



HAL
open science

Le changement climatique en Bretagne : cartographie sur la période observée (1951-2020) et future (2031-2100).

Louis Amiot, Vincent Dubreuil, Valerie Bonnardot

► To cite this version:

Louis Amiot, Vincent Dubreuil, Valerie Bonnardot. Le changement climatique en Bretagne : cartographie sur la période observée (1951-2020) et future (2031-2100).. Norois. Environnement, aménagement, société, 2023, 266, pp.7-25. <10.4000/norois.13069>. <halshs-04163105>

HAL Id: halshs-04163105

<https://shs.hal.science/halshs-04163105v1>

Submitted on 30 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Le changement climatique en Bretagne : cartographie sur la période observée (1951-2020) et future (2031-2100)

Climate change in Brittany: mapping over the observed (1951-2020) and future (2031-2100) periods

Louis AMIOT*, Vincent DUBREUIL, Valérie BONNARDOT

Université Rennes 2, LETG-UMR 6554 CNRS, 2 Place Recteur H. Le Moal, 35 043 Rennes Cedex, France

INTRODUCTION

Au niveau mondial, la température moyenne annuelle a augmenté de $+1,1^{\circ}\text{C}$ par rapport à l'ère préindustrielle et cette hausse pourrait atteindre $+2$ à $+5^{\circ}\text{C}$ en fin de siècle selon le scénario d'émission de gaz à effet de serre (IPCC, 2021). Les effets de ce changement climatique se font ressentir partout dans le monde avec des extrêmes climatiques (canicules, sécheresses et fortes pluies) plus fréquents et intenses (IPCC, 2021). Au niveau du Grand ouest et de la Bretagne, le changement climatique a fait l'objet de travaux menés à partir des données observées et des projections futures issues des scénarios « Second Report on Emission Scenario » (SRES) du Groupe d'Expert Intergouvernemental sur le Climat ou GIEC (Mérot *et al.*, 2012; Belleguic *et al.*, 2012). Le risque de sécheresse est notamment bien documenté à partir de données climatiques observées et issues de produits satellitaires (Dubreuil, 1994) ou modélisées pour la période future avec les scénarios SRES (Lamy, 2013 ; Dubreuil *et al.*, 2018) ou les scénarios « Representative Concentration Pathway » appelés ensuite RCP (Amiot *et al.*, 2022).

L'intérêt et le besoin général pour la connaissance du climat aux niveaux régionaux et locaux augmentent depuis plusieurs décennies, surtout après un été comme celui de l'année 2022 marqué par une succession d'aléas climatiques (vagues successives de chaleur, sécheresse majeure et incendies de forêts) dont la fréquence, la durée et l'étendue spatiale augmentent avec le changement climatique. La connaissance du changement climatique à l'échelle régionale est donc un enjeu fort en vue de planifier l'adaptation au changement climatique, à travers les PCAET (Plan Climat Air Énergie Territorial) ou le Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires pour les régions.

Une première spatialisation du climat breton a été effectuée en 1981 pour la Bretagne sous la forme des Cartes Climatiques Détaillées (Mounier, 1981) qui permettent une première approche des climats bretons. Ces cartes synthétisent le climat de la région avec une vision globale sur la température moyenne annuelle, les facteurs limitants (sécheresse et froid) ainsi que le régime pluviométrique et le vent. Cependant, ces cartes sont désormais dépassées car elles présentent le climat breton dans les années 1970 soit il y a plus de cinquante ans, avec un traitement cartographique manuel et un nombre limité de points de mesures. Aujourd'hui il est

possible d'automatiser la régionalisation d'un plus grand nombre de données par des méthodes géostatistiques. Ces méthodes peuvent être appliquées aussi bien aux données observées que sur celles disponibles le portail drias¹ qui ne font pas l'objet de spatialisation du changement climatique à échelle fine : c'est l'objet du travail présenté ici.

La méthodologie retenue ici doit permettre de représenter le climat local à échelle fine (résolution d'un kilomètre) ainsi que son évolution à moyen et long terme. Il permet ainsi d'actualiser les synthèses de l'évolution climatique réalisée en 2012 par Météo-France (Belleguic *et al.* 2012) et celles menées dans le cadre du projet CLIMASTER (Mérot *et al.*, 2012) en utilisant le jeu de données de projections climatiques DRIAS 2020 (Soubeyroux *et al.*, 2020). Les résultats présentés ici sont des spatialisations d'indicateurs climatiques de températures et pluviométries à une échelle de 1km au niveau de la Bretagne pour deux horizons temporels passés observés (1951-1980 et 1991-2020) et deux horizons temporels futurs modélisés (2031-2060 et 2071-2100).

DONNEES ET METHODE

Acquisition des données climatiques et environnementales

Données climatiques observées

Afin de couvrir efficacement l'ensemble du territoire de la région, il est nécessaire de sélectionner un nombre suffisant de séries de données. Leurs sélections dépendent de critères de qualité : la série de données doit être suffisamment longue pour permettre une comparaison de normales climatiques (au moins 60 ans) ; la série doit être sans interruption afin de ne pas fausser les calculs des normales climatiques (normales trentenaires) ; elle doit être statistiquement homogène pour permettre d'analyser des évolutions climatiques autres que celles liées à un changement d'appareil de mesure ou d'environnement (OMM, 2013).

Les séries de données sélectionnées à partir des trois critères de qualité (longueur, homogénéité et continuité) sont présentées sur la figure 1. Elles correspondent aux séries homogénéisées par Météo-France (Moisselin *et al.*, 2002) disponibles via la publitheque², au pas de temps mensuel, qui démarrent majoritairement autour de 1951. Il est ainsi possible de comparer deux normales climatiques de 30 ans sur la période observée (OMM, 2013) : 1951-1980 et 1991-2020.

Au total, 72 séries de données de précipitations et 23 pour les températures sont prises en compte dans la région, dont 12 séries de données de précipitations et 3 pour les températures sur les départements limitrophes de la région (Figure 1). Ces stations proches de la région permettent de compléter les séries régionales afin d'affiner le modèle géostatistique de régionalisation.

¹ En ligne : <http://www.drias-climat.fr/decouverte> consulté le 17 novembre 2022

² En ligne : <https://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp> consulté le 12 décembre 2022

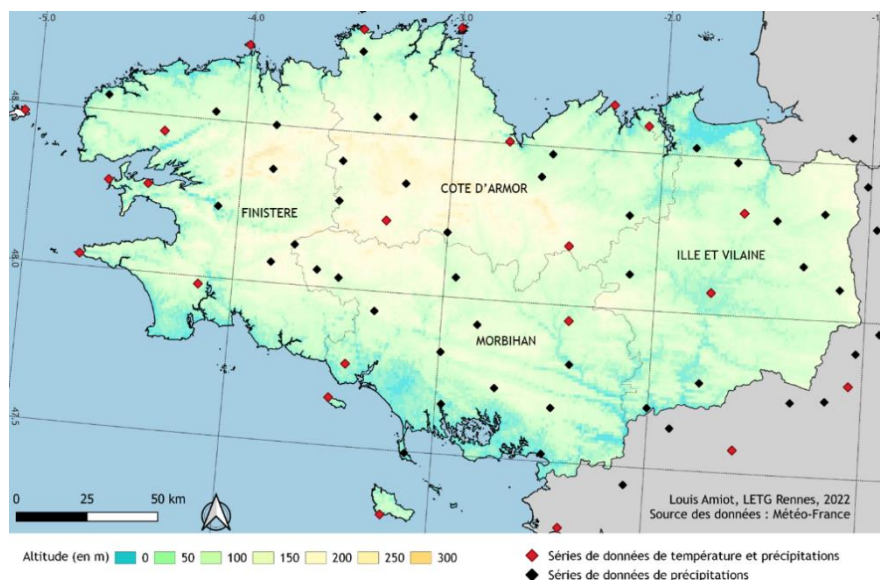


Figure 1 : Répartition des séries de données climatiques (températures et précipitations) utilisées dans l'étude / *Distribution of the climate data series (temperature and rainfall) used in the study*

La répartition spatiale des séries de données est homogène sur l'ensemble de la région avec au moins trois stations de température et onze stations de précipitation par département (Figure 1). Pour les stations de température, il y a une surreprésentation des stations littorales avec 64% des stations situées à moins de 10km de la côte, un espace qui représente seulement 31% de la surface régionale. On note aussi une surreprésentation des stations situées au sud de la région (latitude inférieure à 47,5°) avec 16% des stations contre une surface réelle couvrant moins de 5% de la superficie régionale. Concernant les séries de précipitation, il y a une très bonne répartition géographique des stations de mesure sur l'ensemble de la région. Le point culminant des stations est 256m, alors qu'il est de 385m en Bretagne, les plus altitudes les plus importantes ne sont donc pas couvertes ici. Cependant, la surface concernée reste faible, en effet, 2% de la surface de la Bretagne dépasse 250 m.

