Desjardins Développement international

Baastel

ELLESadAPt

Projet d'adaptation aux changements climatiques des femmes dans les aires protégées au Congo et au Tchad (ELLESadAPt)

# Projection et modélisation climatique à échelle réduite sur le Complexe d'Aires-Protégées de Binder-Léré (CAPBL)

**N° de commande AMC : 7454448 | N° de projet AMC : P011753**

**16 juillet 2024**



En collaboration avec

NOÉ Congo et Tchad

En partenariat avec Canada

# TABLE DES MATIERES

**Page**

**1. INTRODUCTION ..... 4**
**2. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES ..... 4**
**2.1. Données climatiques ..... 5**
**2.2. Horizons futurs et scénarios climatiques ..... 6**
**2.3. Approche méthodologique pour la modélisation à échelle réduite ..... 7**
2.3.1. Descente d'échelle statistique ..... 8
2.3.2. Approche multi-modèles ..... 9
2.3.3. Indicateurs climatiques ..... 10
**3. ANALYSE DES TENDANCES CLIMATIQUES RÉCENTES ..... 11**
**3.1. Climat de la région Mayo-Kebbi Ouest ..... 11**
**3.2. Ressenti de la population sur l'évolution climatique récente dans la région ..... 12**
**3.3. Évolution de la saison des pluies dans les données CHIRPS ..... 12**
**3.4. Évolution de l'intensité des pluies dans les données CHIRPS ..... 13**
**4. ANALYSE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES FUTURES ..... 14**
**4.1. La température ..... 14**
4.1.1. La température minimale ..... 14
4.1.2. La température maximale ..... 17
4.1.3. L'indicateur humidex ..... 18
**4.2. Les précipitations ..... 20**
4.2.1. Le cumul de pluie annuel ..... 20
4.2.2. Le nombre de jours de pluie ..... 21
4.2.3. Les pluies intenses ..... 22
**4.3. La saison des pluies ..... 23**
**4.4. Les feux de brousse ..... 25**
**5. CONCLUSION ..... 28**

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des modèles climatiques utilisés dans l'étude. .....5
Tableau 2 : Liste des indicateurs climatiques calculés dans le cadre de l'étude .....11
Tableau 3 : Seuils d'humidex et degrés de conforts associés. Source : Environnement Canada. .....18
Tableau 4 : Synthèse des évolutions des indicateurs climatiques. .....28

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré au Tchad .....4
Figure 2 : Cumul moyen annuel de précipitations sur 1981-2023 dans les données CHIRPS.....5
Figure 3 : Orographie de la région et températures moyennes sur 1979-2016 dans les données CHELSEA.....5
Figure 4 : Description des scénarios SSP (GIEC, 2021). .....7
Figure 5 : Projection de la variation de température moyenne mondiale par rapport à la période 1850-1900 (GIEC, 2021).....7
Figure 6 : Cumul annuel moyen de précipitation dans les observations CHIRPS (en haut), dans les données de la NASA à la résolution de 25 km (en bas à gauche) et dans les données corrigées et descendues à la résolution de 5 km (en bas à droite) pour le modèle anglais UKESM1-0-LL à l'horizon 2060 pour le scénario ssp585. .....8
Figure 7 : Illustration de la transformation de la distribution de probabilité cumulée (CDF) d'un paramètre issu d'un modèle climatique en un point de grille pour un horizon futur, en utilisant celles des observations et du modèle climatique sur la période historique. Méthode CDFt.....9
Figure 8 : Cumul annuel moyen de précipitation sur 1980-2014 dans les observations CHIRPS et dans les données de la NASA issues des 20 modèles climatiques de CMIP6. .....10
Figure 9 : Climatologie de la région de Mayo-Kebbi Ouest sur les 30 dernières années. Source : WBCKP, 2022.....11
Figure 10 : Évolution du cumul de pluie sur 5 jours (en mm) pendant la saison des pluies sur la période 1981-2023 à Binder. Source : données CHIRPS.....13
Figure 11 : Intensité des pluies intenses (courbe noire) et des pluies extrêmes (courbe rouge) dans les données CHIRPS à Binder.....14
Figure 12: Évolution de la moyenne annuelle des températures minimales journalières entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....15
Figure 13 : Cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières à Binder. .....15
Figure 14 : Cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières à Lere. .....15
Figure 15 : Cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières à Lagon.....16
Figure 16 : Évolution du cycle saisonnier des températures minimales journalières pour le scénario ssp370. 25$^{e}$ et 75$^{e}$ percentiles des modèles (en pointillé), et médiane des modèles (en trait plein).....17
Figure 17 : Évolution de la moyenne annuelle des températures maximales journalières entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....17
Figure 18 : Cycle saisonnier moyen des températures maximales journalières à Binder. .....18
Figure 19 : Évolution du nombre de jours par an avec un humidex > 45°C entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....19
Figure 20: Cycle saisonnier moyen de l'humidex à Binder. .....19
Figure 21 : Évolution du cumul de pluie annuel entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....20
Figure 22 : Cycle saisonnier moyen des précipitations journalières à Binder. .....21
Figure 23 : Évolution du cycle saisonnier des précipitations journalières pour le scénario ssp585. 25$^{e}$ et 75$^{e}$ percentiles des modèles (en pointillé), et médiane des modèles (en trait plein). .....21
Figure 24 : Évolution du nombre de jours de pluie par an entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....21
Figure 25 : Cycle saisonnier moyen de la probabilité de pluie à Binder. .....22
Figure 26 : Évolution en fréquence des pluies intenses entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....22

Figure 27 : Évolution du cumul de pluie en saison des pluies (Juin-Sept) entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....23
Figure 28 : Évolution du nombre de jours de pluie pendant la saison des pluies (Juin-Sept) entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....24
Figure 29 : Évolution de la durée maximale d'une séquence sèche pendant la saison des pluies, entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585. .....24
Figure 30 : Description du calcul de l'IFM Canadien .....26
Figure 31 : Évolution du nombre de mois par an en risque fort de feu de brousse (IFM > 35) entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour le scénario RCP8.5. .....27
Figure 32 : Cycle saisonnier moyen de l'indicateur de risque de feu de brousse. .....27
Figure 33 : Changement relatif de cumul annuel de précipitations sous le scénario SSP5-8.5 pour les horizons 2045 et 2085 en comparaison avec la période de référence (1981-2020). Source : Almazroui et al., 2020.....29

## LISTE DES ACRONYMES

| | |
|---|---|
| AMC | Affaires mondiales Canada |
| AP | Aire Protégée |
| CC | Changement Climatique |
| CDFt | Cumulative Distribution Function Transform |
| CHIRPS | Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data |
| GES | Gaz à effet de serre |
| NEX-GDDP-CMIP6. | NASA Earth eXchange Global Daily Downscaled Projections |
| SSP | Shared Socioeconomics Pathways |

# 1. INTRODUCTION

Caractérisée par une grande sensibilité socio-économique et environnementale et de faibles dispositions à l'Adaptation au Changement Climatique (CC), l'Afrique centrale constitue aujourd'hui l'une des régions du monde classée parmi les plus vulnérables aux changements climatiques. Au cours des 30 dernières années, la région a connu une augmentation des températures et une modification du régime de précipitations avec une intensification des pluies combinée à une augmentation des épisodes de sécheresse. Les impacts sont ressentis tant en termes environnementaux, sur les écosystèmes et la diversité biologique ; que sur les sociétés humaines, caractérisées par des niveaux de pauvreté élevés, pour lesquelles les conditions d'existence se complexifient décennies après décennies. Ces impacts sont, par ailleurs, exacerbés par des pratiques, une utilisation des terres et des ressources naturelles non durables (coupe de bois, avancée du front agricole, chasse, entre autres), aggravant encore davantage la vulnérabilité des écosystèmes et des populations et menaçant la biodiversité unique et riche caractérisant ces territoires.

Cependant, les aires Protégées (AP) sont reconnues comme l'un des outils de gestion les plus puissants pour limiter la perte de biodiversité, réguler la consommation des ressources naturelles et garantir la fourniture de services écosystémiques. À ce titre, il est également admis qu'elles constituent une solution efficace, économique et durable pour lutter contre le changement climatique et ses impacts.

Le projet ELLESadAPt, qui vise un renforcement de l'adaptation au changement climatique des femmes et des écosystèmes des aires protégées du Parc national de Conkouati-Douli au Congo et du Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré au Tchad, tout en générant des bénéfices de conservation de la biodiversité, peut jouer un rôle crucial pour ces deux AP.

Ce rapport se concentre sur le complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré au Tchad. Celui-ci est localisé au sud-ouest du Tchad à proximité du Cameroun (cf. Figure 1), et se trouve dans une zone de transition entre climats soudanien et sahélien**.** Cette zone est caractérisée par un gradient des écosystèmes soudano-sahéliens (savanes dans le nord, bloc forestier dans le sud) et un complexe hydrographique important (plaines alluviales, lacs Léré & Tréné, rivière Mayo-Kebbi).

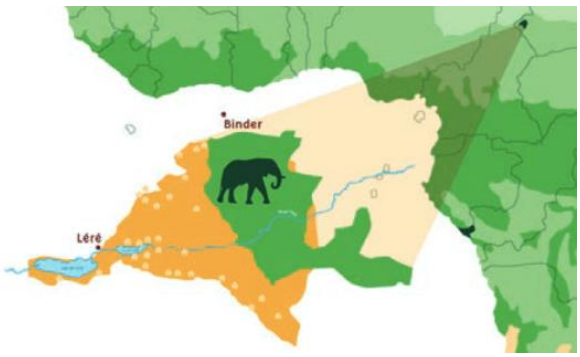



**Figure 1 : Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré au Tchad**

Afin d'évaluer les impacts futurs du changement climatique sur les écosystèmes et la population de cette AP, il est nécessaire de mener une modélisation à échelle réduite pour ces territoires et leurs localités limitrophes pour différents horizons futurs et différents scénarios climatiques. Ces données permettront ensuite de produire des indicateurs climatiques spécifiques aux besoins de l'étude et d'évaluer leur évolution dans le climat futur, afin de proposer des solutions d'adaptation pertinentes pour les femmes et les écosystèmes de cette AP.

# 2. MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES

Il est important de souligner les limites de l'exercice de modélisation pour la région. Les modèles climatiques globaux et régionaux représentent bien la température mais ont plus de difficulté à représenter les nuages et les précipitations, du fait de la très petite échelle à laquelle les processus de formation des nuages et de déclenchement des pluies se produisent. En particulier dans les climats africains, les précipitations qui sont de nature convective présentent souvent des biais.

## 2.1. Données climatiques

Afin de réaliser des modélisations climatiques à échelle réduite, nous avons collecté les données disponibles sur les 40 dernières années sur la région du Tchad couvrant l'Aire Protégée.

Les meilleurs jeux de données d'observation disponibles sur cette région sont :

- Les données de la station météorologique la plus proche : « Pala » au Sud de l'AP de Binder-Léré dont les données sont disponibles sur la période 1953-1978.
- Les données journalières de précipitation CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), issues de données satellites IRT. Ces données couvrent la période 1981-2023 à la résolution spatiale de 5 km x 5 km sur 50°N-50°S.
- Les données journalières de températures minimale et maximale Chelsea-W5E51 à la résolution spatiale de 2,5 km x 2,5 km sur la période 1979-2016.

La climatologie des précipitations et des températures sur les 40 dernières années sur la région à partir des données CHIRPS et CHELSEA est illustrée sur les Figures 2 et 3. La pluviométrie annuelle est comprise entre 750 et 950 mm/an sur la région. Elle est minimale autour du lac Léré et augmente sur les reliefs. En moyenne annuelle, la température minimale journalière est d'environ 22°C et la température maximale journalière de 34 à 35°C. Elles varient avec l'altitude, et sont légèrement plus fortes dans les vallées que sur les collines.

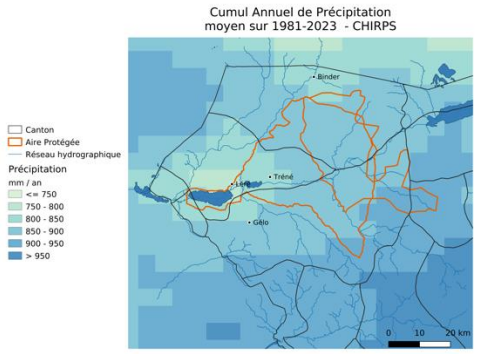



**Figure 2 : Cumul moyen annuel de précipitations sur 1981-2023 dans les données CHIRPS.**

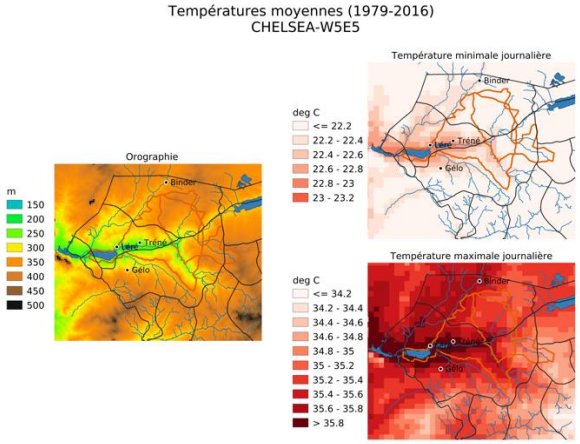



**Figure 3 : Orographie de la région et températures moyennes sur 1979-2016 dans les données CHELSEA.**

Pour estimer les aléas climatiques futurs, nous avons utilisé les projections climatiques CMIP6 du dernier rapport du GIEC (AR6, 2021). Ces projections ont été corrigées de leur biais et descendues à la résolution spatiale de 25 km par un programme de la NASA NEX-GDDP-CMIP6[2] (NASA Earth eXchange Global Daily Downscaled Projections). Les données journalières de précipitation, de température (minimum et maximum) et d'humidité relative d'un ensemble d'une vingtaine de projections climatiques corrigées, issues de modèles climatiques différents (listés dans le Tableau 1), ont été utilisées comme données source.

