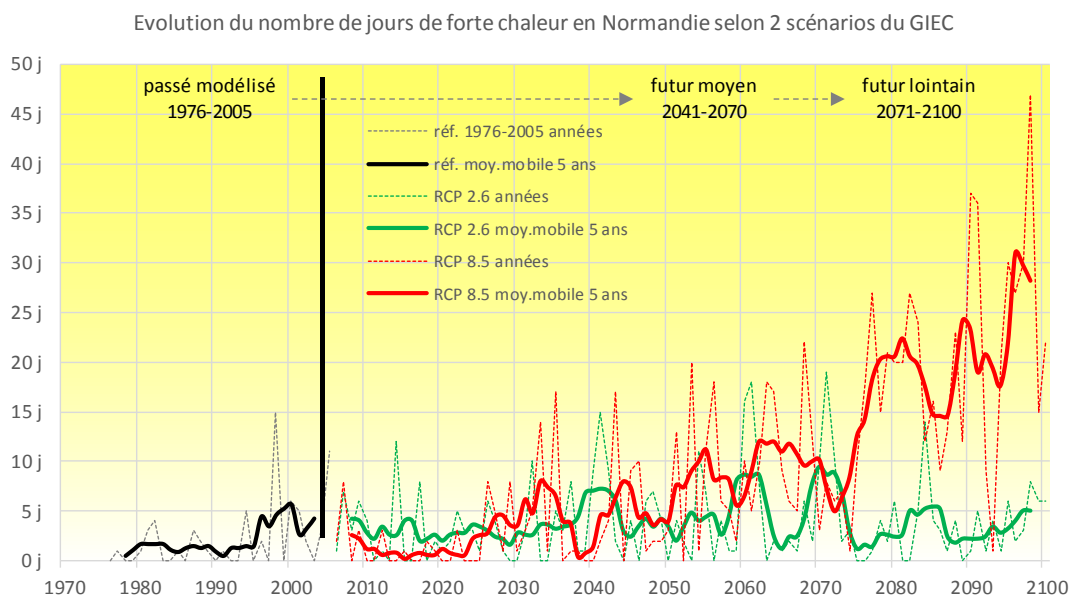


Fig. 25 : Evolution des jours de forte chaleur (30°C) en Normandie de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5. Moyenne des 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Au seuil de 35°C, avec le scénario pessimiste RCP 8.5 les occurrences resteraient limitées entre 10 et 15 jours dans les secteurs les plus propices aux excès thermométriques du fait de leur continentalité (Evreux, Alençon et Préaux), alors que les secteurs littoraux seraient encore presque totalement épargnés (entre 0 et 3 jours selon les expositions, pour Cherbourg, Le Havre et Dieppe). Avec ce scénario, le seuil des 40°C pourrait même être dépassé de façon récurrente dans les parties les plus continentales de la région (2 fois par an à Alençon et Préaux-du-Perche) et atteint une fois tous les 5 à 10 ans sur le reste de la région, excepté les littoraux nord du Cotentin.

En conséquence, les projections à l'horizon 2100 pour le scénario RCP 8.5 montrent des tendances à l'augmentation des canicules (combinaison de chaleur diurne et nocturne) sur la région (Fig. 26).

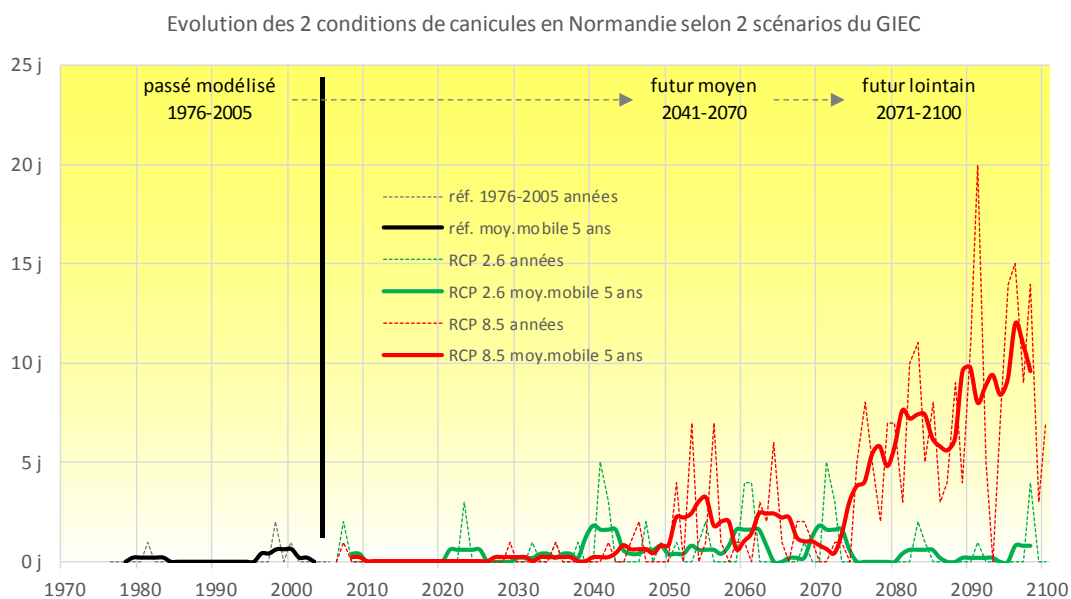


Fig. 26 : Evolution des 2 conditions simultanées de canicule ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{\max} \geq 33^{\circ}\text{C}$) en Normandie de 1976 à 2100, sans tenir compte de la durée minimale de 3 jours consécutifs. Scénarios RCP 2.6 et 8.5. Moyenne des 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Encore une fois, les secteurs continentaux seraient beaucoup plus affectés que les littoraux (14 à 15 jours contre 1 à 4 jours), 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 instantanément la température (Tabl. 4).

		Nombre de jours de type de temps caniculaire et écart à la moyenne 1976-2005								
		1976-2005	2041-2070				2071-2100			
		Réf.	RCP 2.6		RCP 8.5		RCP 2.6		RCP 8.5	
littoral	Cherbourg	0.00	0.07	+0.07	0.17	+0.17	0.03	+0.03	1.00	+1.00
	Le Havre	0.13	0.70	+0.57	1.13	+1.00	0.47	+0.34	4.53	+4.40
	Dieppe	0.07	0.40	+0.33	0.87	+0.80	0.20	+0.13	3.33	+3.26
intermédiaire	Caen	0.07	0.20	+0.13	0.90	+0.83	0.20	+0.13	3.73	+3.66
	Rouen	0.23	1.37	+1.14	2.83	+2.60	1.07	+0.84	11.10	+10.87
continental	Evreux	0.37	2.17	+1.80	4.73	+4.36	1.60	+1.23	14.83	+14.46
	Alençon	0.57	1.63	+1.06	4.13	+3.56	1.63	+1.06	14.53	+13.96
	Préaux	0.53	1.90	+1.37	4.50	+3.97	1.80	+1.27	16.07	+15.54

Tableau 4 : Evolution attendue des 2 conditions simultanées de canicule ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ et $T_{\max} \geq 33^{\circ}\text{C}$) en Normandie entre 1976 et 2100, sans tenir compte de la durée minimale de 3 jours consécutifs, Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5. Valeurs des 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

A noter enfin que le phénomène de « nuit tropicale » (température minimale de l'air relevée sous abri ne descendant pas sous les 20°C , engendrant des difficultés de récupération physiologique) resterait limité sur les littoraux et les hauteurs bocagères à l'ouest de la région à une dizaine de cas par an au cœur de l'été, alors que cet aléa nocturne pourrait dépasser 20 à 25 occurrences dans la vallée de la Seine et les confins méridionaux de la Normandie.