Données climatiques futures modélisées

Les données futures sont issues du portail Drias qui met à disposition les données de plusieurs modèles régionalisées à une résolution spatiale de 8km sur l'ensemble de la France métropolitaine. Parmi les couples de modèles climatiques globaux/régionaux disponibles, le modèle climatique français CNRM/CM5/ALADIN63 (appelé « CNRM » par la suite) a été choisi pour son positionnement médian en termes de réchauffement et d'évolution des précipitations par rapport aux autres (Soubeyroux *et al.*, 2020). Pour simuler l'évolution climatique future, il est d'usage d'utiliser différents scénarios correspondant à différentes trajectoires de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les scénarios utilisés sont les scénarios « Representative Concentration Pathway » (RCP) RCP4.5 et RCP8.5 qui correspondent pour le RCP 4.5 à un scénario d'émission intermédiaire avec une stabilisation des émissions d'ici 2030 puis baisse à

partir de 2050 et pour le scénario RCP 8.5 à une hausse continue des émissions au cours du siècle (Moss *et al.*, 2010). L'usage des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 permet d'étudier deux évolutions climatiques futures possibles avec une hausse des températures en fin de siècle au niveau mondial allant de 1,7 à 3,2°C pour le RCP4.5 et de 3,2 à 5,4°C pour le RCP8.5 par rapport à l'ère préindustrielle (Fuss *et al.*, 2014).

À partir des données de ce modèle et pour chacune des 91 stations, la donnée future modélisée est considérée comme étant celle du point de la grille SAFRAN (Soubeyroux *et al.*, 2008 ; Le Moigne, 2002) la plus proche, excepté pour les stations littorales, un point plus à l'intérieur des terres a été pris en compte afin d'éviter un point littoral à l'interface terre -mer avec une incertitude concernant la réanalyse de ces points précis (Vidal *et al.*, 2010).

Méthode

Une méthode géostatistique de régionalisation des données

Les cartes ont été réalisées à partir d'une régionalisation des données. Cela consiste à affecter la propriété qui décrit un ensemble de points à tout point d'un espace considéré à partir d'un nombre suffisant de points pour assurer une représentativité du phénomène (Caloz et Collet, 2011).

Pour régionaliser les données, il existe plusieurs méthodes d'interpolation, ces méthodes visent à prédire une valeur théorique sur l'ensemble du territoire à partir de données ponctuelles (Siu-Ngang Lam, 1983). Il existe deux grandes familles de méthodes d'interpolation : le krigeage et la régression (Joly *et al.*, 2008). Le krigage est une méthode d'interpolation purement spatiale qui n'offre pas de résultats satisfaisants dans le cas de données climatiques parce qu'elle ne prend pas en compte la variabilité des paramètres géographiques, mais dépend de la distance entre chaque point (Lhotellier, 2006). La régression multiple est une méthode d'interpolation déterministe qui consiste à estimer la valeur d'une variable en tout point d'un territoire donné à partir d'une relation prédéterminée entre les points de mesures et des variables choisies (Arnaud et Emery, 2000).

Pour régionaliser les données climatiques régionales, le choix a été fait d'utiliser la méthode de régression multiple puisque plusieurs variables sont prises en compte. La régression multiple correspond ici à une relation linéaire entre une variable recherchée et des variables mesurées. Chaque coefficient est calculé de manière à réduire au maximum l'écart entre le point mesuré et la courbe de tendance suivant la méthode des moindres carrés (Caloz et Collet, 2011). Sa formule se définit ainsi : $Z = a_0 + a_1 \times x + a_2 \times y + \dots$

Avec Z, la variable dépendante et x, y, etc., les variables explicatives. Cette méthode définit la distribution spatiale d'un phénomène sur le territoire.

Une correction des projections climatiques futures

Les données climatiques futures sont théoriquement exploitables notamment parce qu'elles sont corrigées par la méthode ADAMONT donc sans biais (Soubeyroux *et al.*, 2020). Cependant, les données modélisées sur la période passée dite de référence de Drias (1976-2005) ont tout de même été confrontées aux données observées sur la même période pour vérifier les écarts (biais) au niveau de chaque station. Pour les températures moyennes, les biais sont effectivement quasiment négligeables au pas de temps annuel (autour de 0,1°C). Cependant, le biais est parfois plus fort, notamment sur les stations littorales (sous-estimation de 0,7°C à Quimper, 0,4°C à St-Cast-le-Guildo ou l'Île d'Yeu par exemple).

Les biais obtenus sur les données de précipitation sont beaucoup plus variables. Le modèle CNRM a tendance à sous-estimer les précipitations dans la région de façon hétérogène selon la station et la période l'année considérée. La sous-estimation est très variable d'une station à l'autre avec par exemple une sous-estimation du cumul moyen par année hydrologique de l'ordre de 20 mm en moyenne, mais elle est par exemple de 200 mm à Quimper et il existe parfois des surestimations, jusqu'à 110 mm à Quiberon.

Les biais ont ainsi été considérés comme non négligeables, notamment concernant les stations littorales malgré la précaution prise concernant ces stations. Le choix a donc été fait de corriger les données issues du modèle CNRM. La correction des données s'effectue par une soustraction des biais préalablement calculées sur la période 1976-2005 aux données modélisées brutes sur une période de 30 ans à horizon moyen (période 2031-2060) et horizon lointain (période 2071-2100) :

$$x_{corr} = x_{mod} - \Delta_{ref1976-2005}$$

Avec x_{corr} = donnée modélisée corrigée

x_{mod} = donnée modélisée brute

$\Delta_{ref1976-2005}$ = écart entre la donnée modélisée et la donnée observée sur la période de référence drias (1976-2005)

Une fois cette opération effectuée, l'équation de régression est appliquée aux données futures pour les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5.

Les variables de la régression multiple

Pour réaliser la cartographie du climat, des variables explicatives sont utilisées dans la méthode d'interpolation. Les variables géographiques et environnementales prises en compte ici sont : la latitude, la longitude, la distance à la mer et l'altitude. Les variables d'occupation du sol ou satellitaires utilisées dans

certaines études (Joly *et al.*, 2008 ; Dubreuil *et al.*, 2002) ne sont pas utilisées pour ne pas ajouter à l'incertitude de l'évolution climatique, l'incertitude de l'évolution de l'occupation du sol.

Les données géographiques sont définies à partir d'une base de données avec des références spatiales et paramètres géographiques pour chacun des points du territoire. L'information topographique est issue du Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM³ qui a une résolution spatiale de 90m dégradée à 1km.

Avec les variables énoncées précédemment, la régression multiple pour un point donné est la suivante :

$$D_x = a_0 + a_1 \times alt_x + a_2 \times lat_x + a_3 \times long_x + a_4 \times dist_x$$

Avec :

D : Donnée climatique recherchée en un point x

alt : l'altitude en mètre

lat : la latitude en degré

long : la longitude en degré

dist : la distance à la mer en kilomètre

D'après ces quatre variables, il est possible d'obtenir un résultat statistiquement significatif pour l'ensemble des points à 1km de résolution. Les coefficients *a* varient selon l'indicateur climatique et la période considérée.

RESULTATS :

Les résultats statistiques

Les régressions multiples

Le modèle de régionalisation a été appliqué aux températures et précipitations. Concernant les températures moyennes annuelles, les résultats des régressions multiples ont des corrélations fortes proches de 0,9 (Tableau 1). Les variables les plus impactantes sur la distribution spatiale des températures sont l'altitude et la latitude qui ont respectivement des coefficients standards proches de -0,6 et -0,4 (Tableau 2). Pour la Bretagne, la baisse de la température moyenne annuelle est de 0,7 à 0,8°C pour 100m d'élévation et de 0,4 à 0,5°C pour un déplacement de 1° vers le nord (Tableau 1).

