

# **Évolution du climat** à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie





### **BENOIT LAIGNEL**

Président du GIEC de la Métropole Rouen Normandie et co-Président du GIEC Normand, Benoit LAIGNEL est professeur en géosciences et environnement et Vice-Président de l'Université de Rouen Normandie. Il est membre expert et délégué français représentant le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche à l'IPCC/GIEC. Il est également Principal Investigator de la mission spatiale SWOT portée par le CNES et la NASA

### **ZEINEDDINE NOUACEUR**

Zeineddine NOUACEUR est maître de conférences en climatologie à l'Université de Rouen Normandie. Ces travaux de recherche portent sur les changements climatiques et les risques environnementaux dans les régions sahéliennes et en Afrique du Nord.

# **Sommaire**

Constat Les scénarios du GIEC	<b>5 7</b>
PARTIE I : Évolution récente du climat en Normandie et dans l'agglomération rouennaise	8
Évolution des températures atmosphériques, des vagues de chaleur et de froid	8
Évolution récente des températures	8
Évolution récente des vagues de chaleur	10
Évolution récente des vagues de froid	11
Évolution des précipitations, des phénomènes neigeux, du brouillard et des épisodes de fortes précipitations	12
Évolution récente des précipitations Évolution récente de la neige et du brouillard	12 13
Évolution récente de la rieige et du brouillard Évolution récente des fortes précipitations	13
Évolution des vents et des tempêtes	14
PARTIE II: Projections climatiques en Normandie et dans l'agglomération rouennaise Projections sur l'évolution des températures atmosphériques et des vagues de chaleur et de froid Projections sur l'évolution des températures atmosphériques Projections sur l'évolution des vagues de chaleur Projections sur le nombre de nuits anormalement chaudes et de nuits tropicales Projections sur l'évolution du froid et des gelées	15 15 16 18 19
Projections sur l'évolution des précipitations, des phénomènes neigeux, et des épisodes de fortes	19
précipitations	21
Projections sur l'évolution des précipitations	21
Projections sur l'occurrence des phénomènes neigeux	23
Projections sur l'occurrence des épisodes de fortes précipitations	23
Projections sur la fréquence des sécheresses et incidence sur l'indice bioclimatique	23
Projections sur l'occurrence des tempêtes	26
Conclusion et chiffres-clés à retenir pour la Métropole Rouen Normandie	27
Références bibliographiques	28

# Constat

Les changements liés à l'évolution du climat sont déjà perceptibles au travers de l'élévation de la température atmosphérique et une plus grande occurrence des aléas naturels (inondations, canicules, sécheresses induisant potentiellement des feux de forêts, aléa « retrait et gonflement » des sols argileux), l'organisation sanitaire et sociale (plan canicule et prévalence accrue de certaines maladies comme l'asthme en lien avec la qualité de l'air). l'impact sur les écosystèmes et la biodiversité (capacité des espèces à s'adapter et/ou à migrer) et les transformations économiques induites (évolution des pratiques agricoles, modification des activités touristiques, etc.).

Déterminer les effets du changement climatique constitue aujourd'hui un enjeu mondial majeur de société pour le XXIe siècle à laquelle les scientifiques doivent répondre afin d'aider à la mise en place de politiques d'atténuation et d'adaptation et d'outils de gestion adaptés aux enjeux. À l'échelle mondiale, l'autorité scientifique est représentée par le Groupe Intergouvernemental des Experts sur le Climat (GIEC en français et IPCC en anglais) créé en 1988 et 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 et la réponse à apporter afin d'atténuer et s'adapter à leurs conséquences. Le GIEC se compose de trois groupes de travail proposant chacun un rapport d'évaluation de l'évolution du changement climatique, de ses impacts et des politiques et solutions d'atténuation. Récemment, le GIEC a terminé son 6e cycle d'évaluation qui a donné lieu à trois volumes :

Vol. 1 : Les aspects physiques du changement climatique (août 2021)

Vol. 2 : Les impacts, les risques, l'adaptation et la vulnérabilité au changement climatique (février 2022)

Vol. 3: L'atténuation (avril 2022)

Le rapport de synthèse de ces volumes a été publié en mars 2023. Le GIEC publie aussi des rapports spéciaux sur certains sujets comme par exemple sur les conséquences d'un réchauffement à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels (2018), l'océan et la cryosphère (2019) ou encore sur la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres (2019).

S'appuyant sur les mêmes principes que le GIEC, un groupe interdisciplinaire composé d'experts locaux sur le climat a été créé en 2018 par la Métropole Rouen Normandie dans le cadre de sa COP 21 locale. Ce GIEC de la Métropole rouennaise vise à fournir une expertise approfondie de l'évolution du changement climatique et de ses conséquences à l'échelle de l'intercommunalité, afin d'aider à la prise de décision dans les politiques d'atténuation et d'adaptation locales et les projets d'aménagement. Sur cette base, une première analyse de l'évolution du climat de la Métropole a été réalisée en 2018 à partir de laquelle ont découlé d'autres publications thématiques (psychologie sociale, ressources en eau, agriculture, biodiversité, qualité de l'air, santé publique, urbanisme, architecture, mobilités, énergie, économie). Depuis, les modèles climatiques ont été actualisés et de nouvelles données sont désormais disponibles pour permettre une nouvelle analyse du changement climatique sur le territoire de la Métropole. Cette présente publication propose donc une actualisation de l'étude de 2018.

#### Données disponibles

En France, dans le cadre du projet DRIAS¹, pour l'ensemble des régions françaises et sur la base des scenarii RCP du cinquième rapport du GIEC (IPCC/GIEC, 2013), des projections climatiques régionalisées ont été réalisées et un portail internet dédié à ces projections et à l'évolution d'indices de températures, de précipitations et de vent a été mis à disposition. Ces données ont été utilisées pour établir des scénarios de référence à considérer pour la mise en œuvre du premier plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), dans le cadre de la mission confiée à Jean Jouzel par le Ministère en charge du développement durable en 2010 (Ouzeau et al., 2014; Planton et al., 2015). Depuis, les projections climatiques régionalisées du DRIAS ont été actualisées en 2020 par Météo-France (Soubeyroux et al., 2020). Ces nouvelles projections sont aussi synthétisées sur le site Climat HD, un autre outil de Météo-France, et plusieurs seront utilisées dans le cadre de cette présente étude.

En outre, il existe aussi des travaux axés sur le changement climatique et ses conséquences sur les bassins de la Seine et de la Somme, ainsi que sur le territoire normand et son littoral (GIP Seine Aval, GIP ROL (Réseau d'Observation du littoral de Normandie et des Hauts de France), GIEC normand, GIEC de la Métropole Rouen Normandie, projet LiC-CO (Littoraux et Changements Côtiers) du partenariat Transmanche, Plateforme numérique multirisques de la Métropole de Rouen Normandie développée par l'institut TURN de l'Université Rouen Normandie). Il semble ainsi assez légitime de penser que les travaux à l'échelle de la Normandie puissent être extrapolables en grande partie au territoire de la Métropole de Rouen, à l'exception tout de même du milieu urbain où les tendances doivent être regardées avec prudence et nécessiteraient des études spécifiques, par exemple sur l'évolution des îlots de chaleur et de fraicheur, ou encore sur le risque inonda-

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et nos environnements



### Quelques définitions de notions utilisées dans cette expertise :

- Bilan radiatif: Exprimé en W/m² et renvoyant au principe de l'effet de serre, il s'agit de la différence entre les flux d'énergie solaire entrant sur Terre et les flux renvoyés dans l'espace. Avec l'augmentation des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dont le CO₂ est le plus marquant, ce bilan est aujourd'hui positif et illustre l'ampleur du réchauffement de l'atmosphère.
- Forçage radiatif: ce phénomène correspond à une variation du bilan radiatif provoqué par un facteur influençant l'évolution du climat. Celui-ci peut être d'origine naturelle (éruption volcanique, activité solaire) ou anthropique (émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols issus des activités humaines, défrichement, etc.).
- Projection (ou simulation) climatique: Selon le GIEC (2013), il s'agit d'une simulation de la réponse du système climatique à un scénario futur d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols. Cette simulation est obtenue généralement à l'aide des modèles climatiques, les outils numériques permettant de modéliser les interactions et les rétroactions physiques, chimiques, et biologiques du climat en fonction des forçages radiatifs et des scénarios appliqués.
- Canicules (ou vague de chaleur): À la suite du retour d'expérience de la canicule de 2003 (Cantat, 2005), les épisodes caniculaires ne sont plus définis depuis 2004 uniquement par la valeur maximale de la température supérieure à 35°c durant trois jours consécutifs, mais également en fonction des valeurs minimales mesurées la nuit car celles-ci conditionnent la phase de récupération physiologique nocturne résultant de la qualité du sommeil. En France, la fréquence de ce phénomène a nettement augmenté ces dernières décennies (http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/canicules; Cantat, 2005) En Seine-Maritime, un épisode est déclaré comme caniculaire lorsque la température maximale journalière atteint 33°C, suivie d'une température minimale ne descendant pas en-dessous de 18°C, durant trois jours consécutifs.
- Jour de chaleur : jour où la température maximale de l'air dépasse 25°C à Rouen
- Jour de forte chaleur : jour où la température maximale de l'air dépasse 30°C à Rouen
- Jour de très forte chaleur: jour où la température maximale de l'air dépasse 35°C
   à Rouen
- Journées anormalement chaudes: Une journée anormalement chaude est une journée pour laquelle la température maximale est supérieure d'au moins 5 °C à la température maximale de référence (calculée au niveau local sur la période 1976-2005). À titre d'exemple, ces références respectives sont en moyenne pour juin à août de 23 °C pour Paris, 23 °C pour Nantes, 26 °C pour Toulouse.
- Nuits anormalement chaudes: Une nuit anormalement chaude est une nuit pour laquelle la température minimale est supérieure d'au moins 5 °C à la température minimale de référence (calculée au niveau local sur la période 1976-2005). À titre d'exemple, ces références respectives sont en moyenne pour juin à août de 16 °C pour Paris, 14 °C pour Nantes. 17 °C pour Toulouse.
- Nuits tropicales: nuit durant laquelle la température minimale de l'air ne descend pas en-dessous de 20°C.
- Jour de froid (ou gelée): jour où la température minimale de l'air descend en-dessous de 0°C à Rouen
- Jour de grand froid (ou forte gelée) : jour où la température minimale de l'air des-
- Jour de très grand froid (ou très forte gelée): jour où la température minimale de l'air descend en-dessous de -10°C à Rouen
- Tempête: phénomène atmosphérique issu d'un système dépressionnaire générant des vents violents supérieurs à 100 km/h en plaine sur une surface étendue (plus de 2 % du territoire).
- Indice bioclimatique: rapport moyen mensuel des précipitations sur la température moyenne durant le printemps et l'été