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 normand, la présence d'épisodes aux températures fortement négatives et/ou de précipitations neigeuses peut engendrer des problèmes environnementaux et sociétaux, 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).

A l'horizon lointain 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. Les *grands froids* (minimum inférieur à -5°C) deviendraient très rares et n'apparaîtraient plus tous les ans, même dans les secteurs traditionnellement les plus rigoureux en hiver (entre 0,7 et 0,9 jour par an à Rouen, Evreux, Alençon et Préaux-du-Perche). Le scénario RCP 2.6 marque également une réduction des manifestations du froid, mais dans une mesure moins prononcée (Tabl. 5 et Fig. 27).

		jour froid ($\leq 0^{\circ}\text{C}$)			jour grand froid ($\leq -5^{\circ}\text{C}$)			jour très grand froid ($\leq -10^{\circ}\text{C}$)		
		1976-2005	2071-2100		1976-2005	2071-2100		1976-2005	2071-2100	
		Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5
littoral	Cherbourg	12.4	9.2	3.2	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	Le Havre	18.7	13.4	6.1	2.4	1.6	0.2	0.4	0.2	0.0
	Dieppe	26.2	19.7	8.8	3.3	2.4	0.3	0.4	0.1	0.0
intermédiaire	Caen	26.5	18.7	8.1	2.6	2.0	0.4	0.3	0.1	0.0
	Rouen	43.0	32.1	14.2	5.3	3.7	0.7	1.0	0.3	0.0
continental	Evreux	45.7	34.4	15.3	5.8	3.9	0.8	1.0	0.4	0.0
	Alençon	45.7	36.7	14.6	5.8	3.6	0.7	1.1	0.6	0.0
	Préaux	46.2	35.6	15.2	5.5	3.8	0.9	1.2	0.6	0.0

Tableau 5 : Évolution attendue du froid (seuils de 0°C , -5°C et -10°C) en Normandie entre 1976 et 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 à l'horizon lointain 2100 pour les 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement d'O. Cantat).

Evolution du nombre de jours de grand froid (-5°C) en Normandie selon 2 scénarios du GIEC

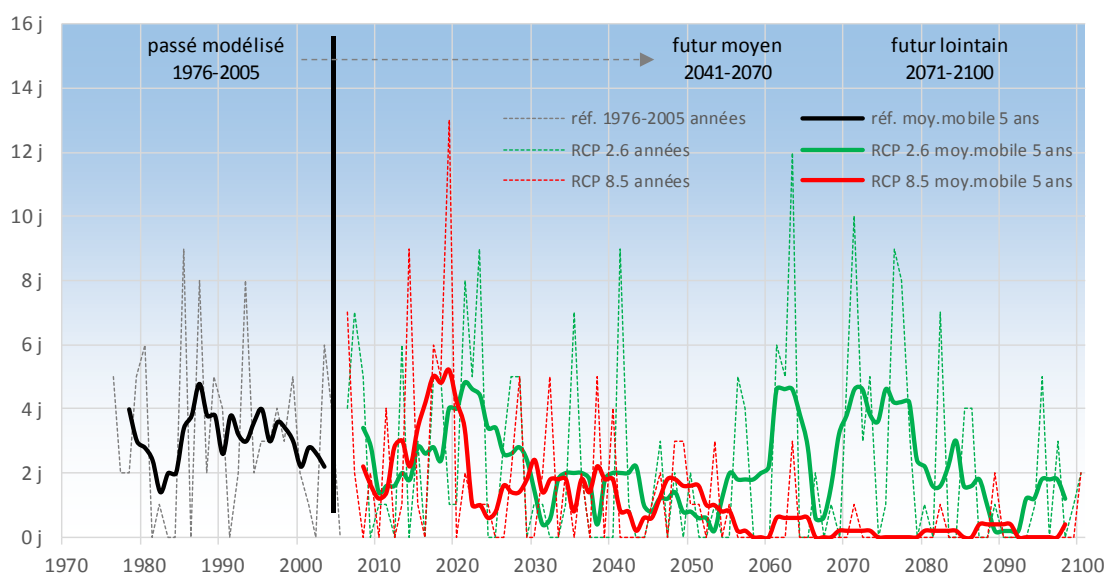


Fig. 27 : Evolution des jours de grand froid (-5°C) en Normandie de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5. Moyenne des 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Dans le contexte plus chaud du 21^e siècle, la neige se ferait également beaucoup plus rare en Normandie, en apparition comme en quantité (Tabl. 6 et 7). Dans l'optique du scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100, les chutes de neige ne seraient plus observées qu'entre 2 et 5 fois durant le cœur d'un hiver nettement adouci (contre 10 à 20 jours par an des côtes vers l'intérieur des terres sur la période de référence 1976-2005). La hauteur de neige cumulée sur une saison froide passerait de 10 à 30 cm actuellement, à moins de 5 cm pour tous les points de grille sélectionnés, soit une réduction de 75% à 90% 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 nécessairement 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 permettrait aux précipitations solides d'apparaître encore de 8 à 15 fois durant l'hiver (soit une perte de l'ordre de 4 jours pour tous les points). L'épaisseur du cumul de neige tombée baisserait de l'ordre de 30 à 50% selon l'emplacement dans la région.

		Nombre de jours avec chute de neige par an et écart à la moyenne 1976-2005								
		1976-2005	2041-2070				2071-2100			
		Réf.	RCP 2.6		RCP 8.5		RCP 2.6		RCP 8.5	
littoral	Cherbourg	12.2	7.4	-4.8	5.0	-7.2	8.4	-3.8	2.6	-9.6
	Le Havre	12.5	10.9	-1.6	5.9	-6.6	8.8	-3.7	3.2	-9.3
	Dieppe	14.7	12.7	-2.0	7.4	-7.3	10.8	-3.9	4.0	-10.7
intermédiaire	Caen	15.9	12.3	-3.6	8.2	-7.7	12.1	-3.8	5.4	-10.5
	Rouen	19.9	15.1	-4.8	10.0	-9.9	15.6	-4.3	6.1	-13.8
continental	Evreux	19.8	14.9	-4.9	9.5	-10.3	15.3	-4.5	4.6	-15.2
	Alençon	16.5	11.8	-4.7	9.0	-7.5	13.5	-3.0	5.3	-11.2
	Préaux	16.3	11.4	-4.9	7.7	-8.6	12.3	-4.0	4.7	-11.6

Tableau 6 : Évolution attendue du nombre de jours avec chute de neige en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain pour les 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement d'O. Cantat).