³En ligne : <https://srtm.csi.cgiar.org/> consulté le 17 novembre 2022

Tableau 1 : Résultats statistiques issus de la régression multiple pour les données de température / *Statistical results from the multiple regression for temperature data*

| Scénario | Périodes | Alt | Long | Lat | Dist | Constante | COEFF CORR |
|---------------|------------------|--------|-------|-------|--------|-----------|-------------|
| OBS | 1951-1980 | -0,007 | -0,10 | -0,42 | 0,000 | 31,61 | 0,87 |
| | 1991-2020 | -0,007 | -0,06 | -0,44 | -0,002 | 33,79 | 0,91 |
| RCP4.5 | 2031-2060 | -0,008 | -0,04 | -0,48 | -0,001 | 36,12 | 0,89 |
| | 2071-2100 | -0,008 | -0,02 | -0,50 | 0,000 | 37,80 | 0,89 |
| RCP8.5 | 2031-2060 | -0,008 | -0,04 | -0,49 | 0,000 | 37,14 | 0,90 |
| | 2071-2100 | -0,008 | 0,01 | -0,53 | 0,000 | 41,01 | 0,87 |

Avec alt= altitude, long = longitude, lat = latitude, Dist = distance à la mer

Tableau 2 : Coefficient standard des différentes variables pour les données de température par périodes et scénario / *Standard coefficient of different variables for temperature data according to scenario and period.*

| Scénario | Période | Alt | Long | Lat | Dist |
|----------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| OBSERVE | 1951-1980 | -0,60 | -0,17 | -0,42 | -0,14 |
| | 1991-2020 | -0,64 | -0,10 | -0,40 | -0,02 |
| RCP 4.5 | 2031-2060 | -0,64 | -0,10 | -0,44 | -0,04 |
| | 2071-2100 | -0,63 | -0,05 | -0,45 | -0,03 |
| RCP8.5 | 2031-2060 | -0,64 | -0,11 | -0,45 | -0,03 |
| | 2071-2100 | -0,61 | -0,05 | -0,44 | -0,02 |

Avec alt= altitude, long = longitude, lat = latitude, Dist = distance à la mer

Pour les précipitations, les résultats de la régression multiple présentent des corrélations de 0,7 à 0,8. Il est à noter une inversion des coefficients pour la latitude entre la saison d'étiage ou le coefficient est positif et la saison de recharge ou le coefficient est négatif (Tableau 3). Le rôle de la latitude dans la distribution spatiale des précipitations varie donc selon la saison à savoir une augmentation des précipitations pour un déplacement vers le Nord en saison d'étiage et l'inverse en saison de recharge. Par ailleurs, l'altitude est déterminante à toute saison avec un coefficient standard situé autour de +0,6. Ensuite, la longitude est déterminante, notamment en saison de recharge avec un coefficient de -0,5 à -0,6 contre -0,2 en saison d'étiage (Tableau 4).

Tableau 3 : Résultats statistiques issus de la régression multiple pour les données annuelles et saisonnières de précipitations (étiage et recharge) pour différentes périodes et scénario / Statistical results of the multiple regression for annual and seasonal rainfall data (*low water season and refill seasons*) for different period and scenario :

| Fenêtre temporelle pour le cumul pluviométrique (Période Scénario) | Alt | Long | Lat | Dist | Const | COEFF CORR |
|--|------|--------|--------|-------|---------|------------|
| Annuelle (1991-2020) | 1,98 | -70,97 | -56,96 | -0,07 | 3279,53 | 0,79 |
| Saison Etiage (1991-2020) | 0,65 | -8,71 | 0,45 | -0,05 | 252,54 | 0,73 |
| Saison Recharge (1991-2020) | 1,33 | -62,11 | -58,25 | -0,03 | 3068,11 | 0,81 |
| Saison Etiage (2031-2060 RCP4.5) | 0,59 | -11,54 | 5,62 | -0,11 | -28,58 | 0,73 |
| Saison Recharge (2031-2060 RCP4.5) | 1,01 | -44,94 | -42,83 | 0,05 | 2381,40 | 0,79 |

Avec Alt= altitude, Long = longitude, Lat = latitude, Dist = distance à la mer, COEFF CORR = coefficient de corrélation

Tableau 4 : Coefficient standard des différentes variables pour les données de précipitations annuelles et saisonnières (étiage et recharge) en fonction des périodes et scénario / *Standard coefficient of different variables for annual and seasonal rainfall data (low water and refill seasons) according to periods and scenario.*

| Fenêtre temporelle pour le cumul pluviométrique (Période Scénario) | Coefficient standard des variables | | | |
|--|------------------------------------|-------|-------|-------|
| | Alt | Long | Lat | Dist |
| Annuelle (1991-2020) | 0,64 | -0,43 | -0,12 | -0,01 |
| Saison Etiage (1991-2020) | 0,68 | -0,17 | 0,00 | -0,02 |
| Saison Recharge (1991-2020) | 0,60 | -0,52 | -0,18 | -0,01 |
| Saison Etiage (2031-2060 RCP4.5) | 0,65 | -0,25 | 0,04 | -0,05 |
| Saison Recharge (2031-2060 RCP4.5) | 0,60 | -0,53 | -0,19 | 0,01 |

Avec Alt= altitude, Long = longitude, Lat = latitude, Dist = distance à la mer

Les résidus du modèle de régionalisation

Le résultat cartographique présente les biais, ceux-ci représentent généralement moins de 0,5°C pour la température moyenne annuelle (Figure 2A) mais ils peuvent représenter plus de 20% pour le cumul pluviométrique annuel. Par exemple, le cumul est sous-estimé de plus de 10% sur le Finistère intérieur. Le cumul est à l'inverse surestimé de plus 10% pour plusieurs stations, notamment les stations du littoral sud-breton, principalement celle de Belle-Ile (Figure 2B).

Les résidus du modèle géostatistiques présentées montrent que les paramètres géographiques ne sont pas les seuls à influencer le climat. Il y a aussi d'autres paramètres environnementaux comme les courants marins ou la dynamique atmosphérique. Mais aussi des paramètres d'occupation du sol qui ne sont pas pris en compte ici.

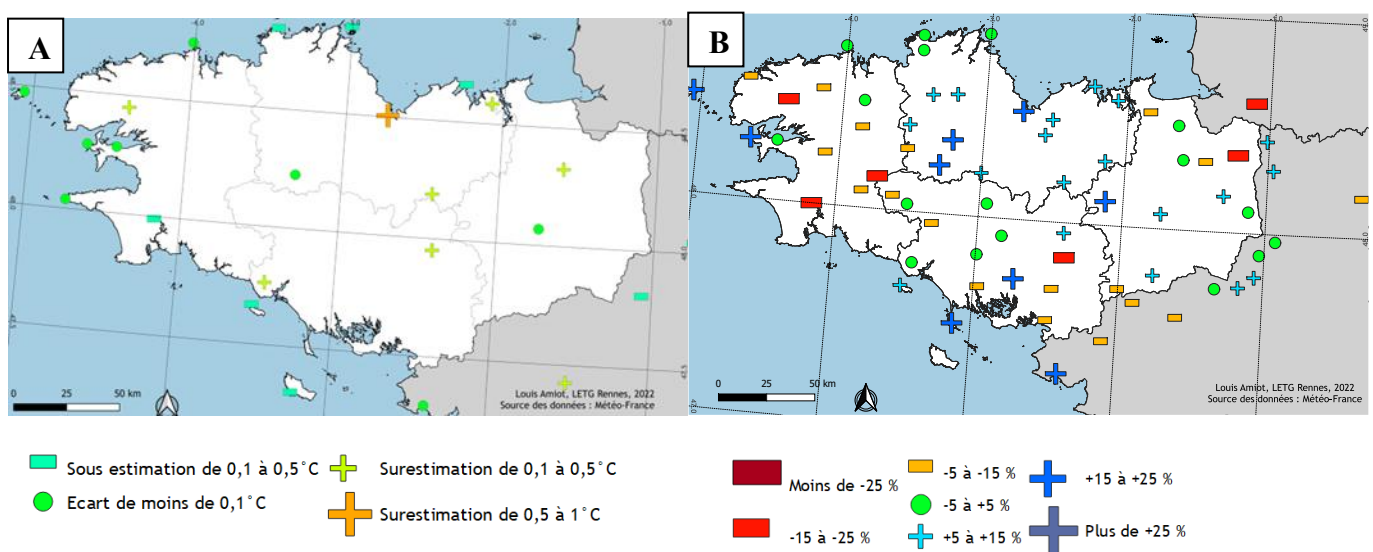


Figure 2 : Résidus du modèle de régionalisation pour A. les températures moyennes annuelles (1991-2020) et B. le cumul annuel moyen (1991-2020) / *Residues of regionalization model for A. Annual average temperature (1991-2020) and B. Annual precipitation (1991-2020).*

Une hausse marquée des températures en Bretagne

Une hausse des températures observées en Bretagne depuis 1951

L'impact régional du changement climatique est clairement visible avec une hausse de 0,9 à 1,1°C entre la période 1951-1980 et 1991-2020. Ainsi, la normale climatique la plus récente (1991-2020) n'affiche aucune température moyenne annuelle inférieure à 10°C dans la région contre 4% de la surface régionale sur la période 1951-1980. La température moyenne annuelle dépasse 11°C sur la quasi-totalité du territoire, sur cette même période 1991-2020, cette surface concernait la moitié de la Bretagne sur la période 1951-1980. La température

moyenne annuelle la plus élevée sur la période 1951-1980, entre 11,5°C et 12°C et qui se retrouvait principalement sur le littoral sud se retrouve sur la carte de 1991-2020 sur le pourtour des hauteurs des Monts d'Arrée et Montagnes Noires. Saint-Brieuc a sur la période la plus récente une température moyenne annuelle proche de celle de Lorient sur la période 1951-1980 (Figure 3A et 3B).