### Les scénarios du GIEC

L'évolution du changement climatique et de ses impacts sur les sociétés va dépendre des réactions du système Terre aux différents forçages radiatifs naturels (éruptions volcaniques, activité solaire) ou anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols, modification des puits de carbone par le changement de l'usage des terres, etc.) qui vont influencer le bilan radiatif de la planète, et des choix socio-économiques et de développement pris par les sociétés (choix énergétiques, population, activité économique, développement technologique, agricole, industriel, etc.). Afin d'analyser l'évolution du climat à long-terme en fonction de ces nombreux paramètres complexes, le GIEC a élaboré plusieurs générations de scénarios socio-économiques d'émissions de gaz à effet de serre au cours de ses six rapports d'évaluation (AR)<sup>2</sup>:

- Les quatre scénarios SA90 lors de l'AR1 paru en 1990
- Les scénarios IS92 par l'AR2 et l'AR3 publiés respectivement en 1995 et en 2002,
- Les scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios en anglais – Rapport spécial sur les scénarios d'émissions en français) introduits dans l'AR4 paru en 2007 (Nakicenovic et al., 2000)
- Les scénarios RCP (pour Representative Concentration Pathways en anglais) issus des scénarios SRES et utilisés pour l'AR5 en 2013-2014. Développés par la communauté scientifique pour les besoins du GIEC, ils illustrent les profils représentatifs des concentrations des gaz à effet de serre, de l'ozone et des aérosols pour la période 2006-2300 en fonction des efforts entrepris pour réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre à partir des techniques actuelles (à l'inverse des scénarios SRES qui ne prévoyaient pas de politique climatique, IPCC, 2013). Exprimés en W/m² pour désigner le forçage radiatif induit, ils se répartissent en 4 familles (Figure 1):
  - RCP 2.6, considéré comme le scénario optimiste où les réductions des émissions et des concentrations de gaz à effet

- de serre sont les plus drastiques et sur lequel s'appuient les objectifs de l'Accord de Paris de 2015. En effet, il s'agit du seul scénario qui permet de limiter le réchauffement de la Terre à +2°C.
- RCP 4.5, considéré comme un scénario médian, où les émissions se poursuivent après 2050 mais se stabilisent avant 2100
- RCP 6.0, un deuxième scénario intermédiaire où la trajectoire des émissions croît encore après 2100 mais se stabilise avant 2150
- RCP 8.5, le scénario le plus pessimiste, où les émissions et les concentrations ne cessent de croître. Il s'agit du scénario pour lequel aucune politique climatique d'envergure n'est réplieée
- Les scénarios SSP (pour Shared Socioeconomic Pathways) élaborés par des sociologues et les économistes intégrés récemment pour l'AR6 en 2022. Ils distinguent les modèles de développement socio-économiques et technologiques, et montrent les effets des stratégies d'atténuation et d'adaptation.

Ces scénarios gardent cependant une part d'incertitude car ils prennent en compte des forçages radiatifs pouvant être imprévisibles ou variables dans le temps (éruptions volcaniques, aérosols, activité solaire). Appliqués à l'échelle mondiale ou continentale, ces scénarios ont aussi été progressivement régionalisés afin de pouvoir déterminer la transposition des changements globaux à une échelle locale, et leurs répercussions environnementales, sociales et économiques pour les Etats et les mailles administratives sous-jacentes. Dans le cadre de la présente expertise, les scénarios RCP seront utilisés en raison de la disponibilité des données. Les nouveaux scénarios SSP étant encore très récents, ils ne seront régionalisés qu'au cours des prochaines années.



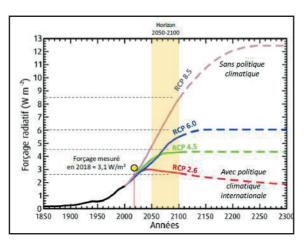


FIGURE 1: En haut, évolution du forçage radiatif total et global (W/m²) pour la période historique (1850-2005), valeur du forçage en 2018, et les trajectoires des quatre scénarios RCP (2005-2100) et leurs extensions simulées jusqu'à 2300. Le forçage radiatif est exprimé par rapport à l'année de référence 1850. Sources : GIEC 2013 et Drias, complété et adapté par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020). En bas, caractéristiques des scénarios RCP utilisés pour la présente expertise (Moss et al., Nature 2010).

Scénario RCP	Forçage radiatif considéré	Concentration de GES (ppm)
RCP 2.6	Pic à 3 W/m² avant 2100 puis déclin	Pic à environ 490 eq-CO <sub>2</sub> avant 2100 puis déclin
RCP 4.5	Environ 4,5 W/m² au niveau de stabilisation après 2100	Environ 660 eq-CO <sub>2</sub> au niveau de stabilisation après 2100
RCP 6.0	Environ 6 W/m² au niveau de stabili- sation après 2100	Environ 850 eq-CO <sub>2</sub> au niveau de stabilisation après 2100
RCP 8.5	Supérieur à 8,5 W/m²	Supérieure à 1370 eq-CO <sub>2</sub> en 2100

# PARTIE I : Évolution récente du climat en Normandie et dans l'agglomération rouennaise

# Évolution des températures atmosphériques, des vagues de chaleur et de froid

#### Évolution récente des températures

En appliquant la méthode des anomalies de températures du GIEC entre deux périodes de référence, on constate des anomalies de températures positives de l'ordre de + 0,6°C à +0,8°C entre la période de référence actuelle 1981-2010 et la précédente 1951-1980 qui définissent les normales climatiques (Cantat et al., 2020). En appliquant cette fois la méthode des tendances linéaires, on constate une augmentation de la température moyenne de +1,2°C à + 2,2°C pour les huit stations météorologiques normandes disposant de données continues et fiables entre 1970 à 2020 (Figure 2). À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, la station de Rouen-Boos montre une tendance à l'augmentation de la température statistiquement significative de 2,2 °C sur la période de 1970 à 2020 (Tableau 1).

Plus précisément, l'analyse de l'évolution des températures annuelles à la station Météo-France de Rouen-Boos permet de dégager deux grandes périodes caractéristiques

et significatives (Figure 3a). Une première phase entre 1960 et la fin des années 1980 est marquée par des températures proches de la normale (1961-1990). La deuxième phase de 1989 à 2022 témoigne, quant à elle, du réchauffement climatique actuel. L'analyse de cette période montre que le début de ce cycle commence à partir de l'année 1989, avec une confirmation de la tendance dès l'année 1994. Les écarts à la période de référence 1961-1990 dépassent systématiquement +1°C à partir du début des années 2000 et s'accentuent depuis le milieu des années 2010 avec des écarts dépassant plusieurs fois +1,5°C, avec un maximum à +2,4°C environ en 2020.

Les températures enregistrées à Rouen-Boos montrent aussi une hausse des valeurs minimales (températures nocturnes) et des valeurs maximales (généralement en milieu d'après-midi) (Figures 3b et 3c). Les dernières périodes des séries chronologiques permettent de voir que sur cette longue période chaude de près d'un quart de siècle, les valeurs, après avoir accusé un léger ra-

lentissement entre 2005 et 2010 (notamment pour les minimas), enregistrent les indices les plus élevés de la période considérée. Par exemple pour l'année 2014, on note environ + 1,90°C pour les minimas et + 2,05°C pour les maximas. Comme pour les températures moyennes, les écarts de températures avec la période de référence se sont accentués depuis le milieu des années 2010 notamment pour les températures maximales. L'écart plus réduit en 2021 marque un léger coup d'arrêt à cette tendance qui repart à la hausse en 2022, considérée par Météo-France comme l'année la plus chaude jamais enregistrée en France depuis le début du XXº siècle (Météo-France, 2023).

La comparaison entre les valeurs enregistrées dans la station de Rouen-Jardin (station urbaine de centre-ville) et Rouen-Boos (station péri-urbaine) située sur le plateau nord de l'agglomération, ne montre pas de différences significatives sur les tendances enregistrées des températures moyennes des deux stations.

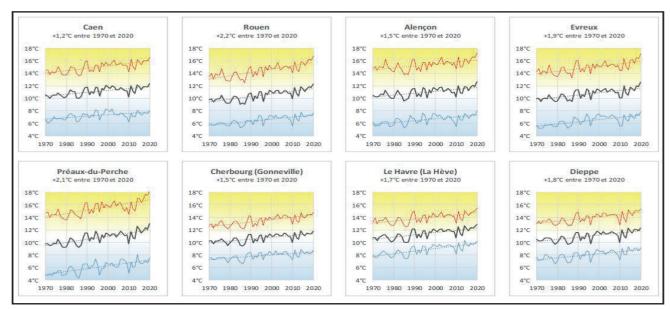


FIGURE 2 : Évolution de la température de l'air moyenne entre 1970 et 2020 pour les huit stations météorologiques normandes disposant de données continues et fiables. Tendances linéaires (pointillés) et moyennes des valeurs minimale (bleu), moyenne (gris foncé) et maximale (rouge) des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Évreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. – Source : Données Météo-France, traitements et analyses réalisés par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

	Caen	Rouen	Alençon	Evreux	Cherbourg	Préaux	Dieppe	La Hève	Région
moyenne 1970-2020	11.2°C	10.5°C	11.0°C	10.7°C	10.7°C	10.8°C	11.0°C	11.4°C	10.91°C
tendance linéaire	+1.2°C	+2.2°C	+1.5°C	+1.9°C	+1.5°C	+2.1°C	+1.7°C	+1.9°C	+1.8°C
valeur décennale									
décennie 1 : 1971-1980	10.4°C	9.7°C	10.4°C	9.9°C	10.1°C	9.7°C	10.3°C	10.7°C	10.1°C
décennie 2 : 1981-1990	11.0°C	10.0°C	10.7°C	10.4°C	10.4°C	10.3°C	10.7°C	11.0°C	10.6°C
décennie 3 : 1991-2000	11.3°C	10.6°C	11.0°C	10.8°C	10.7°C	10.9°C	11.0°C	11.5°C	11.0°C
décennie 4 : 2001-2010	11.4°C	10.9°C	11.2°C	11.1°C	11.1°C	11.1°C	11.3°C	11.8°C	11.2°C
décennie 5 : 2011-2020	11.7°C	11.5°C	11.7°C	11.5°C	11.3°C	11.9°C	11.8°C	12.2°C	11.7°C
décennie 5 - décennie 1	+1.3°C	+1.8°C	+1.3°C	+1.6°C	+1.2°C	+2.2°C	+1.5°C	+1.5°C	+1.6°C

Tableau 1 : Évolution de la température de l'air entre 1970 à 2020, calculée à partir de tendances linéaires et des valeurs moyennes décennales pour 8 stations météorologiques régionales. – Source : Données Météo-France, traitements et analyses réalisés par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

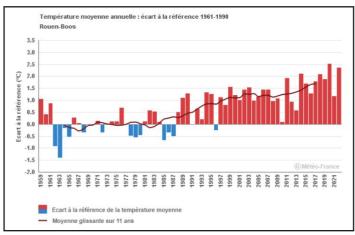


FIGURE 3a : Évolution des écarts à la période de référence 1961-1990 de la moyenne annuelle des températures moyennes quotidiennes observées. Les valeurs inférieures et supérieures à la période 1961-1990 apparaissent respectivement en bleu et en rouge. La température moyenne quotidienne est égale à la somme des températures minimales et maximales observées divisée par deux. – Source : Données Météo-France issues du site Climat HD (séries homogénéisées, données brutes de 2015 à 2022).