		Cumul de neige annuel (équiv. cm d'épaisseur) et % d'écart à la moy. 1976-2005								
		1976-2005	2041-2070				2071-2100			
		Réf.	RCP 2.6		RCP 8.5		RCP 2.6		RCP 8.5	
littoral	Cherbourg	16.8	8.7	-48%	3.6	-79%	8.3	-51%	1.6	-90%
	Le Havre	11.9	9.9	-17%	3.2	-73%	6.0	-50%	2.0	-83%
	Dieppe	15.0	16.4	9%	6.2	-59%	9.0	-40%	3.8	-75%
intermédiaire	Caen	19.6	13.4	-32%	5.3	-73%	9.9	-49%	3.5	-82%
	Rouen	29.2	20.5	-30%	9.6	-67%	16.6	-43%	4.7	-84%
continental	Evreux	24.5	16.0	-35%	8.2	-67%	13.3	-46%	3.0	-88%
	Alençon	24.4	16.2	-34%	9.0	-63%	15.2	-38%	4.5	-82%
	Préaux	21.4	14.3	-33%	7.7	-64%	13.6	-36%	3.4	-84%

Tableau 7 : Évolution attendue de la hauteur cumulée de neige en Normandie (estimée à partir de l'observation qu'en général 1 cm de neige donne 1 mm d'eau une fois fondue). Scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain pour les 8 points de grille correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

3.3. Sécheresses atmosphériques

Evolution des sécheresses atmosphériques

Les périodes sèches montrent une augmentation progressive de leur durée sur l'ensemble des scénarios (Fig. 28). Le phénomène est particulièrement prononcé en cas d'absence de politique climatique internationale (RCP 8.5), avec un allongement moyen supérieur à 1 semaine à l'horizon 2100 (de 22,4 à 29,5 jours), contre seulement 2 jours (24,7 jours) si des mesures de réduction des gaz à effet de serre sont rapidement adoptées à l'échelle mondiale (RCP 2.6).

Le Perche subirait en été des séquences sèches dépassant un mois, ce qui pourrait être préjudiciable pour les herbages dont dépend une partie de l'activité économique locale. La situation climatique 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 contrées par l'avancement de la saison végétale (la sécheresse et la chaleur intervenant après la fin du cycle de la plante, ou en fin de cycle quand les besoins en eau de la plante sont moins importants) (Beauvais et al., 2019).

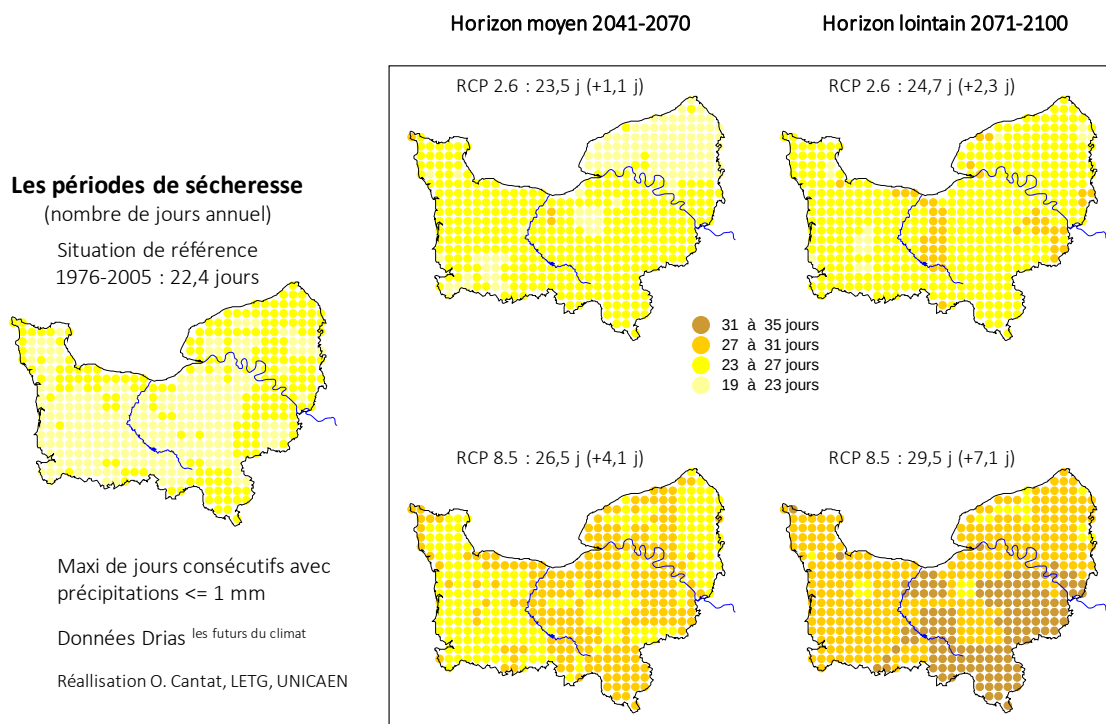


Figure 28 : Évolution attendue de la durée maximale des périodes de sécheresse en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Evolution de l'indice bioclimatique

Les impacts d'un assèchement des conditions atmosphériques sur les milieux, induit par l'augmentation des températures et la réduction possible des précipitations, peuvent être évalués encore plus précisément par le calcul d'un indice bioclimatique durant la période végétative (Fig. 29 et 30). Sur la période de référence 1976-2005, l'indice moyen est de 4,6, valeur caractéristique d'une ambiance subhumide. Le contraste régional est important entre les espaces humides, voire hyperhumides de l'ouest du bocage normand et du Pays de Caux, et la légère déficience observée dans les plaines de Caen et d'Evreux.

Avec le scénario RCP 2.6, la péjoration des conditions serait assez peu marquée aux horizons moyen comme lointain : l'indice fléchirait de quelques dixièmes (-0,4 et -0,2) et resterait dans la catégorie subhumide. En revanche, pour le scénario RCP 8.5, des modifications importantes se produiraient à l'horizon 2100 avec l'apparition d'une large bande subsèche 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 déficientes. Pour ce scénario sans politique climatique, le continuum temporel montre nettement une baisse par paliers successifs de l'indice bioclimatique, amenant les conditions édaphiques de déficientes à subsèches (premier palier entre 2030 et 2050 vers 3,5 ; deuxième entre 2050 et 2070 vers 3,0 et troisième de 2070 jusqu'à 2100 avec 2,5).