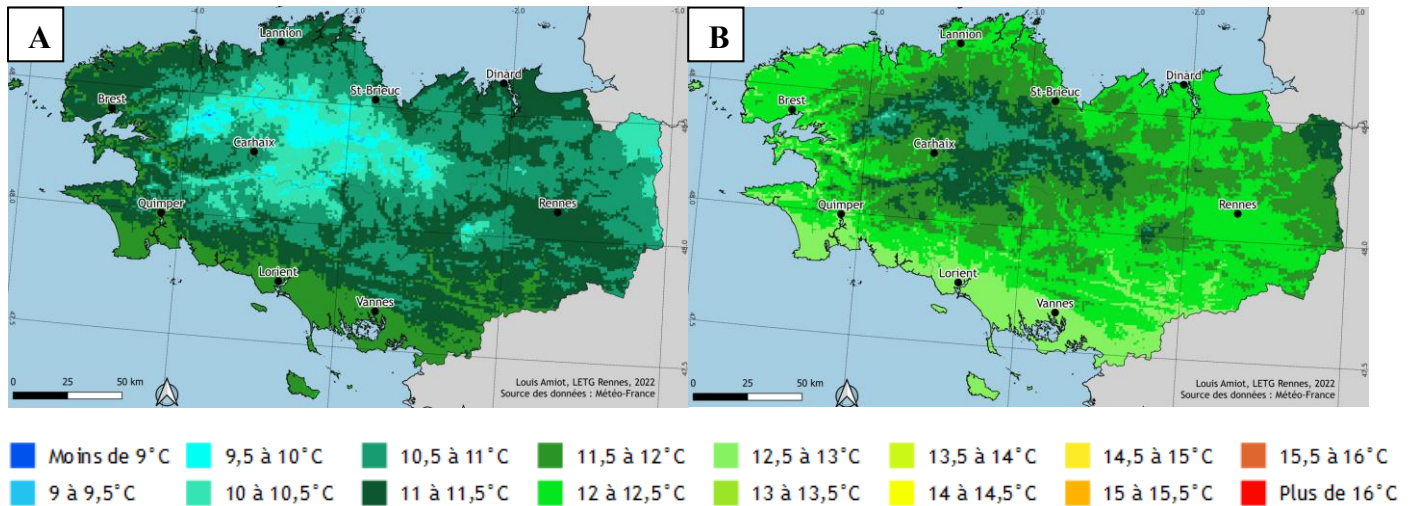


Figure 3 : Température moyenne annuelle (°C) en Bretagne pour les périodes 1951-1980 (A) et 1991-2020 (B) / Annual mean temperature (°C) in Brittany for the 1951-1980 (A) and 1991-2020 (B) periods.

Vers des températures méridionales en Bretagne ?

La hausse des températures se poursuit sur la région, son intensité dépend du scénario :

Dans le cas du scénario RCP 4.5, la température moyenne annuelle devrait augmenter de 0,5 à 0,7°C à horizon moyen, c'est-à-dire la période 2031-2060 par rapport à la période actuelle 1991-2020 (Figure 4A et Tableau 5), plus de 80% de la région aurait une température moyenne annuelle supérieure à 12°C, contre 47% de la surface sur la période 1991-2020. Sur la période 2071-2100, le réchauffement serait de 1,1 à 1,4°C par rapport à 1991-2020 (Figure 4B). Les températures moyennes annuelles de la région varieraient donc de 11,5 à 14,5°C en moyenne en fin de siècle avec 65% de la région concernée par une température moyenne annuelle située entre 13 et 14°C. Ainsi, la température moyenne annuelle de Saint-Brieuc sur la période 2071-2100 correspondrait à celle de Nantes sur la période 1991-2020 dans ce scénario (Tableau 6).

Dans le scénario RCP 8.5, le réchauffement est de l'ordre de 0,5 à 1,4°C à horizon moyen par rapport à la période 1991-2020. Celui-ci est plus rapide que dans le cas du scénario RCP4.5, particulièrement sur les Monts d'Arrée et à l'Est de la région avec un réchauffement de plus de 1°C (Tableau 5). Les températures seraient de 11,5 à 14 °C, un tiers de la région aurait une température moyenne annuelle supérieure à 13°C (Figure 4C). En fin de siècle, le réchauffement serait de 2,5 à 3,3°C par rapport à la période 1991-2020 (Tableau 5) avec la même répartition géographique de réchauffement que précédemment. Les températures seraient ainsi

comprises entre 12,5°C et 16°C en Bretagne ; avec plus d'un tiers de la surface régionale qui aurait une température moyenne annuelle supérieure à 15°C soit plus que la température moyenne annuelle d'Avignon sur la période 1991-2020 (Figure 4D, Tableau 6).

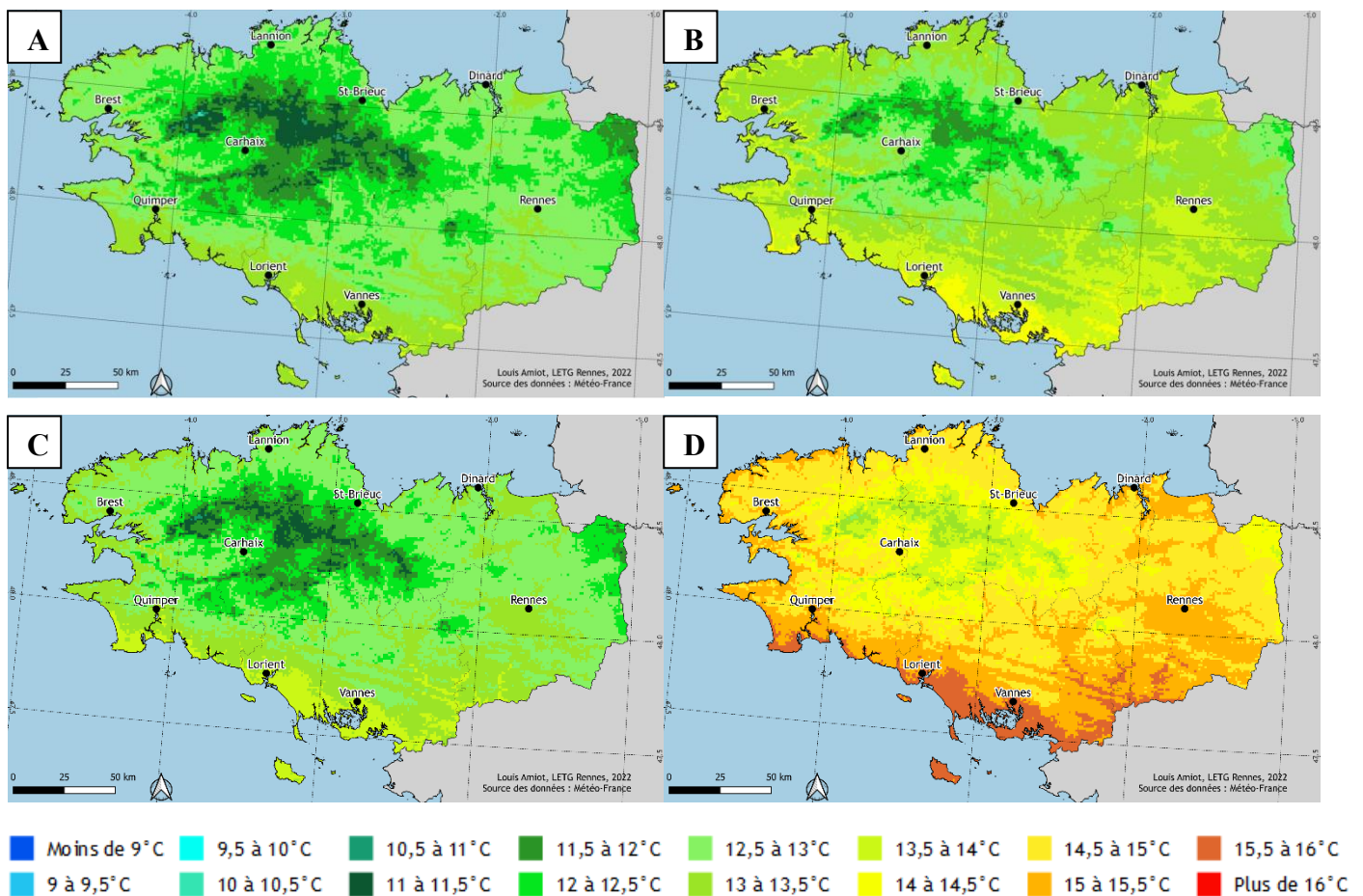


Figure 4 : Températures moyennes annuelles (°C) en Bretagne pour les périodes futures 2031-2060 (A et C) et 2071-2100 (B et D) sous conditions de scénario RCP4.5 (A et B) et RCP8.5 (C et D) d'après le modèle climatique CNRM / *Annual mean temperatures (°C) in Brittany for the 2031-2060 (A and C) and 2071-2100 (B and D) future periods under the conditions of RCP4.5 (A and B) and RCP8.5 (C and D) scenarios according to the CNRM climate model.*