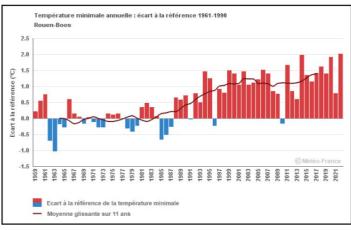


FIGURE 3b: Évolution des écarts à la période de référence 1961-1990 de la moyenne annuelle des températures minimales quotidiennes observées. Les valeurs inférieures et supérieures à la période 1961-1990 apparaissent respectivement en bleu et en rouge. La température minimale est observée entre J-1 à 18h UTC et J à 18 heures UTC. – Source: Données Météo-France issues du site Climat HD (séries homogénéisées, données brutes de 2015 à 2022).

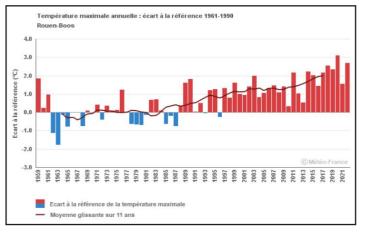


FIGURE 3c: Évolution des écarts à la période de référence 1961-1990 de la moyenne annuelle des températures maximales quotidiennes observées. Les valeurs inférieures et supérieures à la période 1961-1990 apparaissent respectivement en bleu et en rouge. La température maximale est observée entre J à 06 heures UTC et J+1 à 06 heures UTC. – Source: Données Météo-France issues du site Climat HD (séries homogénéisées, données brutes de 2015 à 2022).

### Évolution récente des vagues de chaleur

Les vagues de chaleur deviennent de plus en plus récurrentes sur le territoire de l'ex région Haute-Normandie, notamment ces deux dernières décennies (Figure 4). Même si les canicules survenues du 3 au 14 août 2003 et du 23 juin au 7 juillet 1976 ont été les plus sévères (selon la taille des bulles), l'épisode du 23 au 26 juillet 2019 est celui où a été mesurée la journée la plus chaude depuis l'année 1947 (43°C mesurés à la station Rouen-Jardin et 41,3°C mesurés à la station de Rouen-Boos le 25 juillet 2019).

Les jours où la température maximale de l'air dépasse 25°C sont aussi plus fréquents à Rouen depuis les années 1970 avec une augmentation moyenne de 22 jours (de 15 à 37 jours) (Cantat et al., 2020 - Figure 5). La récurrence des jours de forte chaleur (plus de 30°C) et des très fortes chaleurs (plus de 35°C) est également perceptible dans les données de Météo-France. À Rouen, entre la période 1971-1990 et la période actuelle 2001-2020, la fréquence de ces journées a considérablement augmenté passant de 58 à 134 occurrences pour les jours de forte chaleur, et de 1 occurrence (en 1990) à 17 cas recensés entre 2001 et 2020, dont 11 durant les six dernières années, pour les jours de très forte chaleur. Des valeurs extrêmes ont notamment pu être atteintes en 2019 lors du pic de la canicule. Par ailleurs, les années particulièrement chaudes où le mercure dépasse 25°C plus de 20 jours par an semblent se répéter plus fréquemment bien que des variabilités interannuelles restent toutefois constatées comme en 2007 où le seuil des 25°C n'a été « seulement » atteint qu'à dix reprises à Rouen.

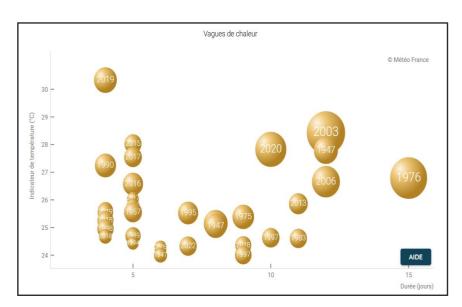


FIGURE 4 : Évolution des vagues de chaleur dans l'ex région Haute-Normandie de 1947 à 2023 - Source : Climat HD Météo-France

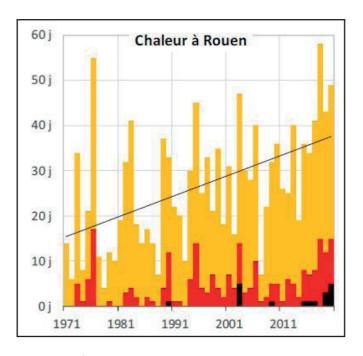


FIGURE 5 : Évolution du nombre de jours de chaleur (T° maximale journalière de l'air supérieure ou égale à 25°C (en orange)), de jours de forte chaleur (T° supérieure ou égale à 30°C (en rouge)), et de jours de très forte chaleur (T° supérieure ou égale à 35°C (en noir)) à Rouen-Boos entre 1971 et 2020. – Source : Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

#### Évolution récente des vagues de froid

L'évolution des vagues de froid montre des tendances radicalement opposées à celles présentées précédemment (Figure 6). Dans l'ex région Haute-Normandie, les vagues de froid ont été moins nombreuses et moins intenses ces deux dernières décennies (voir la taille des bulles). Les phénomènes les plus longs et les plus sévères se sont produits avant les années 2000.

À Rouen, il est déjà relevé une réduction importante des jours de froid et de gel (température minimale journalière inférieure ou égale à 0°C) de 23 occurrences en moyenne entre 1971 et 2020, avec une tendance moyenne allant de 58 jours à 35 jours (Figure 7). De même, le nombre de jours de fortes gelées (minimum inférieur à -5°C) décline nettement entre la période 1971-1990 pour laquelle 155 cas sont recensés, et la période actuelle 2001-2020 avec 97 cas recensés. Enfin, les très grands froids (minimum inférieur à -10°C) deviennent plus rares dans la région et le territoire rouennais ne fait pas exception. Entre 1971 et 1990, un cumul de 22 cas a été observé tandis que seulement 6 occurrences ont été relevées de 2001 à 2020, avec une dernière apparition en février 2012 (-12,1°C le 12 février). De manière générale, la tendance des vagues de froid tend à la diminution mais avec des variabilités interannuelles importantes comme en témoigne l'année 2010 qui fut également particulièrement neigeuse en Normandie (voir Figure 10 - Cantat et al., 2020).

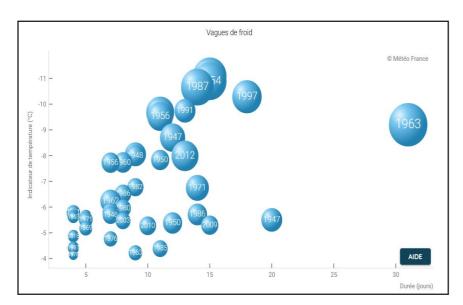


FIGURE 6 : Évolution des vagues de froid dans l'ex région Haute-Normandie de 1947 à 2022 - Source : Climat HD de Météo-France

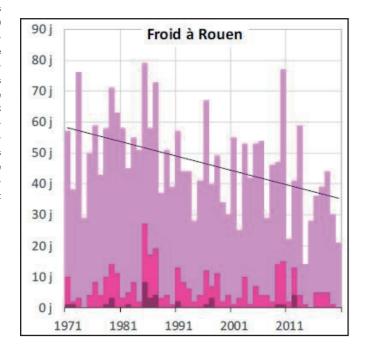


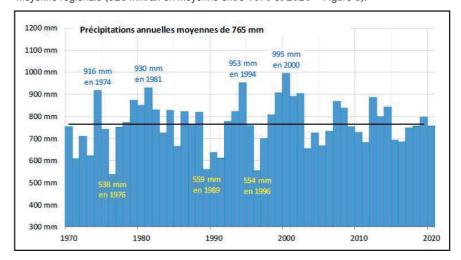
FIGURE 7 : Évolution du nombre de jours de froid (T° minimale journalière de l'air inférieure ou égale à 0°C en rose), de grand froid (à -5°C en parme) et de très grand froid (-10°C en violet) à Rouen-Boos entre 1971 et 2020. – Source : Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

# Évolution des précipitations, des phénomènes neigeux, du brouillard et des épisodes de fortes précipitations

#### Évolution récente des précipitations

Dans l'ensemble, les stations météorologiques enregistrant les précipitations moyennes mensuelles et annuelles sur le bassin aval de la Seine, sur les bassins versants littoraux et les stations de la Métropole Rouen Normandie ne montrent aucune tendance statistiquement significative (Mesquita, 2009 ; Laignel et al., 2010, Laignel, 2012 ; Ricquier et al., 2018 ; Cantat et al., 2020). Le GIEC Normand relève aussi une forte variabilité interannuelle, voire inter-mensuelle des cumuls de précipitations à l'échelle de la Normandie (Figure 8). Cela s'est traduit par une alternance de périodes d'excédents et de déficits pluviométriques entre 1970 et 2020, avec une bonne représentation des périodes extrêmes (sécheresses de 1976 et de 1989 à 1991, et cycle humide du début des années 2000). Les écarts ont pu atteindre environ +/- 30% jusqu'en 2003 (entre 500 et 1000 mm/an). À partir de cette année-là, la variabilité interannuelle s'est réduite à +/- 15% (entre 650 et 850 mm/an) (Figure 9).

Bien sûr, les cumuls de précipitations à l'échelle régionale n'illustrent pas la diversité géographique entre des territoires relativement plus secs (602 mm par an en moyenne à Evreux), d'autres plus arrosés (921 mm à Cherbourg-Gonneville), bien qu'eux-mêmes sont soumis aux mêmes fluctuations interannuelles. Le territoire de la Métropole Rouen Normandie est exposé à des cumuls de précipitations légèrement au-dessus de la moyenne régionale (823 mm/an en moyenne entre 1970 et 2020 – Figure 8).