**Tableau 1 : Liste des modèles climatiques utilisés dans l'étude.**

| Pays | Institut | Modèle climatique |
|---|---|---|
| Angleterre | NERC / Met Office | UKESM1-0-LL |
| Thaïlande | Research *Center* for Environmental Changes | TaiESM1 |

[1] Dirk N. Karger, Stefan Lange, Chantal Hari, Christopher P. O. Reyer, Niklaus E. Zimmermann (2021): CHELSA-W5E5 v1.1: W5E5 v1.0 downscaled with CHELSA v2.0. ISIMIP Repository. https://doi.org/10.48364/ISIMIP.836809.1
[2] Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A. et al. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. Sci Data 9, 262 (2022). https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4

| | | |
|---|---|---|
| Norvège | NorESM Climate modeling Consortium (NCC) | NorESM2-MM |
| | | NorESM2-LM |
| Chine | Nanjing University of Information Science and Technology | NESM3 |
| Japon | Meteorological Research *Institute* | MRI-ESM2-0 |
| Allemagne | MPI | MPI-ESM1-2-LR |
| | | MPI-ESM1-2-HR |
| Japon | Research Center for Advanced Science and Technology (Tokyo) | MIROC6 |
| | | MIROC-ES2L |
| Angleterre | Met Office | HadGEM3-GC31-MM |
| | | HadGEM3-GC31-LL |
| EU | Goddard Institute for Space Studies, NASA | GISS-E2-1-G |
| Chine | Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG) | FGOALS-g3 |
| Canada | Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria | CanESM5 |
| Europe Méditerranée | Euro-Mediterranean Center on Climate Change | CMCC-ESM2 |
| | | CMCC-CM2-SR5 |
| EU | NCAR | CESM2-WACCM |
| | | CESM2 |
| Chine | Beijing Climate Center (BCC) | BCC-CSM2-MR |
| Australie | Centre for Australian Weather and Climate Research | ACCESS-ESM1-5 |
| | | ACCESS-CM2 |

L'ensemble des jeux de données que nous avons utilisées sont des données en open data, accessible sur les sites web des organismes de recherche qui les mettent à disposition.

## 2.2. Horizons futurs et scénarios climatiques

Les projections climatiques CMIP6 de l'AR6 couvrent la période 1950-2100 et sont forcées par les émissions observées de gaz à effet de serre (GES) sur la période historique (1950-2014) et par des scénarios d'émissions potentielles futures ensuite : les scénarios SSP pour lesquels des facteurs socio-économiques sont associés aux concentrations de gaz à effet de serre. Les caractéristiques de ces scénarios sont illustrées sur la Figure 4, et le changement de température globale de 1950 à 2100 par rapport à la période préindustrielle associé à chacun des scénarios sur la Figure 5.

Parmi les scénarios climatiques, deux scénarios ont été choisis pour cette étude :

- Le scénario situé dans la partie moyenne supérieure de l'ensemble des scénarios, le plus probable au vu des politiques actuelles : SSP3-7.0
- Le scénario le plus pessimiste « sans politique climatique » : SSP5-8.5

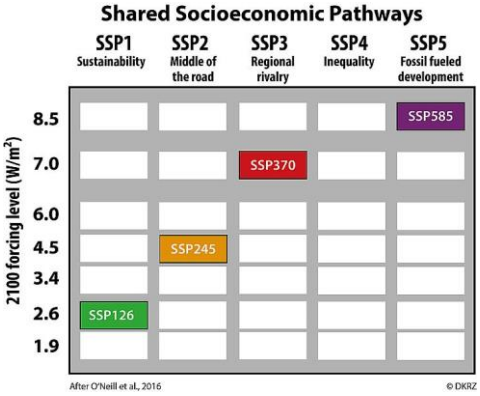



**Figure 4 : Description des scénarios SSP (GIEC, 2021).**

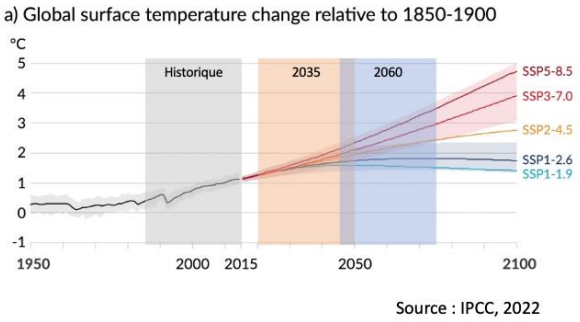



**Figure 5 : Projection de la variation de température moyenne mondiale par rapport à la période 1850-1900 (GIEC, 2021).**

L'étude du climat nécessite de travailler sur des périodes longues (30 ans) afin de définir un état moyen du climat actuel et/ou futur indépendant de la variabilité naturelle du climat.

Les projections climatiques CMIP6 corrigées d'un ensemble de modèles climatiques globaux ont été utilisées :

- pour les deux scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 aux horizons 2035 (période 2020-2050) et 2060 (période 2045-2075),
- en comparaison avec la période historique (1985-2014), cf. illustration sur la Figure 5.

Les horizons choisis correspondent à un horizon court-terme, 2035, qui est celui du projet ELLESadAPt, et à un horizon moyen-terme, 2060.

## 2.3. Approche méthodologique pour la modélisation à échelle réduite

Il est nécessaire de réaliser une modélisation à échelle réduite pour les territoires ciblés, afin d'avoir une vision plus fine que celle fournie par les données existantes (cf. Figure 6, carte de la donnée source en bas à gauche) des impacts locaux du changement climatique sur l'AP de Binder-Léré au Tchad. Nous avons réalisé une descente d'échelle statistique des données journalières des projections de la NASA à 25 km pour atteindre une résolution spatiale de 2,5 à 5 km (cf. Figure 6, carte de la donnée obtenue à fine échelle en bas à droite).

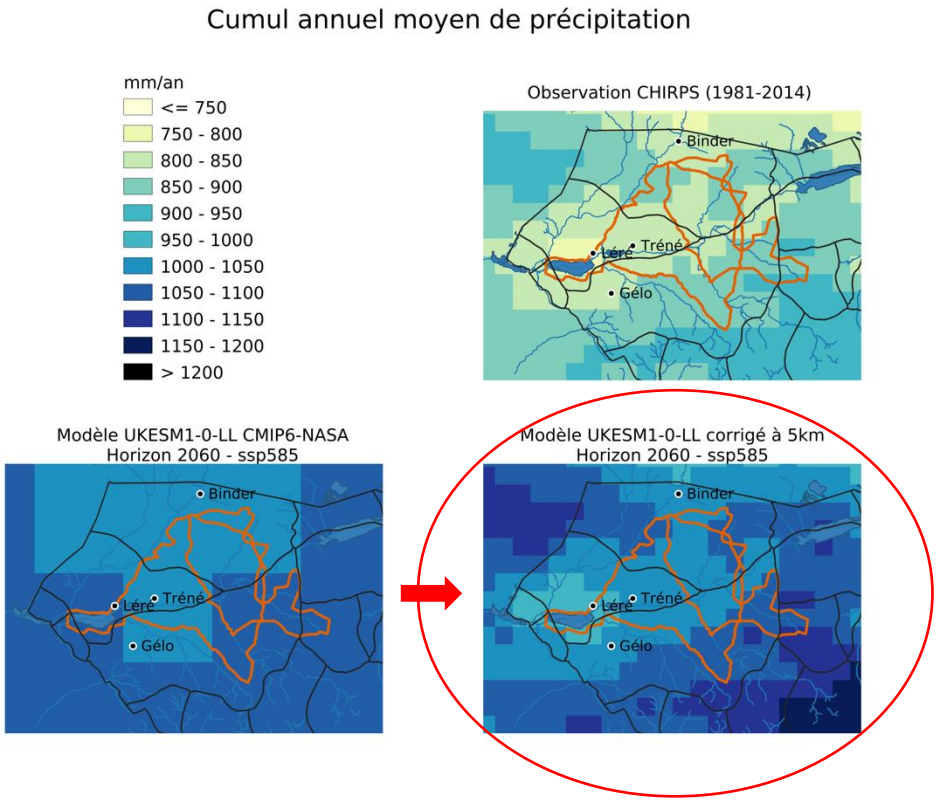



**Figure 6 : Cumul annuel moyen de précipitation dans les observations CHIRPS (en haut), dans les données de la NASA à la résolution de 25 km (en bas à gauche) et dans les données corrigées et descendues à la résolution de 5 km (en bas à droite) pour le modèle anglais UKESM1-0-LL à l'horizon 2060 pour le scénario ssp585.**

### 2.3.1. Descente d'échelle statistique

Les modèles climatiques globaux commettent des erreurs systématiques, en raison de leur résolution élevée (de l'ordre de 100 à 150 km pour CMIP6) et de leur représentation imparfaite de certains processus de la physique atmosphérique (les nuages notamment). Par exemple, les modèles sous-estiment souvent les précipitations extrêmes.

Afin de fournir les données les plus réalistes possible pour analyser l'impact du changement climatique sur les écosystèmes de l'AP de Binder-Léré au Tchad, il est indispensable de corriger les biais. Cette correction de biais, quand elle est réalisée avec des données à haute résolution spatiale (de l'ordre du km), permet également d'affiner l'échelle spatiale des données de projection, et de descendre de 25 km (données de la NASA) à une résolution de l'ordre du kilomètre. Plusieurs méthodes de correction de biais existent : la méthode des deltas, la méthode quantile-quantile ou encore la méthode CDFt (Cumulative Distribution Function Transform, Michelangeli et al. 2009).

Nous avons choisi la méthode CDFt, développée au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), un laboratoire français de l'IPSL spécialisé dans les études de changement climatique. La fonction de transformation de la distribution cumulée (CDFt) est une méthode proche de la méthode quantile-quantile, dont le principe est de corriger un certain biais statistique dans les projections par rapport à des données observées localement. Pour ce projet, les données observées localement sont les données satellites CHIRPS à 5 km de résolution spatiale pour les précipitations et les données Chelsea-W5E5 à 2,5 km de résolution spatiale pour les températures journalières minimale et maximale. La méthode CDFt a pour objectif de transformer la distribution de probabilité des projections futures de manière à l'ajuster à celle de la projection future du paramètre observé localement.

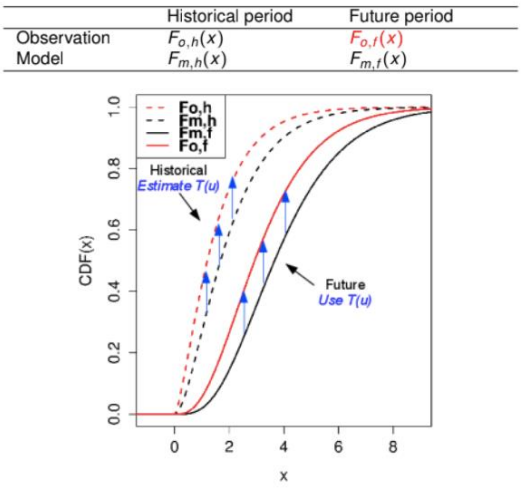



**Figure 7 : Illustration de la transformation de la distribution de probabilité cumulée (CDF) d'un paramètre issu d'un modèle climatique en un point de grille pour un horizon futur, en utilisant celles des observations et du modèle climatique sur la période historique. Méthode CDFt.**

La particularité de CDFt est donc de pouvoir prendre en compte l'évolution temporelle de la probabilité de distribution d'un paramètre. En se basant sur la transformation établie entre les données à grande et petite échelle sur le climat présent, la méthode CDFt permet de transposer dans le futur les projections à petite échelle à partir des projections futures à large échelle (cf. Figure 7).

C'est une méthode univariée, que nous avons appliquée pour chaque maille du domaine d'étude, avec une fenêtre glissante de 30 jours pour intégrer la saisonnalité. Pour les précipitations, un développement spécifique a été appliqué, qui corrige à la fois le taux de précipitation et l'occurrence (Vrac et al., 2016). Cette méthode permet de prendre en compte l'évolution des propriétés statistiques des données à l'échelle locale avec le changement climatique.

### 2.3.2. Approche multi-modèles

Nous avons utilisé une approche multi-modèles, qui permet d'appréhender l'ensemble des évolutions possibles pour le climat futur et de diminuer l'incertitude associée aux projections climatiques. Nous avons donc sélectionné les projections d'une vingtaine de modèles (listés dans le Tableau 1) dont les données ont été traitées par la NASA pour les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 retenus pour notre étude.

La Figure 8 illustre la dispersion des résultats des modèles climatiques de CMIP6 utilisés dans l'étude, après qu'une correction de biais et une descente d'échelle à 25 km de résolution aient été réalisée par la NASA.