Tableau 5 : Ecart de températures moyennes annuelles (°C) à 5 stations bretonnes : pour la période observée 1991-2020 par rapport à la période 1951-1980 et pour les périodes futures 2031-2060 (horizon moyen) et 2071-2100 (horizon lointain) par rapport à la période observée 1991-2020 en fonction des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 / *Differences in annual mean temperature (°C) for 5 stations in Brittany for the observed 1991-2020 period compared to the 1951-1980 period and for the future periods 2031-2060 and 2071-2100 compared to the observed period of 1991-2020 according to two scenarios (RCP4.5 and RCP8.5).*

| | Température moyenne annuelle 1991-2020 (°C) | Ecart de température (°C) | | | | |
|-------------------|---|---|---|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Entre les deux périodes observées (1991-2020 par rapport à 1951-1980) | Entre les périodes futures et la période observée 1991-2020 selon deux horizons et deux scénarios : | | | |
| | | | Horizon moyen RCP4.5 | Horizon moyen RCP8.5 | Horizon lointain RCP4.5 | Horizon lointain RCP8.5 |
| BREST | 11,7 | +1,0 | +0,6 | +0,8 | +1,2 | +2,7 |
| DINARD | 11,9 | +1,0 | +0,6 | +0,5 | +1,4 | +2,6 |
| LORIENT | 12,1 | +0,9 | +0,7 | +0,4 | +1,3 | +2,5 |
| MERDRIGNAC | 11,4 | +1,0 | +0,5 | +0,9 | +1,2 | +3,1 |
| QUIMPER | 12,6 | +1,1 | +0,6 | +1,3 | +1,3 | +3,3 |
| RENNES | 12,4 | +1,1 | +0,7 | +0,7 | +1,4 | +2,9 |
| ST-BRIEUC | 11,5 | +1,1 | +0,5 | +0,8 | +1,1 | +2,8 |

Tableau 6 : Températures moyennes annuelles (°C) de quelques stations françaises pour la normale trentenaire 1991-2020 / *Annual mean temperature for several French stations for the 30-year normal 1991-2020.*

| | Normale climatique annuelle 1951-1980 | Normale climatique annuelle 1991-2020 |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Nantes | 11,7 | 12,7 |
| La Rochelle | 12,5 | 13,5 |
| Toulouse | 12,7 | 14,2 |
| Avignon | | 15 |
| Marseille | 14,5 | 15,9 |

Une évolution plus complexe de la pluviométrie en Bretagne

Une hausse des cumuls pluviométriques sur la période observée

Si on compare les cumuls pluviométriques annuels de la période 1991-2020 par rapport à ceux de la période 1951-1980, ils ont eu tendance à augmenter de l'ordre en général de 10% sur la région. L'augmentation n'est

pas homogène sur l'ensemble du territoire : elle est plus forte sur le sud Morbihan avec jusqu'à + 25% et plus de +10% sur le sud de la région, à l'inverse la hausse est plus limitée sur le Nord-Est de la Bretagne. Sur les autres stations, la hausse est généralement située entre 5 et 10% (Figure 5B).

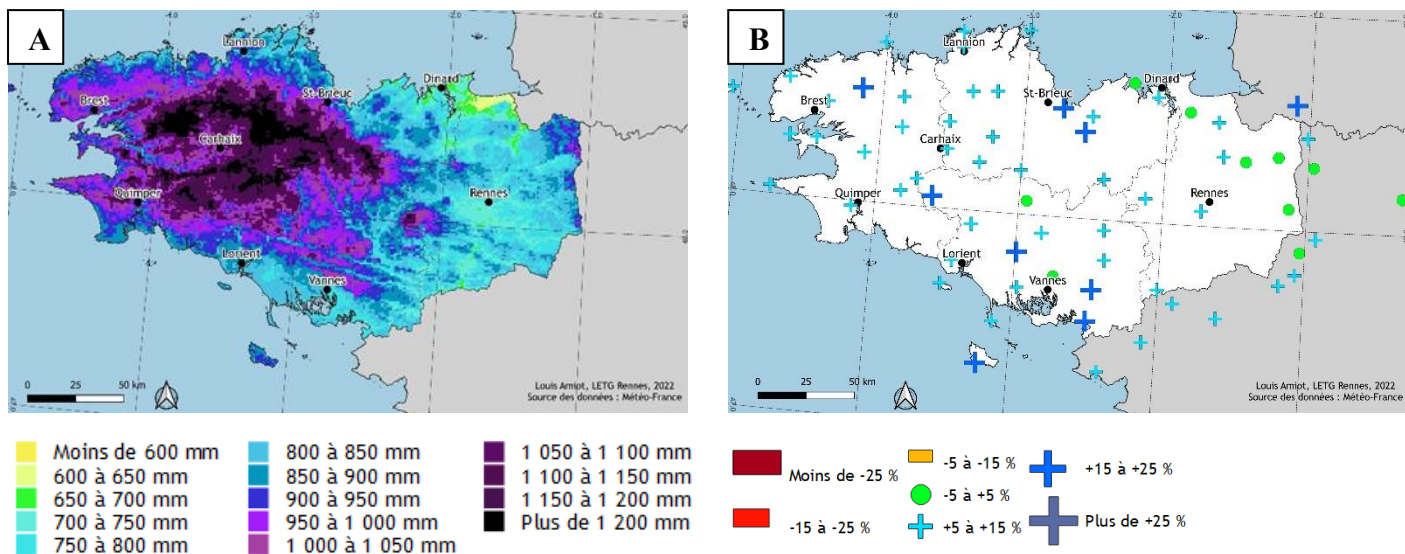
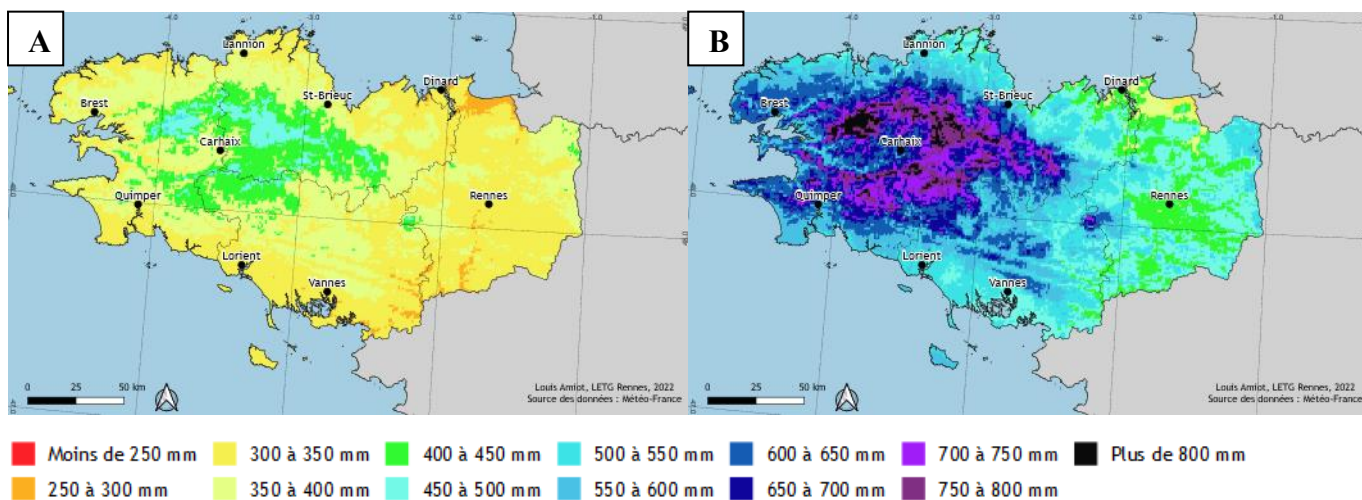


Figure 5 : Cumuls moyens (mm) sur une année hydrologique en Bretagne sur la période 1991-2020 (A) et évolution (en %) par rapport à la normale 1951-1980 (B) / Mean annual rainfall amount (mm) in Brittany during the period 1991-2020 (A) and evolution (in %) compared to 1951-1980 (B)

Si on affine par saison hydrologique en distinguant la saison de recharge allant d'octobre à mars (figure 6A et 6C) et la saison d'étiage allant d'avril à septembre (figure 6B et 6D), la hausse du cumul pluviométrique saisonnier est similaire pour les deux saisons sur la période observée et de l'ordre de 8% mais elle n'est pas homogène spatialement : la hausse est plus forte sur le Sud de la Bretagne avec au moins + 10% et plus faible au centre de la région ce qui est similaire à la situation annuelle (Figure 6C et 6D).