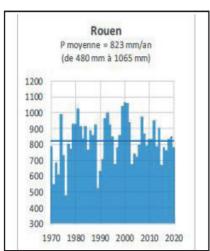


FIGURE 8 : À gauche, précipitations moyennes annuelles entre 1970 et 2020 en Normandie. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. À droite : précipitations moyennes annuelles entre 1970 et 2020 mesurées pour la station de Rouen. – Source : Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

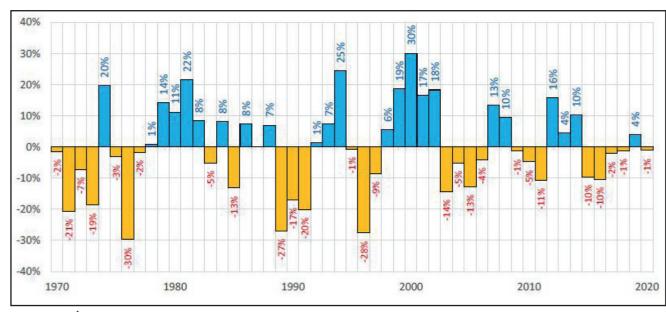


FIGURE 9 : Écart à la moyenne 1970-2020 des précipitations moyennes annuelles (en %). Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. – Source : Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

#### Évolution récente de la neige et du brouillard

Une diminution du nombre de jours de chutes de neige et de brouillard (visibilité horizontale < 1000 m) est observée entre 1971 et 2020 (Cantat et al., 2020). Dans le cas des chutes de neige, une forte variabilité interannuelle peut être recensée malgré la tendance à la diminution comme en témoigne l'hiver particulièrement neigeux de 2010 à Rouen. À propos du nombre de jours de brouillard, la tendance à Rouen est assez spécifique dans la mesure où elle se mesure par paliers avec un premier palier avec un nombre de jours supérieur à 120 jours au début des années 1970, puis un second palier autour de 90 jours en moyenne entre le milieu des années 1970 à la fin des années 1980, et un troisième palier autour de 55 jours de brouillard du début des années 1990 à nos jours (Figure 10).

### Évolution récente des fortes précipitations

À l'instar du volume de précipitations moyennes annuelles, il n'est actuellement pas relevé de tendances statistiquement significatives sur l'évolution du nombre de jours avec des fortes précipitations (seuil de 10 mm/jour, soit 10 litres/m²) à Rouen (Figure 11 - Cantat et al., 2020). Des variabilités interannuelles très importantes existent avec des pics à plus de 30 jours suivis de creux de 15 jours l'année d'après. Ces phénomènes nécessitent une vigilance particulière en raison des risques de ruissellement et d'inondation, et de pollution des eaux de surfaces et souterraines (turbidité) pouvant en résulter, notamment dans les milieux karstiques (Laignel et al., 2006; Massei et al., 2003 ; Mouhri et al., 2008 ; Valdès et al., 2005, 2007, 2014).

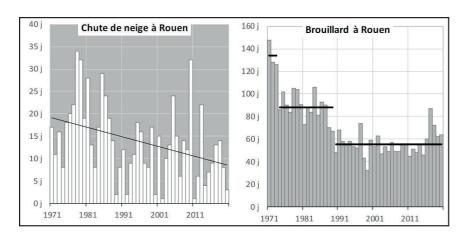


FIGURE 10 : À gauche, évolution de la fréquence annuelle des chutes de neige à Rouen-Boos entre 1971 et 2020. Valeur annuelle (bâton blanc) et tendance linéaire (trait noir) ; À droite : évolution du nombre de jours de brouillard (visibilité horizontale < 1000 m) à Rouen-Boos entre 1971 et 2020. Valeur annuelle (bâton gris) et moyennes sur plusieurs années (trait noir). – Source : Données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

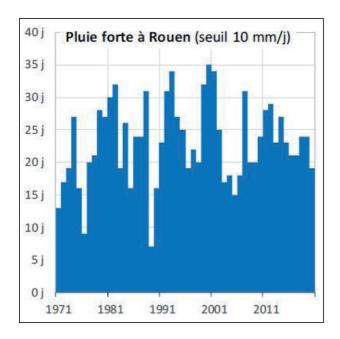
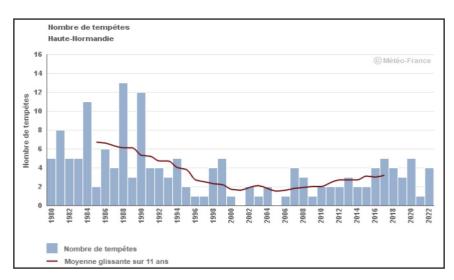


FIGURE 11 : Évolution du nombre de jours de fortes précipitations (>= 10 mm/j) à Rouen-Boos entre 1971 et 2020 – Source : données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020)

# Évolution des vents et des tempêtes

En France métropolitaine, le nombre annuel de tempêtes a fortement varié sur la période 1949-1999, sans montrer de tendance significative, à la hausse ou à la baisse (ONERC 2015; In CEREMA 2018). Selon l'ONERC (2015), depuis les cent dernières années, aucune tendance significative ne se dégage sur l'ouest de l'Europe, ni sur le nombre de tempêtes, ni sur leur intensité. Les modèles actuels de projection climatique ne permettent pas de tirer de conclusions sur l'évolution de la fréquence et l'intensité des tempêtes hivernales sur le territoire français (Ouzeau et al., 2014). Par ailleurs, l'étude des surcotes au cours du XX<sup>e</sup> siècle a montré que la fréquence des facteurs atmosphériques contribuant à ce phénomène (dépressions atmosphériques, vents d'ouest) est restée relativement stable, même si la période 1970-1990 a été plutôt agitée (In CEREMA, 2018).

Ces tendances se vérifient également pour l'ex région Haute-Normandie où le nombre de tempêtes recensées depuis 1980 fait l'objet d'une forte variabilité interannuelle et avec une tendance à la baisse mais sans lien établi avec le changement climatique (Figure 12). À Rouen, la réduction du nombre de jours avec des vents forts (rafales > à 58 km/h) au cours des dix dernières années a aussi été mis en évidence par le GIEC Normand qui interroge toutefois la durabilité de cette tendance sur le long terme au regard de la quantité limitée de données disponibles pour ce paramètre climatique (Cantat et al., 2020). Le nombre de tempêtes a présenté un maximum d'occurrences dans les années 1980 en lien avec la fréquence des circulations zonales puissantes de la fin de l'automne au début de printemps (Cantat et al., 2020). Cette tendance ne traduit pas forcément une dangerosité moindre de ce phénomène, comme en témoignent les « tempêtes du siècle » de 1999 qui ont ravagé les forêts françaises (alors que 5 jours de tempêtes ont été recensés cette année-là dans l'ex région Haute-Normandie). À l'échelle de la Seine-Maritime et de l'Eure, l'Office National des Forêts et le Centre Régional de la Propriété Forestière de Normandie indiquent que ces tempêtes auraient engendré environ 800 000 m³ de chablis en forêt domaniale. et entre 1,3 et 1,5 million en forêt privé avec des dégâts beaucoup plus importants dans l'Eure. En ce qui concerne le territoire de la Métropole, les forêts de la Londe-Rouvray et de Roumare ont été les plus affectées (Kazmierczak, et al. 2020).



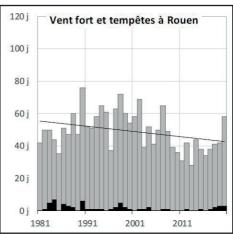


FIGURE 12: En haut, évolution du nombre de tempêtes (rafales > 100 km/h) dans l'ex région Haute-Normandie entre 1980 et 2022. En bas, évolution du nombre de jours de vent fort (rafales > 58 km/h, bâton gris) et de tempêtes (rafales > 102 km/h, bâton noir) à Rouen-Boos entre 1981 et 2020. - Source: site Climat HD de Météo-France pour le graphique en haut, et données Météo-France traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

# PARTIE II : Projections climatiques en Normandie et dans l'agglomération rouennaise

# Projections sur l'évolution des températures atmosphériques et des vagues de chaleur et de froid

### Projections sur l'évolution des températures atmosphériques

À l'échelle de la Normandie, les projections climatiques indiquent clairement une élévation de la température atmosphérique moyenne annuelle, quel que soient l'endroit et le scénario utilisé. Cette augmentation pourrait être comprise entre + 1°C pour le scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), et + 3,5 °C dans le cas d'un scénario de fortes émissions où aucune politique climatique d'envergure n'est menée (RCP 8.5) (Cantat et al., 2020). L'augmentation des températures sera d'autant plus forte à l'intérieur des terres, notamment dans la vallée de la Seine, en raison d'une continentalité du climat plus importante, tandis que le littoral pourrait être moins intensément concerné, mais à moyen-terme seulement (Figure 13).

Ces projections sont confirmées par les simulations réalisées par Météo-France pour l'ex-région Haute-Normandie (Figure 14). Celles-ci prévoient une augmentation des températures moyennes annuelles d'ici 2050, tous scénarios confondus. À partir de 2050, le réchauffement climatique peut être stabilisé dans le cas d'un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6). En revanche, il se poursuit dans le cas d'un scénario médian (RCP 4.5) et d'un scénario de fortes émissions (RCP 8.5) pour lesquels la température moyenne annuelle pourrait respectivement dépasser la barre des +2°C et +4°C d'ici 2100 par rapport à la période de référence 1976-2005. Ces tendances pourraient se retranscrire aussi bien en hiver qu'en été.

