



République du Cameroun
Paix-Travail-Patrie

Université de Douala

Ecole Nationale Supérieure
Polytechnique de Douala

Département de Météorologie

Republic of Cameroon
Peace-Work-Fatherland

University of Douala

National Higher Polytechnic
School of Douala

Department of Meteorology



1^{ère} Promotion 2022-2025

CONCEPTION D'UN OUTIL D'EVALUATION DE VULNÉRABILITÉ CLIMATIQUE AVEC GESTION INTÉGRÉ DES CATASTROPHES ET SYSTEME D'ALERTE PRÉCOCE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION EN MÉTÉOROLOGIE

Présenté par
DASSI TENE Roméo-Ledoux, Matricule 22G00820



Encadreurs Académique

Dr MALONG Yannick Stopira
Chargé de Cours, Génie Informatique,
ENSPD, Douala/Cameroun

M. ZELEFACK TEGUEFOUET Junior
ASS, Physique, ENSPD, Douala/Cameroun

Encadreurs Professionnel

M. AMBESI NDONWI Hans
Responsable Service Prévision Météo,
DMN-Yaoundé/Cameroun

Dr KAMSU TAMO Pierre Honoré
Expert Consultant à ACMAD, Niamey/Niger

DÉDICACE

À la famille TENE !

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail est le fruit des efforts conjugués de nombreuses personnes. Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à cette avancée :

- ❖ À toute l'administration et au personnel de l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Douala (ENSPD), ainsi qu'à l'ensemble de nos enseignants, pour leur accueil chaleureux et leur contribution à rendre notre séjour à la fois enrichissant sur le plan intellectuel et social ;
- ❖ Au Pr Ruben MOUANGUE, directeur de l'ENSPD, pour son encadrement académique précieux et son soutien constant ;
- ❖ Au Dr MALONG Yannick Stopira, Chargé de Cours, Génie Informatique, notre responsable académique, pour son accompagnement et ses conseils durant de notre formation ;
- ❖ À M. ZELEFACK TEGUEFOUET Junior, ASS en Physique à l'ENSPD, pour ses enseignements éclairés et son accompagnement lors de la rédaction de ce mémoire ;
- ❖ Au Pr MEZOUË Cyril, Maître de Conférences en Physique de l'Atmosphère, notre responsable académique de troisième année, pour son orientation et son soutien constants ;
- ❖ À M. TCHINDA TAZO Simplice, Directeur de la Météorologie Nationale du Cameroun et Représentant permanent auprès de l'OMM, pour son accueil et son encadrement ;
- ❖ Au Dr KAMSU TAMO Pierre Honoré, Expert Consultant à ACMAD, pour son accompagnement durant tout le stage, son suivi attentif, et sa collaboration efficace dans l'élaboration et la réalisation de ce travail ;
- ❖ À M. AMBESI HANS, chef du Service de Prévision Météorologique, pour son suivi rigoureux et son encadrement de qualité ;
- ❖ À M. GUILAMBOUHE Christian et à Mlle. MODI MBOG Esther Christelle, cadres au Service de Prévision Météorologique, pour leur soutien professionnel et leur encadrement ;
- ❖ Au Dr IGRI MOUDI Pascal, Consultant UNDRR à la CEEAC, pour son appui dans l'élaboration de ce travail ;
- ❖ À M. MIAMBAYE Mbaiquedem, expert au CAPC-AC, pour son soutien et ses conseils précieux ;
- ❖ À M. TAGUEMFO KAMMALAC Jores, pour son soutien constant ;
- ❖ À M. MEYENE ESSAGA Pascal, pour son soutien et sa collaboration efficace ;
- ❖ Et enfin, à nos familles et amis, pour leur appui inestimable, leur collaboration, leur aide et leur assistance tout au long de cette étude.

Votre soutien et votre encouragement ont été une véritable source de motivation dans cette démarche. Nous en sommes profondément reconnaissants.

AVANT-PROPOS

Dans un contexte mondial marqué par le changement climatique, l'Afrique Centrale se trouve à un carrefour critique. Cette région, riche en biodiversité et en ressources naturelles, est cependant confrontée à des défis majeurs liés à sa vulnérabilité face aux aléas climatiques. Les événements extrêmes tels que les inondations, les sécheresses et les glissements de terrain mettent à mal les systèmes de subsistance, exacerbent la pauvreté et compromettent le développement durable.

Conscients de ces enjeux, nous avons entrepris de concevoir ClimGuard, un outil numérique novateur destiné à évaluer la vulnérabilité climatique, à gérer les catastrophes et à diffuser des alertes précocees. Cette initiative s'inscrit dans une démarche participative et interdisciplinaire, visant à impliquer les acteurs locaux dans la co-construction de solutions adaptées à leurs réalités.

ClimGuard repose sur une méthodologie rigoureuse, intégrant des données climatiques et socio-économiques, afin de fournir des analyses précises et contextualisées. En facilitant l'accès à l'information et en renforçant les capacités d'anticipation, cet outil a pour ambition de promouvoir une gestion proactive des risques climatiques, essentielle pour la résilience des communautés.

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous les partenaires et les communautés qui ont contribué à cette recherche, notamment l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Douala (ENSPD), la Direction de la Météorologie Nationale du Cameroun (DIRMET), le Centre d'Application et de Prévision Climatologique de l'Afrique Centrale (CAPC-AC), ainsi que le Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement (ACMAD). Leur engagement et leur expertise ont été essentiels au développement de ClimGuard. Nous sommes convaincus que cet outil constituera un levier puissant pour les décideurs, les ONG et les acteurs communautaires, leur permettant d'améliorer la préparation et la réponse face aux défis climatiques croissants.

RÉSUMÉ

Le changement climatique constitue un défi majeur pour l’Afrique Centrale, une région particulièrement vulnérable en raison de sa forte dépendance aux ressources naturelles, de son urbanisation rapide, et de sa faible capacité d’adaptation institutionnelle et communautaire. Face à la fréquence croissante des aléas climatiques tels que les inondations, les sécheresses, ou les glissements de terrain, il devient urgent de doter les acteurs locaux d’outils adaptés permettant d’anticiper les risques, de planifier des réponses efficaces et de protéger les populations. Cette étude portant sur la conception d’un outil numérique innovant, dénommé ClimGuard, dédié à l’évaluation de la vulnérabilité climatique, à la gestion intégrée des catastrophes et à la diffusion d’alertes précoce dans les pays d’Afrique Centrale. L’objectif de ClimGuard est de combler les lacunes des approches actuelles en fournissant une solution intégrée, interactive, et contextualisée aux réalités locales. La méthodologie de conception repose sur une approche interdisciplinaire et participative. L’outil est structuré autour de trois grands modules : Un module d’évaluation de la vulnérabilité climatique, qui combine des données climatiques (précipitations, températures, fréquence des événements extrêmes) avec des données socio-économiques (pauvreté, infrastructures, santé, éducation) pour produire des cartes dynamiques de vulnérabilité à l’échelle locale; Un module de gestion des catastrophes, permettant la planification, la priorisation et le suivi des interventions avant, pendant et après une crise climatique ; Un module d’alerte précoce, basé sur des seuils d’aléas, des indicateurs d’exposition, et des canaux de communication accessibles (E-mails, SMS, radios communautaires, tableaux de bord en ligne). Les données utilisées proviennent de sources ouvertes fiables telles que CHIRPS, ERA5, OpenStreetMap, ainsi que d’enquêtes communautaires locales. Des outils technologiques libres (Python, MySQL, Dash, QGIS) ont été utilisés pour garantir la flexibilité, la transparence et la durabilité du système. Les résultats obtenus montrent que ClimGuard permet de localiser précisément les zones à haut risque, de visualiser les dynamiques de vulnérabilité dans le temps, et de générer des alertes compréhensibles et accessibles aux populations ciblées. Les tests réalisés dans la zone pilote ont montré une bonne acceptation de l’outil par les utilisateurs finaux, avec un fort potentiel de réPLICATION à l’échelle régionale. ClimGuard se présente ainsi comme un outil stratégique pour les décideurs publics, les municipalités, les ONG et les communautés.

Mots clés : *Vulnérabilité climatique, Gestion des catastrophes climatiques, Systèmes d’alerte précoce, Changement climatique, Systèmes d’information géographique.*

ABSTRACT

Climate change is a major challenge for Central Africa, a region particularly vulnerable due to its high dependency on natural resources, rapid urbanization, and limited institutional and community adaptive capacity. In response to the increasing frequency of climate-related hazards such as floods, droughts, and landslides, it is urgent to equip local stakeholders with appropriate tools to anticipate risks, plan effective responses, and protect populations. This study focuses on the design of an innovative digital tool called ClimGuard, dedicated to climate vulnerability assessment, integrated disaster management, and early warning dissemination in Central African countries. The objective of ClimGuard is to address the gaps in current approaches by providing an integrated, interactive, and locally contextualized solution. The design methodology is based on an interdisciplinary and participatory approach. The tool is structured around three main modules: A climate vulnerability assessment module, which combines climate data (precipitation, temperatures, frequency of extreme events) with socio-economic data (poverty, infrastructure, health, education) to generate dynamic vulnerability maps at the local scale; A disaster management module, enabling planning, prioritization, and monitoring of interventions before, during, and after a climate crisis; An early warning module, based on hazard thresholds, exposure indicators, and accessible communication channels (SMS, community radio, online dashboards). The data used comes from reliable open sources such as CHIRPS, ERA5, OpenStreetMap, as well as local community surveys. Open-source technologies (Python, MySQL, Dash, QGIS) were employed to ensure the system's flexibility, transparency, and sustainability. The results demonstrate that ClimGuard can precisely locate high-risk zones, visualize vulnerability dynamics over time, and generate understandable and accessible alerts for targeted populations. Tests conducted in the pilot region showed strong user acceptance, with significant potential for regional replication. ClimGuard thus emerges as a strategic tool for public decision-makers, municipalities, NGOs, and communities.

Keywords: Climate vulnerability, Climate disaster management, Early warning systems, Climate change, Geographic information systems.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de Localisation DMN.....	5
Figure 2 : Organigramme de DMN.....	8
Figure 3 : Développement des capacités selon l'UNDRR.....	11
Figure 4 : Zone d'étude (Afrique Centrale).....	19
Figure 5: Logo représentatif de la NOAA	22
Figure 6: Infrastructure du CDS.....	23
Figure 7: Architecture Générale d'une Application Django.....	27
Figure 8: Django + API RESTful	29
Figure 9: Logo HTMX	31
Figure 10: Logo du CDN Tailwind.....	31
Figure 11: La pyramide de Tests selon Mike Cohn	33
Figure 12: Diagramme UML	35
Figure 13: Page d'accueil ClimGuard	38
Figure 14: Page de Connexion et Inscription.....	38
Figure 15 : Gestion des utilisateurs.....	39
Figure 16 : Profil des Utilisateurs	40
Figure 17: Tableau de bord des vulnérabilités	40
Figure 18: Détails des sondages	41
Figure 19: Questionnaires du sondage	42
Figure 20: Enregistrement des Catastrophes.....	43
Figure 21: Section Rapport sur les Catastrophes	44
Figure 22: Répartition géographique des catastrophes	45
Figure 23: Statistique sur les Impacts	45
Figure 24: Répartition des catastrophes par Danger	46
Figure 25: Catastrophes par pays, région et type de danger	46
Figure 26: Evolution temporelle des catastrophes	47
Figure 27 : Carte interactives dédiée aux prévisions météorologiques.....	48
Figure 28 : Indice de vigilance des précipitations.....	49
Figure 29: Bulletin Multirisque.....	52
Figure 30: Prévision et Impact Hydrologique.....	53
Figure 31: Bulletin de Prévision sur les villes	53
Figure 32: Carte météo de la côte camerounaise	54

Figure 33: Résumé des Inondations en 2023	55
Figure 34: Automatisation et traitement de données	66
Figure 35: Interface de développement Visual Studio Code	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Cadre conceptuel et architecture des systèmes d'alerte Précoce	15
Tableau 2: Synthèse des données utilisées.....	26
Tableau 3: Évaluation de la Vulnérabilité Climatique.....	35
Tableau 4: Calendrier estimatif des activités	56
Tableau 5: Jours de Travail Estimés	56
Tableau 6: Estimation Total du Budget	57
Tableau 7: Dangers ou Aléas	62
Tableau 8: Impacts	62
Tableau 9: Types de Cible	63
Tableau 10: Cibles	63
Tableau 11: Extrait d'Echelle de vulnérabilité du questionnaire	63

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACMAD	: African Centre for Meteorological Applications for Development
AGRHYMET	: Centre Régional de formation en Agriculture, Hydrologie et Météorologie
API	: Application Programming Interface
CAPC-AC	: Centre d'Application et de Prévision Climatologique de l'Afrique Centrale
CC	: Changement Climatique
CCNUCC	: Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDN	: Content Delivery Network
CDS	: Copernicus Climate Data Store
CEEAC	: Communauté Economique des Etats de l'Afrique Centrale
CERPAM	: Centre d'Etude et de Réalisations Pastorales Alpes-Méditerranée
ClimSA	: Climate Services and Related Applications
CMSC	: Cadre Mondial pour les Services Climatologiques
CMR	: Cameroun
CNULD	: Convention des nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification
CNSC	: Cadre national pour les Services Climatiques
CRA	: Centre Régional AGRHYMET
CRIDF	: Centre Régional AGRHYMET
CSS	: Cascading Style Sheets
CUA	: Commission de l'Union Africaine
CRUD	: Create Read Update Delete
DIRMET	: Direction de la Météorologie Nationale du Cameroun
DMN	Direction de la Météorologie Nationale du Cameroun
ENSPD	: Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Douala
FAO	: Food and Agriculture Organisation (Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture)
GES	: Gaz à Effet de Serre
GFS	: <i>Global Forecast System</i>
GIC	: Gestion Intégrée des Catastrophes

GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GRCA/ACC	: Gestion des Risques de Catastrophes et Adaptation au Changement Climatique
HTML	: <i>Hyper Text Markup Language</i>
IVC	: Indice de Vulnérabilité Climatique
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
MCCDD	: Master Changement Climatique et Développement Durable
MEEP	: Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de la Pêche
MESA	: Programme de Surveillance de l'Environnement et de Sécurité en Afrique
MySQL	: <i>My Structured Query Language</i>
NCDC	: <i>National Climate Data Center</i>
OCHA	: <i>Office for the Coordination of Humanitarian Affairs</i>
OMM	: Organisation Météorologique mondiale
ONU	: Organisation des Nations Unies
PNUE	: Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PC	: Personal Computer
RCA	: République Centrafricaine
RCP	: Representative Concentration Pathways
RGE	: Recensement Général de l'Elevage
RGPH	: Recensement Général de la population et de l'Habitat
SADC	: <i>Southern African Development Community</i>
SMHN	: Service Météorologique et Hydrologique National
SPSS	: <i>Statistical Package on Social Science</i>
SS	: Services Climatiques
UA	: Union Africaine
UBT	: Unité Bétail Tropical
UML	: <i>Unified Modeling Language</i>
UNDRR	: <i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
UNPFII	: Forum Permanent des Nations Unies sur les Questions Autochtones

TABLE DE MATIERE

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
AVANT-PROPOS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	ix
TABLE DE MATIERE	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Contexte général.....	1
Problématique.....	1
Objectif Principal	2
Objectifs spécifiques	2
Structure du document	2
CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE	3
1.1. Présentation du Ministère des Transports du Cameroun (MINT).....	3
1.1.1. Rôles et Responsabilités	3
1.1.2. Objectifs Stratégiques.....	3
1.1.3. Directions Principales du MINT	3
1.2. Direction de la Météorologie Nationale (DMN)	4
1.2.1. Historique de la DMN	4
1.2.2. Localisation de la DMN	5
1.2.3. Missions principales de la DMN	5
1.2.4. Services de la DMN.....	6
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1. Évaluation de la vulnérabilité climatique	11
2.1.1. Processus de Hiérarchisation Analytique (AHP).....	12
2.2. Gestion Intégrée des Catastrophes (GIC)	13
2.2.1. Définition et principes fondamentaux de la GIC	13
2.2.2. La coordination multisectorielle comme levier clé	13
2.2.3. La planification stratégique dans la gestion des risques	14
2.2.4. Le rôle croissant des outils numériques dans la GIC.....	14
2.2.5. Défis, limites et perspectives d'avenir.....	14
2.3. Systèmes d'Alerte Précoce (SAP)	14
2.3.1. Fondements théoriques et éléments constitutifs des SAP	14
2.3.2. Typologies et exemples de systèmes en Afrique	15
2.3.3. Cadre conceptuel et architecture des systèmes d'alerte	15
2.3.4. Défis et limites dans le contexte africain	15
2.3.5. Innovations et approches intégratives : le cas de ClimGuard.....	15

2.3.6. Perspectives et besoins futurs	16
2.4. Études de l'existant	16
CHAPITRE 3 : OUTILS ET MÉTHODES	18
3.1. Zone d'étude.....	18
3.2. Données Utilisées	19
3.2.1. Données Climatiques	20
3.2.1.1. Stations.....	20
3.2.1.2. ERA5	20
3.2.1.3. TAMSAT	20
3.2.1.4. ARC2	21
3.2.1.5. CHIRPS	21
3.2.2. Données de Prévisions.....	21
3.2.2.1. GFS/GEFS	22
3.2.2.2. Copernicus C3S Daily Forecast	22
3.2.2.3. Modèle WRF (Weather Research and Forecasting)	24
3.3. Conception du Système.....	27
3.3.1. Conception Backend : Django	27
3.3.1.1. Architecture du Backend	27
3.3.1.2. Sécurité et Performance	29
3.3.2. Conception Frontend : Dash et HTMX	29
3.3.2.1. Interface Utilisateur	30
3.3.2.2. Interactivité avec HTMX	30
3.3.2.3. Cartographie Interactive avec Folium.....	31
3.3.2.4. Ergonomie et Design	31
3.3.3. Base de données (MySQL).....	32
3.3.3.1. Structure de la Base de Données.....	32
3.3.3.2. Optimisation des Performances	32
3.3.4. Intégration et Tests	32
3.4. Méthodologie d'Évaluation de la Vulnérabilité	35
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET PERSPECTIVES	38
4.1. Présentation de l'Interface Système	38
4.1.1. Page d'Accueil.....	38
4.1.2. Pages de Connexion & Inscription	38
4.1.3. Gestion des Comptes Utilisateurs.....	39
4.2. Module Évaluation de la Vulnérabilité Climatique.....	40
4.2.1. Tableau de bord	40
4.2.2. Détails des sondages.....	41
4.2.2. Questionnaires du sondages.....	42
4.3. Module Gestion des Catastrophes	43
4.3.2. Enregistrement en temps réel	43
4.3.2. Rapports automatisés	43
4.3.2. Statistiques et Analyses	44
4.4. Module de Prévisions Météorologiques	47

4.4.1. Fortes Précipitations : Indice d’Inondation.....	48
4.4.2. Indice de vigilance des précipitations.....	48
4.4.3. Vagues de Chaleurs	49
4.4.4. Démarrage des Saisons.....	50
4.5. Module des Alertes Météorologiques	50
4.5.1. Surveillance des Phénomènes Météorologiques.....	51
4.5.2. Détection des Phénomènes Extrêmes	51
4.5.3. Bulletins Météorologique Associés aux Alertes.....	51
4.5.3.1. Bulletins Des Catastrophes	51
4.5.3.3. Bulletins des Prévisions Météorologiques sur les Villes	53
4.5.3.3. Bulletins de Prévision Météo Marine	54
4.5.4. Gestion des niveaux de vigilance	55
4.5.5. Diffusion multicanal	55
4.6. Coût estimatif du projet.....	55
4.6.1. Calendrier des activités.....	55
4.6.2. Jours de Travail Estimés.....	56
4.6.3. Estimation Total du Budget.....	56
4.7. Perspectives du projet.....	57
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	59
REFERENCE BIBLIOGRAPHIE	60
ANNEXES	62

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le changement climatique est considéré comme l'une des plus grandes menaces au développement durable et aux moyens d'existence des populations dans les pays en développement, avec des effets défavorables sur la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources naturelles et les infrastructures (IPCC, 2018). Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) conclut, dans son rapport publié le 9 août 2021, que le climat est en train de changer partout dans le monde et plus rapidement que prévu (GIEC, 2021). Un réchauffement accéléré de plus de 1,5°C est prévu au cours des prochaines décennies, ce qui dépasserait la limitation de 1,5°C de réchauffement à l'échelle mondiale (IPCC, 2022). Le changement climatique se manifeste par un changement dans les régimes de précipitations et la hausse des températures, la montée du niveau de la mer, ainsi que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes, notamment les inondations, les sécheresses et les cyclones dévastateurs (Rigaud et al., 2019).

Contexte général

L'Afrique Centrale est l'une des régions les plus vulnérables au changement climatique dans le monde. Elle fait face à une combinaison de facteurs aggravants, notamment une forte variabilité climatique, une urbanisation rapide et non planifiée, une pauvreté endémique, une gouvernance environnementale limitée, ainsi qu'une dépendance élevée aux ressources naturelles. Les effets du changement climatique dans la région se manifestent à travers des phénomènes extrêmes de plus en plus fréquents et intenses : inondations, sécheresses, glissements de terrain, vagues de chaleur, insécurité alimentaire, érosion côtière, entre autres. Ces aléas climatiques affectent directement les moyens de subsistance des populations et exacerbent les vulnérabilités socio-économiques existantes. L'absence de systèmes efficaces d'alerte précoce, de planification territoriale résiliente et d'outils d'évaluation des risques accessibles complique encore davantage la prise de décision rapide et informée par les gouvernements, les collectivités locales et les communautés.

Problématique

Malgré les avancées technologiques et l'existence d'initiatives internationales en matière de gestion des risques climatiques, la majorité des outils disponibles sont soit trop complexes, soit peu adaptés aux réalités locales d'Afrique Centrale. Beaucoup d'entre eux nécessitent des compétences techniques élevées, des infrastructures numériques avancées ou ne tiennent pas compte des données locales, souvent insuffisamment disponibles ou mal structurées. De plus, les systèmes d'alerte sont souvent fragmentés, peu interconnectés, et ne prennent pas suffisamment en compte les dynamiques

socio-économiques et environnementales spécifiques à chaque territoire. L'enjeu n'est donc pas seulement de prévoir un événement climatique, mais aussi d'en comprendre les impacts différenciés selon les communautés, les activités économiques et les écosystèmes.

Objectif Principal

Développer un outil innovant, intégré et accessible, pour améliorer la gestion des risques climatiques en Afrique Centrale : ClimGuard.

Objectifs spécifiques

Dans ce contexte, cette étude vise à développer un outil innovant, intégré et accessible : ClimGuard.

Cet outil a pour ambition de :

- Évaluer la vulnérabilité climatique : Le faire à différentes échelles spatiales (régionale, communale, locale) ;
- Gestion intégrée des risques : Aider à la gestion intégrée des risques climatiques et des catastrophes naturelles en fournissant des informations pertinentes et en temps réel.;
- Systèmes d'alerte précoce : Fournir des systèmes d'alerte précoce adaptés aux conditions d'Afrique Centrale, tenant compte des spécificités locales.

ClimGuard se veut un pont entre la science des données climatiques, les besoins des territoires, et les impératifs d'action rapide face aux menaces climatiques et environnementales croissantes.

Structure du document

Ce document est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la **Présentation de l'entreprise**; il présente l'entreprise, son historique, sa mission et ses valeurs. Nous y décrivons également le contexte dans lequel l'entreprise évolue, ainsi que les besoins spécifiques qu'elle cherche à satisfaire à travers le développement de ClimGuard. Le deuxième chapitre, intitulé **Revue de littérature**, analyse les pratiques locales et internationales en lien avec des projets similaires, il expose également le cahier des charges de notre système, en mettant en lumière les enjeux et les défis rencontrés dans la gestion des risques climatiques. Le troisième chapitre, **Outils et méthodes**, nous décrivons l'architecture du système, les technologies employées ainsi que les choix de conception ; nous détaillons les méthodologies utilisées pour le développement de ClimGuard, en mettant en avant l'approche participative et les sources de données mobilisées. Enfin, le quatrième chapitre, **Résultats et perspectives**, présente les résultats obtenus à travers l'implémentation de ClimGuard, en discutant des limites de la solution proposée et des pistes d'amélioration envisagées. Nous y formulons également des recommandations pour les futures étapes de développement et d'évaluation de l'outil.

CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

1.1. Présentation du Ministère des Transports du Cameroun (MINT)

Le Ministère des Transports du Cameroun est une institution clé du gouvernement chargée de la régulation, de la gestion et du développement du secteur des transports dans le pays. Sa mission principale est d'assurer un système de transport sécurisé, efficace et accessible, afin de favoriser la mobilité des personnes et des biens, accélérer le développement économique et social, tout en veillant à la sécurité des usagers.

1.1.1. Rôles et Responsabilités

- Élaborer et mettre en œuvre la politique nationale des transports.
- Réguler et contrôler tous les modes de transport (routier, ferroviaire, maritime, aérien).
- Développer et moderniser les infrastructures de transport.
- Garantir la sécurité dans les différents modes de déplacement.
- Superviser la gestion des titres de transport et des licences professionnelles.
- Collaborer avec des partenaires internationaux pour le renforcement du secteur.

1.1.2. Objectifs Stratégiques

- Moderniser et sécuriser le réseau de transport.
- Renforcer la coopération avec la DNM pour anticiper et gérer les risques liés aux conditions météorologiques.
- Favoriser la sécurité routière, maritime, ferroviaire et aérienne.
- Promouvoir la durabilité environnementale dans le secteur.

1.1.3. Directions Principales du MINT

Le Ministère des Transports du Cameroun (MINT) dispose de plusieurs directions et services spécialisés, chacun chargé d'une mission précise pour assurer le bon fonctionnement du secteur des transports dans le pays. Voici une présentation des principales directions généralement présentes au sein du MINT :

- **Direction de la Réglementation et du Contrôle des Transports** : Chargée de la réglementation, des licences, des contrôles techniques, et du respect des normes dans tous les modes de transport.

- **Direction des Infrastructures et des Equipements** : Responsable de la planification, de la construction, de la maintenance et du développement des infrastructures de transport (routes, ports, aéroports, chemins de fer).
- **Direction de la Sécurité des Transports** : Chargée de la sécurité dans le secteur, notamment la sécurité routière, maritime, aérienne, et ferroviaire.
- **Direction de l'Aviation Civile** : Supervise tout ce qui concerne le transport aérien, la gestion des aéroports, et la réglementation de l'aviation civile.
- **Direction des Transports Routiers et Ferroviaires** : Gère le parc de véhicules en circulation, la réglementation routière, et le développement du secteur ferroviaire.
- **Direction du Transport Maritime et Fluvial** : Supervise la navigation maritime et fluviale, la sécurité des ports, et la gestion des navires et du trafic maritime.
- **Direction de la Météorologie Nationale (DIRMET)** : Fournit des données météorologiques essentielles pour la sécurité et l'efficacité des opérations de transport, notamment pour l'aviation, la navigation maritime, et la planification générale. C'est dans cette direction que nous avons effectué ce stage de fin de formation.
- **Direction Administrative et Financière** : Gère les questions financières, budgétaires, et le personnel du ministère.
- **Direction de la Formation et de la Sécurité Routière** : Chargée de la formation des acteurs du secteur et de la sensibilisation à la sécurité.

1.2. Direction de la Météorologie Nationale (DMN)

Dans le cadre de ses activités, le Ministère des Transports collabore étroitement avec la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Cette association est essentielle notamment pour la gestion en temps réel des conditions météorologiques, qui ont un impact direct sur la sécurité et l'efficacité des transporteurs aériens, maritimes, et même terrestres. La DMN fournit des prévisions météorologiques, des alertes et des données climatiques cruciales pour la planification et la sécurité des opérations de transport.

1.2.1. Historique de la DMN

La Direction de la Météorologie Nationale (DMN) a été créé pendant la période coloniale c'est-à-dire lorsque le Cameroun était encore sous mandat français et était initialement dirigée par les responsables français nommés par la tutelle. La gestion de l'organisme est confiée à des ingénieurs Camerounais après l'indépendance nommés par décret présidentiel et le tout premier ingénieur à occuper le poste de Directeur fut Mandengue Epoh (de 1962-1967). la DMN est d'abord placée sous tutelle du Ministère des travaux publics et des transports puis au ministère des transports à sa création.