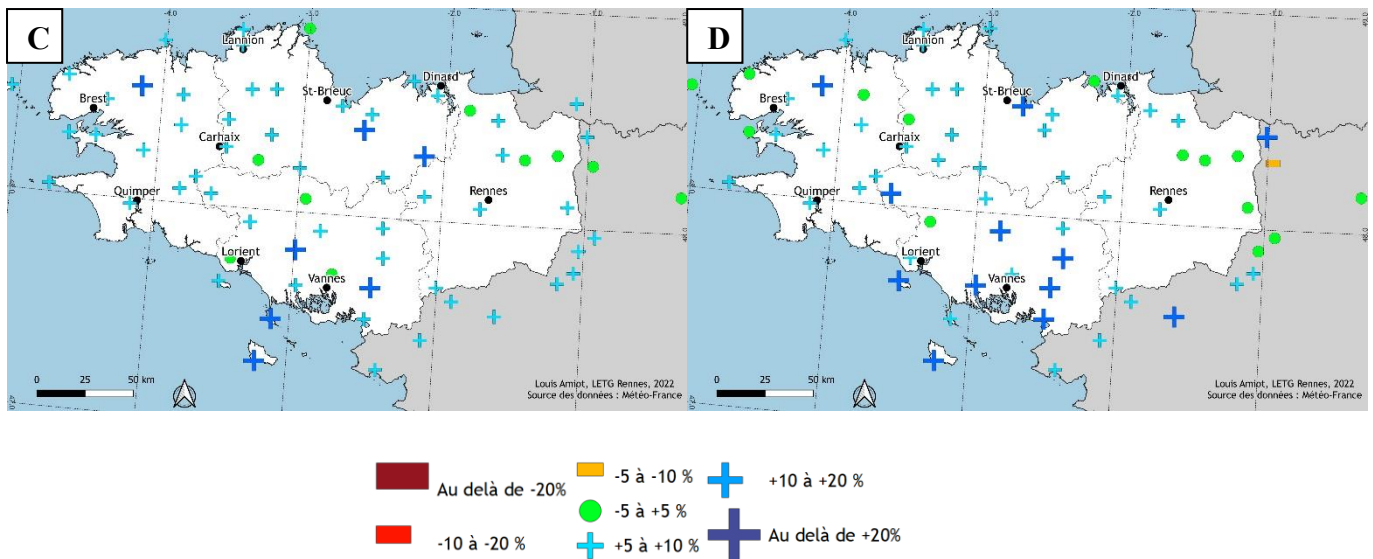


Figure 6 : Cumuls pluviométriques moyens (en mm) sur la période 1991-2020 en saison d'été (avril-septembre) (A) et de recharge (octobre-mars) (B) et évolution (en %) par rapport à la période 1951-1980 en saison d'été (C) et de recharge (D) / Mean rainfall amounts (in mm) for the 1991-2020 period during the low water season (April to September) (A) and the refill season (October to March) (B) and evolution (in %) compared to the 1951-1980 period for the low water season (C) and the refill season (D)

Vers une amplification du contraste pluviométrique saisonnier ?

L'évolution simulée par le modèle CNRM montre une amplification du contraste saisonnier avec une hausse du cumul en saison de recharge et une baisse du cumul en saison d'été quel que soit le scénario. Cela s'observe dès l'horizon moyen principalement sur l'Est de la région (Figure 7).

Ainsi, pour la période 2031-2060 avec le scénario intermédiaire RCP4.5, le cumul pluviométrique en saison de recharge tend à augmenter de l'ordre de 9% tandis que le cumul de la saison d'été baisserait de 12%. La baisse du cumul en saison d'été ressort particulièrement sur le centre de la région où le cumul ne dépasse pas 450 mm (Figure 7A) En saison de recharge, le cumul dépasse 400 mm sur une large partie de la région excepté le bassin rennais et la côte Nord-Est de la région (Figure 7B). La hausse du cumul ressort surtout sur l'Est de la région avec par exemple une hausse de l'ordre de 15% à Rennes et sur plusieurs stations d'Ille et Vilaine entre les périodes 1991-2020 et 2031-2060 (Figure 7D). Dans l'Ouest de la région, la hausse du cumul est moins prononcée avec une hausse inférieure à 5% pour les stations situées au centre du massif armoricain. Les tendances sont sensiblement les mêmes avec le scénario RCP8.5 à horizon moyen.

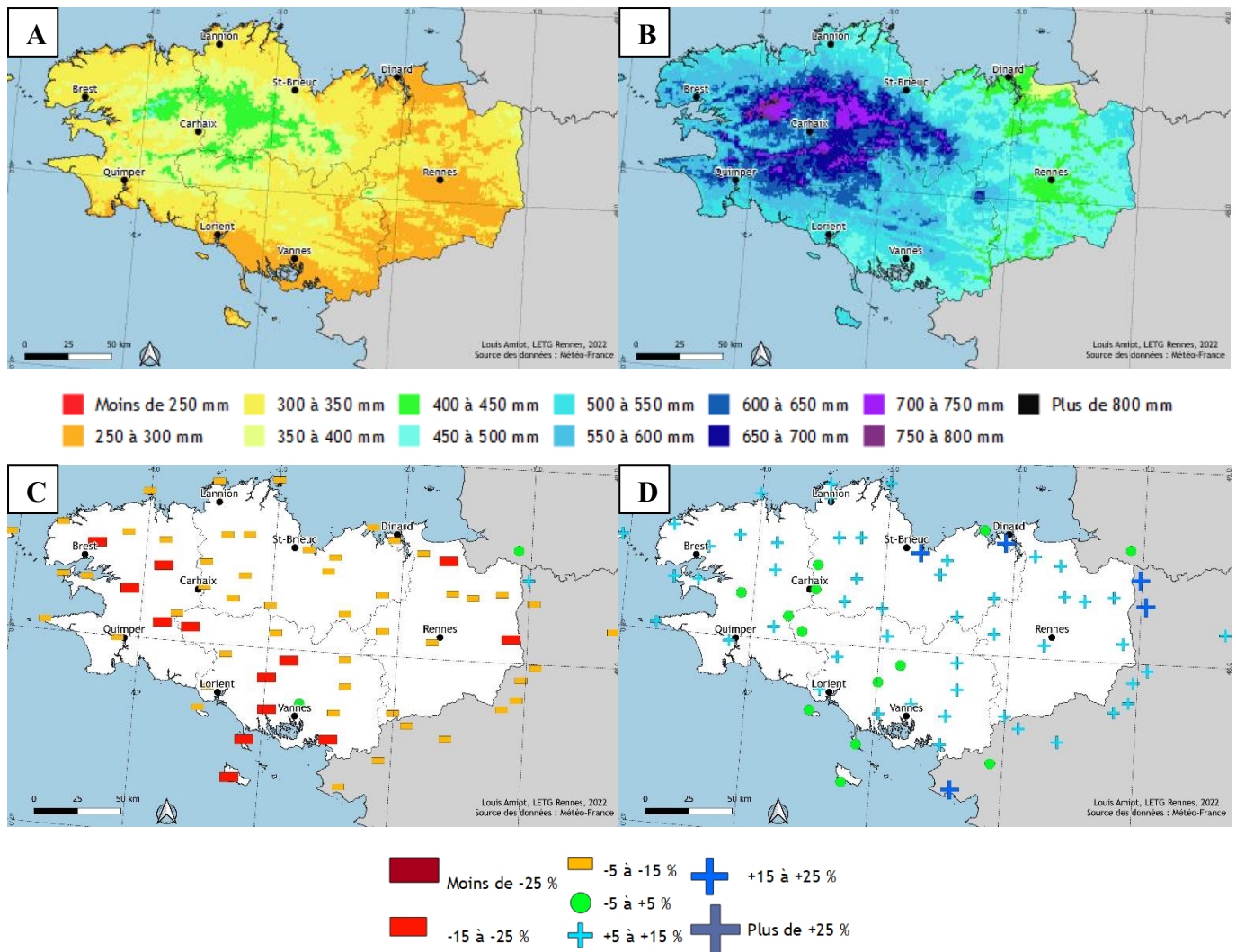


Figure 7 : Cumuls pluviométriques moyens (en mm) en saisons d'étiage (A) et de recharge (B) sur la période 2031-2060 pour le scénario RCP4.5 et tendance d'évolution par rapport à la période 1991-2020 (en %) en saisons d'étiage (C) et de recharge (D) / *Mean rainfall amount (mm) for the low water season (A) and the refill season (B) over the 2031-2060 period for the RCP4.5 scenario and changes compared to the 1991-2020 period (in %) during the low water season (C) and the refill season (D)*

Pour l'horizon lointain, la tendance à l'amplification du contraste saisonnier se réduit en scénario RCP4.5 mais se renforce en scénario RCP 8.5 (Figure 8). En saison de recharge, l'écart entre le cumul observé sur la période 1991-2020 et le cumul simulé sur la période 2071-2100 est en hausse de l'ordre + 15%, même jusqu'à +30% pour le scénario RCP 8.5, alors que la hausse est plus réduite (seulement +3%) dans le scénario RCP4.5. Mêmes observations pour la saison d'étiage, le cumul tend à diminuer de l'ordre de 10% dans le scénario RCP8.5 contre 2% dans le RCP4.5 (Figure 8A et 8B).