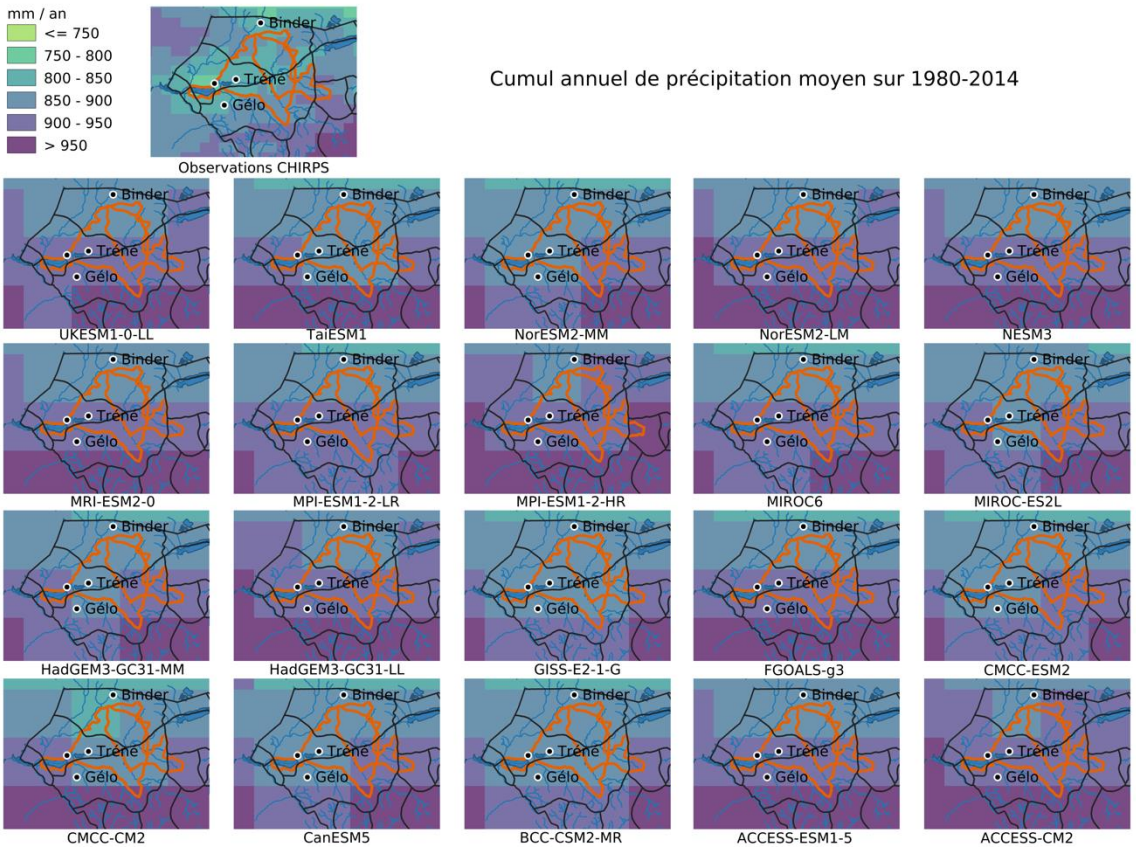



**Figure 8 : Cumul annuel moyen de précipitation sur 1980-2014 dans les observations CHIRPS et dans les données de la NASA issues des 20 modèles climatiques de CMIP6.**

Pour chacun de ces 20 modèles climatiques, nous avons réalisé une seconde descente d'échelle statistique sur l'AP de Binder-Léré pour les précipitations journalières et les températures journalières minimale et maximale sur les périodes 2020-2050 et 2035-2075 pour les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5. Ce calcul, réalisé sur le super calculateur du CRIANN, a demandé 288 heures de CPU et a produit 41 Go de données.

### 2.3.3. Indicateurs climatiques

Ce jeu de données climatiques à échelle réduite a ensuite été utilisé pour développer des indicateurs climatiques adaptés aux besoins de l'étude, qui ont été calculés pour le climat présent et pour le climat futur aux différents horizons et suivant les différents scénarios.

Des discussions avec les experts de l'équipe projet Baastel ont permis de de définir les indicateurs climatiques les plus adaptés aux besoins de l'étude, listés dans le Tableau 2.

**Tableau 2 : Liste des indicateurs climatiques calculés dans le cadre de l'étude**

| Paramètre | Indicateurs climatiques | Caractérise |
|---|---|---|
| Température | Température minimale journalière (moyenne annuelle)<br>Température maximale journalière (moyenne annuelle)<br>Humidex (cycle saisonnier moyen; nb de jours par an avec Humidex > 45 / 54°C) | Intensité<br>Intensité<br>Intensité; fréquence des événements extrêmes |
| Précipitation | Cumul de pluie annuel<br>Nombre de jours de pluie par an<br>Probabilité de pluie intense (caractérisé par la PR 1/10 ans en climat historique) | Intensité<br>Fréquence<br>Fréquence des événements extrêmes |
| Saison des pluies (Juin-Sept) | Cumul de pluie sur la saison des pluies<br>Nombre de jours de pluie pendant la saison des pluies<br>Durée maximale d'une séquence sèche en saison des pluies | Intensité<br>Fréquence<br>Intensité des événements extrêmes |
| Feu de brousse | Indicateur de Feu Météorologique (nb de jours par an avec un risque fort - IFM > 35) | Fréquence des événements extrêmes |

# 3. ANALYSE DES TENDANCES CLIMATIQUES RÉCENTES

## 3.1. Climat de la région Mayo-Kebbi Ouest

Le parc Naturel de Binder-Léré se situe dans le département de Mayo Dallah, dans la région de Mayo-Kebbi Ouest. Dans cette région, le climat observé est un climat de savane tropicale (selon la classification Köppen-Geiger), avec un régime monomodal :

- une longue saison sèche de novembre à mai
- une saison des pluies courte de juin à octobre.

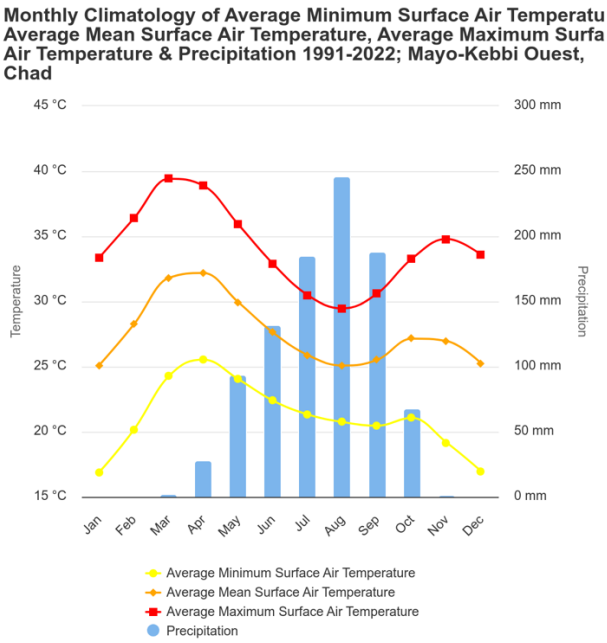



**Figure 9 : Climatologie de la région de Mayo-Kebbi Ouest sur les 30 dernières années. Source : WBCKP, 2022.**

Les températures sont plus élevées en fin de saison sèche (mars-avril) pour diminuer progressivement pendant la saison des pluies et atteindre leur minimum en août. L'amplitude saisonnière est de 10°C pour la température maximale et de 5°C pour la température minimale. L'amplitude diurne est de 15°C

en saison sèche et diminue à 10°C en saison des pluies. Les températures maximales sont très élevées ; elles dépassent 35°C pendant 4 mois de l'année et atteignent 40°C pendant 2 mois.
Le cumul de précipitation moyen annuel sur les 30 dernières années est de 900 mm, reparti sur 5 mois avec une grande partie du cumul concentré sur juillet-août-septembre.

### 3.2. Ressenti de la population sur l'évolution climatique récente dans la région

Les enquêtes menées sur le terrain permettent de récolter les ressentis de la population sur les impacts du climat et de son évolution pendant les dix dernières années sur leur vie et l'activité agricole. Dans les réponses, on retiendra :

- Un début retardé de la saison des pluies, caractérisé par un début des pluies avec des intensités faibles, puis une pause sur plusieurs semaines et ensuite une reprise de la pluie avec des pluies plus fortes.
- Des pluies plus intenses qui font plus de dégâts : ruissellement, érosion.
- Plus d'irrégularité des pluies pendant la saison des pluies.

Une analyse des tendances climatiques récentes a été réalisée sur les données CHIRPS afin de vérifier ces ressentis sur des bases scientifiques. Nous nous sommes concentrés sur Binder, les résultats étant proches sur le reste de l'AP de Binder-Léré.

### 3.3. Évolution de la saison des pluies dans les données CHIRPS

Afin d'analyser l'évolution des pluies en saison des pluies sur les quarante dernières années, nous avons calculé la moyenne glissante des cumuls de précipitations journalières sur 5 jours pour chaque année entre 1981 et 2023 pendant la saison des pluies (illustré sur la Figure 10). Quand le cumul sur 5 jours est inférieur à 5 mm, ce qui correspond à des pluies très faibles et peu utile pour l'agriculture, il est considéré comme nul.

Pendant les mois de mai et juin, les pluies sont ponctuelles avec des intensités faibles. Les pluies plus intenses et continues arrivent début juillet et se poursuivent jusqu'à mi à fin septembre, avec des pauses sèches plus ou moins longues et des cumuls plus ou moins forts selon les années.

La variabilité interannuelle est très importante. Par exemple, l'année 2020 a eu une saison des pluies qui a débuté tard, mi-juillet, et qui s'est poursuivie jusqu'à fin septembre avec une longue pause sèche d'une quinzaine de jours début août. Au contraire, l'année suivante, 2021, a une saison des pluies qui a débuté fin juin et s'est poursuivie jusqu'à début septembre avec peu de pause sèche. Cette forte variabilité interannuelle des pluies (date de début de saison des pluies, nombre d'occurrence de pauses sèches, etc.) dans cette région a été également mise en évidence par Seingue et al. (2015[3], 2016[4]), qui propose des stratégies d'adaptation pour l'agriculture.

Cependant, on n'observe pas de tendance significative sur les quarante dernières années, que ce soit sur la date de début de la saison des pluies, ni sur le nombre et/ou la durée des pauses sèches de juillet à septembre (cf. Figure 10). Comme l'a montré Seingue et al. (2015) dans son étude sur le Mayo Kebbi Est, sur certaines stations météo il existe des tendances mais elles sont opposées d'une station à l'autre (augmentation de la pluviométrie annuelle à Bongor, diminution à Moulkou et pas de tendance à Fianga). Sur cette région située au Nord du CAPBL, c'est la forte variabilité tant spatiale qu'interannuelle qui ressort. Sur le Mayo Kebbi Ouest, et en particulier ici sur Binder, il n'y a pas de tendance mais également une forte variabilité interannuelle.

[3] R. G. SEINGUE, BAOHOTOU L., (2015), Mise en évidence de la variabilité pluviométrique sur la plaine du Mayo-Kebbi, sud-ouest du Tchad*, Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies* n°25(8), pp 93-109
[4] Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement (2016). Stratégies paysannes d'adaptation face aux risques d'instabilité pluviométrique annuelle dans la plaine du Mayo-Kebbi. R. Seingue, M. Djeko et L. Baohouto.

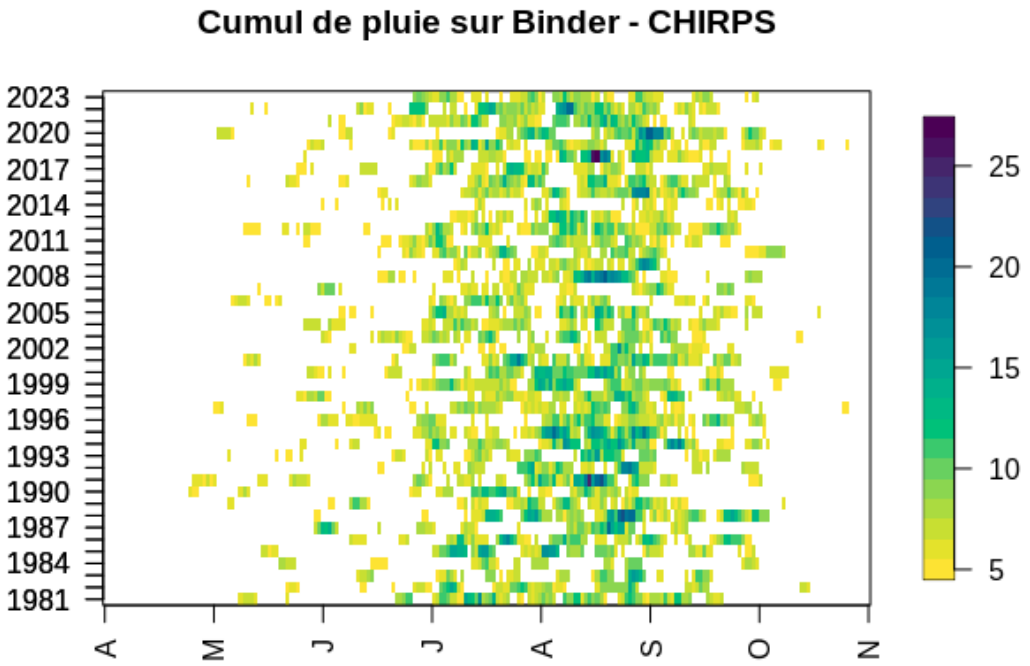



**Figure 10 : Évolution du cumul de pluie sur 5 jours (en mm) pendant la saison des pluies sur la période 1981-2023 à Binder. Source : données CHIRPS.**

Une explication au ressenti des populations, qui ne se reflète pas dans les données de précipitation observées par satellite, pourrait être que c'est la pluie utile (précipitation moins évapotranspiration) qui diminue en début de saison des pluies. En effet, comme la température augmente avec le changement climatique, l'évapotranspiration augmente, et en fin de saison sèche les premières pluies ne pénètrent pas le sol desséché et s'évaporent sans apporter au sol l'eau nécessaire pour les cultures. Il faut alors attendre la diminution de température et un cumul de pluie sur plusieurs semaines pour que le sol s'humidifie et devienne capable d'absorber l'eau de pluie.