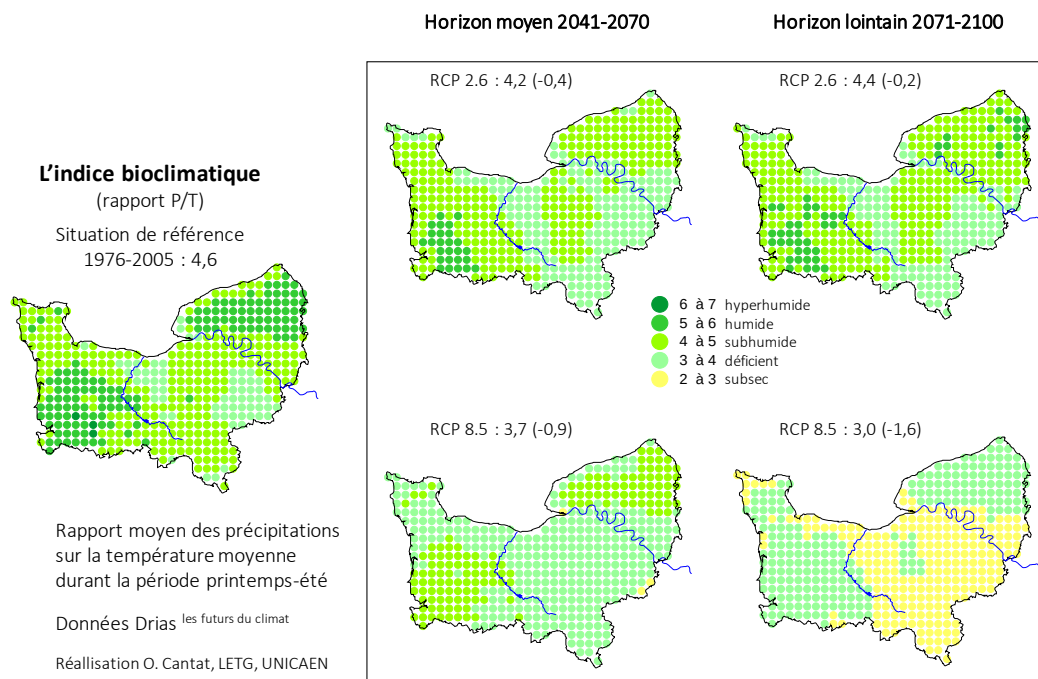


Figure 29 : Évolution attendue de l'indice bioclimatique en Normandie au printemps-été. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

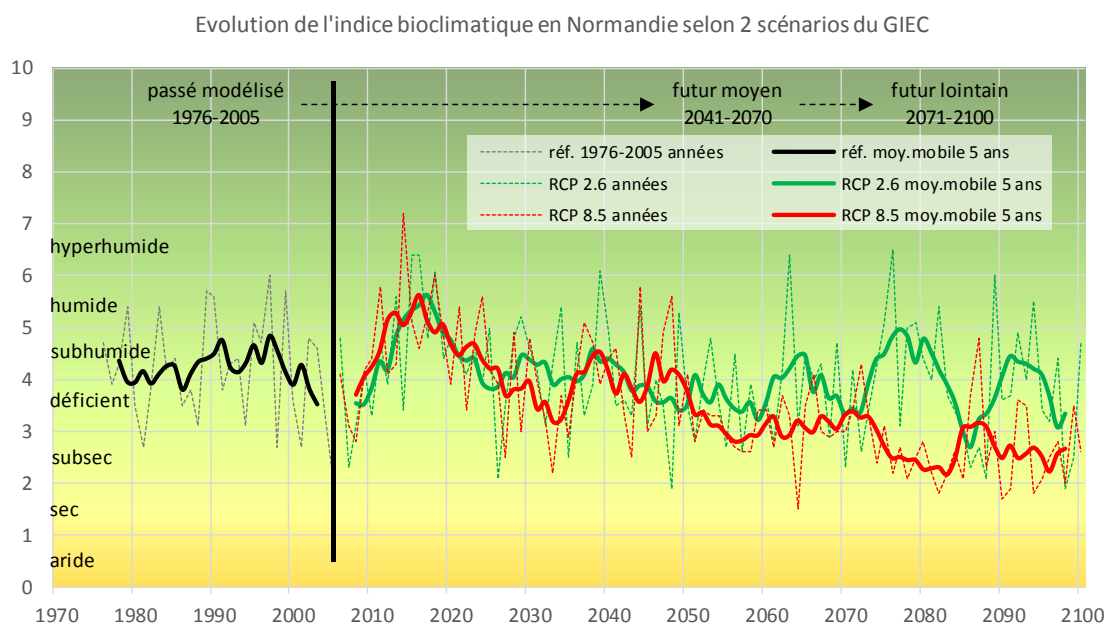


Figure 30 : Évolution attendue de l'indice bioclimatique en Normandie au printemps-été de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

3.4. 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 (Fig. 31), avec en moyenne 4,1 jours par an. Une nette opposition intra-régionale apparaît, avec entre 2 à 3 jours par an dans la partie axiale de la région et 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 près de 10 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 légère augmentation de sa fréquence sur l'ensemble des scénarios (Fig. 32) : entre 0,2 et 0,8 jour de plus par an en moyenne. Le continuum temporel calculé sur les 8 points de grille permet toutefois de constater la différenciation des scénarios à l'horizon lointain, avec un RCP 8.5 plus propice aux très fortes précipitations.

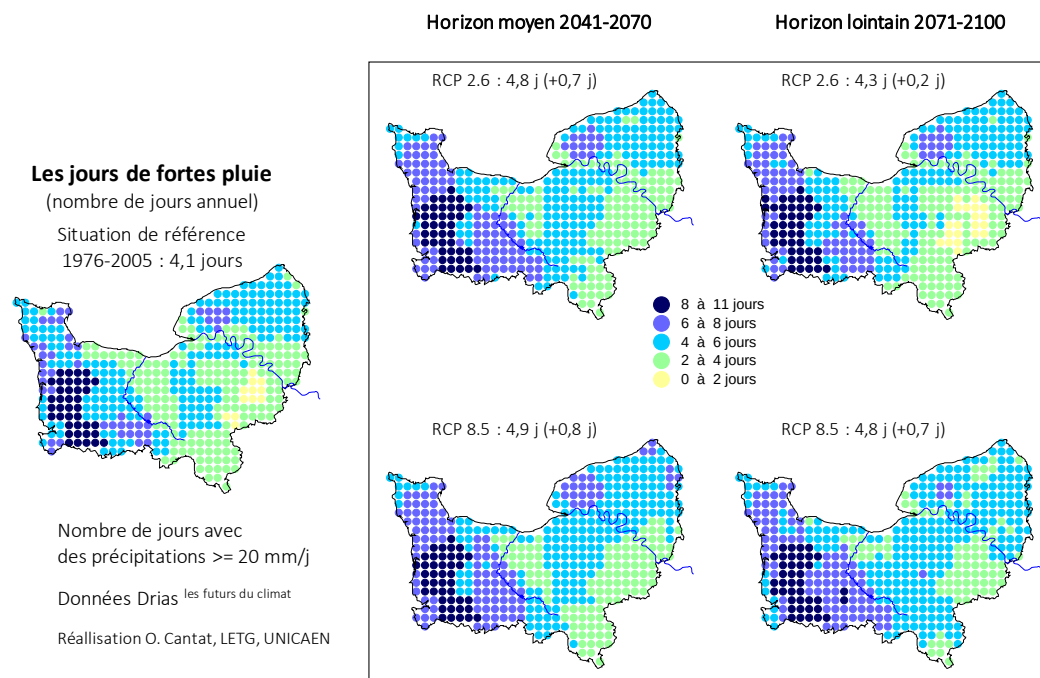


Figure 31 : Évolution attendue de la fréquence des fortes précipitations (seuil de 20 mm/jour) en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 à l'horizon lointain 2100 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