En 2009 son siège fut place à douala en raison de la collaboration de l'état du Cameroun avec l'Agence pour la sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) qui datait a cette période 16 stations météorologique et était responsable de la gestion des données météorologie aéronautique pour le comte du Cameroun.

1.2.2. Localisation de la DMN

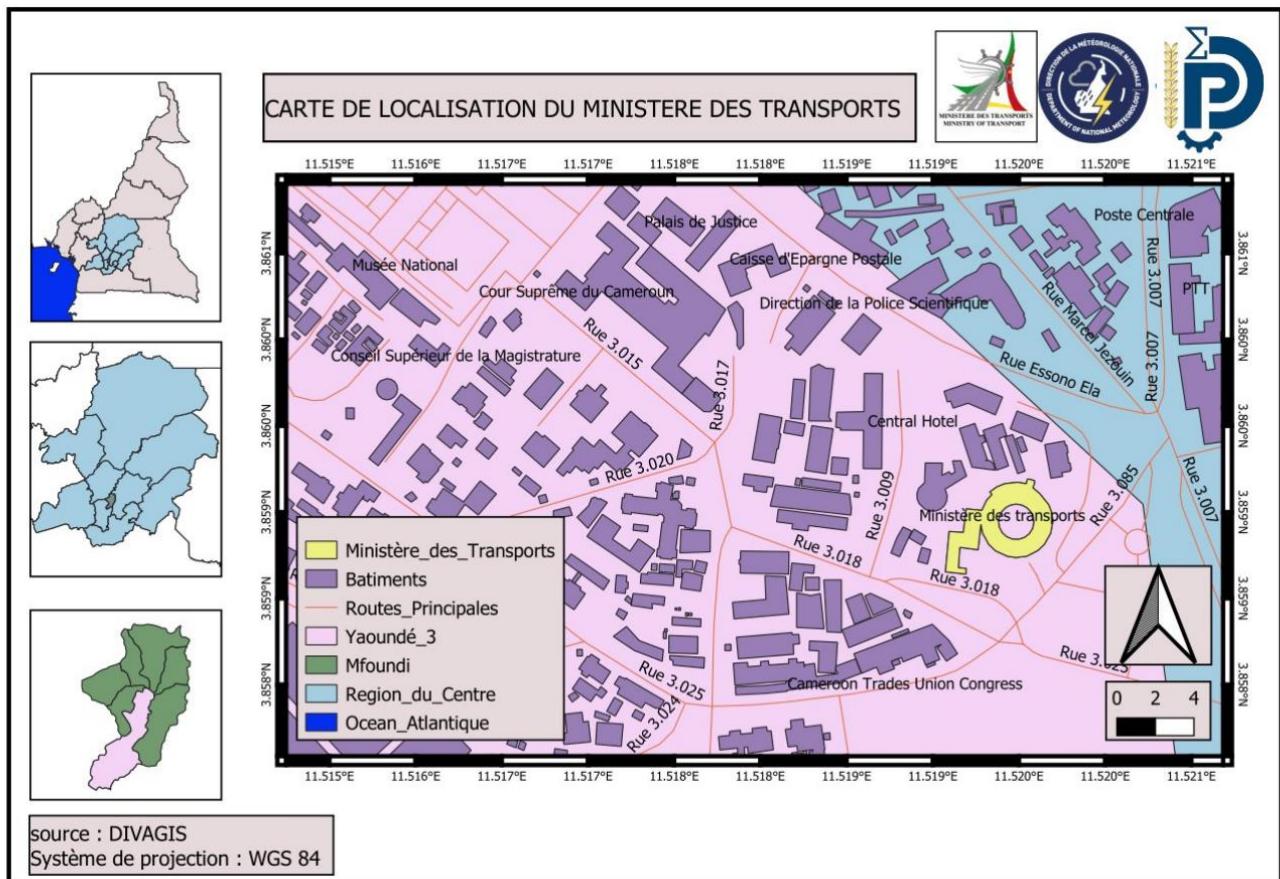


Figure 1: Carte de Localisation DMN

1.2.3. Missions principales de la DMN

- **Observation et prévisions météorologiques** : Surveillance du climat et des phénomènes extrêmes (pluies, sécheresses, températures). Prévisions pour l'aviation, la navigation maritime et les activités agricoles.
- **Alertes précocees** : Diffusion d'avertissemens en cas d'intempéries (inondations, vents violents). Collaboration avec la protection civile pour la gestion des risques.
- **Appui à l'agriculture et aux transports** : Données climatiques pour les agriculteurs (calendriers culturaux). Informations météo pour la sécurité routière et aérienne.
- **Recherche climatique** : Études sur le changement climatique et ses impacts au Cameroun.

1.2.4. Services de la DMN

La Direction de la Météorologie Nationale (DMN) est structurée en plusieurs divisions et services spécialisés pour assurer la surveillance climatique, les prévisions météorologiques et la sécurité des activités dépendantes des conditions atmosphériques. Elle se compose de plusieurs services spécialisés pour répondre aux divers besoins météorologiques du pays. Voici son organisation hiérarchique :

- **SCTI (Service de la Coopération Technique Internationale)**

Le SCTI est chargé du suivi des questions relatives à l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), et responsable de la collaboration avec d'autres pays et organisations internationales. Il facilite les échanges de technologies, de données et d'expertise, renforçant ainsi les capacités météorologiques nationales par la coopération technique.

- **SDAM (Sous-Direction des Applications Météorologiques)**

La SDAM se concentre sur l'application des données météorologiques dans différents domaines. Elle est divisée en plusieurs sous-services :

- **SCBD (Service de la Climatologie et de la Banque des Données)** : Ce service gère l'archivage et l'analyse des données climatiques. Il permet d'accéder à des informations historiques et actuelles sur le climat, essentielles pour la recherche et la prise de décisions.
- **SAEA (Service de l'Agro-Météorologie et de l'Environnement Atmosphérique)** : Elle étudie l'impact des conditions météorologiques sur l'agriculture et l'environnement. Il fournit des prévisions et des conseils aux agriculteurs pour optimiser leurs pratiques.
- **SAMST (Service de l'Assistance à la Sécurité des Transports)** : Ce service assure la sécurité des transports en fournissant des prévisions météorologiques précises. Il collabore avec les organismes de transport pour minimiser les risques liés aux conditions climatiques.
- **SPCOM (Service de la Prévention des Catastrophes d'Origine Météorologique)** : Ce service se consacre à la prévention des catastrophes naturelles, telles que les inondations ou les tempêtes. Il développe des systèmes d'alerte et des stratégies de sensibilisation pour protéger les populations.

- **CMN (Centre Météorologique National)**

Le CMN est le cœur opérationnel de la DMN, chargé de la collecte et de l'analyse des données météorologiques. Ses sous-services comprennent :

-
- **SR (Service Réseau)** : Ce service gère le réseau de stations météorologiques, assurant la collecte de données en temps réel. Il est essentiel pour la précision des prévisions.
 - **SPM (Service des Prévisions Météorologiques)** : SPM est responsable de l'élaboration des prévisions météorologiques. Il utilise des modèles numériques et des données collectées pour fournir des prévisions à court et moyen terme.
 - **SCTDM (Service de Centralisation et de Transmission des Données Météorologiques)** : Ce service traite les données recueillies par le réseau de stations. Il s'assure que les informations sont précises et disponibles pour les autres services.

- **Réseau Territorial**

Le réseau territorial comprend des services régionaux et des centres spécialisés :

- **10 Services Régionaux** : Chaque service régional est chargé de surveiller les conditions météorologiques dans sa zone géographique, fournissant des prévisions locales et des alertes.
- **03 CPVMA (Centres Principaux Aéroports)** : Ces centres fournissent des services météorologiques spécifiques aux aéroports, garantissant la sécurité des opérations aériennes grâce à des prévisions précises.
- **11 Centres Secondaires** : Ces centres soutiennent les services régionaux en collectant et en analysant des données météorologiques à l'échelle locale, contribuant ainsi à la précision globale des prévisions.

DIRECTION DE LA MÉTÉOROLOGIE NATIONALE (DMN)

SCTI (Service de la Coopération Technique Internationale)

SDAM (Sous-Direction des Applications Météorologiques)

SCBD (Service de la Climatologie et de la Banque des Données)

SAEA (Service de l'Agro-Météorologie et de l'Environnement Atmosphérique)

SCBD (Service de la Climatologie et de la Banque des Données)

SCBD (Service de la Climatologie et de la Banque des Données)

CMN (Centre Météorologique National)

SR (Service Réseau)

SCTDM (Service de Centralisation et de Transmission des Données Météorologiques)

SPM (Service des Prévisions Météorologiques)

Figure 2 : Organigramme de DMN

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Selon Antonio Guterres, Secrétaire général de l'ONU, “Le changement climatique est le problème déterminant de notre époque... chaque jour où nous n’agissons pas est un jour où nous nous rapprochons un peu plus d’un destin qu’aucun d’entre nous ne souhaite – un destin qui résonnera à travers les générations dans les dommages causés à l’humanité et à la vie sur terre”.

La notion de changement climatique est définie comme « des changements qui sont attribués directement ou indirectement à l’activité humaine altérant la composition de l’atmosphère mondiale et qui viennent s’ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables » (GIEC, 2007). Le changement climatique et ses conséquences sont désormais reconnus comme l’un des plus grands défis de la planète (GIEC, 2007 ; Ali et al., 2011 ; Bruno, 2012 ; Cheng et al., 2014).

L’urgence climatique constitue la plus grande menace économique, sociale et environnementale à laquelle sont confrontées la planète et l’humanité. Les catastrophes liées au climat ont presque doublé par rapport aux vingt années précédentes. Cette situation a exacerbé les inégalités au sein des pays et entre eux, ceux qui contribuent le moins aux émissions mondiales étant souvent ceux qui subissent les pires conséquences de l’urgence climatique.

Nous sommes à la croisée des chemins. Le changement climatique compromet la capacité à réaliser le Programme de développement durable à l’horizon 2030, y compris le Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe.

Il réécrit la carte mondiale des ressources pour des actifs tels que l’eau, les terres arables et l’énergie tout en favorisant les migrations, les déplacements et l’instabilité. La transition vers un monde durable à zéro émission nette de carbone nécessite des changements rapides au niveau des systèmes, notamment dans des secteurs clés tels que l’énergie, l’alimentation et la santé.

Le changement climatique se manifeste par des modifications du climat, accompagnées d’une augmentation générale des températures moyennes au niveau mondial. Ces modifications sont une conséquence directe de l’accumulation des gaz à effet de serre dans l’atmosphère (ONU, 2015). Selon la définition de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992), « les changements climatiques sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l’atmosphère mondiale et qui viennent s’ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes observables ».

Le changement climatique se manifeste par des variations de l'état du climat, détectables à travers des modifications de la moyenne ou de la variabilité de ses propriétés, telles que la température et les précipitations, qui persistent généralement pendant plusieurs décennies (GIEC, 2013, p. 187). Le sixième rapport d'évaluation du GIEC, publié le 9 août 2021, confirme que l'incidence des activités humaines sur la variabilité des paramètres du système climatique est incontestable (IPCC, 2021).

L'évolution du climat mondial a eu des répercussions sur les régimes pluviométriques, caractérisées par l'avènement de phénomènes hydroclimatiques extrêmes (GIEC, 2014; Salack, 2016). Toutes les projections climatiques prévoient une intensification du réchauffement moyen, accompagnée de changements dans les précipitations, ainsi qu'une plus grande fréquence et intensité des phénomènes extrêmes (GIEC, 2014). Au cours des dernières décennies, une augmentation significative des risques météorologiques attribuables aux changements climatiques a été observée (GIEC, 2012; Dotsévi, 2018). Carry et Veyret (1996) et Fujiki (2017) ont montré que, parmi les risques météorologiques naturels, les inondations sont les plus fréquentes et touchent le plus grand nombre d'individus.

Comment le changement climatique entraînera le risque de :

- **Cyclones** : Sous 2,5° C du réchauffement climatique, les tempêtes les plus dévastatrices devraient se produire jusqu'à deux fois plus souvent qu'aujourd'hui. (Bacmeister et al., 2018)
- **Sécheresse** : Le nombre de personnes souffrant de sécheresses extrêmes à travers le monde pourrait doubler en moins de 80 ans (Pokhrel, 2021).
- **Inondations** : Pour chaque 1°C de réchauffement climatique, les précipitations quotidiennes extrêmes peuvent s'intensifier d'environ 7 % (GIEC, 2021).
- **Vague de chaleur** : Le stress thermique dû à la chaleur et à l'humidité extrêmes pourrait affecter chaque année 1,2 milliard de personnes d'ici 2100 (Li, Yuan et Kopp, 2020).
- **Maladies infectieuses** : D'ici 2050, les moustiques porteurs de maladies à transmission vectorielle comme le paludisme pourraient atteindre environ 500 millions de personnes supplémentaires (Ryan et al., 2019).
- **Élévation du niveau de la mer** : Les inondations côtières pourraient menacer des actifs représentant jusqu'à 20 % du PIB mondial d'ici 2100 (Kirezci et al., 2020).
- **Wildfire** : D'ici 2030, la saison des incendies pourrait durer trois mois de plus dans les zones déjà exposées aux incendies de forêt (Ross, Gannon et Steinberg, 2020).

Malgré de très faibles émissions de gaz à effet de serre, l'Afrique est considérée comme la principale victime du réchauffement climatique (GIEC, 2018) et demeure la région du monde la plus vulnérable à la hausse des températures, à la perturbation de la distribution des précipitations, ainsi qu'à

l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des catastrophes naturelles, notamment les inondations et les sécheresses (Rigaud et al., 2019).

Le Cameroun, comme tous les pays du monde, est impacté par le changement climatique (GIEC, 2022). Il est exposé à une forte alternance de sécheresses et d'inondations. Le pays a connu une période sèche prolongée entre 1969 et 1993, avec des pics en 1972-1973 et 1983-1984, suivie d'une alternance d'années humides et sèches depuis 1994 (Hiernaux et al., 2021). Selon ces auteurs, la variabilité pluviométrique a été accrue à partir des années 1990, entraînant l'appauvrissement et la destruction des sols par ruissellement, érosion et lessivage. Selon le GIEC (2022), l'impact du changement climatique s'accompagnera, à court terme, d'autres changements sociétaux bien réels, tels que l'augmentation démographique, l'essor des zones urbaines, et la pression sur les ressources naturelles et la biodiversité.