### 3.4. Évolution de l'intensité des pluies dans les données CHIRPS

Un autre sujet évoqué lors des enquêtes de terrain est un ressenti d'augmentation de l'intensité des pluies. Nous avons donc utilisé la série temporelle des pluies journalières sur 40 ans des données satellites CHIRPS sur Binder. Nous avons calculé l'intensité des pluies intenses (qui correspond au 95$^{e}$ percentile de l'intensité des pluies journalières sur les jours de pluie) et des pluies extrêmes (99$^{e}$ percentile de l'intensité des pluies journalières sur les jours de pluie) pour chaque année entre 1981 et 2023 (cf. Figure 11), afin de déterminer si une tendance se dégage sur ces 40 ans.

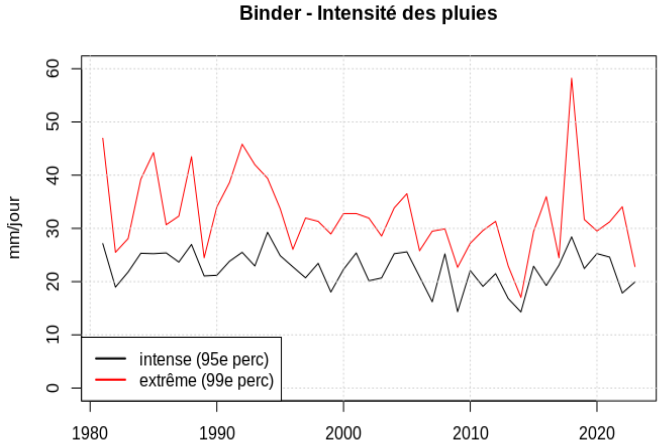



**Figure 11 : Intensité des pluies intenses (courbe noire) et des pluies extrêmes (courbe rouge) dans les données CHIRPS à Binder.**

Aucune tendance n'est observée sur l'intensité des pluies intenses (20 mm/jour en moyenne) ni sur celle des pluies extrêmes (30 mm/jour en moyenne) sur les 4 dernières décennies à Binder dans les données CHIRPS. La variabilité interannuelle de l'intensité des pluies extrêmes est forte, alors que celle des pluies intenses est un peu moins élevée. Il faut cependant garder à l'esprit que l'intensité des pluies intenses est sous-estimée dans les données CHIRPS.

Afin d'estimer les biais des données CHIRPS sur les pluies intenses, le nombre de jours de pluie, etc. sur l'AP de Binder-Léré, il aurait été intéressant de pouvoir comparer les données satellites avec les données de la station météorologique la plus proche, située à Pala. Cependant, les données disponibles sur la station météorologique Pala sont uniquement les données de précipitations journalières sur une période assez ancienne 1953-1978, antérieure au lancement des satellites, et donc pour laquelle les données CHIRPS n'existent pas.

# 4. ANALYSE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES FUTURES

Nous présentons les résultats obtenus pour les différents indicateurs climatiques en les regroupant par catégorie : lié à la température, à la pluviométrie, à la saison des pluies et enfin le risque de feu de brousse.

## 4.1. La température

### 4.1.1. La température minimale

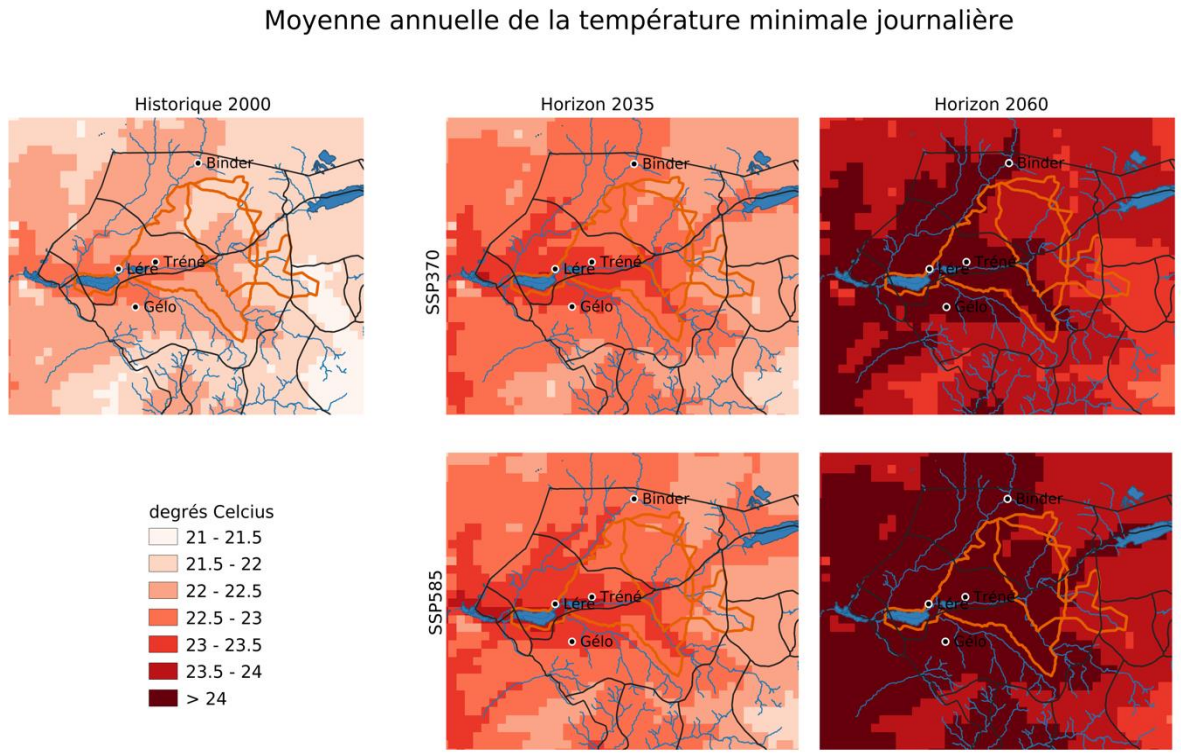



**Figure 12: Évolution de la moyenne annuelle des températures minimales journalières entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

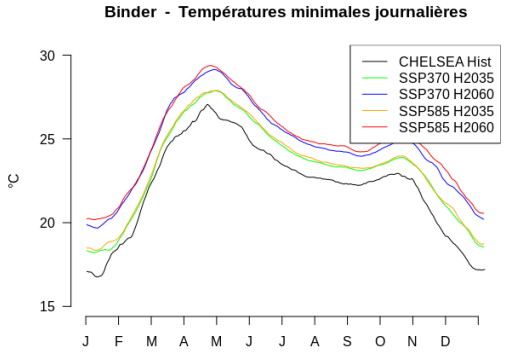



**Figure 13 : Cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières à Binder.**

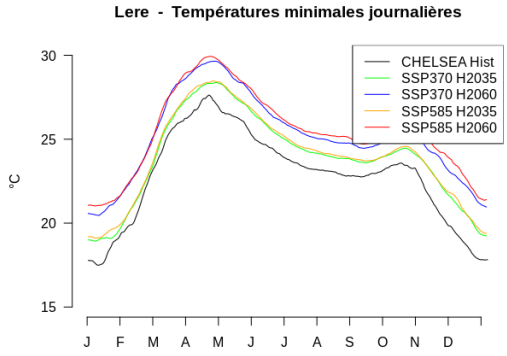



**Figure 14 : Cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières à Lere.**

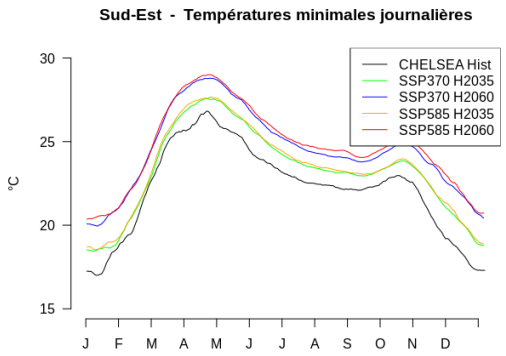



**Figure 15 : Cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières à Lagon.**

La cartographie de la Figure 15 montre l'évolution de la moyenne annuelle des températures minimales journalières entre la période historique et les horizons futurs pour les 2 scénarios retenus. On note une augmentation de l'ordre de 1°C à l'horizon 2035 et de 2 à 2,5°C à l'horizon 2060. A l'horizon 2035, les résultats pour les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 sont très proches. A l'horizon 2060, des différences apparaissent, avec une zone plus étendue sur laquelle la température minimale dépasse 24°C en moyenne sur l'année dans le scénario SSP5-8.5.

Il est également intéressant d'analyser l'évolution du cycle saisonnier moyen des températures. La région où se situe le CAPBL, au Sud du Tchad, connait une saison sèche de décembre à avril et une saison des pluies avec de fortes pluies de mai à novembre. Les températures introduisent des nuances sensibles au cœur des saisons hydriques. En effet, l'humidité de la saison des pluies apporte un radoucissement des températures, durant les mois de juillet et août où les minimales tombent à 26° et les maximales à 31°C. Les amplitudes journalières se réduisent. L'arrêt des pluies marque la remontée des températures accompagnée d'une forte évaporation, donc du maintien de l'hygrométrie élevée d'octobre à novembre. L'installation de l'anticyclone saharien à l'air sec et frais entraîne une chute des températures, elles s'abaissent en janvier où les températures minimales descendent jusqu'à 16°. C'est la période fraîche de la saison sèche. Mais rapidement, dès le mois de mars, les températures remontent pour atteindre les plus hautes valeurs en avril-mai, avec des températures minimales à 26°C et maximales au-dessus de 40°C.

Le cycle saisonnier moyen des températures minimales journalières a été calculé localement dans les simulations à fine échelle sur :

- Binder, au Nord de l'AP,
- Léré, village sur le lac, et
- Lagon, au Sud-Est de l'AP.

Les figures 16,17 et 18 représentent l'évolution du cycle saisonnier de la température minimale journalière pour les différents horizons et scénarios futurs pour les villages de Binder, Léré et Lagon. Les résultats sont très proches sur les 3 villages. Dans la suite de l'étude, nous nous focaliserons sur Binder, sachant que les résultats obtenus pour le cycle saisonnier sont similaires sur le reste de l'AP.

On observe une augmentation des températures minimales journalières homogène toute l'année, de 1°C environ à l'horizon 2035 et de 2°C environ à l'horizon 2060, et peu de différence entre les deux scénarios.

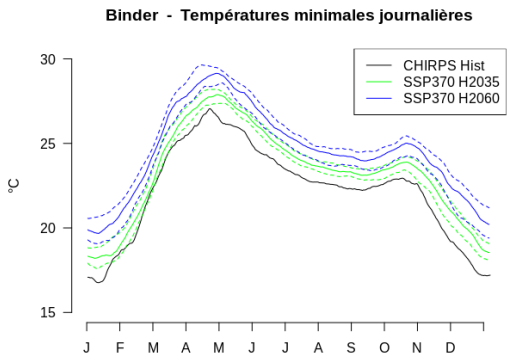



**Figure 16 : Évolution du cycle saisonnier des températures minimales journalières pour le scénario ssp370. 25e et 75e percentiles des modèles (en pointillé), et médiane des modèles (en trait plein).**

Afin d'évaluer l'incertitude associée à ces résultats, les 25e et 75e percentiles de la distribution des modèles, ainsi que la médiane, ont été tracés sur la Figure 19. Celle-ci montre une bonne convergence des simulations réalisées par les 20 modèles vers une augmentation nette des températures tout au long de l'année.