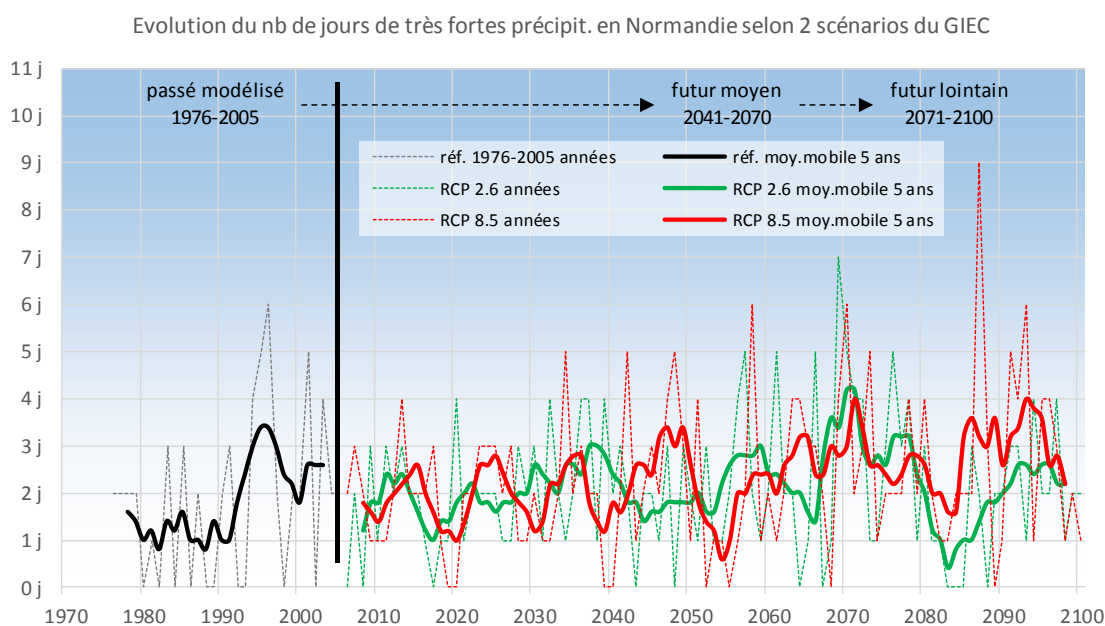


Figure 32 : Évolution attendue du nombre de jours avec des très fortes précipitations (≥ 20 mm/j) en Normandie de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Pour le seuil des fortes précipitations (≥ 10 mm/j) on n'observe pas d'évolution significative et les deux scénarios présentent des valeurs très voisines entre 15 et 20 jours par an dès l'horizon moyen (Fig. 33)

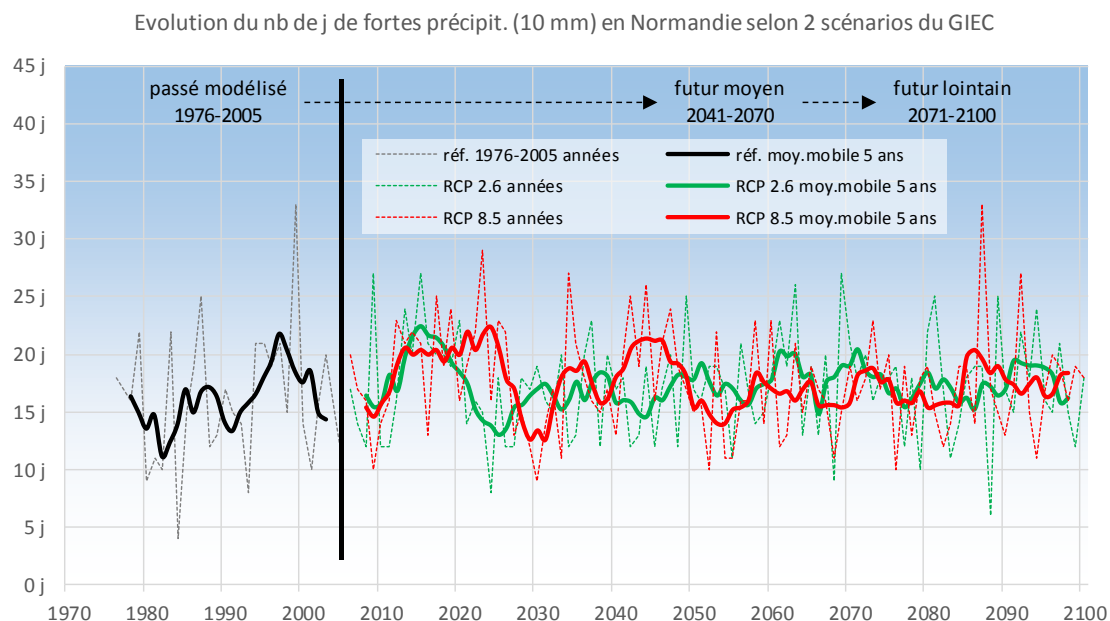


Figure 33 : Évolution attendue du nombre de jours avec des fortes précipitations (≥ 10 mm/j) en Normandie de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Du point de vue de l'évolution saisonnière, selon le scénario RCP 8.5 du GIEC à l'horizon 2100 (Fig. 34), toutes les saisons seraient affectées par une augmentation sensible de la part des précipitations intenses (au-dessus du 90ème centile annuel), notamment en hiver et en été (environ +10%), alors qu'aux intersaisons le phénomène serait moins prononcé (vers +4 à +5%).