2.1. Évaluation de la vulnérabilité climatique

L'évaluation de la vulnérabilité climatique repose sur l'analyse de trois composantes principales : l'exposition aux aléas climatiques, la sensibilité des systèmes humains et naturels, et leur capacité d'adaptation. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définit la vulnérabilité comme « le degré auquel un système est susceptible d'être affecté, ou incapable de faire face, aux effets néfastes du changement climatique ». Des modèles tels que le modèle MOVE (Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe) et le CVA (Climate Vulnerability Assessment) ont été largement utilisés pour structurer l'analyse des risques. Ces modèles permettent de combiner des données physiques (températures, précipitations, élévation du niveau de la mer) avec des indicateurs sociaux et économiques (revenus, accès à l'eau, santé publique) pour produire une cartographie dynamique de la vulnérabilité.



Figure 3 : Développement des capacités selon l'UNDRR

2.1.1. Processus de Hiérarchisation Analytique (AHP)

L'*Analytic Hierarchy Process* (AHP), ou Processus de hiérarchisation analytique en français, est une méthode structurée d'aide à la décision conçue pour traiter des problématiques complexes impliquant plusieurs critères ou options. Développée dans les années 1970 par Thomas Saaty, cette technique facilite la prise de décision en décomposant un problème global en une hiérarchie de sous-problèmes, d'objectifs, de critères et d'alternatives, permettant ainsi d'évaluer de manière systématique et cohérente chaque option selon des priorités relatives.

L'AHP est utilisé dans une large gamme de domaines, notamment :

- La gestion de projets et l'évaluation d'investissements
- La sélection de sites ou de fournisseurs
- La planification stratégique
- La gestion des risques
- La priorisation des actions en développement durable, environnement, ou santé

Avantages :

- Structuration claire et logique du problème complexe
- Intégration à la fois des jugements qualitatifs et quantitatifs
- Évaluation transparente et reproductible
- Facilite le consensus entre plusieurs décideurs

Limites :

- La qualité des résultats dépend de la cohérence et de la fiabilité des jugements.
- La comparaison par paires peut devenir fastidieuse lorsque le nombre d'éléments augmente.
- Peut introduire des biais subjectifs si les parties ne sont pas impartiales ou si les jugements sont mal calibrés.

L'Analytic Hierarchy Process est une méthode d'aide à la décision rigoureuse et flexible, adaptée aux situations où plusieurs critères doivent être pris en compte. En structurant le problème en hiérarchie et en utilisant des comparaisons systématiques, l'AHP permet de dégager des priorités claires et d'appuyer des choix éclairés, même dans des contextes complexes ou incertains.

L'évaluation de la vulnérabilité climatique et la gestion intégrée des catastrophes sont des éléments essentiels pour renforcer la résilience des communautés face aux impacts du changement climatique. En intégrant des approches holistiques et des outils innovants, il est possible de mieux anticiper et gérer les risques, tout en favorisant une adaptation durable aux défis climatiques. La collaboration

entre les différents acteurs, ainsi que l'engagement des communautés locales, sont cruciaux pour atteindre ces objectifs et assurer un avenir plus sûr et plus résilient.

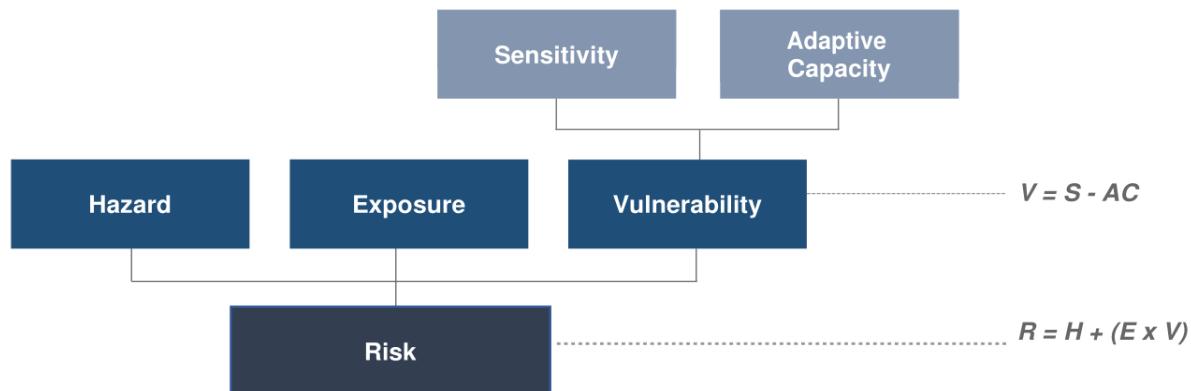


Figure 1: Évaluation des Risques

L'évaluation de la vulnérabilité climatique et la gestion intégrée des catastrophes sont des éléments essentiels pour renforcer la résilience des communautés face aux impacts du changement climatique. En intégrant des approches holistiques et des outils innovants, il est possible de mieux anticiper et gérer les risques, tout en favorisant une adaptation durable aux défis climatiques. La collaboration entre les différents acteurs, ainsi que l'engagement des communautés locales, sont cruciaux pour atteindre ces objectifs et assurer un avenir plus sûr et plus résilient.

2.2. Gestion Intégrée des Catastrophes (GIC)

2.2.1. Définition et principes fondamentaux de la GIC

Selon plusieurs études (UNISDR, 2005 ; CIMH, 2019), la Gestion Intégrée des Catastrophes repose sur une approche systémique qui englobe l'ensemble des actions allant de la prévention à la reconstruction. Elle privilégie la coordination multisectorielle, une planification stratégique et la participation communautaire pour réduire la vulnérabilité. La littérature souligne que cette approche vise à renforcer la résilience des populations face aux aléas naturels, en intégrant les facteurs humains, environnementaux et institutionnels (PPE, 2014).

2.2.2. La coordination multisectorielle comme levier clé

De nombreux auteurs (Alexander, 2013 ; Carrilho et al., 2017) mettent en avant l'importance de la coordination entre acteurs divers, notamment les gouvernements, les ONG, les collectivités locales et les bailleurs de fonds. Ces travaux montrent que la fragmentation institutionnelle, fréquente en Afrique centrale, limite l'efficacité des réponses aux catastrophes (Blaikie et Brookfield, 1987). La

recherche insiste sur la nécessité d'établir des mécanismes de coordination intégrés, avec des responsabilités clairement définies, pour optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

2.2.3. La planification stratégique dans la gestion des risques

La littérature (Wisner et al., 2004 ; UNDRR, 2019) considère que la planification stratégique est essentielle pour anticiper les risques et coordonner les interventions. Elle doit être basée sur une évaluation précise des vulnérabilités, intégrant des données climatiques et socio-économiques. La mise en place de plans d'action, comprenant des procédures d'alerte précoce et des protocoles d'intervention, est fortement recommandée pour réduire la vulnérabilité des collectivités.

2.2.4. Le rôle croissant des outils numériques dans la GIC

Les technologies numériques jouent aujourd'hui un rôle central dans la gestion intégrée des catastrophes. Selon (COMMIT, 2018 ; OCHA, 2020), l'utilisation de plateformes numériques, de systèmes d'alerte précoce et de cartographies interactives facilite la collecte et la diffusion immédiate des données, renforçant ainsi la capacité de réaction. La recherche souligne également que l'intégration de données climatiques dans des outils comme ClimGuard permet de relier la météo, l'environnement et les actions communautaires pour une meilleure anticipation des risques (Khan et al., 2020).

2.2.5. Défis, limites et perspectives d'avenir

Malgré ses avantages, la mise en œuvre de la GIC rencontre plusieurs obstacles (UNDRR, 2018). Parmi eux, la faiblesse des capacités institutionnelles, le manque de financements durables, et la fragmentation des acteurs constituent des entraves majeures, notamment en Afrique centrale (Davis, 2012). La littérature propose toutefois des solutions telles que l'investissement dans la formation, le renforcement de la gouvernance locale, et le développement de plateformes numériques régionalisées pour renforcer la résilience communautaire (Adger et al., 2005; IPCC, 2021).

2.3. Systèmes d'Alerte Précoce (SAP)

2.3.1. Fondements théoriques et éléments constitutifs des SAP

Un système d'alerte précoce efficace repose sur quatre éléments fondamentaux : la connaissance des risques, la surveillance et l'alerte, la communication et la diffusion, ainsi que la capacité de réponse (UNDRR, 2015). Selon la définition de l'UNDRR, un système « centré sur les personnes » doit assurer la réactivité des communautés vulnérables face aux risques. La littérature (Buchanan-Smith et al., 2014) insiste sur l'intégration de ces composantes dans une approche systémique afin de réduire la vulnérabilité face aux catastrophes naturelles.

2.3.2. Typologies et exemples de systèmes en Afrique

En Afrique, plusieurs initiatives illustrent l'application de ces principes, telles que le projet RANET (Radio and Internet for the Communication of Hydro-Meteorological and Climate-Related Information) ou le programme WASAC (West African Science Service Center) (Magne et al., 2019). Ces systèmes utilisent la radio, la téléphonie mobile et Internet pour diffuser des alertes en temps réel. Toutefois, leur efficacité est souvent limitée par des obstacles locaux, notamment la faible connectivité, l'insuffisance d'infrastructures, et le manque de sensibilisation communautaire (Nchter et al., 2017).

2.3.3. Cadre conceptuel et architecture des systèmes d'alerte

La revue de la littérature reconnaît que la conception d'un SAP doit répondre à une approche intégrée, structurée autour de quatre piliers : (i) la connaissance des risques à travers la cartographie et la collecte de données, (ii) la surveillance continue par capteurs et satellites, (iii) la diffusion adaptée à tous les segments populationnels, et (iv) la capacité de réponse rapide (Coppola, 2015; Grothmann et al., 2018). La pertinence de chaque élément dépend de la contextualisation locale, notamment en zones rurales.

Tableau 1: Cadre conceptuel et architecture des systèmes d'alerte Précoce

Composante	Description
Surveillance et Suivi	- Collecte de données météorologiques, hydrologiques, agricoles, etc. - Surveillance continue des indicateurs clés
Analyse et Prévision	- Analyse des données pour identifier les tendances et les risques - Modélisation et prévision des événements potentiels
Diffusion de l'Alerte	- Communication des alertes et des informations aux parties prenantes - Utilisation de canaux de diffusion adaptés (Emails, SMS, radio, ...)
Préparation et Réponse	- Planification des mesures d'urgence et d'adaptation - Coordination des actions des différents acteurs
Retour d'Expérience	- Évaluation de l'efficacité du système d'alerte précoce - Amélioration continue du système

2.3.4. Défis et limites dans le contexte africain

Malgré leur potentiel, les systèmes d'alerte en Afrique rencontrent plusieurs défis (UNISDR, 2019). La majorité des initiatives souffrent d'inadéquation aux réalités locales, notamment l'absence d'infrastructures de communication fiables, ainsi qu'un déficit de sensibilisation et de formation des populations (Geven et al., 2020). La lenteur dans la diffusion, la méfiance envers les sources d'alertes, et la faible participation communautaire compromettent leur efficacité (Kreibich et al., 2017).

2.3.5. Innovations et approches intégratives : le cas de ClimGuard

Face à ces limites, la littérature évoque l'émergence de solutions innovantes intégrant des technologies adaptées au contexte local. ClimGuard, par exemple, combine la collecte en temps réel via des satellites, stations, et modèles météorologiques, avec une plateforme de communication multisources (SMS, Radios Communautaires, Emails). Son approche intègre également la sensibilisation et la formation des acteurs locaux pour favoriser une réaction adaptée (Davoine et al., 2021). La plateforme vise à assurer la diffusion rapide d'alertes fiables, tout en impliquant activement les communautés et en renforçant leur Capacité de réaction (Carpenter et al., 2018).

2.3.6. Perspectives et besoins futurs

Plusieurs études soulignent la nécessité d'adapter ces systèmes aux réalités locales, notamment en développant des technologies peu coûteuses, résilientes, et accessibles même en zones à faible connectivité (Klopfen et al., 2019). La participation communautaire et la sensibilisation restent également cruciales pour renforcer la crédibilité et la compréhension des alertes (Lebel et al., 2020). Enfin, l'intégration de ces systèmes dans une gestion intégrée des risques, en lien avec la GIC, apparaît comme une voie stratégique pour accroître leur impact.

2.4. Études de l'existant

Plusieurs outils numériques similaires à ClimGuard ont été développés et expérimentés à travers le monde, illustrant leur potentiel d'adaptation aux contextes locaux. En Éthiopie, par exemple, le Climate Risk Assessment Tool (CRAT), élaboré selon la méthodologie du CRIDF, a permis aux autorités de mieux appréhender les vulnérabilités communautaires face aux risques climatiques (CRIDF, 2018). Ce système repose sur une évaluation systématique des impacts passés et futurs liés à la température, aux précipitations, aux sécheresses ou inondations, facilitant la définition d'interventions ciblées pour renforcer la résilience face au changement climatique (GIEC, 2021).

D'un autre côté, dans la région SADC, la plateforme DIMSUR offre une visualisation interactive des vulnérabilités urbaines via des cartes, permettant aux décideurs d'identifier les zones à risque et de planifier des interventions adaptées (SADC, 2019). En Afrique centrale, la plateforme DEWETRA tente d'expérimenter la gestion des risques naturels, soulignant l'importance d'adapter indicateurs, sources de données et mécanismes d'alerte aux spécificités régionales (CRIDF, 2020). Ces initiatives démontrent que la conception d'un outil régional comme ClimGuard est possible, à condition d'intégrer des indicateurs contextualisés et des sources de données diversifiées.

La littérature insiste également sur la nécessité d'une approche flexible, tenant compte des particularités socio-économiques, géographiques et culturelles locales (GIZ, 2020). Des méthodes telles que celles proposées par le CRIDF, notamment via son Vulnerability Sourcebook, offrent une

évaluation rigoureuse des vulnérabilités, fondamentaux pour la réussite de systèmes d’alerte adaptés (CRIDF, 2018).