### 4.1.2. La température maximale

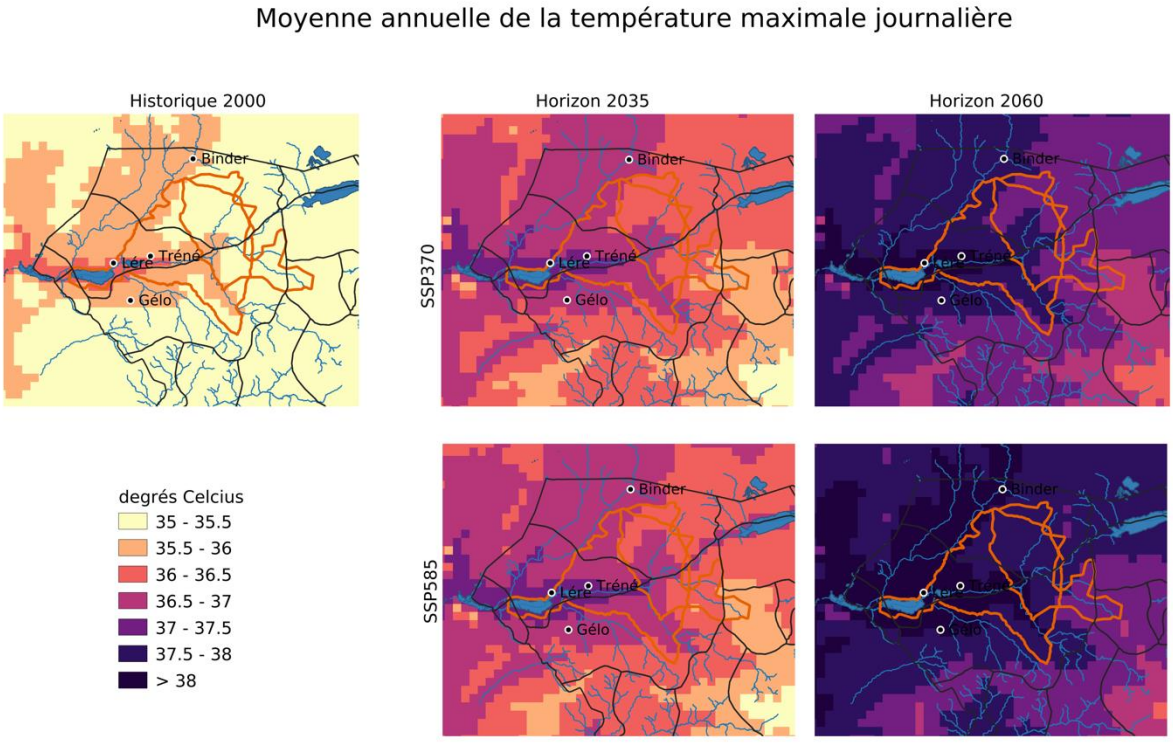



**Figure 17 : Évolution de la moyenne annuelle des températures maximales journalières entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

La cartographie de la Figure 20 montre l'évolution de la moyenne annuelle des températures maximales journalières entre la période historique et les horizons futurs pour les 2 scénarios retenus. On note une augmentation de l'ordre de 1°C à l'horizon 2035 et de 2°C à l'horizon 2060. A l'horizon 2035, les résultats pour les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 sont très proches. A l'horizon 2060, des différences apparaissent, avec une zone plus étendue dans les vallées (autour du lac et le long des rivières) où la température maximale dépasse 38°C en moyenne sur l'année dans le scénario SSP5-8.5.

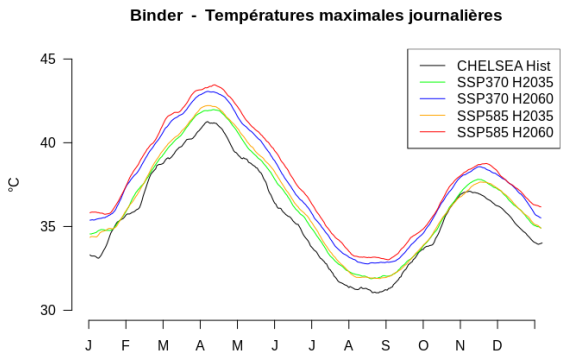



**Figure 18 : Cycle saisonnier moyen des températures maximales journalières à Binder.**

La température maximale journalière a un fort cycle saisonnier, avec une amplitude de 10°C entre la période la plus chaude avec plus de 40°C en fin de la saison sèche, en avril, et la fin de la saison des pluies, en octobre, où la température maximale descend à 30°C. L'évolution du cycle saisonnier pour les horizons futurs est proche dans les deux scénarios. L'augmentation de température est homogène tout au long de l'année, d'environ +1°C à l'horizon 2035 et +2°C à l'horizon 2060.
Comme pour la température minimale, les courbes sont similaires pour les villages de Léré et Lagon, et on observe une bonne convergence des données issues des 20 simulations.

### 4.1.3. L'indicateur humidex

L'indice humidex a été développé par les météorologues canadiens pour intégrer les effets combinés de la chaleur et de l'humidité. La formule pour calculer l'humidex est la suivante :

$$\text{Humidex} = T_{\text{air}} + 0.5555\left[6.11 \times e^{5417.7530\left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{273.15+T_{\text{rosee}}}\right)} - 10\right]$$

où Tair est la température de l'air et Trosée est le point de rosée, qui dépend de l'humidité relative et de la température.

Cet indicateur combine l'humidité relative et la température, ce qui donne le ressenti ambiant du corps, généralement supérieur au ressenti de la température réelle. Il est très utile dans les régions tropicales, où la forte humidité pendant la saison des pluies augmente l'inconfort lié aux températures élevées. Le corps tente de se maintenir à une température interne constante de 37°C. Par temps chaud, l'organisme produit de la sueur qui rafraîchit le corps en s'évaporant. La sueur ne s'évapore pas toujours aussi rapidement s'il y a beaucoup d'humidité dans l'air. L'évaporation s'arrête même complètement lorsque l'humidité relative atteint environ 90%. Dans ce cas, la température du corps augmente et il y a un risque pour la santé.
Les seuils d'humidex et leurs impacts sanitaires, définis par Environnement Canada dans le contexte d'un climat tempéré, sont détaillés dans le Tableau 3. On note qu'au-dessus de 45°C, il y a un risque fort pour la santé. Une réserve peut cependant être émise sur ces seuils, établis par des canadiens qui, bien que subissant des chaleurs élevées et humides l'été, ne vivent pas en climat tropical. Le corps humain s'adaptant à son environnement, la population tchadienne supporte certainement mieux que des canadiens la chaleur humide associée à un fort humidex et les seuils proposés peuvent être revus à la baisse pour le Tchad.

**Tableau 3 : Seuils d'humidex et degrés de conforts associés. Source : Environnement Canada.**

| Valeur humidex | Degré de confort |
|---|---|
| Moins de 29 | Aucun inconfort |
| 30 à 39 | Un certain inconfort |
| 40 à 45 | Beaucoup d'inconfort: évitez les efforts |
| Au-dessus de 45 | Danger |
| Au-dessus de 54 | Coup de chaleur imminent |

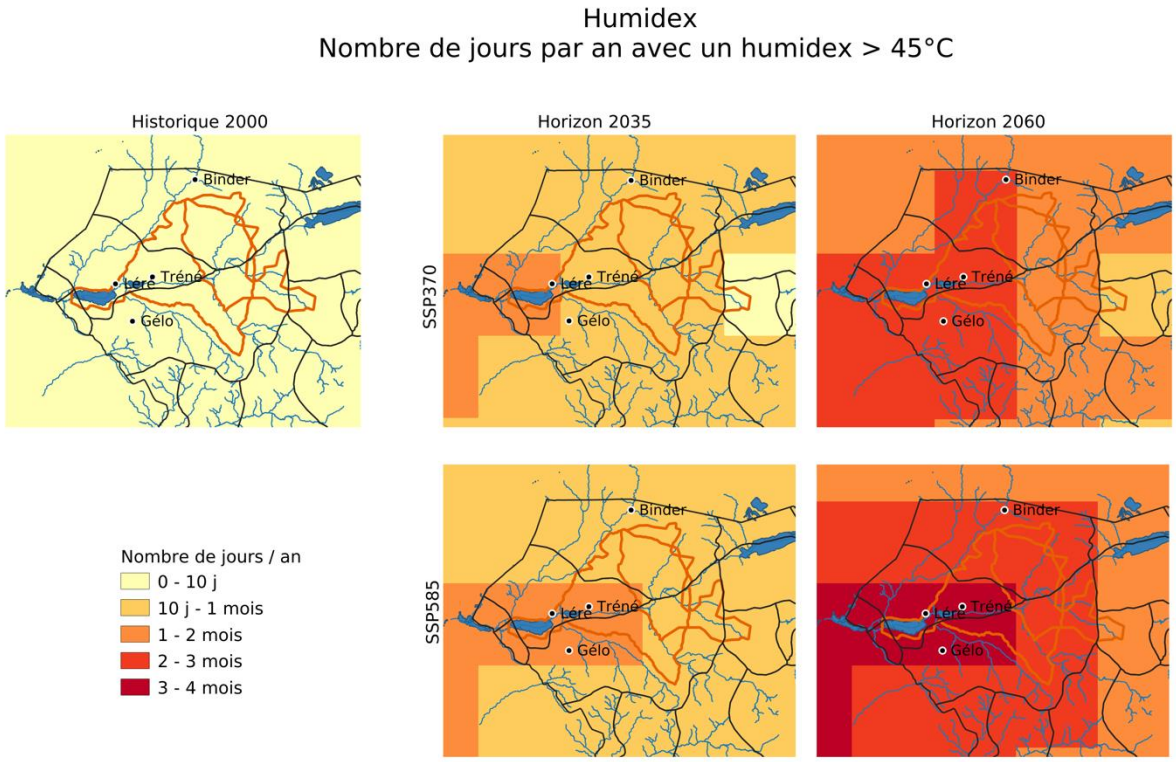



**Figure 19 : Évolution du nombre de jours par an avec un humidex > 45°C entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

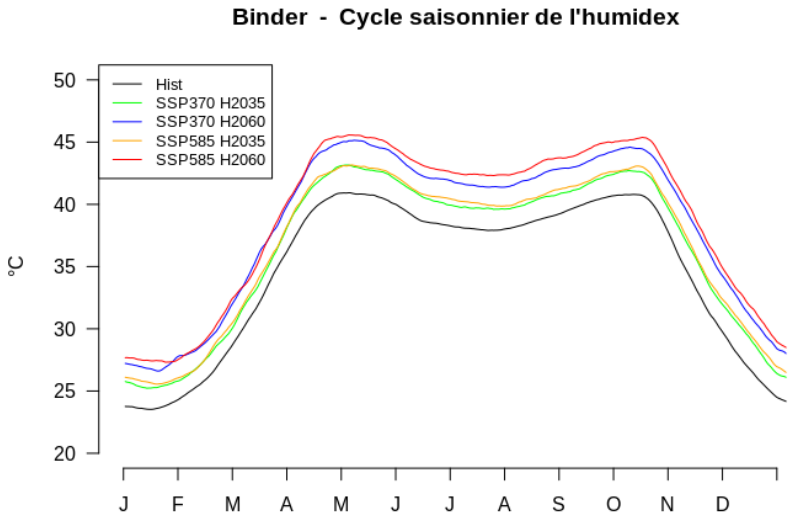



**Figure 20: Cycle saisonnier moyen de l'humidex à Binder.**

Sur la Figure 22 est cartographié le nombre de jours par an avec un humidex > 45°C, qui présente un risque fort pour la santé. Celui-ci augmente fortement, et passe de moins de 10 jours par an en climat historique à 10 jours à 1 mois par an à l'horizon 2035 (voire 1 à 2 mois autour des lacs) ; et monte à 2 à 3 mois par an à l'horizon 2060 (voire 3 à 4 mois autour des lacs pour le scénario ssp585).

L'humidex présente des valeurs maximums pendant la saison des pluies (cf. Figure 23), car l'humidité est forte. C'est plus particulièrement en avril-mai (mois qui précèdent l'installation des fortes pluies) et en octobre (fin de la saison des pluies), quand la température est elle aussi à son maximum, qu'il est le plus élevé avec plus de 40°C en période historique. Il monte à 42°C en moyenne à l'horizon 2035 et

atteint 45°C en moyenne à l'horizon 2060. Ces périodes longues avec un humidex > 45°C vont déclencher des risques sanitaires pour la population, déjà très vulnérable.

## 4.2. Les précipitations

La région d'étude a un climat soudano-sahélien, avec un régime pluviométrique monomodal composé d'une saison des pluies et d'une saison sèche. Le régime de pluviométrie est caractérisé à la fois par le cumul annuel de pluie, et par sa répartition en termes de jours de pluie. Il est également intéressant d'analyser les pluies intenses et leur évolution.