La tendance d'amplification du cumul pluviométrique est donc nette pour l'horizon moyen avec des évolutions similaires dans les deux scénarios (Figure 8A). En fin de siècle la tendance varie selon le scénario avec une amplification toujours plus grande pour le scénario RCP8.5 et une stabilisation des cumuls pour le RCP4.5 (Figure 8B).

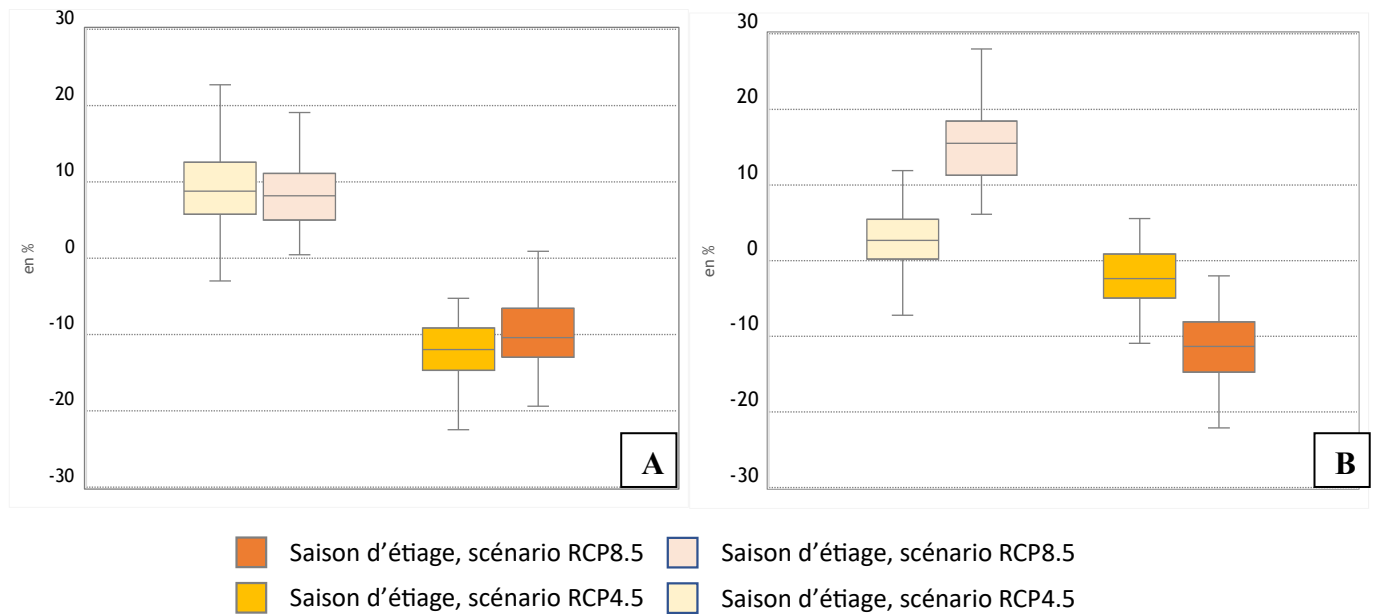


Figure 8 : Distribution des écarts relatifs entre les données observées sur les périodes 1991-2020 et 2031-2060 (horizon moyen) (A) et les périodes 1991-2020 et 2071-2100 (horizon lointain) (B) d'après les données des 72 séries de données de précipitation (en %) / *Distribution of relative differences between the observed data for the periods of 1991-2020 and 2031-2060 (medium horizon) (A) and the periods of 1991-2020 and 2071-2100 (distant horizon) (B) according to the data of 72 series of data precipitation (in %).*

DISCUSSION

La répartition géographique relative des pluies ou températures n'est pas remise en cause par le changement climatique et par la variabilité spatiale du réchauffement. Cela signifie que le massif armoricain restera le territoire le plus frais et arrosé de la région, le littoral sud restera le lieu le plus chaud de la région et le bassin rennais et la côte nord de l'Ille-et-Vilaine devrait rester le moins arrosé.

L'évolution des températures est différente de plusieurs dixièmes de degrés entre des stations littorales et celles qui sont au centre ou à l'Est de la région. Le réchauffement est plus fort à l'intérieur de la Bretagne et vers l'Est (Belleguic *et al.*, 2012 ; Merot *et al.*, 2012), autrement dit il est plus modéré sur le littoral. Cela ne remet toutefois pas en cause la répartition spatiale des températures dans la région, en effet, le centre Bretagne reste malgré tout le territoire le plus frais de la région avec un écart qui se réduit par rapport au littoral.

Concernant les précipitations, la tendance future à une accentuation du contraste saisonnier des pluies déjà constatée avec une baisse du cumul en saison d'étéage et une hausse en saison de recharge (Lamy, 2013 ; Merot *et al.*, 2012 ; Amiot *et al.*, 2022) se confirme ici sur l'Est de la région. Mais ce n'est pas le cas pour l'Ouest qui devrait connaître une baisse des cumuls sur les deux saisons hydrologiques. La baisse reste toutefois plus faible en saison de recharge qu'en saison d'étéage.

Les précipitations sont plus complexes à étudier et spatialiser, notamment parce qu'elles présentent une plus grande variabilité spatiale et discontinuité dans le temps. Les corrélations pour la régionalisation sont moins élevées que pour les températures (Tableau 1 et 3). Météo-France utilise d'ailleurs une méthode spécifique pour la spatialisation des données de précipitation afin de limiter les biais avec la méthode Aurhely (Benichou et Le Breton, 1987). La prise en compte de l'exposition dans la formule de régression pourrait être une piste de réflexion pour améliorer la robustesse statistique des résultats.

Concernant l'évolution pluviométrique dans le futur, il n'y a pas de tendance homogène au niveau annuel et une grande incertitude règne tant au niveau mondial (IPCC 2021), national (Jouzel *et al.*, 2014) que régional (Merot *et al.*, 2012 ; Amiot *et al.*, 2022).

L'incertitude de l'évolution des cumuls pluviométriques vient se superposer à l'incertitude issue du modèle de régionalisation, même si, les résultats sont cohérents géographiquement et conforme à ceux d'autres travaux sur la région (CRPF, 2019 ; Belleguic *et al.*, 2012), il est nécessaire de rester vigilant sur les conclusions concernant l'évolution pluviométrique.

Par ailleurs, les données futures ne présentent ici que la vision du modèle climatique qui a été choisi : le modèle CNRM-ALADIN qui est classiquement utilisé dans les études d'impacts à l'échelle régionale en métropole car il présente des biais réduits par rapport à d'autres modèles dans la région (Soubeyroux *et al.*, 2020). Cependant, il est identifié par le rapport Drias comme étant parmi les 3 modèles de l'ensemble Drias qui réchauffe le moins en hiver et une évolution des précipitations hivernales situées dans la médiane. Concernant l'évolution des précipitations et températures estivales, il est dans la médiane des évolutions de l'ensemble des modèles Drias (Soubeyroux *et al.*, 2020). Les tendances d'évolution climatique peuvent être différentes selon le modèle, la période et le scénario considéré, surtout concernant la pluie. L'usage de données issues d'autres modèles climatiques (qui réchauffent et humidifient plus ou moins selon les saisons) permettrait ainsi de prendre en compte l'incertitude liée aux modèles climatiques.

Le changement climatique se traduit donc dans la région par une hausse des températures sur toutes les saisons accompagnée d'une amplification du contraste pluviométrique saisonnier. Moins de pluie en été, avec des températures plus élevées, ces éléments laissent craindre une hausse du risque de sécheresse. Des études récentes montrent effectivement une hausse du risque de sécheresse pour la Bretagne avec la possibilité d'avoir une sécheresse au moins aussi intense que celle de 1976 une année sur deux en fin de siècle (Lamy 2013; Dubreuil *et al.*, 2018,).