Concernant la gestion des alertes précoce, plusieurs initiatives ont été mises en œuvre en Afrique. Des acteurs comme RANET ou WASAC ont amélioré la diffusion d’informations climatiques et de risques, mais leur efficacité demeure limitée dans les zones rurales, en raison de faibles connectivités et d’une infrastructure insuffisante (Hambleton et al., 2016). Ces limitations soulignent la nécessité pour ClimGuard d’intégrer un module d’alerte sophistiqué, basé sur des données météorologiques en temps réel (précipitations, vents, températures) et sur des seuils de vulnérabilité personnalisés selon les communautés (UNDRR, 2019).

La diffusion de ces alertes doit également s’appuyer sur des canaux variés : SMS, radios communautaires, applications mobiles ou encore relais via les acteurs locaux (Klopper, 2020). La communication se doit d’être simple, claire, multilingue et adaptée aux capacités des populations pour assurer leur compréhension et leur réaction (Lebel et al., 2020). La collaboration avec des leaders communautaires, des associations et des structures locales est essentielle pour renforcer la crédibilité et l’efficacité des dispositifs d’alerte.

Dans cette optique, l’outil RVAT développé par le CRIDF et basé sur la méthodologie du Vulnerability Sourcebook de la GIZ, constitue une référence dans l’évaluation intégrée des risques (CRIDF, 2019). Il permet non seulement de comprendre les impacts présents, mais aussi d’anticiper ceux liés à des aléas futurs tels que sécheresses ou inondations, facilitant ainsi la mise en œuvre d’interventions pertinentes (GIZ, 2021).

En conclusion, ces expériences nationales et régionales illustrent que la gestion proactive des risques climatiques doit reposer sur une surveillance intégrée, une communication efficace et une capacité de réponse renforcée. ClimGuard ambitionne d’incarner cette démarche en intégrant des fonctionnalités avancées d’évaluation de vulnérabilités, de récolte de données en temps réel et de réseaux de diffusion adaptés aux réalités africaines, notamment dans les zones rurales ou à faible connectivité. La clé de leur réussite réside dans leur capacité à s’adapter aux contextes locaux, à gagner la confiance des communautés et à mobiliser l’ensemble des acteurs concernés.

CHAPITRE 3 : OUTILS ET MÉTHODES

3.1. Zone d'étude

L'étude s'est concentrée sur une zone pilote située en Afrique Centrale, principalement au Cameroun. Cette région se caractérise par une forte diversité climatique, socio-économique et environnementale, permettant d'évaluer la robustesse, la transférabilité et l'adaptabilité de l'outil ClimGuard dans des contextes variés.

Au Cameroun, deux zones principales ont été sélectionnées :

- Les zones urbaines de Douala et Yaoundé, exposées aux risques d'inondations urbaines, caractérisées par leur forte densité de population et la complexité de la planification urbaine ;
- Les régions de l'Extrême-Nord, où la sécheresse prolongée et la pression sur les ressources naturelles sont particulièrement préoccupantes.

En parallèle, au Tchad, l'étude a focalisé sur les régions sahéliennes autour d'Abéché et Mongo, où la récurrence des sécheresses, la dégradation des ressources pastorales, et la vulnérabilité des populations nomades sont exacerbées par un accès limité aux services de base, la rareté de l'eau, et les conflits liés à la gestion des ressources.

Ces zones ont été choisies pour refléter une diversité de défis climatiques :

- Inondations et dégradation des infrastructures dans les zones urbaines densément peuplées ;
- Sécheresses prolongées, dégradation des écosystèmes, et compétition accrue pour l'eau et les ressources naturelles dans les régions semi-arides ;
- Vulnérabilités socio-économiques, notamment pour les populations pastoralistes et nomades, souvent marginalisées dans la gestion des risques.

L'approche territoriale centrée sur ces zones emblématiques permettra non seulement de tester l'efficacité de ClimGuard face à une gamme variée d'enjeux, mais aussi de recueillir des enseignements clés pour l'adaptation régionale de l'outil. Au-delà d'un simple focus local, cette démarche vise à élaborer un cadre méthodologique pouvant s'appliquer à d'autres contextes en Afrique Centrale, avec une capacité d'intégration des données régionales et locales.

En somme, cette sélection de zones témoigne d'une volonté de couvrir une large palette de défis climatiques, socio-économiques et environnementaux, afin de garantir la pertinence, la robustesse et la transférabilité de ClimGuard dans la région.

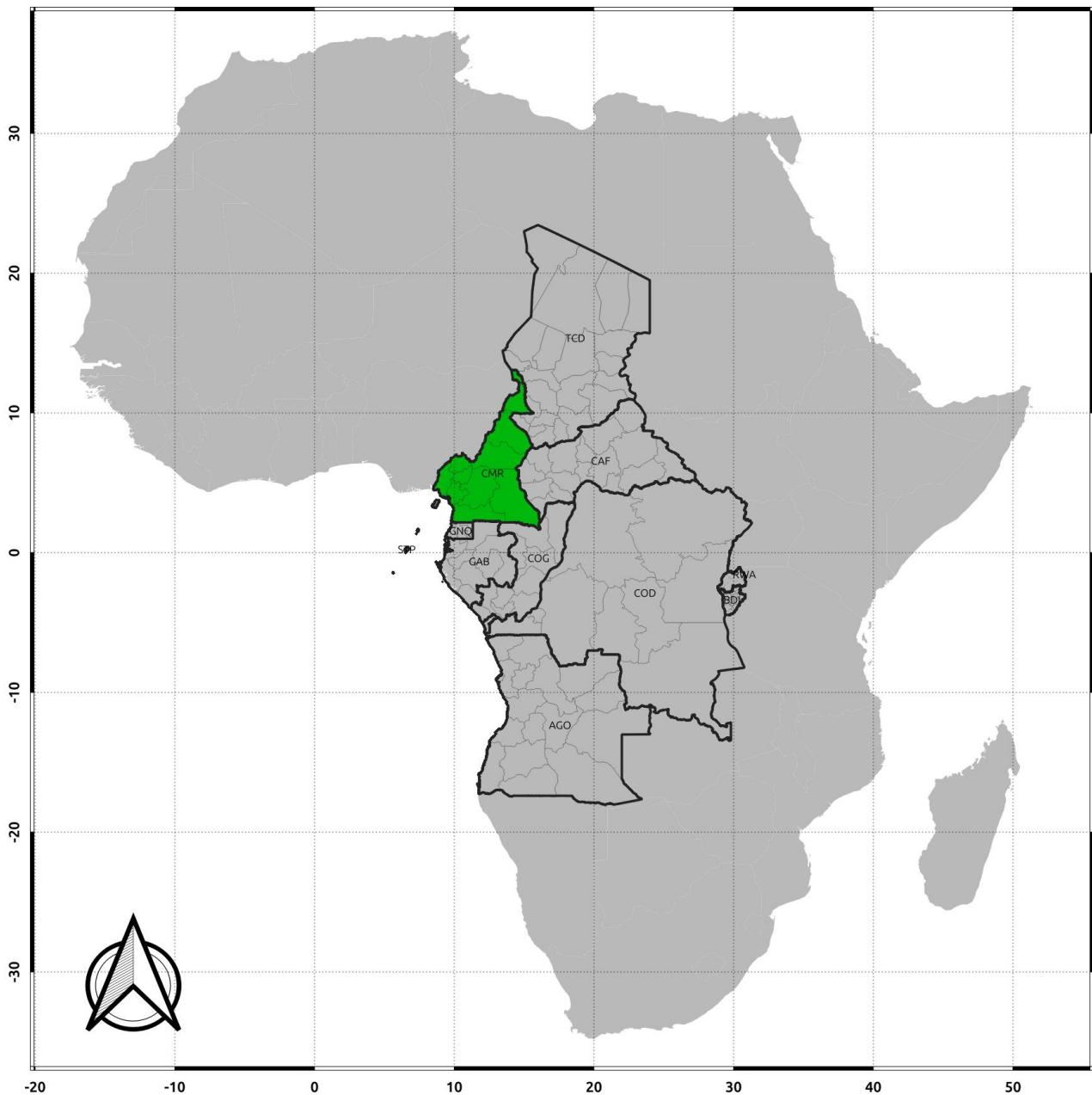


Figure 4 : Zone d'étude (Afrique Centrale)

En somme, cette étude dans tous les pays d'Afrique Centrale permettra de couvrir une gamme représentative de défis climatiques, allant des risques urbains aux vulnérabilités rurales et pastorales. Avec le Cameroun comme pays pilote, les enseignements tirés serviront à élargir et à renforcer l'impact de ClimGuard dans la prévention, la gestion et la réponse aux crises climatiques sur l'ensemble de la région.

3.2. Données Utilisées

La gestion des risques climatiques repose sur des données précises et fiables. Dans le cadre de ClimGuard, plusieurs sources de données ont été sélectionnées pour leur pertinence, leur accessibilité

et leur capacité à fournir des informations utiles pour l'analyse et la prise de décision. Ces données sont regroupées en deux catégories principales : les données climatiques et les données de prévisions.

3.2.1. Données Climatiques

Les données climatiques sont essentielles pour comprendre les tendances passées et actuelles du climat. Elles permettent d'analyser les variations climatiques, d'évaluer les impacts sur les écosystèmes et les sociétés, et d'anticiper les risques futurs. Les principales sources de données climatiques utilisées dans ClimGuard sont :

3.2.1.1. Stations

Les stations météorologiques fournissent des mesures in situ des différents paramètres climatiques, tels que la température, les précipitations, l'humidité, etc. Ces données sont importantes pour comprendre le climat à l'échelle locale.

3.2.1.2. ERA5

ERA5 est une réanalyse climatique produite par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). Elle fournit des données horaires sur une vaste gamme de variables climatiques, allant de la température de l'air aux précipitations, sur une grille de 31 km.

Caractéristiques :

- Couverture : Données disponibles depuis 1950 jusqu'à nos jours.
- Résolution : Grille de 31 km, permettant des analyses à une échelle locale.
- Accès : Les données sont accessibles gratuitement via le portail Copernicus Climate Data Store.

Utilisation dans ClimGuard : ERA5 est utilisé pour établir des bases de référence climatiques, analyser les tendances à long terme et évaluer les anomalies climatiques. Grâce à sa résolution fine, il permet d'identifier les variations climatiques spécifiques à certaines régions d'Afrique Centrale.

3.2.1.3. TAMSAT

Le système TAMSAT (Tropical Applications of Meteorology using SATellite data) fournit des estimations de précipitations à partir de données satellitaires. Ce système est particulièrement utile dans les régions où les stations météorologiques sont rares ou inaccessibles.

Caractéristiques :

- Couverture : Données disponibles principalement pour l'Afrique subsaharienne.
- Résolution : Grille de 4 km, offrant une bonne précision pour les analyses régionales.

-
- Accès : Les données TAMSAT sont disponibles via le site web de TAMSAT et d'autres plateformes de données climatiques.

Utilisation dans ClimGuard : TAMSAT est utilisé pour surveiller les précipitations en temps réel, ce qui est crucial pour la gestion des risques d'inondation et de sécheresse. Les utilisateurs peuvent ainsi obtenir des informations actualisées sur les conditions météorologiques locales.

3.2.1.4. ARC2

ARC2 (African Rainfall Climatology) est une base de données climatologique qui fournit des estimations de précipitations basées sur des données de télédétection et des stations météorologiques.

Caractéristiques :

- Couverture : Données disponibles pour l'Afrique, avec un accent particulier sur les régions rurales.
- Résolution : Grille de 10 km, permettant des analyses détaillées.
- Accès : Les données sont accessibles via le site web de l'Institut de recherche pour le développement (IRD).

Utilisation dans ClimGuard : ARC2 est utilisé pour compléter les données de précipitations fournies par d'autres sources, permettant ainsi d'obtenir une image plus complète des régimes de précipitations en Afrique Centrale.

3.2.1.5. CHIRPS

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) est une autre source de données de précipitations qui combine des données satellitaires et des observations de stations pour générer des estimations précises.

Caractéristiques :

- Couverture : Données disponibles pour le monde entier, avec une attention particulière pour les régions à risque climatique.
- Résolution : Grille de 5 km, offrant une précision fine.
- Accès : Les données CHIRPS sont accessibles gratuitement via le site web du Climate Hazards Group.

Utilisation dans ClimGuard : CHIRPS est utilisé pour fournir des estimations de précipitations fiables, essentielles pour les analyses de risque et la planification des interventions d'urgence.

3.2.2. Données de Prévisions

Les données de prévisions sont cruciales pour anticiper les événements climatiques futurs et prendre des mesures proactives. Dans ClimGuard, plusieurs modèles de prévision sont intégrés pour fournir des informations sur les conditions météorologiques à venir. Les principales sources de données de prévisions utilisées sont :

3.2.2.1. GFS/GEFS

Le modèle GFS (Global Forecast System) est un modèle de prévision numérique de la météo développé par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis. Le GEFS (Global Ensemble Forecast System) est une version ensemble du GFS, fournissant plusieurs scénarios de prévision.

Caractéristiques :

- Couverture : Données disponibles à l'échelle mondiale.
- Résolution : GFS offre une résolution de 13 km, tandis que le GEFS utilise une résolution de 25 km.
- Accès : Les données GFS et GEFS sont accessibles via le site web de la NOAA et d'autres plateformes de données météorologiques.

Utilisation dans ClimGuard : GFS et GEFS sont utilisés pour fournir des prévisions à court terme (jusqu'à 16 jours) sur des variables telles que la température, les précipitations et la vitesse du vent. Ces prévisions aident les utilisateurs à anticiper les événements climatiques extrêmes, tels que les tempêtes et les vagues de chaleur.



Figure 5: Logo représentatif de la NOAA

3.2.2.2. Copernicus C3S Daily Forecast

Le Copernicus Climate Change Service (C3S) fournit des prévisions climatiques basées sur plusieurs modèles de prévision, y compris ceux de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), DWD (Deutscher Wetterdienst), JMA (Japan Meteorological Agency), et ICON (ICOsaHedral Nonhydrostatic).

Caractéristiques :

- Couverture : Données disponibles à l'échelle mondiale.
- Résolution : Varie selon le modèle, avec des résolutions allant de 9 km à 25 km.
- Accès : Les données sont accessibles via le portail Copernicus Climate Data Store.