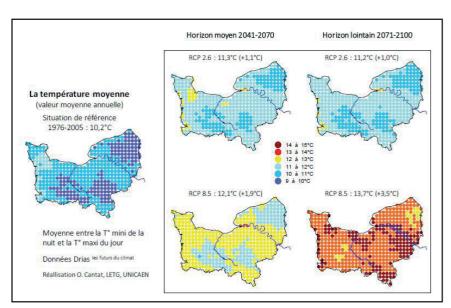


FIGURE 13 : Évolution attendue des températures moyennes annuelles en Normandie à moyen-terme et à long terme – Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin pour la période de référence (1976-2005). Données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

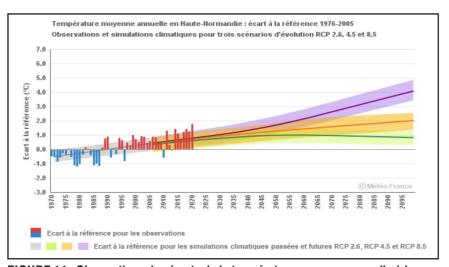


FIGURE 14 : Observations des écarts de la température moyenne annuelle à la période de référence 1976-2005 et simulations climatiques pour trois scénarios d'évolution du changement climatique (RCP 2.6 ; RCP 4.5 et RCP 8.5) dans l'ex région Haute-Normandie – Source : Climat HD de Météo-France, modèles actualisés du DRIAS (2020)

### Projections sur l'évolution des vagues de chaleur

À l'échelle de la Normandie, l'écart de la fréquence des jours de chaleur, de forte chaleur et de très forte chaleur devrait se creuser entre l'intérieur des terres et les espaces proches du littoral. En effet, les projections du DRIAS pour les huit points représentatifs de la diversité climatique normande indiquent des vagues de chaleur plus intenses et plus durables dans les villes éloignées du littoral (Tableau 2). À l'inverse, celles proches de la mer bénéficieront de la fraicheur océanique et résisteront davantage à l'augmentation de la fréquence de cet aléa estival, dont l'occur-

rence est susceptible d'apparaître dès la fin du printemps et de déborder sur le début de l'automne (Cantat et al., 2020). Ainsi, pour la Métropole Rouen Normandie, le nombre de jours de chaleur (température > ou = 25°C), d'environ de 16 jours en moyenne pour la période de référence (1976-2005), pourrait passer d'ici 2100, à 25 jours en moyenne pour un scénario optimiste (RCP 2.6), et à 60 jours en moyenne pour un scénario pessimiste (RCP 8.5) (Tableau 2 et Figure 15, Laignel et Nouaceur, 2018; Cantat et al., 2020). En outre, le nombre de jours de forte chaleur (température > ou = 30°C) doublerait avec un scénario optimiste (6 jours), et serait multiplié par neuf pour un scénario pessimiste (environ 27 jours). Peu d'évolution (moins d'1 jour) serait remarqué entre la période de référence et le scénario optimiste concernant l'évolution future des jours de très forte chaleur (température > ou = 35°C), mais l'occurrence de ces journées serait multipliée par neuf dans le cas d'un scénario pessimiste (presque 9 jours). De manière générale, les années 2003 et 2022, particulièrement chaudes en Normandie et en France, seront plus fréquentes à l'avenir. Les barres des 35°C et des 40°C pourraient être plus fréquemment atteintes si les émissions et les concentrations de gaz à effet de serre ne sont pas drastiquement réduites à court-terme, soit d'ici 2030.

		jourd	haleur (>=2	5°C)	jour fort	e chaleur (	>=30°C)	jour très forte chaleur (>=35°C)			
		1976-2005	2071-2100		1976-2005	2071-2100		1976-2005	2071-2100		
	85 - 1 1	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	Réf.	RCP 2.6	RCP 8.5	
	Cherbourg	4.2	7.3	25.4	0.5	0.8	4.3	0.0	0.0	0.4	
littoral	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	
Intermediaire	Rouen	16.5	26.7	63.1	3.7	6.3	26.6	0.3	0.9	8.8	
	Evreux	23.5	36.1	78.9	5.1	9.1	34.9	0.3	1.1	11.0	
continental	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 2 : Évolution attendue de la chaleur (seuils de 25°C, 30°C et 35°C) en Normandie à moyen terme et à long terme pour les 8 points de grille représentatifs de la diversité climatique en Normandie et correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen – Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

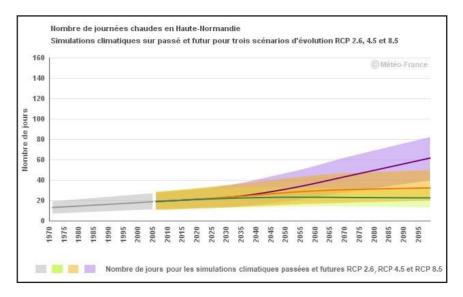
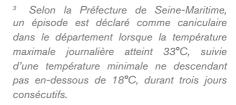


FIGURE 15 : Évolution du nombre de jours de chaleur (maximum >= 25°C) dans l'ex région Haute-Normandie selon trois scénarios d'évolution RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 – Source : Climat HD de Météo-France, modèles actualisés du DRIAS (2020)

D'autre part, les projections climatiques indiquent que le nombre de jours de canicule3, qui est compris entre 0 et 5 jours en moyenne durant la période de référence 1976-2005, pourrait passer, d'ici 2100, de 1 à 5 jours pour un scénario optimiste (RCP 2.6), et à entre 4 à 15 jours selon un scénario pessimiste (RCP 8.5) (Figure 16). Là encore, cette tendance présenterait des disparités selon les secteurs littoraux et continentaux, les premiers étant plus épargnés que les seconds face à ce phénomène (1 à 4 jours contre 14 à 15 jours -Tableau 3) en raison de leur proximité à la fraicheur maritime qui réduit plus rapidement le mercure que dans les territoires continentaux (Cantat et al., 2020).



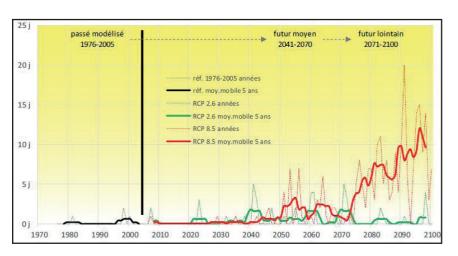


FIGURE 16: Projection de l'évolution attendue des deux conditions simultanées de canicule (Température minimale nocturne supérieure ou égale à 20°C et température maximale supérieure ou égale à 33°C) en Normandie de 1976 à 2100 selon les scénarios optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5), sans tenir compte de la durée minimale de 3 jours consécutifs. Cette évolution prend en compte la moyenne des 8 points de grille représentatifs de la diversité climatique en Normandie et correspondant à Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. – Source: expérience Météo France CNRM 2014: Modèle Aladin, données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

		1976-2005 Réf. 0.00	a	2041-	2070		2071-2100				
			RCP	2.6	RCP	8.5	RCP	2.6	RCP	8.5	
	Cherbourg		0.07	+0.07	0.17	+0.17	0.03	+0.03	1.00	+1.00	
littoral	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	
	Caen	0.07	0.20	+0.13	0.90	+0.83	0.20	+0.13	3.73	+3.66	
intermédiaire	Rouen	0.23	1.37	+1.14	2.83	+2.60	1.07	+0.84	11.10	+10.87	
	Evreux	0.37	2.17	+1.80	4.73	+4.36	1.60	+1.23	14.83	+14.46	
continental	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 3 : Déclinaison de la figure 16 selon la moyenne des 8 points de grille représentatifs de la diversité climatique en Normandie – Source : expérience Météo-France CNRM 2014 : Modèle Aladin, données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

### Projections sur le nombre de nuits anormalement chaudes et de nuits tropicales

Avec le changement climatique, les différences thermiques entre les villes et les campagnes sont vraisemblablement amenées à s'accroître dans les prochaines décennies. L'îlot de chaleur urbain devrait se renforcer puisque, d'une part, la croissance urbaine se poursuit, et que, d'autre part, les modèles climatiques prévoient un accroissement de la fréquence du « beau temps » en été sur l'Europe occidentale (GIEC, 2013 ; Fréchet et al., 2023). Cette évolution se traduirait par des périodes de canicule plus fréquentes, renforçant ainsi les risques sanitaires en raison des chaleurs torrides qui règneraient de jour - synonymes de forte déshydratation – et surtout des nuits qui demeureraient étouffantes - avec une réduction notable

de la durée et de la qualité de la récupération physiologique pour les citadins (INVS, 2003; Besancenot, 2004; Cantat, 2010). En particulier, le nombre de nuits anormalement chaudes ou les nuits tropicales sont susceptibles de considérablement augmenter en France métropolitaine. L'Institut national des statistiques et des études économiques (IN-SEE) et Météo-France indiquent qu'environ 1 habitant sur 7 sera exposé aux anomalies de chaleur les plus fréquentes d'ici 2050 (Fontès-Rousseau C., Lardellier R., Soubeyroux J.-M., 2022). La Normandie sera relativement épargnée par cette tendance en raison de la proximité de la région avec le littoral, mais une hausse des journées et des nuits anormalement chaudes en toute saison, et des nuits tropicales l'été, reste malgré tout à prévoir. En effet, dans la Métropole Rouen Normandie, les scénarios du DRIAS indiquent une légère augmentation des nuits anormalement

chaudes l'été de 3 à 6 jours en moyenne à court-terme (2021-2050) pour trois scénarios (optimiste (RCP 2.6), médian (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5)) et une stabilisation des occurrences des nuits tropicales. Cette tendance se stabiliserait ensuite à moyenterme (2041-2070) et à long-terme (2071-2100) pour les deux premiers scénarios. En revanche, dans le cas d'un scénario de fortes émissions et concentrations de gaz à effet de serre (RCP 8.5), le nombre de nuits anormalement chaudes en période estivale augmenterait en moyenne à 11 jours à moyen-terme, et à 25 jours à long-terme. Plus de la moitié de ces nuits chaudes seraient des nuits tropicales (6 et 14 jours en moyenne respectivement à moyen et long-terme) (Tableau 4).

	RÉFÉ	RENC	Ē	NO	MBRE DE	NUITS AI	NORMAL	EMENT C	HAUDES	ET DE NI	JITS TRO	PICALES		
	1976	6-2005		Pério	ode									
Н	Р	Е	Α	Sais	on		Printemps Et			é		Automne		
8	4 0	3 1	4 0	, and the second										
				HORIZONS										
				2021	-2050			2041	-2070			2071	-2100	
SCÉNA	RIOS	RCP	Н	Р	Е	Α	Н	Р	Е	Α	Н	Р	Е	Α
S C É N A OPTIMIS		2.6	12 0	7 0	6 2	8	13 0	9	6 2	9	12 0	9	6 2	8
S C É N A MODÉRI	-	4.5	12 0	9	7	9	13 0	11 0	8	12 0	18 0	12 0	9	16 0
S C É N A PESSIM		8.5	15 0	9	7 2	12 0	20 0	13 0	11 6	16 0	31 0	23 0	25 14	31 1

Tableau 4 : Évolution historique et future du nombre de nuits anormalements chaudes et de nuits tropicales dans la Métropole Rouen Normandie - Source : DRIAS, 2020 et Chedru, 2022.

### Projections sur l'évolution du froid et des gelées

Ici, les projections climatiques à l'échelle de la région Normandie indiquent aussi des tendances opposées aux projections présentées pour les phénomènes extrêmes liés à la chaleur (Figure 17). Dans le cas d'un scénario pessimiste (RCP 8.5), la fréquence des gelées poursuivrait la baisse déjà observée, passant d'environ 35 jours par an actuellement à moins de 12 jours à l'horizon 2100. Cet aléa deviendrait encore plus rarissime sur les littoraux au nord-ouest de la région, mais resterait observable, même dans une proportion moindre, dans le département de l'Orne, avec un nombre de jours oscillant entre 20 à 30 jours de gel par an (contre 60 jours actuellement). Cette baisse serait bien plus limitée de l'ordre de 8 jours en moyenne par an, et

de 10 à 15 jours dans l'intérieur des terres, dans le cas d'un scénario optimiste où une politique ambitieuse et efficace de réduction des émissions de gaz à effet de serre est menée (RCP 2.6).