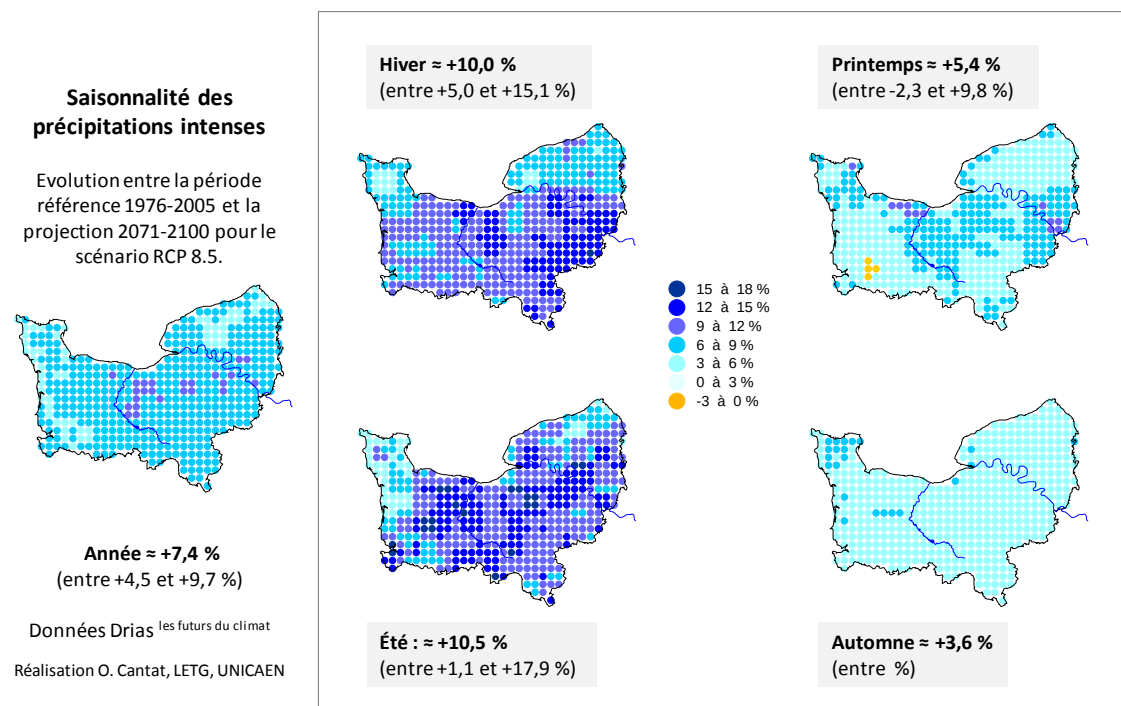


Figure 34 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne (en %) de la part des précipitations intenses (au-dessus du 90ème centile annuel) en Normandie. Scénario RCP 8.5 à l'horizon lointain 2100 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

3.3. Tempêtes

Les modèles actuels de projection climatique 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).

Toutefois, d'après les sorties du modèle Aladin (Tabl. 8), il semblerait qu'à l'horizon 2100 la fréquence des tempêtes diminue très légèrement sur le littoral normand pour les deux scénarios (1 à 2 jours en moins par an), après une faible augmentation dans l'horizon moyen terme. Ces tendances de faibles amplitudes sont visibles sur le continuum temporel de la station du Havre particulièrement ouverte aux vents forts (Fig. 35). Dans les terres, les valeurs sont si faibles qu'il n'est pas opportun d'interpréter le signal.

		Nombre de jours de tempête et écart à la moyenne 1976-2005								
		1976-2005	2041-2070				2071-2100			
		Réf.	RCP 2.6		RCP 8.5		RCP 2.6		RCP 8.5	
littoral	Cherbourg	5.2	4.3	-0.9	4.8	-0.4	3.8	-1.4	3.8	-1.4
	Le Havre	11.4	12.0	+0.6	12.2	+0.8	10.7	-0.7	10.4	-1.0
	Dieppe	9.2	8.4	-0.8	8.9	-0.3	7.0	-2.2	6.7	-2.5
intermédiaire	Caen	2.2	2.0	-0.2	2.3	+0.1	1.5	-0.7	1.8	-0.4
	Rouen	1.3	1.0	-0.3	1.9	+0.6	1.0	-0.3	1.4	+0.1
continental	Evreux	0.7	0.9	+0.2	1.3	+0.6	0.7	0.0	0.9	+0.2
	Alençon	0.3	0.1	-0.2	0.5	+0.2	0.2	-0.1	0.3	0.0
	Préaux	0.2	0.0	-0.2	0.4	+0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.1

Tableau 8 : Évolution attendue du nombre de jours de tempêtes (rafales ≥ 28 m/s, environ 100 km/h) en Normandie. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 aux horizons moyen et lointain (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement d'O. Cantat).

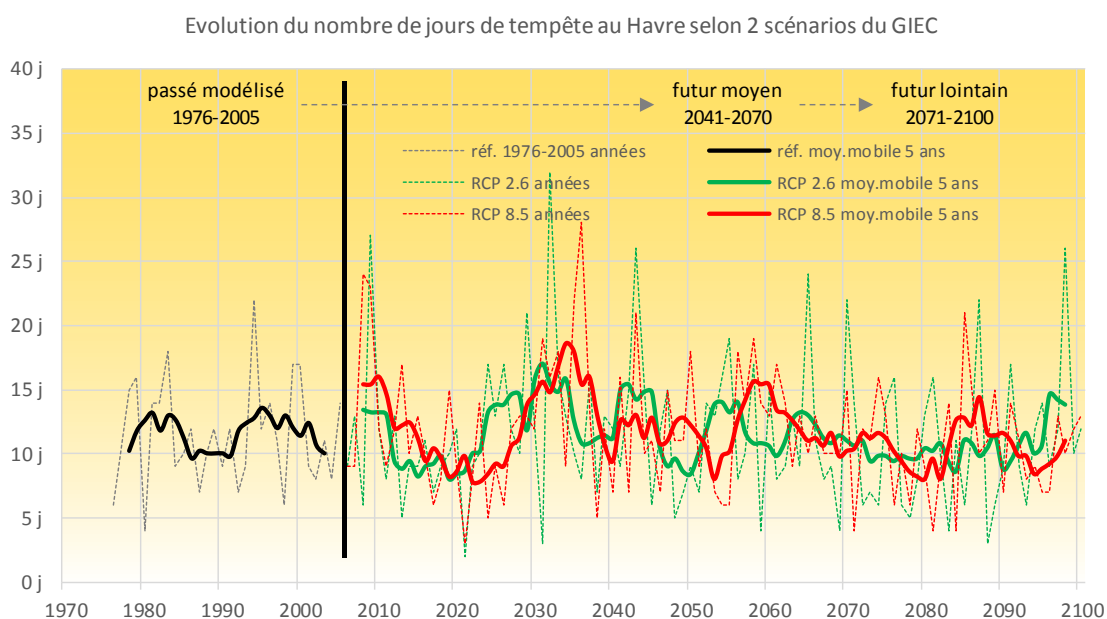


Figure 35 : Évolution attendue du nombre de jours de tempête (rafales supérieures à 100 km/h) sur le point de grille correspondant au site exposé du Havre Cap de La Hève de 1976 à 2100. Scénarios RCP 2.6 et 8.5 (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias (traitement et réalisation d'O. Cantat).

Cependant, à une échelle beaucoup plus large et selon le GIEC/IPCC (2013), 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.