L'approche cartographique permet de supposer que certaines zones seront plus vulnérables au risque de sécheresse, notamment en Ille-et-Vilaine, au niveau du bassin rennais ou du littoral sud du Morbihan. Ces territoires sont déjà assez peu arrosés avec des températures estivales plus élevées (Belleguic *et al.*, 2012).

CONCLUSION

La régionalisation du climat à une résolution d'un kilomètre permet de préciser comment se traduit le changement climatique à une échelle plus fine et montre la diversité spatiale du climat passé et futur.

Le changement climatique actuel ne devrait pas bouleverser la répartition spatiale des pluies et températures actuelle de la région : les hauteurs resteront le territoire le plus frais et le plus arrosé de la région, le littoral sud restera le lieu le plus chaud et le moins arrosé avec le bassin rennais.

L'ensemble de la Bretagne est concerné par un changement climatique qui se traduit par une hausse des températures moyennes annuelles de l'ordre de 0,9-1,1°C accompagnée d'une hausse de 10% du cumul moyen par année hydrologique par rapport à la période 1951-1980.

Au niveau des températures, le réchauffement marque un décalage septentrional des normales climatiques, par exemple, la température annuelle moyenne de la côte Nord bretonne sur la période 1991-2020 correspond à celles de la côte Sud sur 1951-1980. En fin de siècle, sur la période 2071-2100, la hausse des températures moyennes annuelles est de l'ordre de 1,3 à 3°C par rapport à 1991-2020 selon le scénario. Ainsi, la température moyenne annuelle pourrait atteindre plus de 15°C sur plus d'un tiers de la surface régionale.

Concernant les précipitations, il n'y a pas de tendances à échelle annuelle mais une tendance saisonnière divergente. Le cumul de pluie tend à baisser en saison d'été (de l'ordre de 12% à horizon moyen) et augmenter en saison de recharge (de l'ordre de 9% à horizon moyen). Cela s'observe principalement sur l'Ille et Vilaine, sur le reste de la région, le cumul baisse sur les deux saisons à horizon moyen. Cette situation, notamment la baisse du cumul en saison d'été laisse craindre une hausse du risque de sécheresse et une méditerranéisation du climat (Dubreuil, 2022).

Il serait utile de réaliser ce travail cartographique en comparant plusieurs modèles climatiques afin de distinguer les divergences et convergences de ceux-ci concernant l'évolution du climat. Par ailleurs, les nouveaux scénarios climatiques du 6^{ème} rapport du GIEC pourraient apporter des tendances plus affinées ouvrant la voie à de nouveaux travaux à venir quand ils seront disponibles sur le portail Drias.

Remerciements : Le travail a été effectué dans le cadre du projet FERMADAPT, projet financé par la région Bretagne et l'ADEME et porté par Valorial et la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne. Il a été réalisé grâce aux données climatiques mises à disposition par Météo-France via la Publiothèque

Références bibliographiques

- AMIOT L., DUBREUIL V., LAUNAY J., BARDON E., MASSA F., KEROMNES E., BARAER F., 2022. Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bretagne : les résultats du programme DEMOCLIM, acceptée pour publication, in. *Le changement climatique, les risques et l'adaptation*, actes du 35^{em} colloque de l'AIC, Toulouse.
- ARNAUD M., EMERY X., 2000. *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*, Paris : Hermès science publications, 221 p.
- BELLEGUIC K., CONSEIL C., EVENO T., LORGE S., BARAER F., 2012. *Le changement climatique en Bretagne*, rapport Météo France, 85 p.
- BENICHOU P., LE BRETON O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques, *La Météorologie*, n°7, vol 19, p. 23-34.
- CALOZ R., COLLET C., 2011 *Analyse spatiale de l'information géographique*, Science & ingénierie de l'environnement, Lausanne [Paris], Presses polytechniques et universitaires romandes, 383p.
- CRPF BRETAGNE-PAYS DE LA LOIRE, 2019, *Caractérisation et évolution du climat en Bretagne*
- DUBREUIL V., 1994. *La sécheresse dans la France de l'ouest : étude au moyen des bilans hydriques et des données NOAA-AVHRR*, thèse de Géographie, Université Rennes 2, 381p.
- DUBREUIL V., MONTGOBERT M., PLANCHON O., 2002 : Une méthode d'interpolation des températures de l'air en Bretagne : combinaison des paramètres géographiques et des mesures infrarouge NOAA-AVHRR, *Hommes et Terres du Nord*, n°1, pp.26-39, DOI : <https://doi.org/10.3406/htn.2002.2795>
- DUBREUIL V., LAMY C., PLANCHON O., 2018. Les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur, in HOLOBACA I-H., IVAN K. (Dir), *Les risques naturels dans le contexte du changement climatique*, Cluj (Roumanie), Presa Universitara Clujeana p.15-21
- DUBREUIL V., 2022. Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen, n°116, DOI : [10.37053/lameteorologie-2022-0012](https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2022-0012)
- FUSS S., CANADELL J. G., PETER, G. P., TAVONI M., ANDREW R. M., CIAIS P., JACKSON R. B., JONES C. D., KRAXNER F., NAKICENOVIC N., LE QUERE C., RAUPACH M. R., SHARIFI A., SMITH P., YAMAGATA Y., 2014. Betting on Negative Emissions, *Nature Climate Change*, n°4, Vol 10, p. 850–853, DOI : <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021 Sixth Assessment Report, résumé technique, 81p.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M., WAVRESKY P., 2008. Interpolation par recherche d'informations locale, *Climatologie*, n°5, p.27-47, DOI : <https://doi.org/10.4267/climatologie.714>.
- JOUZEL J., OUZEAU G., DEQUE M., JOUINI M., PLANTON S., VAUTARD R., 2014. *Le climat de la France au XXIe siècle Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer*, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 64p.

- LAMY C., 2013. *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*, thèse de Géographie, Université Rennes 2, 287 p.
- LE MOIGNE P., 2002. *Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran*, Note de centre GMME, Météo-France.
- LHOTELLIER R., 2006. Systèmes d'information géographique et traitement de données climatiques : l'exemple de l'interpolation des températures. *Analele Științifice ale Universității*, n°12, p. 66-76.
- MEROT P., DUBREUIL V., DELAHAYE D., DESNOS P., 2012. *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perception*. Rennes, PUR, coll. « Espace et territoires », 484 p.
- MOISSELIN J-M., SCHNEIDER M., CANELLAS C., MESTRE O., 2002. Les changements climatiques en France au XXème siècle : Etude des longues séries homogénéisées de données de température et précipitations, *La météorologie*, n°38, p. 45-56, DOI : <https://doi.org/10.4267/2042/36233>
- MOUNIER J., 1981. Carte climatique détaillée de la France au 1:250000. Coupure Saint-Brieux-Lorient, Centre national de la Recherche scientifique (CNRS), Equipe de Recherche30, Grenoble, France, et Université de Haute-Bretagne. Rennes, France, *GéoProdig, portail d'information géographique*
- MOSS R. H., EDMONDS J. A., HIBBARDS K. A., MANNING M. R., ROSE S. K., VANVUUREN D. P., CARTER T. R., EMORI S., KAINUMA M., KRAM T., MEEHL G. A., MITCHELL J. F. B., NAKICENOVIC N., RIAHI K., SMITH S. J., TOUFFER R. J., THOMSON A. M., WEYANT J. P., WILBANKS T. J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, vol 463, p. 747–756., DOI : [10.1038/nature08823](https://doi.org/10.1038/nature08823)
- OMM, 2013. *Guide des pratiques climatologiques*, n°100, 174 p.
- SIU-NGANG LAM N., 1983. Spatial interpolation methods: a review. *The American Cartographer* , n°2, vol 10 p.129-149.
- SOUBEYROUX J.-M., BERNUS S., CORRE L., GOUGET V., KERDONCUFF M., SOMOT S., TOCQUER F., 2020. *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*. Rapport Météo France, 97p.
- SOUBEYROUX J.M., MARTIN E., FRANCHISTEGUY L., HABETS F., NOILHAN J., BAILLON M., REGIMBEAU F., VIDAL J-P., LE MOIGNE P., MOREL S., 2008. Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études, *La Météorologie*, vol 63 : 40-45, DOI : [10.4267/2042/21890](https://doi.org/10.4267/2042/21890)
- VIDAL J-P., MARTIN E., FRANCHISTEGUY F., BAILLON M., SOUBEYROUX J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, n°11, vol 30, p.1627-1644, DOI : <https://doi.org/10.1002/joc.2003>