### 4.2.1. Le cumul de pluie annuel

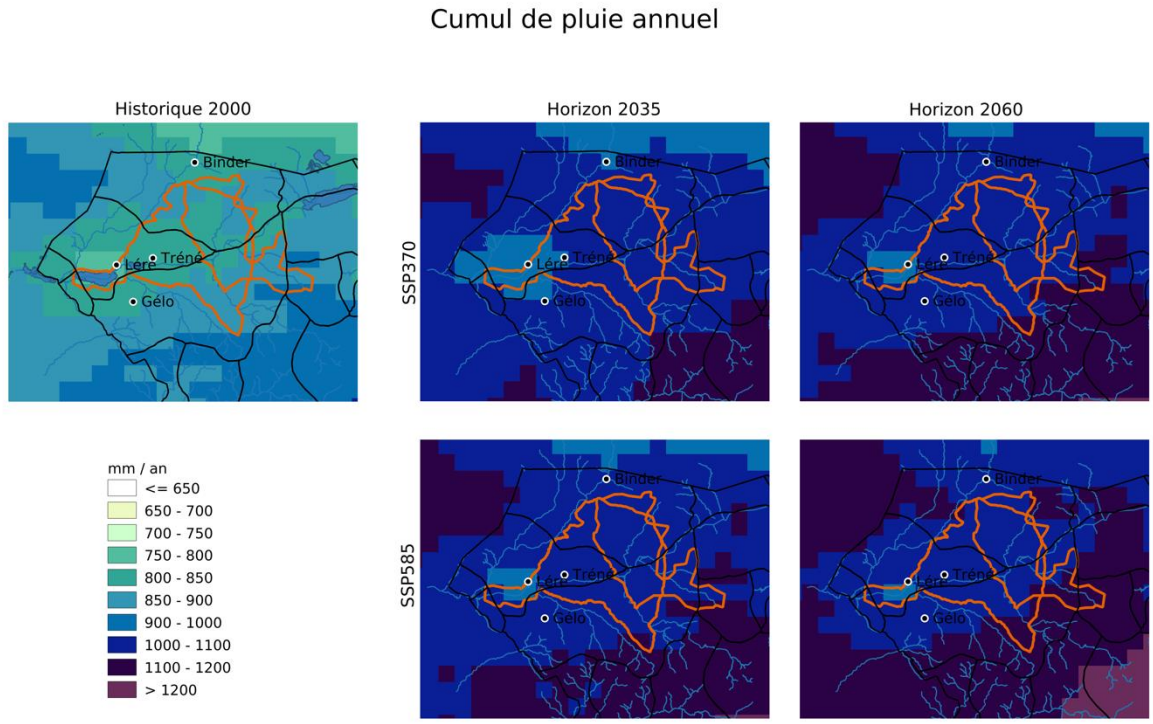



**Figure 21 : Évolution du cumul de pluie annuel entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

Actuellement, la pluviométrie annuelle moyenne sur l'AP de Binder-Léré est comprise entre 750 et 950 mm (cf. Figure 24). Elle est plus élevée sur les reliefs situés au Sud et au Sud-Est de l'AP et plus faible dans les vallées et autour du lac de Léré. Les projections futures montrent une augmentation du cumul de pluie annuel de 100 à 200 mm, qui correspond à 10 à 20% du cumul annuel historique. On observe peu de différence entre les deux scénarios, et également peu de différences entre l'horizon 2035 et l'horizon 2060.

Il est intéressant d'analyser le cycle saisonnier moyen de la pluviométrie et son évolution future (cf. Figure 25), afin de déterminer à quelle période le cumul de pluie augmente. Celui-ci augmente à partir du mois de juillet jusqu'à la fin de la saison des pluies, avec des valeurs proches pour les 2 scénarios et les 2 horizons futurs.

Afin d'évaluer l'incertitude associée à ces résultats, les 25e et 75e percentiles de la distribution des modèles, ainsi que la médiane, ont été tracés sur la Figure 26. Le cumul journalier de précipitation présente une augmentation nette dans le futur par rapport à la période historique, malgré une plus grosse dispersion dans les simulations climatiques que pour la température.
Il est important de noter que, malgré l'incertitude associée à la modélisation des précipitations dans les modèles de climat, les 20 modèles utilisés dans cette étude convergent vers une augmentation

significative des précipitations entre la période historique et l'horizon 2060 dans le scénario SSP5-8.5 sur la région d'étude.

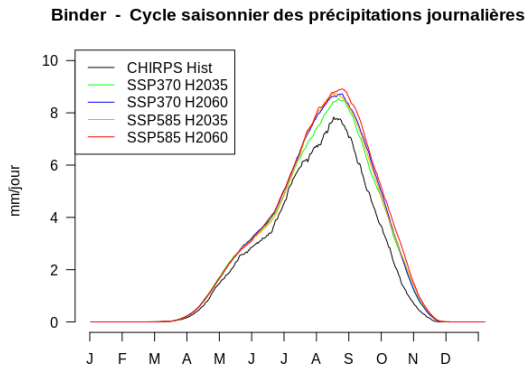



**Figure 22 : Cycle saisonnier moyen des précipitations journalières à Binder.**

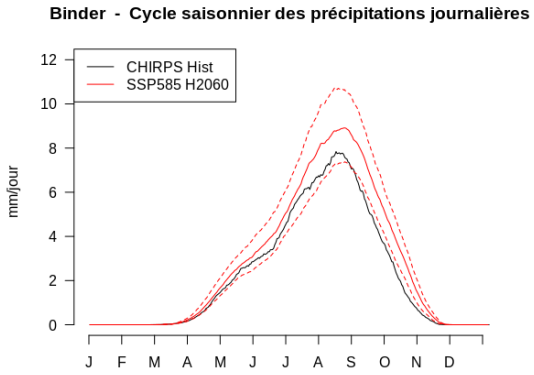



**Figure 23 : Évolution du cycle saisonnier des précipitations journalières pour le scénario ssp585. 25e et 75e percentiles des modèles (en pointillé), et médiane des modèles (en trait plein).**

### 4.2.2. Le nombre de jours de pluie

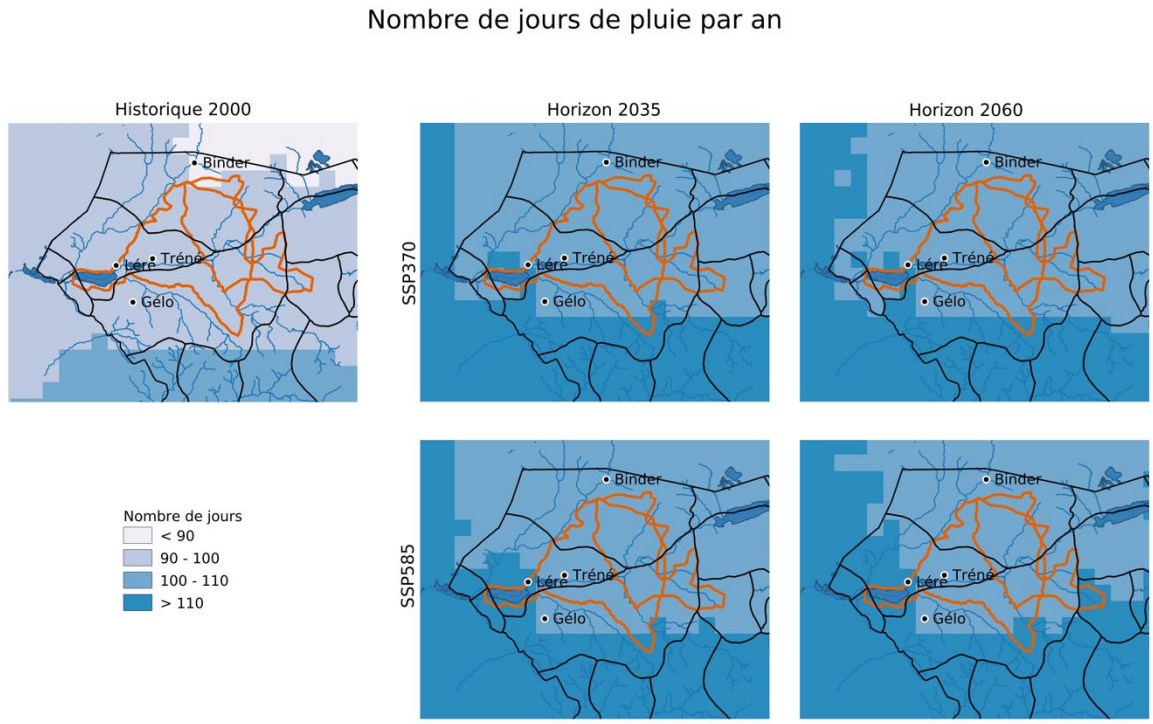



**Figure 24 : Évolution du nombre de jours de pluie par an entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

Le nombre de jours de pluie par an, homogène sur l'AP de Binder-Léré, passe de 90-100 jours à 100-110 jours dans le futur. On observe donc une augmentation d'environ 10 jours de pluie par an dans le futur, avec toujours une convergence dans les 2 scénarios et pour les 2 horizons futurs.

L'analyse du cycle saisonnier moyen de la probabilité de pluie pour chaque jour de l'année en climat historique et futur permet de déterminer si l'augmentation du cumul de pluie est liée à une augmentation

du nombre de jours de pluie ou à une augmentation de l'intensité des pluies. On observe sur la Figure 28 qu'à partir du mois de mai, le nombre de jours de pluie augmente par rapport à la période historique jusqu'à fin septembre. En juin-juillet, l'augmentation est plus faible. Donc l'augmentation du cumul de pluie est liée à une augmentation du nombre de jours de pluie pendant la saison des pluies.

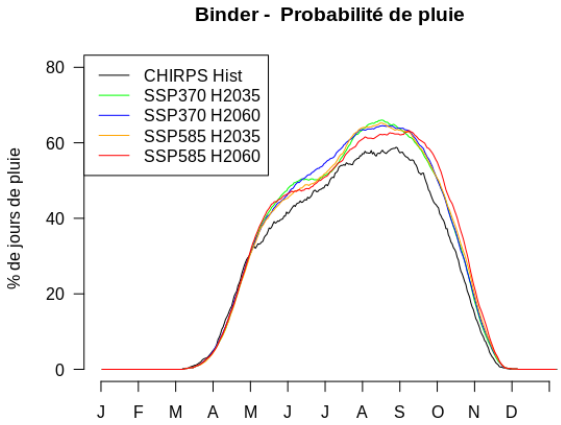



**Figure 25 : Cycle saisonnier moyen de la probabilité de pluie à Binder.**

### 4.2.3. Les pluies intenses

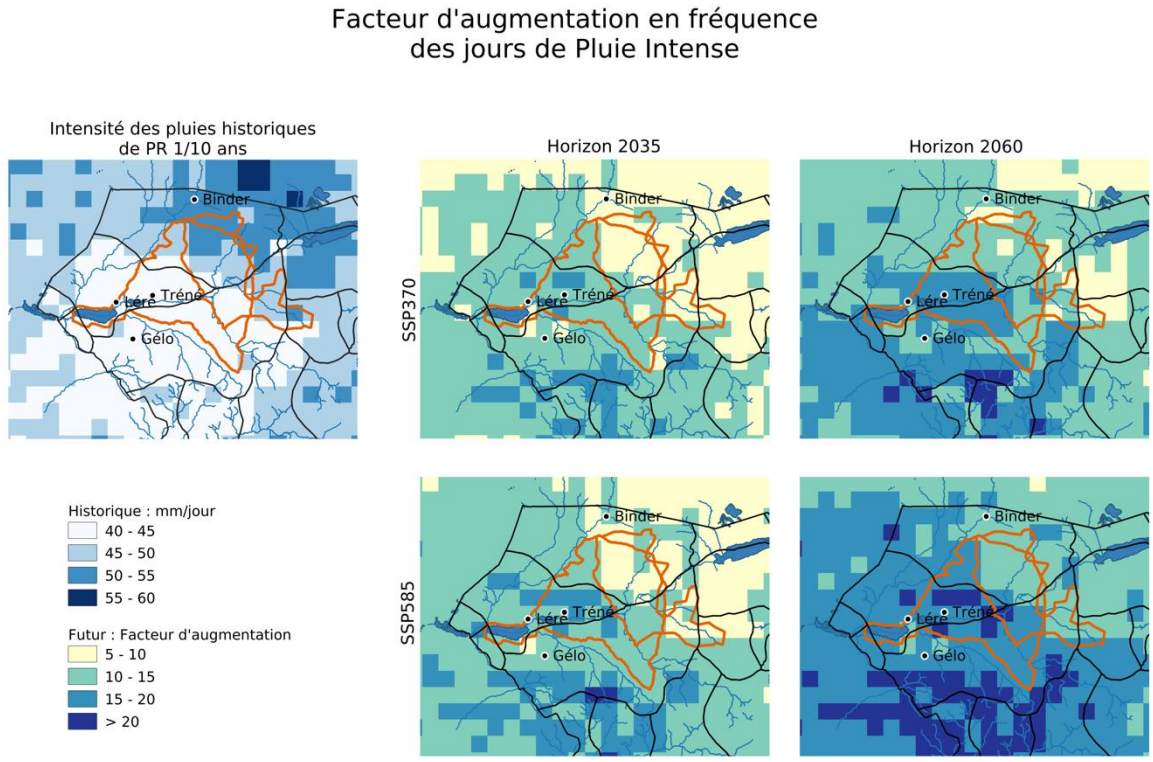



**Figure 26 : Évolution en fréquence des pluies intenses entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

Les pluies intenses, correspondant au 90e percentile de la distribution des pluies sur les jours de pluie ou à la pluie décennale, sont responsables des inondations de type « flash flood ».

En climat historique, l'intensité des pluies décennales est de 40 à 45 mm/jour sur le CAPBL dans les données satellites CHIRPS (cf. Figure 29). Cette intensité est légèrement sous-estimée au dire des populations locales qui l'estiment à environ 50 mm/jour.

Dans le climat futur, la fréquence des pluies de cette intensité décennale en période historique augmente significativement. Ainsi, un événement de pluie intense décennal en période historique (donc qui arrive une fois tous les 10 ans) arrivera une fois tous les 2 ans à 1 fois par an à l'horizon 2035 et 1,5 à 2 fois par an à l'horizon 2060. Les tendances sont identiques pour les deux scénarios. Cette forte augmentation en fréquence des pluies intenses risque d'augmenter la fréquence des inondations par ruissellement, d'autant plus que la déforestation en cours liée à entre autres à la pression démographique dans l'AP augmente les risques de ruissellement à un niveau de pluviométrie égal.