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 (1970-2019) 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 ont été utilisés : l'un « optimiste », RCP 2.6, supposant la mise en application immédiate d'une politique climatique internationale ; 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 2014) dont les données sont toutes disponibles sur le portail Drias, les futurs du climat. Les projections résultent donc d'un seul modèle et les horizons moyens (2041-2070) et lointain (2071-2100) sont privilégiés. Toutefois, les autres modèles vont globalement dans le même sens, même si certaines valeurs et temporalités peuvent présenter quelques différences parfois...

Pour l'analyse des changements contemporains sur la période 1970-2019, les données de Météo-France ont été analysées sur huit stations normandes fiables et représentatives de la diversité climatique régionale.

Les résultats de ce travail indiquent clairement que le changement climatique est une réalité en Normandie. En effet, la température a augmenté sur toutes les stations météorologiques normandes, de l'ordre de +0,6 à +0,8°C entre la période de référence actuelle 1981-2010 et la précédente 1951-1980. L'utilisation d'un autre indicateur, fondé sur la réalisation de tendance linéaire sur les 8 stations normandes étudiées met en évidence une augmentation moyenne de la température de +1,7°C entre 1970 à 2019.

Le réchauffement climatique se traduit 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 présentant pas, quant à elle, de tendance statistiquement significative, mais une succession de phases pluvieuses et sèches entre 1970 et 2019. En revanche, le réchauffement de la température de l'air s'accompagne logiquement d'une diminution de la fréquence des précipitations sous forme de neige et du nombre de jours de brouillard.

Les projections concernant l'évolution de plusieurs paramètres climatiques en Normandie aux horizons proche (2021-2050), moyen (2041-2070) et lointain (2071 et 2100), selon deux scénarios d'émission en GES du GIEC/IPCC (RCP 2.5 et 8.5), sont résumées dans le tableau 9. Si on se fixe sur l'horizon lointain, les projections indiquent que l'élévation de la température atmosphérique moyenne 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 (scénario RCP 2.6), alors que sans politique climatique internationale (scénario RCP 8.5), elle pourrait dépasser +3,5°. Selon le scénario RCP 8.5, on assisterait à une augmentation importante de la fréquence des jours de chaleur supérieure ou égale à 25°C, de près de 9 jours par an actuellement à plus de 40 jours.

L'évolution des cumuls annuels de précipitations, à l'horizon 2100, tendrait vers une nette diminution de l'ordre de 10% dans le cas du scénario RCP 8.5 et présenterait une certaine stabilité dans le cas du scénario RCP 2.6.

Concernant les aléas météorologiques, l'écart devrait se creuser entre l'intérieur des terres qui subiront des vagues de chaleur plus intenses et plus durables et les espaces océanisés qui résisteront davantage à l'augmentation de fréquence de cet aléa estival, susceptible de déborder sur la fin du printemps et le début de l'automne. Sans politique climatique (RCP 8.5), les 30°C deviendraient très fréquents en été dans l'intérieur des terres (30 à 40 jours par an), alors que ce seuil serait atteint moins fréquemment sur le littoral (autour de 10 jours par an), voire rarement sur le « finistère » cotentinois (4 jours par an).

La durée des périodes sèches serait progressivement plus longue et le phénomène serait particulièrement prononcé en cas d'absence de politique climatique internationale (RCP 8.5), avec un allongement moyen supérieur à 1 semaine par an à l'horizon 2100, contre seulement 2 jours par an si des mesures de réduction des gaz à effet de serre sont rapidement adoptées à l'échelle mondiale (RCP 2.6).

Le nombre de jours de très fortes précipitations (cumul dépassant 20 mm par jour, soit 20 litres/m²), avec en moyenne 4,1 jours par an, augmenterait entre 0,3 et 0,8 jour de plus par an en moyenne.

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 la rapport AR5 de l'IPCC/GIEC AR5 (2013) et ses scénarios RCP et plusieurs rapports intermédiaires (IPCC/GIEC, 2018, 2019), avant la parution du rapport AR6 prévue en 2022 ;

- 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 2019 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, 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 les autres saisons, surtout 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 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 matières de sécurité, d'aménagement et de gestion de l'environnement au sens large...

	REFERENCE		
	(1976-2005)		
	moy.	min Région	max Région
T° moyenne annuelle (°C)	10.2	9.1	11.4
	écart / Normale		
Nb de jours de gelée	34.5	5	67
	écart / Normale		
Nb de jours de chaleur	13.6	0	26
	écart / Normale		
Précipitations annuelles (mm)	859	642	1126
	écart / Normale		
Nb de jours de précip.	139	123	155
	écart / Normale		
Nb de jours de fortes précip.	4.0	1	10
	écart / Normale		
Nb maxi de jours secs consécutifs	22.4	19	25
	écart / Normale		

SCENARIO RCP 2.6 (avec réduction des gaz à effet de serre)									
Horizon proche (2021-2050)			Horizon moyen (2041-2070)			Horizon lointain (2071-2100)			
moy.	min Région	max Région	moy.	min Région	max Région	moy.	min Région	max Région	
11.1	9.9	12.1	11.3	10.1	12.3	11.2	10.1	12.2	
+0.9	+0.8	+0.7	+1.1	+1.0	+0.9	+1.0	+1.0	+0.8	
27.2	4	55	26.5	4	54	26.4	4	54	
-7.3	-1	-12	-8.0	-1	-13	-8.1	-1	-13	
19.3	1	37	23.6	2	45	22.3	2	43	
+5.7	+1	+11	+10.0	+2	+19	+8.7	+2	+17	
847	643	1111	859	650	1123	858	648	1105	
-12	+1	-15	0.0	8	-3	-1	6	-21	
137	120	151	133	119	146	136	120	150	
-2	-3	-4	-6	-4	-9	-3	-3	-5	
4.2	2	10	4.7	2	10	4.3	1	10	
+0.2	+1	0	+0.7	+1	0	+0.3	0	0	
23.3	20	27	23.5	20	27	24.7	22	28	
+0.9	+1	+2	+1.1	+1	+2	+2.3	+3	+3	

	REFERENCE		
	(1976-2005)		
	moy.	min Région	max Région
T° moyenne annuelle (°C)	10.2	9.1	11.4
	écart / Normale		
Nb de jours de gelée	34.5	5	67
	écart / Normale		
Nb de jours de chaleur	13.6	0	26
	écart / Normale		
Précipitations annuelles (mm)	859	642	1126
	écart / Normale		
Nb de jours de précip.	139	123	155
	écart / Normale		
Nb de jours de fortes précip.	4.0	1	10
	écart / Normale		
Nb maxi de jours secs consécutifs	22.4	19	25
	écart / Normale		