Dans l'ex région Haute-Normandie, les projections climatiques fournies par Météo-France montrent également une diminution du nombre de jours de gel jusqu'en 2050 en lien avec la poursuite du réchauffement (Figure 18). À partir de 2050, cette tendance varie selon les scénarios considérés. Ce phénomène pourrait encore se produire dans un scénario optimiste (RCP 2.6), tandis qu'il accuserait une nouvelle baisse de l'ordre de 19 jours et de 27 jours en moyenne à l'horizon 2071-2100 respectivement pour les scénarios médian (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5).

En déclinant ces projections à l'échelle des huit stations représentatives de la diversité du climat normand, les tendances à la diminution présentent quelques contrastes entre le littoral et l'intérieur des terres (Tableau 5). Malgré tout, d'ici 2100, les phénomènes de très grand froid (température minimale inférieure à -10°C) ne devraient plus se produire (ou alors exceptionnellement), les grands froids (température minimale inférieure à -5°C) deviendraient aussi très rares (entre 0 et 4 jours à Rouen). Les jours de froids (température minimale inférieure ou égale à 0°C) seraient aussi réduits, aussi bien dans un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6 : 32 jours à Rouen) et encore plus dans un scénario de fortes émissions (RCP 8.5 : 14 jours à Rouen).

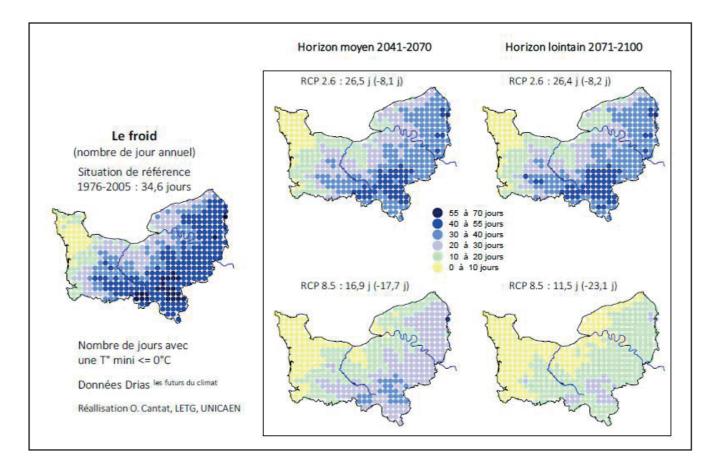


FIGURE 17 : Projections de l'évolution attendue des gelées en Normandie selon des scénarios optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5) à moyen terme et à long-terme – Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

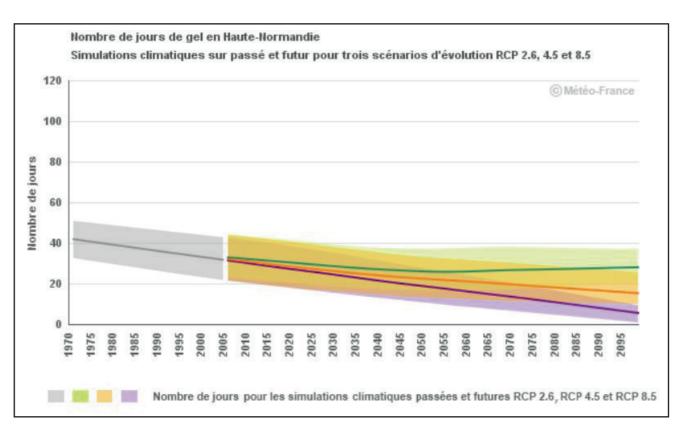


FIGURE 18 : Évolution du nombre de jours de gel en Haute-Normandie selon les simulations climatiques du climat passé et futur pour trois scénarios d'évolution RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. - Source : Climat HD de Météo-France, modèles actualisés du DRIAS (2020)

		jour	froid (<=0°	C)	jour gra	and froid (<	=-5°C)	jour très g	rand froid (	<=-10°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
	Cherbourg	12.4	9.2	3.2	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
littoral	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
Intermediaire	Rouen	43.0	32.1	14.2	5.3	3.7	0.7	1.0	0.3	0.0
	Evreux	45.7	34.4	15.3	5.8	3.9	0.8	1.0	0.4	0.0
continental	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 des jours de froid (seuils de 0°C, -5°C et -10°C) en Normandie entre 1976 et 2100 selon deux scénarios de changement climatique (RCP 2.6 et RCP 8.5) et pour les huit stations représentatives de la diversité du climat normand (Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen). Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin. Données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

# Projections sur l'évolution des précipitations, des phénomènes neigeux, et des épisodes de fortes précipitations

# Projections sur l'évolution des précipitations

Les simulations globales ou celles régionalisées sur l'Europe (projet EURO-CORDEX ; Jacob et al., 2014) montrent des évolutions moins consensuelles pour les précipitations que celles des températures entre les différents modèles climatiques (ONERC, 2015). En effet, en France, l'évolution des précipitations issues des modélisations présente une forte incertitude. Ainsi, les valeurs moyennes peuvent masquer de fortes disparités locales et sont donc à regarder avec précaution (Ouzeau et al., 2014). Toutefois, une majorité de simulations montre une légère augmentation progressive des précipitations hivernales au cours du XXIe siècle (de l'ordre de + 0,1 à + 0,85 mm/j à l'horizon 2071-2100 pour les modèles WRF et Aladin-Climat) et une augmentation plus faible, voire une diminution, l'été (les modèles WRF et Aladin-Climat montrent des résultats divergents à l'horizon 2071-2100 de - 0,38 à + 0,32 mm/j) (Ouzeau et al. 2014 ; In CEREMA, 2018).

À l'échelle de l'ex région Haute-Normandie, les nouvelles projections de Météo-France indiquent une tendance relativement stable d'ici le milieu du siècle comparé à la période de référence 1976-2005. D'ici la fin du siècle, les projections ne montrent que peu de différences entre les scénarios de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), d'émissions modérées (RCP 4.5) et de fortes émissions (RCP 8.5). Météo-France souligne également que la variabilité interannuelle déjà observée du cumul annuel des précipitations se poursuivra durant tout le XXIe siècle. Ainsi. le cumul pluviométrique annuel pourrait osciller selon les années entre une réduction de 10% ou une augmentation de 30% par rapport à la période de référence 1976-2005 (Figure 19).

En revanche, Météo-France précise que les tendances seront plus marquées entre les saisons dans l'ex région Haute-Normandie. En effet, les projections montrent des cumuls hivernaux en augmentation notamment dans un scénario de fortes émissions RCP 8.5 (+40 %) tandis qu'une diminution serait observée en période estivale pour ce même scénario (-30 %) (Figure 20). De plus, les cumuls saisonniers, à l'instar des cumuls annuels, présenteront aussi des variabilités interannuelles importantes. Le contraste entre les précipitations saisonnières pourrait potentiellement engendrer des incidences importantes sur les écosystèmes (forêts, zones agricoles, cours d'eau, falaises, etc.) (Cantat et al., 2020).

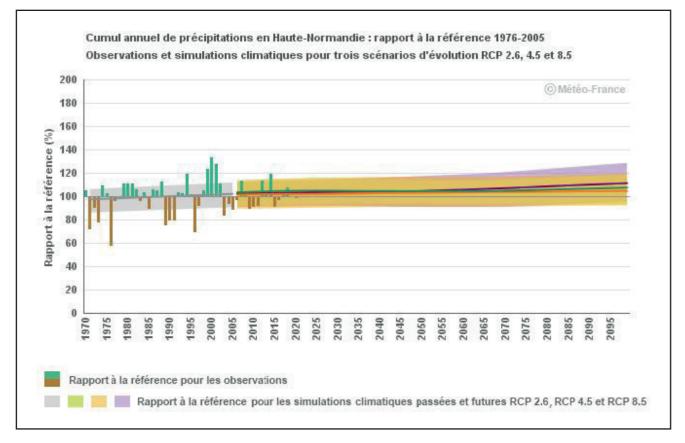
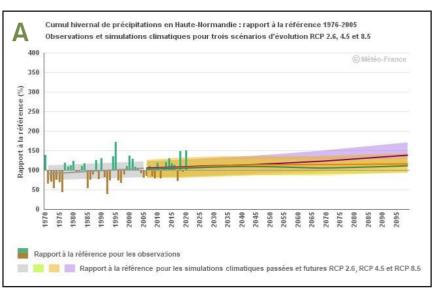


FIGURE 19 : Projections à l'horizon 2100 du cumul annuel de précipitations dans l'ex région Haute-Normandie par rapport à la période de référence 1976-2005 et selon trois scénarios d'évolution RCP 2.6 (optimiste), 4.5 (médian) et 8.5 (pessimiste) - Source : Climat HD de Météo-France, modèles actualisés du DRIAS (2020).

À l'échelle de l'agglomération rouennaise, la projection des cumuls annuels des pluies ne permet pas de décrire une quelconque tendance (Figure 21). Les allures des courbes des moyennes mobiles calculées à partir des deux scénarios extrêmes (RCP 2.6 et RCP 8.5) se confondent et confirment la complexité de la pluviogénèse et les incertitudes avancées dans le cadre de ce paramètre climatique. L'ensemble des résultats indiqués dans ce chapitre soulève de manière générale le caractère aléatoire des précipitations qui pourrait se renforcer à l'avenir.



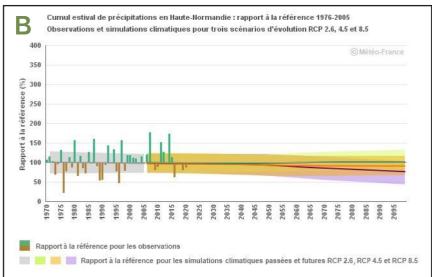


FIGURE 20 : En A, projections à l'horizon 2100 du cumul hivernal de précipitations dans l'ex région Haute-Normandie par rapport à la période de référence 1976-2005 et selon trois scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre RCP 2.6 (optimiste), 4.5 (médian) et 8.5 (pessimiste). En B, mêmes projections pour la période estivale. – Source : Climat HD de Météo-France, modèles actualisés du DRIAS (2020).