## 4.3. La saison des pluies

L'augmentation des pluies projetée aux horizons futurs dans les simulations à fine échelle réalisées dans le cadre de cette étude incite à analyser plus finement la période de la saison des pluies. Nous avons considéré que la saison des pluies s'étend sur les mois de juin à septembre.

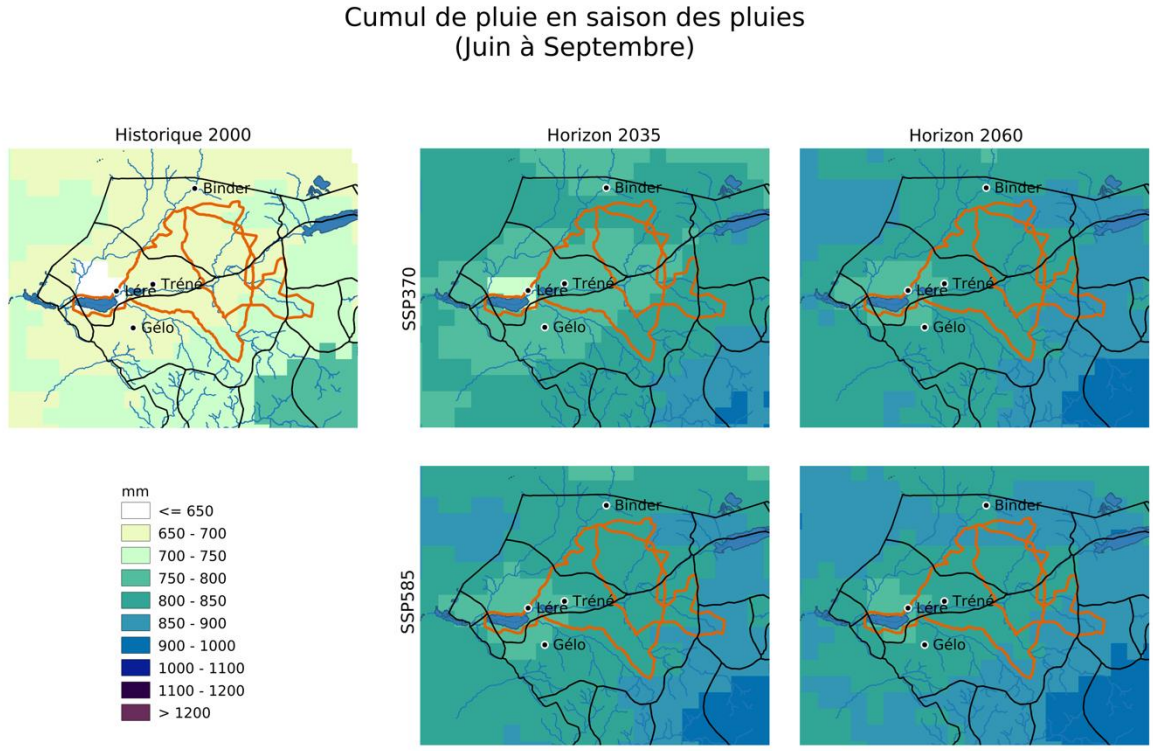



**Figure 27 : Évolution du cumul de pluie en saison des pluies (Juin-Sept) entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

En climat historique, le cumul de pluie sur la saison des pluies représente environ 80% du cumul de pluie annuel. Autrement dit, 80% des pluies tombent sur une période de 4 mois, et 20% sur les 8 autres mois de l'année.

En climat futur, la Figure 30 montre une augmentation de 100 à 150 mm sur la saison des pluies, assez proche de l'augmentation annuelle (Figure 24). Cela confirme que la quasi-totalité de l'augmentation des précipitations aura lieu pendant la saison des pluies, qui verra son cumul de précipitation augmenter de 15 à 20%. On observe peu d'évolution entre les horizons 2035 et 2060, et peu de différence entre les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5.

En période historique, les jours de pluie sont également concentrés pendant la saison des pluies, avec 70% des jours de pluie en 4 mois et 30% sur les 8 mois restants.

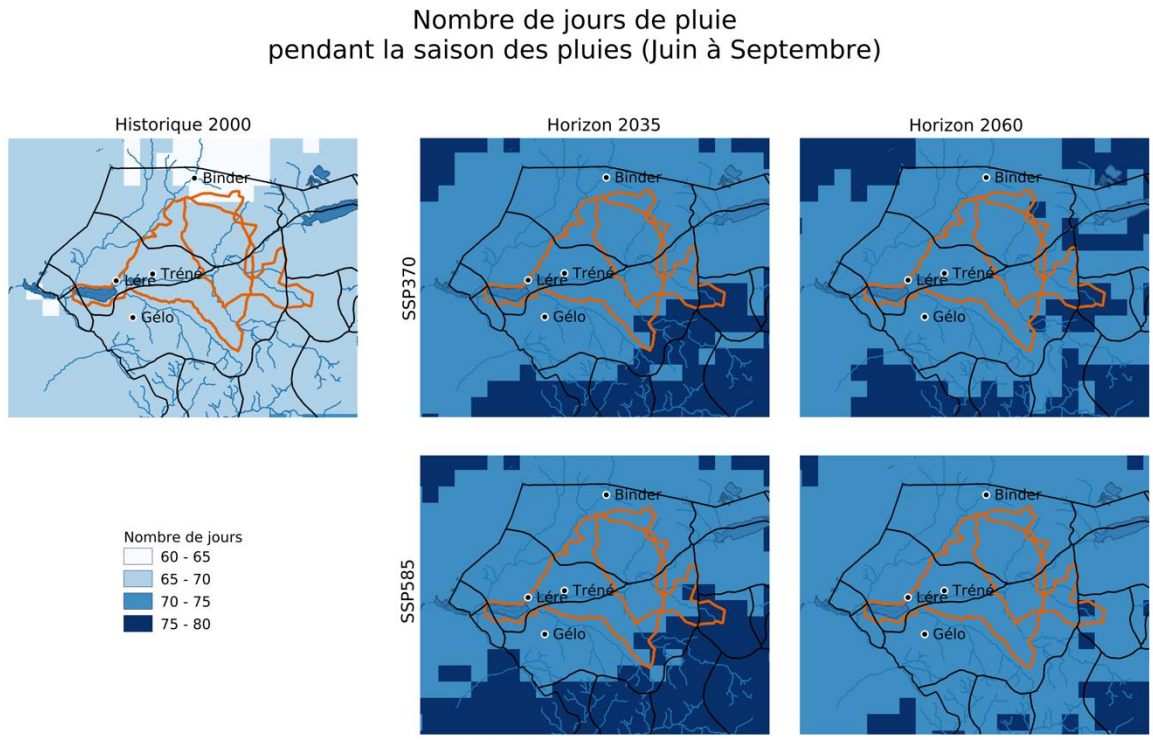



**Figure 28 : Évolution du nombre de jours de pluie pendant la saison des pluies (Juin-Sept) entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

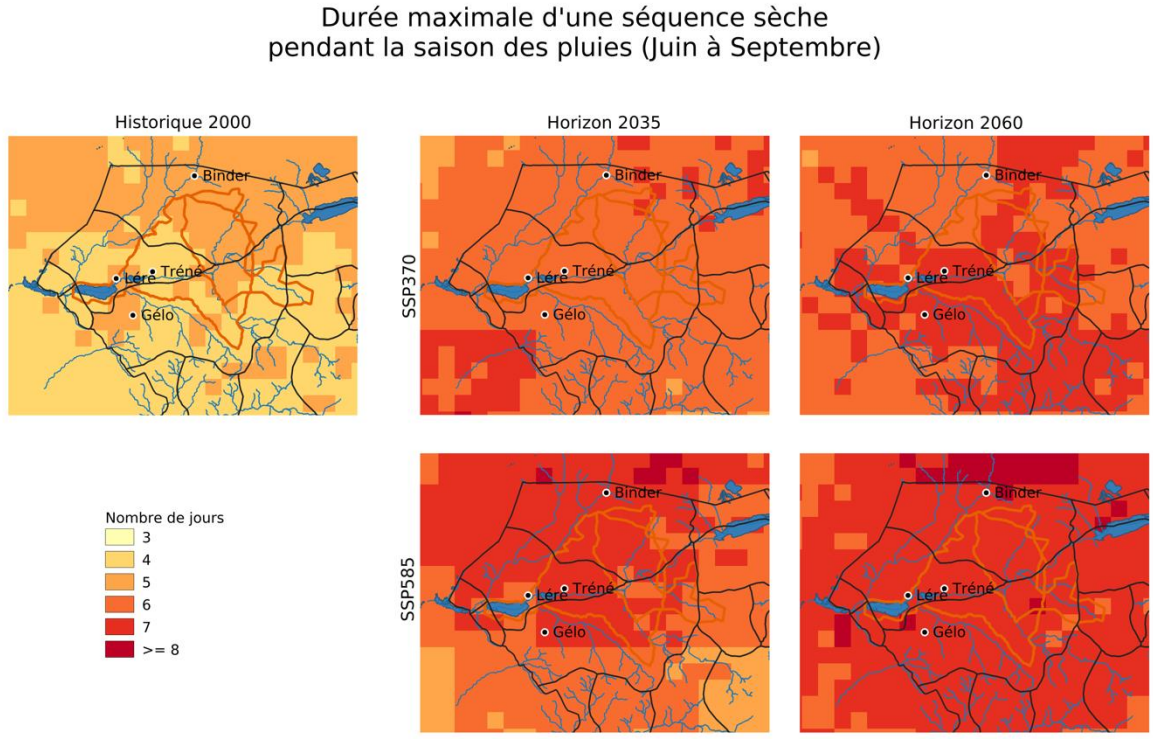



**Figure 29 : Évolution de la durée maximale d'une séquence sèche pendant la saison des pluies, entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour les scénarios ssp370 et ssp585.**

En climat futur, la Figure 31 montre une augmentation de 5 à 10 jours de pluie sur les 4 mois de la saison des pluies, également assez proche de l'augmentation annuelle (Figure 27). On voit sur la Figure 28 représentant le cycle saisonnier de la probabilité de pluie qu'on a aussi une petite augmentation en début et fin de saison des pluies (mai et octobre). Comme pour tous les indicateurs liés à la pluviométrie moyenne, il y a peu d'évolution entre les horizons 2035 et 2060, et peu de différence entre les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5.

Pour les cultures agricoles, un risque important est lié à l'occurrence de pauses sèches pendant la saison des pluies. Nous avons donc calculé l'évolution de la durée maximale d'une pause sèche (séquence de plusieurs jours consécutifs secs, soit avec un cumul journalier < 1 mm) pendant la saison des pluies, en moyenne sur les 20 modèles et sur les 30 ans de simulation (Figure 32). La durée maximale d'une séquence sèche entre juin et septembre passe de 4-5 jours à 6-7 jours. L'augmentation est croissante entre l'horizon 2035 et l'horizon 2060, et plus forte dans le scénario SSP5-8.5 que dans le scénario SSP3-7.0. La durée maximale d'une pause sèche double presque entre la période historique et l'horizon 2060, où elle peut atteindre une semaine, ce qui peut être fort préjudiciable pour les cultures agricoles.

## 4.4. Les feux de brousse

Pour estimer le risque de déclenchement et de propagation de feux de brousse, nous avons calculé l'indice de feu météorologique (IFM). Cet indicateur rend compte des conditions météorologiques propices aux départs et à la propagation de feux de végétation pour une région donnée. De nombreuses études ont montré une corrélation claire entre l'IFM moyen et le nombre de départs de feu. Il est utilisé par plusieurs services météorologiques nationaux dont Météo-France et le Service météorologique du Canada. Il se base sur un modèle empirique canadien développé et utilisé au Canada dès 1976.

L'IFM se compose de différents éléments qui tiennent compte des effets de l'humidité des combustibles et du vent sur le comportement et la propagation des incendies. Plus l'indice est élevé, plus les conditions météorologiques sont favorables au déclenchement d'un incendie de forêt. Le diagramme ci-dessous illustre les composantes du système IFM. Le calcul des composantes est basé sur des données quotidiennes de température, d'humidité relative, de vitesse du vent et de précipitation. Les six composantes standard fournissent des évaluations numériques du potentiel relatif d'incendie de forêt.