Utilisation dans ClimGuard : Les prévisions quotidiennes fournies par C3S sont intégrées dans ClimGuard pour offrir des informations à jour sur les conditions climatiques. Cela permet aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées concernant la gestion des risques et la planification des interventions.

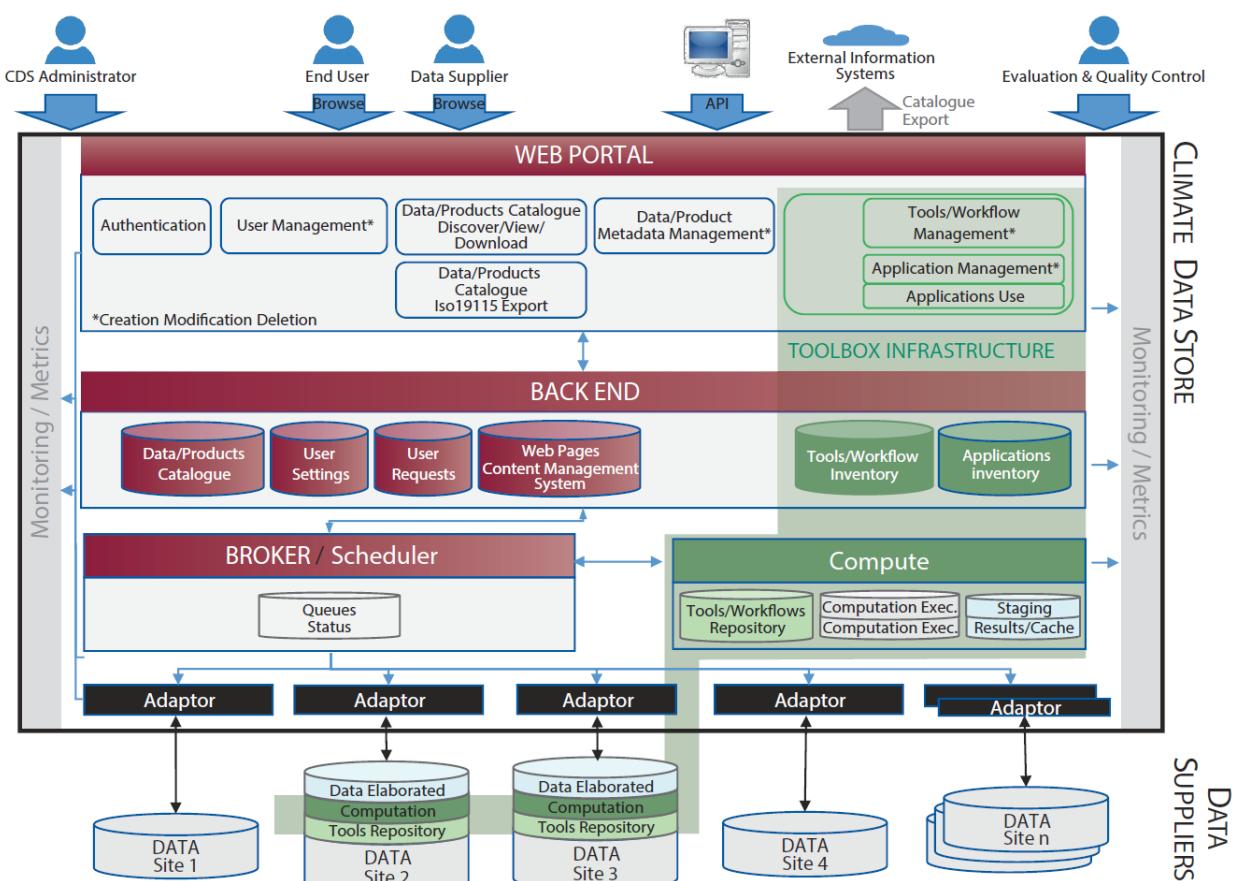


Figure 6: Infrastructure du CDS

3.2.2.3. Modèle WRF (Weather Research and Forecasting)

Le modèle WRF est un système de modélisation numérique de la météo qui a été conçu pour répondre à un large éventail d'applications, allant de la recherche académique à la prévision opérationnelle. Il est particulièrement apprécié pour sa flexibilité et sa capacité à fournir des prévisions à haute résolution.

Caractéristiques du Modèle WRF :

- **Flexibilité** : WRF peut être utilisé pour des prévisions à court terme, des études climatiques, et des simulations de phénomènes météorologiques extrêmes. Il est adapté à différents types de configurations, y compris les modèles à domaine unique et à domaines multiples.
- **Résolution** : Le modèle WRF permet des résolutions spatiales très fines, allant jusqu'à 1 km, ce qui est essentiel pour capturer les détails des phénomènes météorologiques locaux, tels que les orages ou les microclimats.
- **Données d'entrée** : WRF utilise diverses sources de données d'entrée, y compris les données de réanalyse (comme celles fournies par ERA5), les observations de stations météorologiques, et les données satellitaires. Cela permet d'améliorer la précision des prévisions.
- **Modèles physiques** : Le modèle WRF intègre plusieurs schémas physiques pour simuler les processus atmosphériques, tels que la convection, la microphysique des nuages, et les échanges de chaleur et d'humidité entre la surface et l'atmosphère. Cela permet de mieux représenter les interactions complexes qui se produisent dans l'atmosphère.

Dans le cadre de ClimGuard, le modèle WRF est utilisé pour fournir des prévisions météorologiques détaillées et localisées. Voici quelques applications spécifiques :

- **Prévisions à haute résolution** : Grâce à sa capacité à fonctionner à des résolutions fines, WRF permet de générer des prévisions météorologiques détaillées pour des zones spécifiques en Afrique Centrale. Cela est particulièrement utile pour les régions vulnérables aux événements climatiques extrêmes.
- **Analyse des événements climatiques extrêmes** : WRF est capable de simuler des événements météorologiques extrêmes, tels que les tempêtes, les vagues de chaleur et les inondations. Ces simulations aident à anticiper les impacts potentiels sur les communautés locales et à planifier des mesures d'adaptation.
- **Intégration avec d'autres données** : Les prévisions générées par WRF peuvent être combinées avec d'autres sources de données, telles que celles fournies par GFS, C3S, et

d'autres modèles de prévision. Cela permet d'améliorer la robustesse des analyses et des recommandations fournies aux utilisateurs de ClimGuard.

- **Outils de visualisation** : WRF génère des sorties qui peuvent être visualisées à l'aide d'outils géospatiaux, permettant aux utilisateurs de visualiser les prévisions de manière intuitive. Cela inclut des cartes de température, de précipitations, et d'autres variables météorologiques, facilitant ainsi la compréhension des impacts potentiels.

Avantages du modèle WRF:

- **Précision** : La haute résolution et les schémas physiques avancés permettent d'obtenir des prévisions plus précises, particulièrement pour les phénomènes météorologiques locaux.
- **Adaptabilité** : WRF peut être configuré pour répondre à des besoins spécifiques, ce qui le rend adapté à une variété d'applications, y compris la recherche et la prévision opérationnelle.

Limites du modèle WRF :

- **Complexité** : La mise en place et la configuration de WRF peuvent être complexes, nécessitant des compétences techniques avancées.
- **Besoins en ressources** : Les simulations à haute résolution demandent des ressources informatiques importantes, ce qui peut limiter son utilisation dans certains contextes.

Le modèle WRF est un outil puissant pour la prévision météorologique et l'analyse des événements climatiques en Afrique Centrale. En intégrant WRF dans ClimGuard, les utilisateurs bénéficient de prévisions détaillées et précises, essentielles pour la gestion des risques climatiques. Ce modèle, associé à d'autres sources de données, renforce la capacité de ClimGuard à fournir des informations pertinentes et à aider les communautés à s'adapter aux défis climatiques croissants.

Tableau 2: Synthèse des données utilisées

Catégorie	Source de Données	Caractéristiques	Utilisation dans ClimGuard
Données Climatiques	ERA5	<ul style="list-style-type: none"> - Réanalyse climatique - Couverture : 1950 à aujourd'hui - Résolution : 31 km 	<ul style="list-style-type: none"> - Établir des bases de référence climatiques - Analyser les tendances à long terme
	TAMSAT	<ul style="list-style-type: none"> - Estimations de précipitations par satellite - Couverture : Afrique subsaharienne - Résolution : 4 km 	<ul style="list-style-type: none"> - Surveiller les précipitations en temps réel - Gestion des risques d'inondation et de sécheresse
	ARC2	<ul style="list-style-type: none"> - Base de données climatologique - Couverture : Afrique - Résolution : 10 km 	<ul style="list-style-type: none"> - Compléter les données de précipitations - Analyser les régimes de précipitations
	CHIRPS	<ul style="list-style-type: none"> - Estimations de précipitations combinant satellite et stations - Couverture : mondiale - Résolution : 5 km 	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir des estimations fiables de précipitations - Analyse de risque et planification d'urgence
	Données de Stations	Observations météorologiques	<ul style="list-style-type: none"> - Établir des bases de référence climatiques - Analyser les tendances à long terme
Données de Prévisions	GFS/GEFS	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de prévision numérique - Couverture : mondiale - Résolution : 13 km (GFS), 25 km (GEFS) 	<ul style="list-style-type: none"> - Prévisions à court terme (jusqu'à 16 jours) - Anticipation des événements climatiques extrêmes
	Copernicus C3S Daily Forecast	<ul style="list-style-type: none"> - Prévisions basées sur plusieurs modèles (ECMWF, DWD, JMA, ICON) - Couverture : mondiale - Résolution : 9-25 km 	<ul style="list-style-type: none"> - Informations à jour sur les conditions climatiques - Prise de décision éclairée
	Autres Modèles	<ul style="list-style-type: none"> - ECMWF, DWD, JMA, ICON - Couverture : mondiale avec spécificités régionales - Résolution variable 	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir des prévisions complémentaires - Aider à la planification et à la gestion des risques

3.3. Conception du Système

ClimGuard est une solution innovante dédiée à l'analyse et à la gestion des risques liés au climat, aux événements météorologiques extrêmes et aux changements climatiques. Elle permet d'anticiper, de surveiller et de répondre efficacement aux impacts météorologiques et climatiques sur les communautés, les infrastructures et les ressources naturelles. Grâce à l'intégration d'un Système d'Alerte Précoce (SAP) et à l'exploitation des prévisions météorologiques et climatiques, cet outil favorise une approche proactive pour renforcer la résilience face aux aléas climatiques et minimiser les conséquences sur l'environnement et les activités humaines.

ClimGuard a été conçu comme une plateforme numérique interactive, intégrant une interface web conviviale, une base de données géospatiale robuste et des modules d'analyse avancés. L'objectif principal de cette conception est de fournir un outil accessible et efficace pour la gestion des risques climatiques en Afrique Centrale. En adoptant des technologies open-source, nous garantissons la durabilité et la flexibilité du système, tout en permettant une personnalisation en fonction des besoins spécifiques des utilisateurs. L'architecture de ClimGuard repose sur plusieurs composants clés, chacun jouant un rôle essentiel dans le fonctionnement global de la plateforme.

3.3.1. Conception Backend : Django

Le backend de ClimGuard est construit sur le framework Django, qui est reconnu pour sa robustesse et sa sécurité. Django permet de développer des applications web de manière rapide et efficace, grâce à sa structure modulaire et à ses fonctionnalités intégrées.

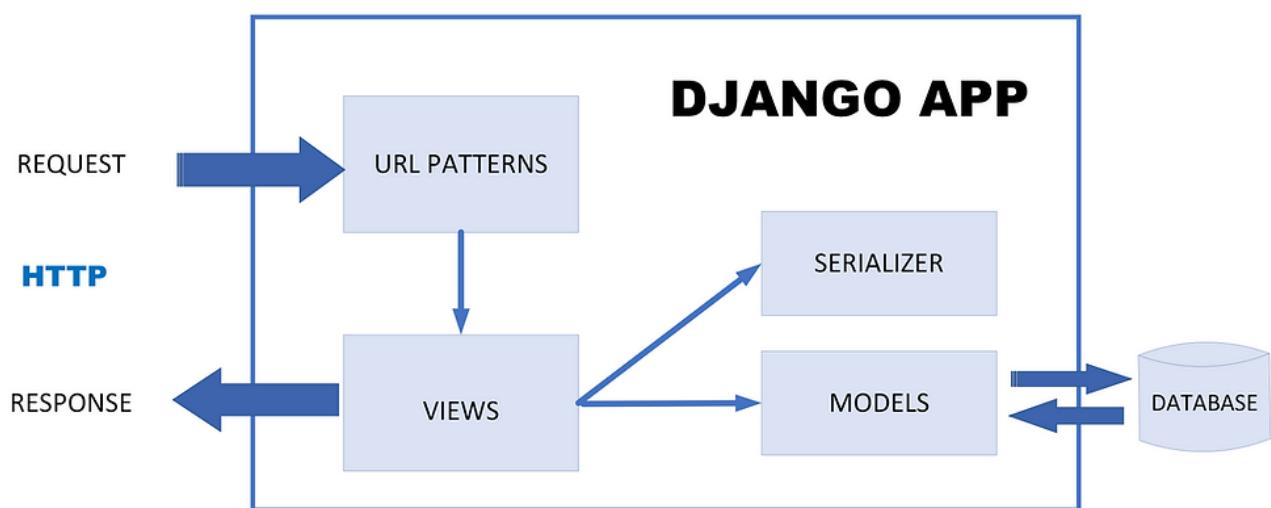


Figure 7: Architecture Générale d'une Application Django

3.3.1.1. Architecture du Backend

Le backend est responsable de la gestion de la logique serveur, du traitement des données et de la communication avec la base de données. Voici les principaux aspects de la conception backend :

- Langage Python : Python a été choisi pour sa simplicité et sa lisibilité, facilitant ainsi le développement et la maintenance du code. De plus, Python dispose d'une vaste bibliothèque d'outils pour l'analyse de données, ce qui est essentiel pour les fonctionnalités de ClimGuard.
- Bibliothèques intégrées :
 - **Pandas** : Utilisé pour la manipulation et l'analyse des données. Pandas permet de gérer des ensembles de données complexes, facilitant le nettoyage, la transformation et l'analyse des données climatiques.
 - **Xarray** : Cette bibliothèque est particulièrement utile pour le traitement des données multidimensionnelles, comme les données climatiques qui varient dans le temps et l'espace. Xarray permet d'effectuer des opérations analytiques avancées sur ces données.
 - **Geopandas** : Permet la manipulation de données géospatiales (shapefiles, GeoJSON, etc.) et l'intégration avec Pandas pour l'analyse spatiale.
 - **Folium** : Utilisé pour la visualisation interactive de données géographiques sur des cartes web, avec la possibilité d'ajouter des couches, des marqueurs et des contrôles personnalisés.
 - **Matplotlib** : Sert à la génération de graphiques et de visualisations, notamment pour créer des images de couches de vigilance à superposer sur les cartes.
 - **NetCDF4** : Permet de lire et manipuler des fichiers NetCDF, format couramment utilisé pour les données climatiques multidimensionnelles.
 - **Numpy** : Fournit des structures de données et des fonctions pour le calcul scientifique et la manipulation efficace de tableaux numériques.
 - **Django** : Framework web utilisé pour la gestion des requêtes HTTP, des sessions utilisateur, et l'intégration avec la base de données (modèles comme Country).
 - **Celery** : (optionnel) Utilisé pour la gestion de tâches asynchrones, par exemple pour le prétraitement ou la génération de données lourdes en arrière-plan.
 - **Base64, io** : Utilisés pour l'encodage et la manipulation d'images en mémoire, notamment lors de la génération de couches d'images à intégrer dans Folium.
 - **Logging** : Permet la gestion des logs pour le suivi et le débogage des traitements.
 - **Django staticfiles** : Pour la gestion et la recherche des fichiers statiques (shapefiles, images, etc.) dans le projet.