SCENARIO RCP 8.5 (sans politique climatique internationale)									
Horizon proche (2021-2050)			Horizon moyen (2041-2070)			Horizon lointain (2071-2100)			
moy.	min Région	max Région	moy.	min Région	max Région	moy.	min Région	max Région	
11.3	10.1	12.3	12.1	11.0	13.1	13.7	12.6	14.6	
+1.1	+1.0	+0.9	+1.9	+1.9	+1.7	+3.5	+3.5	+3.2	
22.9	3	48	16.9	1	40	11.5	1	28	
-11.6	-2	-19	-17.6	-4	-27	-23.0	-4	-39	
20.2	2	39	33.2	3	58	54.3	9	87	
+6.6	+2	+13	+19.6	+3	+32	+40.7	+9	+61	
894	670	1156	850	633	1101	775	587	996	
35	28	30	-9	-9	-25	-84	-55	-130	
141	124	156	132	116	146	118	103	134	
+2	+1	+1	-7	-7	-9	-21	-20	-21	
4.8	2	10	4.9	2	10	4.8	2	10	
+0.8	+1	0	+0.9	+1	0	+0.8	+1	0	
23.9	22	29	26.5	23	30	29.5	25	35	
+1.5	+3	+4	+4.1	+4	+5	+7.1	+6	+10	

Tableau 9 : Synthèse sur l'évolution attendue de plusieurs paramètres climatiques en Normandie selon deux scénarios d'émission en GES du GIEC/IPCC (RCP 2.5 et 8.5) et trois horizons de temps (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin). Période de référence (1976-2005). Données Drias les futurs du climat (traitement d'O. Cantat). Scénario RCP 2.6, avec un politique climatique internationale visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Scénario RCP 8.6, sans politique climatique internationale pour limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Bibliographie

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.)*.

- 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 : 978-2-11-151133-0 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, 2020. *Le climat en Normandie*. Profil Environnemental de Normandie, livrable courant 2020, 92 p. <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/espace-cartographique-a2782.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.sisyphes.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
- 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.Alegría,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, 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.Alegría,M.Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. 35 p.

- 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., 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. 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., 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., 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)
- 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., Cadot 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.
- 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.

- 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. 68p.
- 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.
- Valdès 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.
- 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.

ANNEXES

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

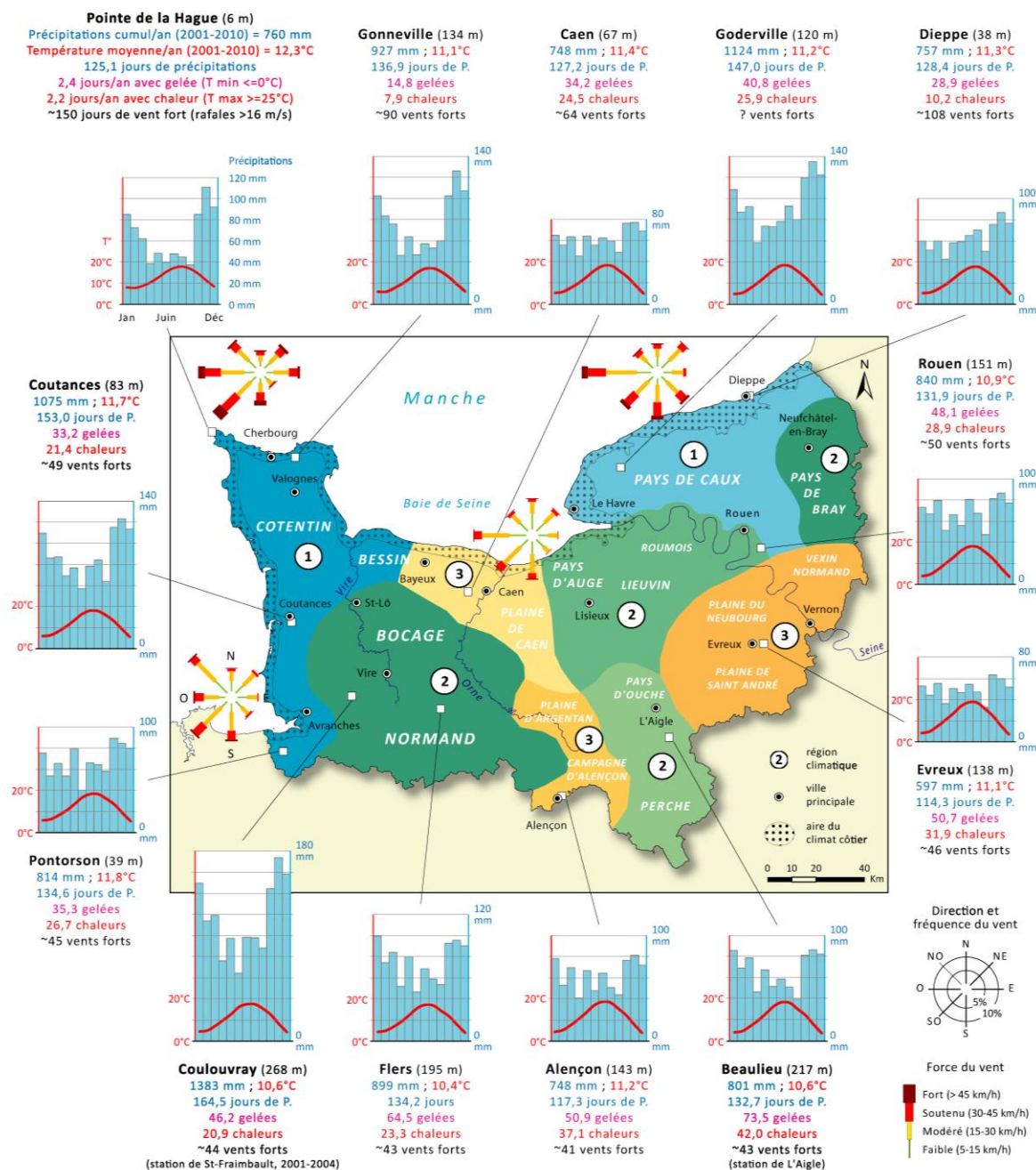
La Normandie est globalement marquée par les influences océaniques. Trois grands types de climats se distinguent, nuancés à échelle plus fine par les facteurs géographiques locaux. Les températures et les précipitations varient principalement selon la topographie, l'exposition aux flux humides provenant 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).



Les principaux ensembles climatiques normands

Familles de climats : (1) maritime ; (2) contrasté des collines ; (3) d'abri des plateaux ; côtier (variante plus éventée et moins arrosée).

Document de synthèse conçu à partir de cartes de températures et de précipitations réalisées d'après les données Drias en points de grille CNRM Météo-France (maille de 8 km) et inspiré des cartes de Trzpit de l'Atlas de Normandie (1965) et de la thèse d'Escourrou (1978).

Les 13 diagrammes ombrothermiques sont dessinés à partir de données Météo-France sur la période 2001-2010.

Les 4 roses des vents littorales sont dessinées à partir des données du modèle Aladin de Météo-France sur la période 1999-2009.

Réalisation : Olivier Cantat, GEOPHEN, LETG Caen, UMR 6554 CNRS, Université de Caen Normandie, 2018.