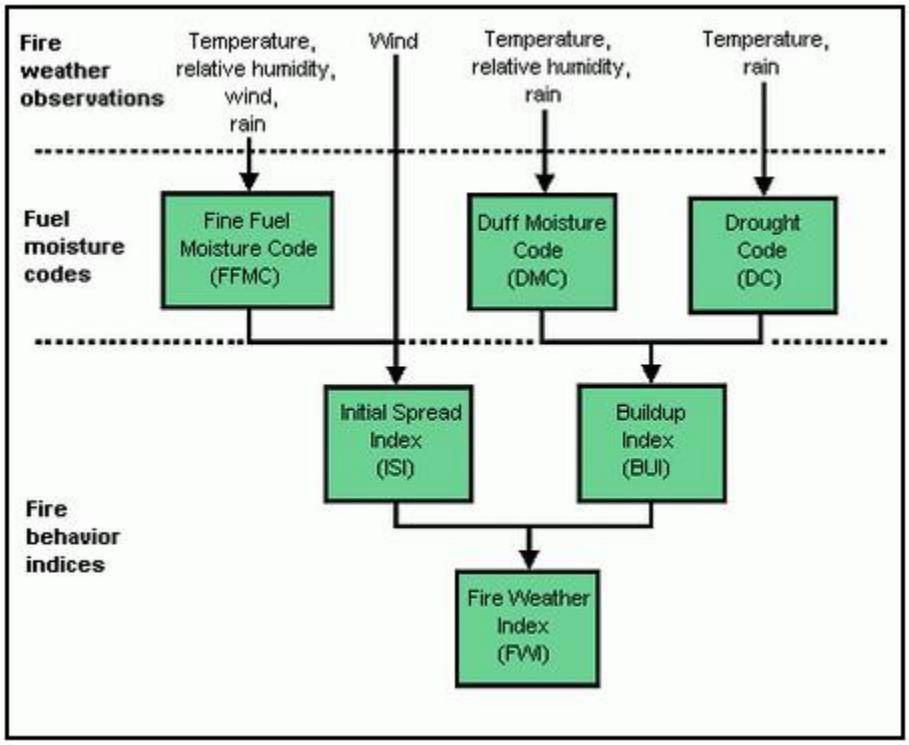



**Figure 30 : Description du calcul de l'IFM Canadien**

Pour calculer l'IFM sur la région couvrant l'AP de Binder-Léré, nous avons utilisé les projections climatiques Cordex-Africa, qui sont des simulations régionales réalisées sur le continent africain à partir des simulations globales CMIP5 du GIEC (2013). Pour cet indicateur IFM, les simulations Cordex-Africa à la résolution de 0,22° (~22 km) ont été sélectionnées.

Les données quotidiennes de température, de vitesse du vent, d'humidité relative et de cumul de précipitation sur 24 heures ont été téléchargées pour 9 modèles régionaux à une résolution de 0,22° dans les conditions de référence (1980-2005) et les projections futures en 2035 et 2060 pour le scénario RCP8.5 (proche du SSP5-8.5 de CMIP6). L'IFM a été calculé sur la région d'étude au pas de temps journalier pour les 3 périodes et chacun des 9 modèles régionaux.

Enfin, pour chaque période, historique et les horizons 2035 et 2060, le nombre de jours par an avec un risque élevé de feu (correspondant à un IFM > 35) a été décompté sur la série temporelle de 30 ans. Ensuite, une estimation du changement a été évaluée entre le climat actuel et le climat futur pour les deux horizons en scénario RCP8.5.

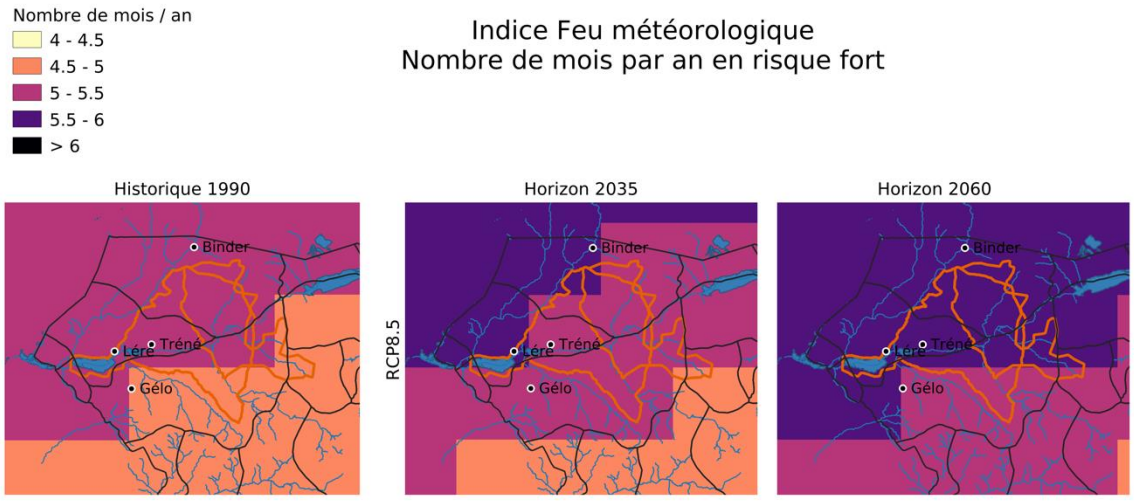



**Figure 31 : Évolution du nombre de mois par an en risque fort de feu de brousse (IFM > 35) entre la période historique et les horizons futurs 2035 et 2060 pour le scénario RCP8.5.**

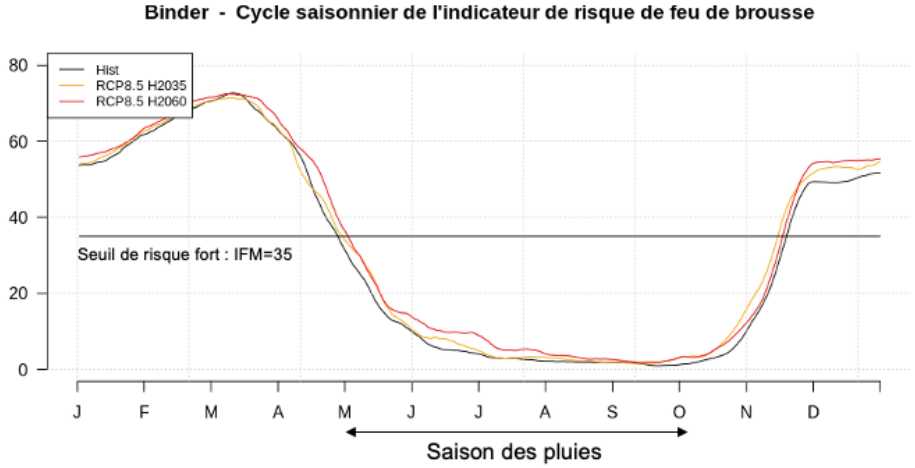



**Figure 32 : Cycle saisonnier moyen de l'indicateur de risque de feu de brousse.**

Le risque de feu de brousse est assez homogène sur l'AP de Binder-Léré, avec un risque plus élevé sur la moitié Nord de l'AP. En climat historique, le risque est fort pendant 4,5 mois à 5,5 mois. Il augmente progressivement jusqu'à atteindre 15 jours par an supplémentaires à l'horizon 2060 en scénario RCP8.5, en conservant les structures spatiales historiques.

L'analyse du cycle saisonnier moyen de l'IFM permet de déterminer à quelle période de l'année le risque de feu de végétation est élevé et comment il évolue dans le futur sous l'action du changement climatique. L'IFM dépasse le seuil de risque fort de mi-novembre à fin avril, pendant la saison sèche. Il est maximum en mars, quand les sols et la végétation sont complètement asséchés avant le début des premières pluies. Sous l'action du changement climatique, dans le scénario RCP8.5, l'indice IFM augmente de façon homogène tout au long de l'année. Le risque de feu de végétation est donc plus élevé tout au long de l'année, et à l'horizon 2060 le seuil de risque fort est dépassé une dizaine de jours plus tôt en début de saison sèche (mi-novembre) et le risque baisse une dizaine de jours plus tard en début de saison des pluies (début mai).

# 5. CONCLUSION

Dans le tableau suivant sont synthétisés les évolutions futures des différents indicateurs climatiques.

Pour les températures, les projections montrent une augmentation uniforme de 1 à 2.5°C tout au long de l'année et sur tout le territoire du CAPBL. Pendant la saison des pluies, à cause de la forte humidité, cette augmentation entraîne un risque fort pour la santé qui passe de 10 jours en période historique à 2 à 3 mois à l'horizon 2060 en scénario SSP5-8.5.

Le cumul de pluie annuel augmente de 10 à 20 %. Cette augmentation est concentrée entre juillet et octobre et est liée à deux facteurs :

- une augmentation du nombre de jours de pluie en mai et de juillet à septembre,
- une intensification des pluies.

Elle entraîne un risque d'inondation par débordement de cours d'eau ou flash flood.

La saison des pluies évolue, avec :

- Un décalage de la fin de la saison des pluies,
- Une augmentation du cumul de pluie pendant la saison des pluies avec plus de jours de pluie.

Cependant, des pluies intenses alternent avec des séquences sèches dont la durée augmente légèrement.

**Tableau 4 : Synthèse des évolutions des indicateurs climatiques.**

| Paramètre | Indicateurs climatiques | Evolution |
|---|---|---|
| Température | Température minimale journalière (moyenne annuelle)<br>Température maximale journalière (moyenne annuelle)<br>Humidex (cycle saisonnier moyen; nb de jours par an avec Humidex > 45 / 54°C) | Augmentation ++<br>Augmentation ++<br>Augmentation +++ |
| Précipitation | Cumul de pluie annuel<br>Nombre de jours de pluie par an<br>Probabilité de pluie intense (caractérisé par la PR 1/10 ans en climat historique) | Augmentation ++<br>Augmentation +<br>Augmentation +++ |
| Saison des pluies (Juin-Sept) | Cumul de pluie sur la saison des pluies<br>Nombre de jours de pluie pendant la saison des pluies<br>Durée maximale d'une séquence sèche en saison des pluies | Augmentation ++<br>Augmentation +<br>Augmentation + |
| Feu de brousse | Indicateur de Feu Météorologique (nb de jours par an avec un risque fort - IFM > 35) | Augmentation + |

Les résultats de cette étude sont en accord avec les projections sur cette région fournies dans le « Climate Change Knowledge Portal » de la Banque Mondiale (https://climateknowledgeportal.worldbank.org/), qui reposent sur les mêmes données source (NASA NEX-GDDP-CMIP6). La descente d'échelle à l'échelle kilométrique, les analyses du cycle saisonnier des différents indicateurs et les indicateurs composites (humidex, IFM) permettent une analyse plus fine et plus complète des impacts locaux du CC sur le CAPBL. Aucune publication scientifique n'a encore été réalisée sur cette région à cette échelle. Cependant, les résultats de cette étude sont en accord avec les publications scientifiques sur le continent africain, comme les travaux d'Almazroui et al. (2020)[5] : le CAPBL (10°N/14°E) est situé dans la zone d'Afrique centrale sur laquelle les projections climatiques prévoient une augmentation du cumul annuel de précipitation de 10 à 20% à l'horizon médian et de 20 à 30% en fin de siècle (cf. Figure 33), et une augmentation de température de 1,6°C à l'horizon médian à 3,7°C en fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5.

[5] Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Nazrul Islam, M., Ismail, M., Klutse, N. A. B., & Siddiqui, M. H. (2020). Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, *4*, 455-475.

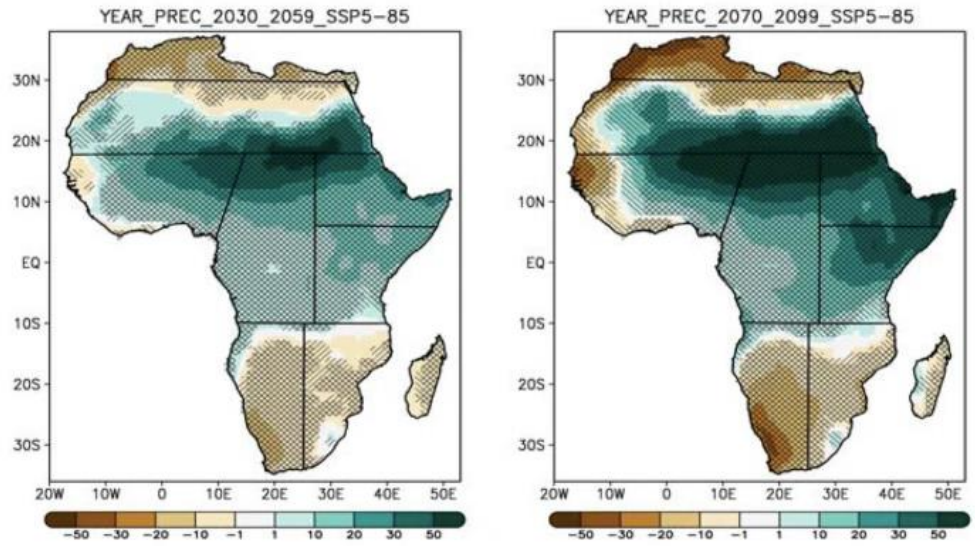



**Figure 33 : Changement relatif de cumul annuel de précipitations sous le scénario SSP5-8.5 pour les horizons 2045 et 2085 en comparaison avec la période de référence (1981-2020). Source : Almazroui et al., 2020.**

Les aléas qui augmentent dans le futur et aux auxquels les populations sont les plus vulnérables créent des risques climatiques que nous classons ici par ordre de décroissance :

- Les jours avec un humidex supérieur au seuil de « danger ». Le risque associé est un risque sanitaire pour les populations et la faune.
- La probabilité de pluie intense. Le risque associé est une augmentation des inondations « flash flood » et de débordement des rivières, en intensité et en fréquence.
- Les températures minimales et maximales. Le risque associé est un stress thermique pour les écosystèmes (faune, flore) et les cultures.
- Les jours avec un Indice Feu météorologique en risque fort. Le risque associé est un risque de feu de brousse.

Desjardins
Développement international

Baastel