- Gestion des utilisateurs : Django intègre un système d'authentification robuste, permettant de gérer les utilisateurs et leurs permissions. Cela garantit que seules les personnes autorisées peuvent accéder à certaines fonctionnalités de la plateforme, renforçant ainsi la sécurité des données.
- API RESTful : ClimGuard utilise une architecture API RESTful pour faciliter la communication entre le frontend et le backend. Cela permet au frontend de récupérer dynamiquement les données nécessaires sans recharger la page, offrant ainsi une expérience utilisateur fluide.



Figure 8: Django + API RESTful

3.3.1.2. Sécurité et Performance

La sécurité est une priorité dans la conception du backend. Django offre plusieurs mécanismes de sécurité intégrés, tels que la protection contre les attaques CSRF (Cross-Site Request Forgery) et XSS (Cross-Site Scripting). De plus, des pratiques de codage sécurisées sont appliquées, telles que la validation des entrées des utilisateurs et le chiffrement des mots de passe.

En termes de performance, le backend est optimisé pour gérer un volume élevé de requêtes. Cela est réalisé grâce à l'utilisation de caches pour stocker temporairement les données fréquemment demandées, réduisant ainsi le temps de réponse et la charge sur la base de données.

3.3.2. Conception Frontend : Dash et HTMX

Le frontend de ClimGuard est conçu avec Dash, une bibliothèque Python qui facilite la création d'applications web interactives. Dash permet d'intégrer des visualisations dynamiques tout en

maintenant une structure de code simple et claire. En intégrant HTMX, une bibliothèque JavaScript légère, nous améliorons l'interactivité et la réactivité de l'interface utilisateur.

3.3.2.1. Interface Utilisateur

L'interface utilisateur de ClimGuard a été développée en tenant compte des besoins des utilisateurs locaux. Elle est conçue pour être intuitive, permettant aux utilisateurs de naviguer facilement à travers les différentes fonctionnalités de la plateforme.

- **Options de langue** : Pour répondre à la diversité linguistique de la région, l'interface offre des options en français, anglais, espagnol et portugais. Cela permet de s'assurer que les utilisateurs peuvent interagir avec l'outil dans leur langue maternelle, augmentant ainsi l'accessibilité et l'adoption de l'outil.
- **Filtres personnalisés** : Les utilisateurs peuvent appliquer des filtres sur les données en fonction de zones géographiques, d'indicateurs spécifiques (comme la température, les précipitations, etc.) et de périodes. Cela permet une analyse ciblée et pertinente des données climatiques.
- **Navigation intuitive** : La navigation est conçue pour être fluide, avec une barre de menu claire et des liens directs vers les différentes sections de la plateforme. Les utilisateurs peuvent facilement accéder aux rapports, aux visualisations et aux outils d'analyse.

3.3.2.2. Interactivité avec HTMX

HTMX permet d'ajouter facilement des interactions dynamiques sans avoir besoin de recharger l'intégralité de la page. Cela améliore considérablement l'expérience utilisateur en rendant l'application plus réactive.

Changement dynamique des données : Grâce à HTMX, les utilisateurs peuvent charger des sections de données spécifiques en fonction de leurs choix de filtres. Par exemple, lorsqu'un utilisateur sélectionne une zone géographique, les données correspondantes peuvent être chargées et affichées sans recharger la page entière.

Formulaires interactifs : Les formulaires pour soumettre des recherches ou des rapports peuvent être mis à jour dynamiquement avec HTMX, permettant aux utilisateurs de voir immédiatement les résultats de leurs soumissions.



Figure 9: Logo HTMX

3.3.2.3. Cartographie Interactive avec Folium

L'un des éléments clés du frontend est la cartographie interactive, développée avec LeafletJS. Cette bibliothèque permet de créer des cartes dynamiques et réactives qui affichent des données géospatiales en temps réel.

Pour la visualisation des données géospatiales, ClimGuard intègre Folium, une bibliothèque Python qui facilite la création de cartes interactives basées sur Leaflet.js.

- Visualisation des données : Folium permet d'afficher des données géospatiales sur des cartes interactives, offrant aux utilisateurs la possibilité de visualiser les impacts climatiques sur des zones spécifiques. Les utilisateurs peuvent interagir avec la carte, zoomer et cliquer sur des régions pour obtenir des informations détaillées.
- Couches de données : Les utilisateurs peuvent superposer différentes couches d'information sur la carte, telles que les alertes de catastrophe, les tendances climatiques et les vulnérabilités spécifiques. Cela permet une analyse approfondie et contextuelle des données.
- Personnalisation des cartes : Folium permet également de personnaliser les cartes avec des marqueurs, des polygones et d'autres éléments visuels, rendant les visualisations plus informatives et engageantes.

3.3.2.4. Ergonomie et Design

L'ergonomie de l'interface est améliorée grâce à l'utilisation de Tailwind CSS, un CDN qui permet de styliser rapidement les éléments de l'interface. Cela garantit une apparence moderne et professionnelle, tout en étant responsive pour une utilisation sur différents appareils (ordinateurs, tablettes, smartphones)



Figure 10: Logo du CDN Tailwind

3.3.3. Base de données (MySQL)

La base de données de ClimGuard est construite sur MySQL, un système de gestion de base de données relationnelle largement utilisé, connu pour sa fiabilité et sa performance.

3.3.3.1. Structure de la Base de Données

La base de données est conçue pour stocker diverses informations pertinentes pour la gestion des risques climatiques, notamment :

- **Données géospatiales** : Grâce à l'extension PostGIS, MySQL gère efficacement les données géoréférencées. Cela permet d'effectuer des requêtes spatiales complexes, essentielles pour l'analyse des impacts climatiques sur différentes zones géographiques.
- **Données climatiques** : Les données climatiques historiques et en temps réel sont stockées dans des tables spécifiques, permettant une analyse approfondie des tendances et des anomalies.
- **Informations sur les utilisateurs** : Les informations concernant les utilisateurs et leurs permissions sont également stockées, garantissant une gestion sécurisée des accès.

3.3.3.2. Optimisation des Performances

Pour assurer des performances optimales, plusieurs stratégies sont mises en œuvre :

- **Indexation** : Des index sont créés sur les colonnes fréquemment interrogées pour accélérer les requêtes. Cela est particulièrement important pour les données géospatiales, où les requêtes peuvent être complexes et nécessiter un traitement intensif.
- **Sauvegardes régulières** : Des sauvegardes régulières de la base de données sont effectuées pour garantir la sécurité des données. Cela permet de restaurer rapidement les informations en cas de défaillance du système.
- **Scalabilité** : La structure de la base de données est conçue pour être scalable, permettant d'ajouter facilement de nouvelles données et fonctionnalités à mesure que les besoins des utilisateurs évoluent.

3.3.4. Intégration et Tests

L'intégration de tous ces composants (backend, frontend et base de données) est cruciale pour le bon fonctionnement de ClimGuard. Des tests rigoureux sont effectués à chaque étape du développement pour s'assurer que chaque module fonctionne correctement et que l'interface utilisateur est fluide.

Des tests unitaires sont réalisés pour chaque fonction du backend et du frontend, garantissant que chaque composant fonctionne comme prévu. Des tests d'intégration sont également effectués pour vérifier que les différentes parties de l'application interagissent correctement.