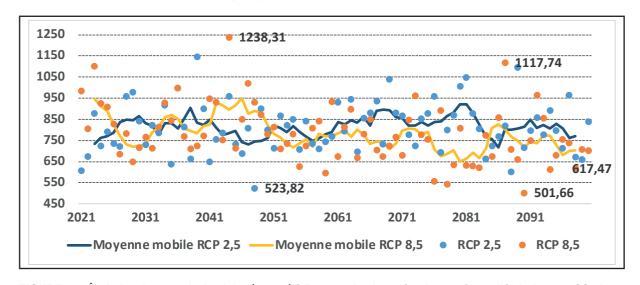


FIGURE 21 : Évolution des cumuls de pluies (en mm) à Rouen selon les scénarios extrêmes d'émissions en  ${\rm CO_2}$  du GIEC (RCP 2.6 et 8.5) (expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, Période de référence : 1976-2005 / données issues du site DRIAS : http://www.drias-climat.fr/)

# Projections sur l'occurrence des phénomènes neigeux

Au regard de la baisse des jours de froid et de l'augmentation globale des températures moyennes, les phénomènes de chute de neige se feront de plus en plus rares dans la région à moyen terme (2041-2070) et à long-terme (2071-2100), bien que cette tendance pourrait être atténuée si les émissions de gaz à effet de serre sont drastiquement réduites (Cantat et al., 2020). À Rouen, environ 15 jours avec chute de neige en moyenne pourraient être attendus dans un scénario optimiste (RCP 2.6) aussi bien à moyen-terme qu'à long-terme. Dans le cas d'un scénario pessimiste (RCP 8.5), seulement entre 10 à 6 jours avec chute de neige en moyenne respectivement à moyen et long terme seraient attendus (Tableau 6).

# Projections sur l'occurrence des épisodes de fortes précipitations

En France métropolitaine, la majorité des modèles prévoit une augmentation généralisée du taux de précipitations extrêmes, avec des valeurs relativement faibles pouvant toutefois dépasser localement les 5 % voire 10 % à l'horizon 2071-2100. Dans le détail, les modèles montrent une forte disparité entre les territoires, sans tendance locale nette (Ouzeau et al. 2014 ; In CEREMA, 2018).

Contrairement aux régions méditerranéennes, la région Normandie est caractérisée par une faible occurrence des très fortes précipitations et des pluies intenses (cumul dépassant 20 mm/jour, soit 20 litres/m²), de l'ordre de 4 jours par an en moyenne. Dans les prochaines décennies, avec les changements climatiques que nous subissons actuellement, la région pourrait observer une plus grande fréquence de ces phénomènes particulièrement dans le sud-ouest où des occurrences de 10 jours pourraient être relevées

(Figure 22). Ceci peut être expliqué par la plus grande exposition de ces territoires aux perturbations océaniques et à un air ascendant maritime chargé d'humidité (Cantat et al., 2020). De manière générale, les températures élevées augmentent le pouvoir évaporant de l'air et favorisent une plus grande disponibilité de l'humidité dans les basses couches atmosphériques.

Le territoire de la Métropole Rouen Normandie ne sera pas épargné car des occurrences de l'ordre de 2 à 6 jours pourraient se produire quel que soit le scénario climatique pris en compte (RCP 2.6 ou RCP 8.5). Cependant, la résolution spatiale des différents modèles climatiques représente un handicap pour une bonne connaissance du cycle pluviométrique à une échelle locale (Figure 21).

Les projections climatiques des précipitations intenses saisonnières (au-dessus du 90° centile annuel) pour un scénario pessimiste (RCP 8.5) montrent également un renforcement de ce phénomène dans toute la région Normandie particulièrement prononcé en hiver et en été. Là aussi, la Métropole Rouen Normandie serait affectée avec une hausse des précipitations intenses saisonnières pouvant atteindre de +9 à +15% par rapport à la période de référence 1976-2005 (Figure 23).

#### Projections sur la fréquence des sécheresses et incidence sur l'indice bioclimatique

D'une durée actuellement comprise entre 19 à 23 jours en moyenne sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie (22 jours en Normandie) durant la période de référence 1976-2005, les sécheresses météorologiques pourraient devenir plus fréquentes et plus longues à l'avenir (Figure 24). Cela vaut notamment pour un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5) où

ce phénomène se prolongerait d'une semaine en moyenne sur le territoire (27 à 31 jours) à moyen-terme (2041-2070), voire presque 10 jours (31 à 35 jours) à long-terme (2071-2100). Dans le cas d'un scénario de faibles émissions (RCP 2.6), cette augmentation des sécheresses serait plus légère, d'environ 4 jours (23 à 27 jours). Cet allongement des périodes sèches se retranscrirait dans toute la Normandie, et plus particulièrement dans l'intérieur des terres (Orne, Eure et Calvados, Est de la Seine-Maritime) et aurait une incidence non négligeable sur les cultures céréalières et les pâturages (Cantat et al., 2020).

Le calcul d'un indice bioclimatique durant la période végétative permet d'estimer les conséquences des sécheresses atsmophériques sur les sols et les écosystèmes (Cantat et al., 2020). Sur la période de référence 1976-2005, l'indice moyen en Normandie est de 4,6, par conséquent synonyme d'une ambiance subhumide. Cependant, il existe des contrastes remarquables au sein de la région avec des espaces plus humides dans le département de la Manche et le Pays de Caux (Seine-Maritime), et d'autres plus déficients dans les plaines du Calvados et de l'Eure (Figure 25).

À l'avenir, en conséquence des sécheresses plus fréquentes et plus longues, cet indice se dégraderait sensiblement pour un scénario RCP 8.5 où une majeure partie de la région connaîtrait une déficience en eau au printemps et en été. Cette évolution serait visible dès le milieu du siècle (-0,9) et s'accentuerait vers la fin du siècle (-1,6). Inversement, les conditions humides se stabiliseraient dans la région dans un scénario RCP 2.6, aussi bien à moyen-terme (-0,4) qu'à long-terme (-0,2). Cette tendance se retranscrirait aussi sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie, avec un assèchement plus marqué dans la vallée de la Seine que sur les plateaux nord du Pays de Caux.

		1976-2005		2041-	2070		2071-2100			
		Réf.	RCP	2.6	RCP	8.5	RCP	2.6	RCP	8.5
	Cherbourg	12.2	7.4	-4.8	5.0	-7.2	8.4	-3.8	2.6	-9.6
littoral	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
1.1	Caen	15.9	12.3	-3.6	8.2	-7.7	12.1	-3.8	5.4	-10.5
intermédiaire	Rouen	19.9	15.1	-4.8	10.0	-9.9	15.6	-4.3	6.1	-13.8
0	Evreux	19.8	14.9	-4.9	9.5	-10.3	15.3	-4.5	4.6	-15.2
continental	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 entre 1976 et 2100 selon deux scénarios de changement climatique (RCP 2.6 et RCP 8.5) et pour les huit stations représentatives de la diversité du climat normand (Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen). Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin. Données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

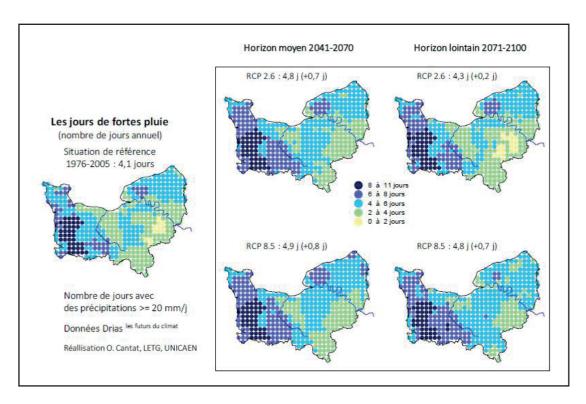


FIGURE 22 : Évolution attendue de la fréquence des fortes précipitations (seuil de 20 mm/jour) en Normandie. Scénarios RCP 2.5 et 8.5 à l'horizon lointain 2100. Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020)

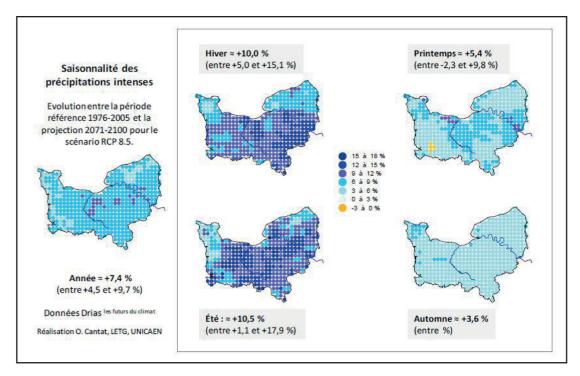


FIGURE 23 : Évolution saisonnière attendue des écarts à la moyenne (en %) de la part des précipitations intenses (au-dessus du 90° centile annuel) en Normandie selon un scénario pessimiste (RCP 8.5) à l'horizon 2100 – Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, Données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020)

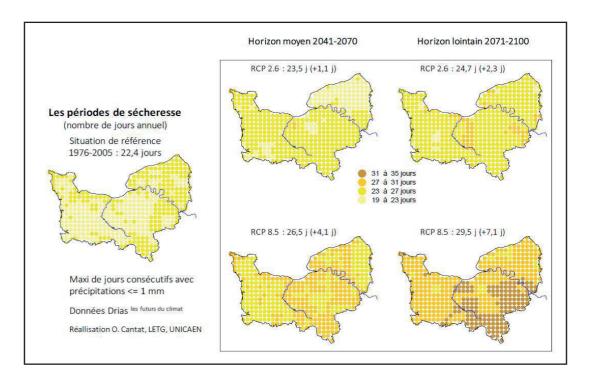


FIGURE 24 : Évolution attendue de la durée maximale des périodes de sécheresse en Normandie selon des scénarios climatiques d'évolution optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5) aux horizons moyen et lointain – Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, données DRIAS traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

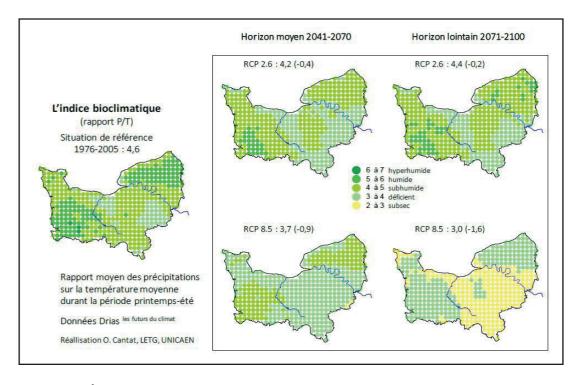


FIGURE 25 : Évolution attendue de l'indice bioclimatique en Normandie durant la période printemps-été selon des scénarios climatiques d'évolution optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5) aux horizons moyen et lointain – Source : expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, données DRIAS traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

### Projections sur l'occurrence des tempêtes

Les projections climatiques ne montrent pas d'évolution majeure concernant la fréquence du phénomène de tempête, avec une relative stabilisation du nombre de jours de tempête (Cantat et al., 2020 – Tableau 7). Cependant, selon les travaux du GIEC/IPCC (2013, 2021), l'intensité des cyclones et des tempêtes devrait augmenter dans l'Atlantique Nord.

		No	ombre de	jours de	tempête	et écart	à la moye	nne 1976	5-2005		
		1976-2005		2041-	2070			2071-2100			
		Réf.	RCP	2.6	RCP	8.5	RCP	2.6	RCP	8.5	
	Cherbourg	5.2	4.3	-0.9	4.8	-0.4	3.8	-1.4	3.8	-1.4	
littoral	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	
intermediaire	Rouen	1.3	1.0	-0.3	1.9	+0.6	1.0	-0.3	1.4	+0.1	
	Evreux	0.7	0.9	+0.2	1.3	+0.6	0.7	0.0	0.9	+0.2	
conti nenta l	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 7 : Évolution attendue du nombre de jours de tempête (rafales >= 58 m/s, environ 100 km/h) en Normandie selon un scénario optimiste (RCP 2.6) et pessimiste (RCP 8.5) et aux horizons moyen et lointain. Résultats déclinés pour les huit stations représentatives de la diversité du climat normand (Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen). - Source - expérience Météo France CNRM 2014 : Modèle Aladin, Données Drias traitées et analysées par le GIEC Normand (Cantat et al., 2020).

# Conclusion et chiffres-clés à retenir pour la Métropole Rouen Normandie

Le changement climatique est donc une réalité dans l'agglomération rouennaise et en Normandie. La réduction des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre est incontournable pour limiter les effets à court, moyen et long terme du changement climatique sur l'environnement, et les sphères économiques et sociales de la société. La préservation des puits de carbone, incarnés principalement par les forêts dans la Métropole Rouen Normandie, paraît aussi essentiel pour parvenir à ces objectifs.

Les grands chiffres-clés du changement climatique à retenir à court, moyen et long terme pour le territoire de la Métropole Rouen Normandie sont indiqués dans le tableau qui suit (Tableau 8). Ils montrent qu'un scénario de

fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5) engendrerait des conséquences majeures sur les écosystèmes, la biodiversité et la santé humaine. En témoignent notamment, d'ici le milieu et la fin du siècle, l'augmentation de la température moyenne annuelle (entre + 2 et +4°C), du nombre de jours de chaleur (en moyenne, entre 20 et 40 jours en 2050, et 60 jours en 2100) et des nuits tropicales (6 à 14 nuits en moyenne). Cette tendance sera logiquement inverse pour les jours de froid dont les occurrences seraient plus rares (de 30 à 14 jours en moyenne). À propos des précipitations, il n'y aurait que peu d'évolution significative sur le cumul annuel des précipitations, mais la variabilité interannuelle déjà observée devrait se poursuivre durant tout le XXIe siècle et des contrastes seront plus marqués entre les saisons. Ceux-ci seraient particulièrement visibles notamment l'été où le

cumul des précipitations serait réduit dans le scénario RCP 8.5 et pourrait engendrer des sécheresses plus longues et fréquentes (de 27 à 35 jours). À l'inverse, le cumul des précipitations devrait augmenter en hiver. Enfin, le nombre de jours de neige devrait diminuer (10 à 6 jours), à l'inverse du nombre d'épisodes de fortes précipitations qui devrait augmenter (4 à 6 jours).

Toutefois, l'ampleur de ces changements et de leurs conséquences serait bien moindre dans le cas d'un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), d'où la nécessité de renforcer drastiquement la baisse des émissions au cours de cette présente décennie.

	Période de	Court-term	e (2021-2050)	Moyen-term	e (2041-2070)	Long-terme	(2071-2100)
	référence 1976-2005 (moyenne/an)	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
Température moyenne annuelle	10,5°C (1970-2020)	+1,1°C	+1,5°C	+1°C	+2°C	+ 1°C	+4°C
Nombre de jours de chaleur (> 25°C) par an	16 jours	Entre 15 et 30 jours	Entre 15 et 30 jours	Entre 20 et 30 jours	Entre 20 et 40 jours	Entre 20 et 30 jours	De 40 à 60 jours
Nombre de nuits tropicales (>20°C)	1 nuit	2 nuits	2 nuits	2 nuits	6 nuits	2 nuits	14 nuits
Nombre de jours froid par an (< 0°C)	43 jours	De 20 à 40 jours	De 15 à 35 jours	De 20 à 40 jours	De 10 à 30 jours	32 jours	14 jours
Précipitations moyennes annuelles	823 mm/an (1970-2020)	vernales et e	stivales. Une for	te variabilité inte	s tendances plus rannuelle se pour ul de neige et les	suivra durant tout	le XXIe siècle
Nombre de jours avec cumul de neige	20 jours	-	-	15 jours	10 jours	15 jours	6 jours
Nombre de jours avec fortes précipitations	De 2 à 4 jours	De 2 à 4 jours	De 2 à 4 jours	De 2 à 4 jours	De 4 à 6 jours	De 2 à 4 jours	De 4 à 6 jours
Nombre de jours de sécheresse	De 19 à 23 jours	-	-	De 23 à 27 jours	De 27 à 31 jours	De 23 à 27 jours	De 27 à 35 jours
Indice bioclimatique	De 4 à 5 (subhu- mide)	-	-	De 3 à 4 (déficient)	De 3 à 4 (déficient)	De 4 à 5 (subhumide)	De 2 à 3 (subsec)
Nombre de jours de tempête	1,3 jour	-	-	1	1,9	1	1,4

Tableau 8 : Chiffres-clés des différentes projections du changement climatique dans la Métropole Rouen Normandie selon un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6) et de fortes émissions (RCP 8.5) par rapport à la période de référence 1976-2005. Les chiffres indiqués représentent les moyennes des projections.

# Références bibliographiques

Besancenot J.-P., 2004. Une vague de chaleur meurtrière: les enseignements de l'été 2003 en France, Géoconfluences - DESCO - ENS LSH, Brève, 6. http://www.ens-lsh.fr/geoconfluence/doc/breves/2004/6.htm

Cantat O., 2005: 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., 2010 : Les types de temps à risque climatique à Paris. Compte rendu de la Réunion du GDR 2663 CNRS RICLIM, « Risques climatiques urbains », Archivio di Stato / Archives d'État (TURIN), 4-5.

Cantat O., Laignel B., Nouaceur Z., Costa S., 2020. Changement climatique et Aléas météorologiques. Rapport GIEC normand, 39 p.

CEREMA, 2018. Dynamiques et évolution du littoral, Synthèse des connaissances du cap d'Antifer au cap de la Hague (Fasicule 3) et du cap d'Antifer à la pointe du Hourdel (Fasicule 2). Catalogue sédimentaire national. Centre d'études et d'expertises sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

Chedru A, 2022. Synthèse des changements climatiques et des aléas météorologiques dans la Métropole Rouen Normandie. 58p.

Fontès-Rousseau C., Lardellier R. (Insee), Soubeyroux J.-M. (Météo-France), « Un habitant sur sept vit dans un territoire exposé à plus de 20 journées anormalement chaudes par été dans les décennies à venir », Insee Première, n°1918, août 2022, 4p.

Fréchet C., Tullifer L., Balducci V. (2023). Les pratiques d'urbanisme et l'aménagement du territoire de la Métropole Rouen Normandie à l'épreuve des défis posés par le changement climatique. Rapport du GIEC Local pour la Métropole Rouen Normandie, 44p.

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

IPCC/GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC/GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Impacts, Adaptation & Vulnerability, Cambridge University Press, Cambridge.

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/GIEC GIEC, 2019: Résumé à l'intention des décideurs, Changement climatique et terres émergées: rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (dir. publ.)]. Sous presse

IPCC/GIEC, 2019 : Résumé à l'intention des décideurs, Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique [sous la direction de H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer], sous presse.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M., Braun A., Colette A., Deque M., Goergievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., Van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Roundsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussa-

na J.F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P., 2014. « URO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. » Regional Environmental Change, 14(2), 563578.

Kazmierczak L., Aubert M., Charrier F., et al. (2020). Les forêts de la Métropole Rouen Normandie face au changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 40 p.

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., Cantat O. 2017. L'ilot de chaleur urbain à Rouen. Étude prospective pour la connaissance du micro climat urbain de la Métropole Rouennaise, 40 p.

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.

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.

Mesquita, J., 2009. Facteurs de contrôle des modalités de la réponse hydrologique des bassins versants en substrat carbonaté : comparaisons entre la Haute-Normandie et la région d'Austin au Texas. Hydrologie. Thèse Doctorat, Univ. Caen, 179 p.

Météo-France, Bilan climatique de l'année 2022, bilan définitif du 12 janvier 2023, 23p. Disponible sur : https://meteofrance.fr/actua-lite/publications/2022-les-bilans-climatiques

Moss et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463, 747-756.

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

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. D., Fenhann, J., Gaffin, S., ... & Zhou, D. (2000). Special report on emissions scenarios.

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 XXIe 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., Costa S., Douez O., Gaufres P, Hissel F., Idier D., Laborie V., Petit V., Sergent P., 2015. Le climat de la France au XXIe siècle - volume 5 - Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. 68 p.

Ricquier F., Nouaceur Z., Laignel B., 2018. Caractérisation des changements climatiques observés à l'échelle du territoire de la métropole rouennaise. Mémoire de Master 1 GEHYD de Ricquier F. encadré par Nouaceur Z. et Laignel B., Département Géosciences et Environnement, Université de Rouen, 46 p.

Soubeyroux et al. (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS-2020 pour la Métropole. Météo-France

Valdés D., Dupont J.P., Massei N., Laignel B., Rodet J. (2005). Analysis of karst hydrodynamics through comparison of dissolved and suspended solids transport. C. R. Geoscience, 337, 15, 1365-1374.

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.

Notes	

### En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité selon la forme suivante :

Laignel B., Nouaceur Z., 2023. Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC de la Métropole Rouen Normandie, 32 p.

Le GIEC de la Métropole Rouen Normandie ne serait en aucune façon responsable des interprétations, productions intellectuelles, et publications diverses résultant des résultant des résultants de leurs travaux et pour lesquelles il n'aurait pas donné d'accord préalable.

Le GIEC de la Métropole Rouen Normandie est un groupe d'experts créé dans le cadre de la COP21 Rouen Normandie animée par la Métropole Rouen Normandie. Les experts proviennent des structures suivantes:



















### **CONTACT**