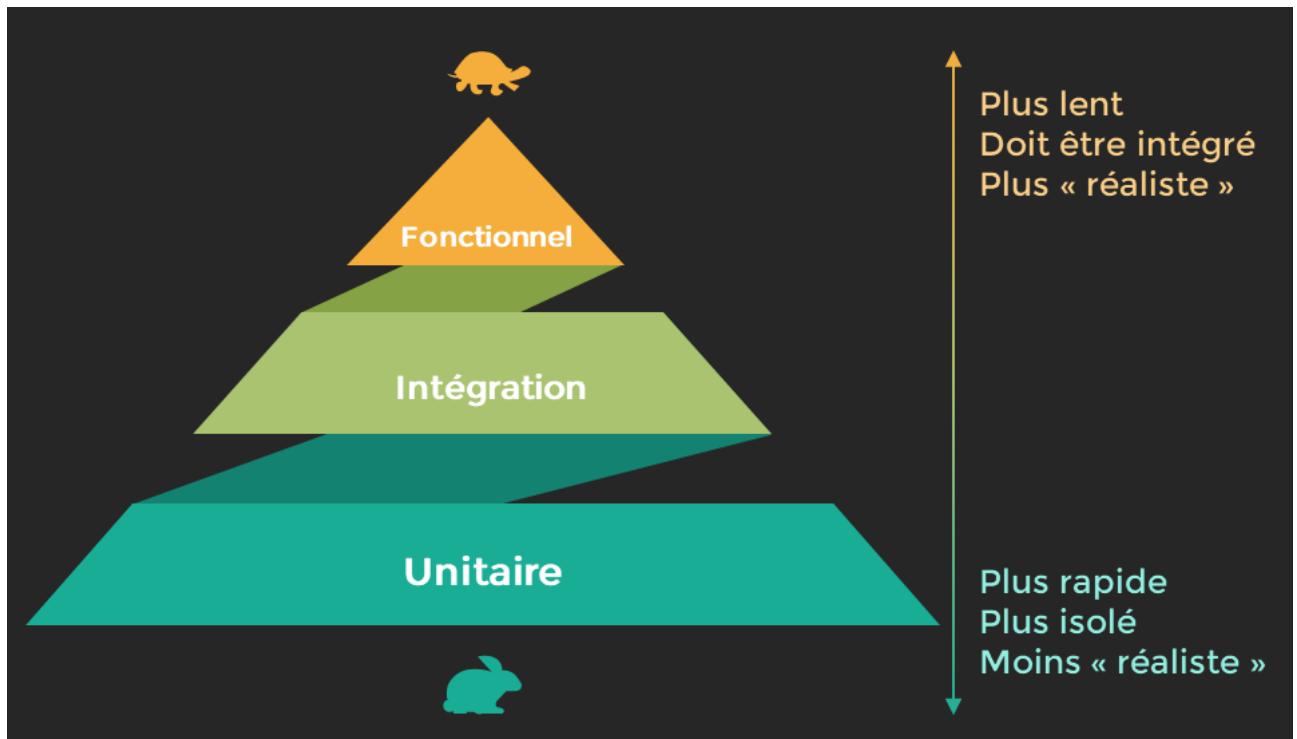


Figure 11: La pyramide de Tests selon Mike Cohn

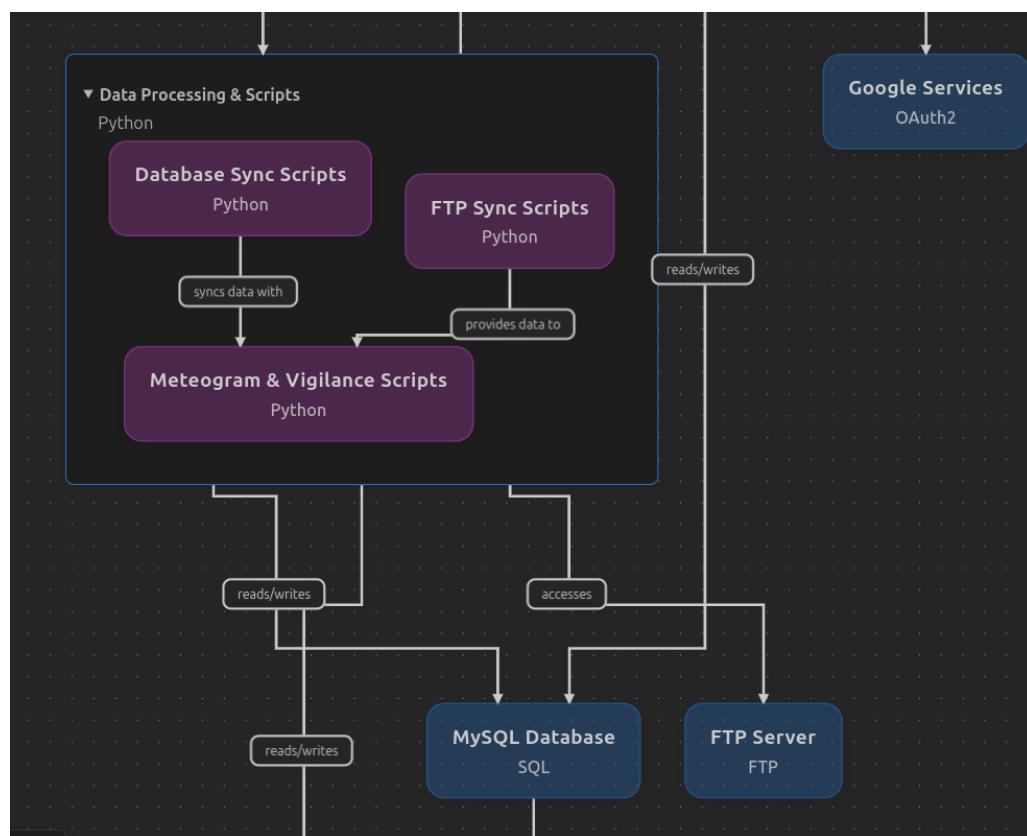
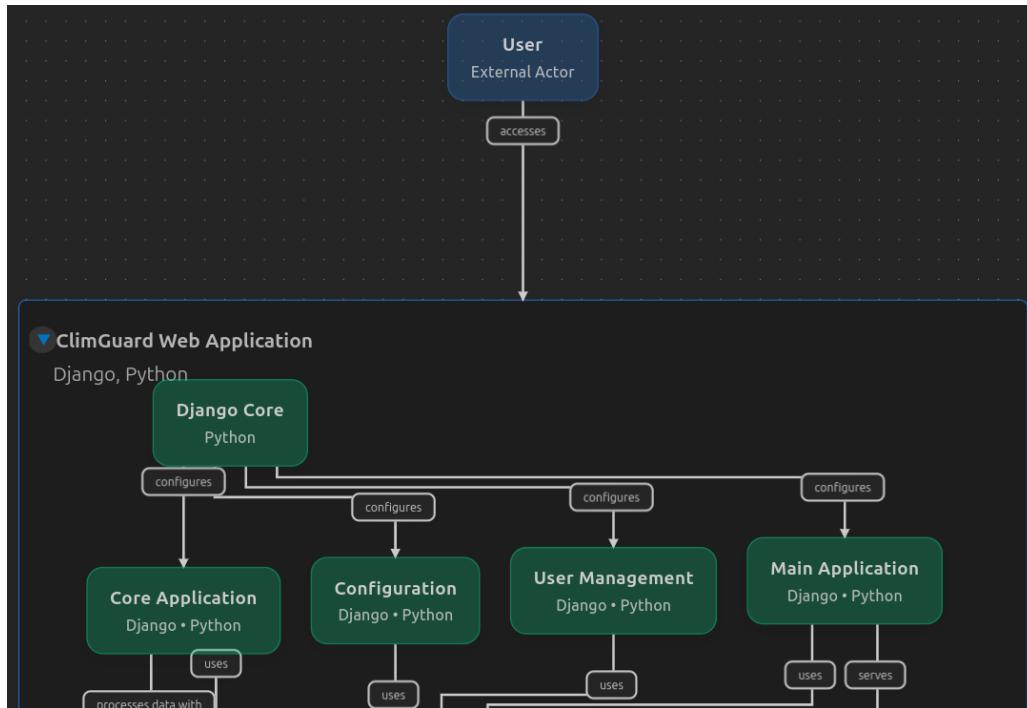
La pyramide de tests selon Mike Cohn est une façon d'organiser et de hiérarchiser les différents types de tests pour un logiciel. L'idée est de visualiser une pyramide avec trois niveaux, du plus large au plus petit :

1. Tests unitaires (le fond de la pyramide) : Ce sont des tests très rapides, qui vérifient que chaque petite partie du code (fonction, méthode, classe) fonctionne correctement. Il y en a beaucoup, et ils sont faciles à faire.
2. Tests d'intégration (au milieu de la pyramide) : Ces tests vérifient que plusieurs parties du code fonctionnent bien ensemble. Ils sont moins nombreux que les tests unitaires.
3. Tests d'acceptation ou tests de système (le sommet de la pyramide) : Ce sont des tests plus complexes qui vérifient que tout le logiciel fonctionne comme il faut dans des situations proches de l'utilisation réelle. Ils sont rares et plus longs à réaliser.

En résumé :

- La majorité des tests doivent être unitaires (fond de la pyramide).
- Un peu moins d'intégration.
- Très peu de tests d'acceptation.

Avant le lancement final, des sessions de test avec des utilisateurs potentiels sont organisées pour recueillir des retours sur l'expérience utilisateur. Cela permet d'identifier les points à améliorer et d'ajuster l'interface en fonction des besoins réels des utilisateurs.



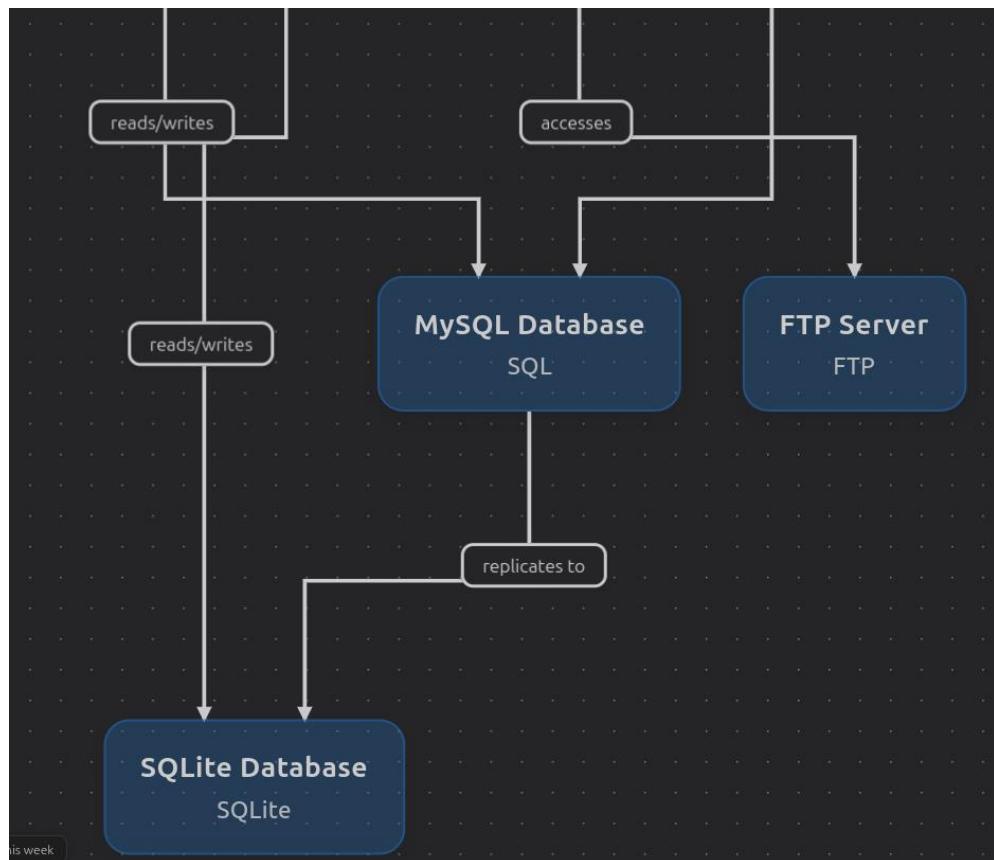


Figure 12: Diagramme UML

3.4. Méthodologie d'Évaluation de la Vulnérabilité

La méthodologie adoptée repose sur une combinaison d'approches quantitatives et qualitatives. L'indice de vulnérabilité climatique (IVC) a été calculé à partir d'une grille d'indicateurs pondérés selon la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Les dimensions évaluées incluent :

- Risques : Identification des risques climatiques
- Exposition : fréquence et intensité des aléas climatiques ;
- Sensibilité : niveau de pauvreté, densité de population, dépendance aux ressources naturelles ;
- Capacité d'adaptation : accès aux services, infrastructures, niveau d'éducation. Chaque indicateur est spatialement représenté sous forme de carte raster ou vectorielle. Un score global de vulnérabilité est attribué à chaque zone d'analyse (commune, arrondissement).

Tableau 3: Évaluation de la Vulnérabilité Climatique

Composante	Description	Acteurs clés / Indicateurs
Risque Climatique	- Probabilité et intensité des aléas climatiques	

Exposition	- Variabilité climatique - Événements extrêmes (sécheresses, inondations, etc.)	- Météo, Autorités - Données OCHA, projections GIEC
Sensibilité	- Dépendance agricole - Accès aux ressources (eau, énergie, santé)	- Agriculteurs, ONG, Gouvernement - Indicateurs : Rendements, Diversification, Accès à l'eau, à l'énergie, aux soins de santé
Capacité d'Adaptation	- Capacité à faire face et à s'adapter aux impacts	
Infrastructures	- Stockage d'eau - Systèmes d'irrigation - Infrastructures de transport et de communication	- Actions : Modernisation, Augmentation - Indicateurs : Volume, Fiabilité, Couverture, Accessibilité
SAP	- Systèmes d'Alerte Précoce - Planification d'urgence et de réponse	- Actions : Planification, Formation, Exercices - Indicateurs : Couverture, Fiabilité, Réactivité
Résilience	- Capacité d'absorption et de récupération - Diversification des moyens de subsistance	- Actions : Diversification, Renforcement - Indicateurs : Absorption, Réponse, Récupération

Une fois que nous avons déterminé les poids des critères de niveau 1, il est essentiel de vérifier la fiabilité du résultat. La méthode AHP propose de calculer un index de cohérence afin d'évaluer la cohérence des jugements établis pour chaque critère. Il est possible qu'il y ait une incohérence potentielle si un critère est jugé de manière incohérente par rapport à un ou plusieurs autres critères. L'index de cohérence nous permet de détecter des défauts importants dans notre calcul et notre évaluation, garantissant ainsi la robustesse et la pertinence de notre processus de décision. Le ratio de cohérence pourra mettre en avant la cohérence de notre résultat. Il peut s'exprimer ainsi :

$$RC = IC / RI$$

Avec :

RI, Indice aléatoire élaboré par Saaty : Il indique le niveau de fiabilité d'une même évaluation effectuée à plusieurs reprises.

IC, Index de Cohérence : il représente le niveau de fiabilité de notre jugement (détail du calcul ci-dessous).

RC, Ratio de Cohérence : En divisant IC par RI, on compare donc notre fiabilité réelle avec une fiabilité théorique. Au plus ce ratio est proche de 0, au plus notre évaluation est cohérente. Saaty donne une valeur au plus de 10% d'erreur pour pouvoir accepter l'évaluation. L'index de cohérence se calcule de la manière suivante :

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

λ_{\max} : Valeur propre maximale.

n : taille de la matrice.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Ce chapitre présente une synthèse analytique des résultats obtenus lors de la mise en œuvre de l'outil ClimGuard dans la zone pilote en Afrique Centrale. Il examine la performance technique, la pertinence opérationnelle, ainsi que l'impact potentiel de l'outil sur la gestion des risques climatiques. La discussion s'appuie sur des données quantitatives et qualitatives recueillies lors des tests, et évaluations.

4.1. Présentation de l'Interface Système

4.1.1. Page d'Accueil



Figure 13: Page d'accueil ClimGuard

4.1.2. Pages de Connexion & Inscription

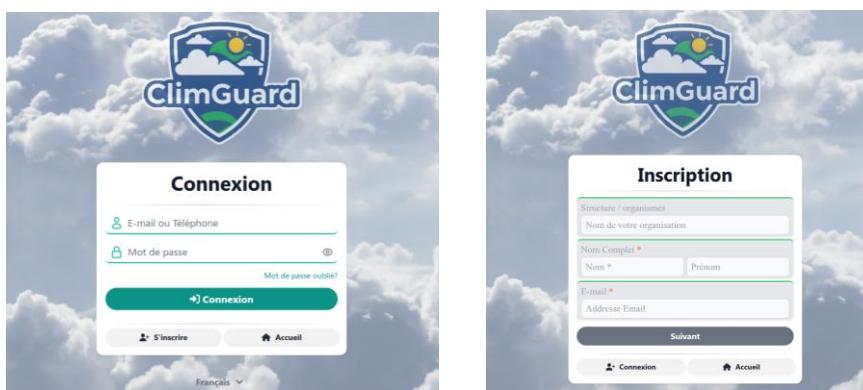


Figure 14: Page de Connexion et Inscription

4.1.3. Gestion des Comptes Utilisateurs

The screenshot shows the ClimGuard user management interface. On the left is a sidebar with navigation links: Accueil, Tableau de bord, Outil de Vulnérabilité, Catastrophes, Prévisions Météo, Alertes Météo, Données, Paramètres, and Utilisateurs (selected). The main area is titled 'Utilisateurs' and contains tabs for Administrateurs, Points Focaux, Éditeurs, and Utilisateurs (selected). A search bar and a 'Recherche...' button are at the top right. Below are five user profiles in a grid:

- DASSI TENE Roméo-Ledoux**: Administrateur, Nom d'utilisateur: @romeo_ledoux, Dernière Connexion: 09/07/2025 04:11:03, Role: Administrateur, Contacts: romeo_ledoux@yahoo.com, Profil button.
- KAMSU TAMO Pierre Honoré**: Administrateur, Nom d'utilisateur: @tamopierre, Dernière Connexion: 09/07/2025 18:11:22, Role: Administrateur, Contacts: tamepierre@gmail.com, Profil button.
- Egono Tatiana**: Utilisateur, Nom d'utilisateur: @egonoyvettetatiana, Dernière Connexion: 27/06/2025 12:01:31, Role: Utilisateur, Contacts: egonoyvettetatiana@gmail.com, Profil button.
- TAGUEUMFO KAMMALAC Jores**: Administrateur, Nom d'utilisateur: @taguemfj, Dernière Connexion: 27/06/2025 09:06:48, Role: Administrateur, Contacts: taguemfj@yahoo.fr, Profil button.
- NGUILAMBOUHE Christian**: Administrateur, Nom d'utilisateur: @nguilambouhe, Dernière Connexion: 24/06/2025 15:39:38, Role: Administrateur, Contacts: cnguilambouhe@gmail.com, Profil button.

At the bottom right of the user grid, it says 'All 5 displayed !'. The footer includes a sidebar for 'DASSI TENE Roméo...' (Administrateur), copyright information (Copyright © 2025 - Tous droits réservés), and links for A propos, Politique de confidentialité, and Licence.

Figure 15 : Gestion des utilisateurs

Cette partie présente une liste d'utilisateurs du système ClimGuard, comprenant leurs profils, rôles, et dernières connexions. Il met en avant une hiérarchie avec principalement des administrateurs et un utilisateur, soulignant l'importance de la gestion des accès et des données pour assurer la sécurité et la maintenance du système. Elle fournit une liste détaillée des utilisateurs inscrits sur la plateforme ClimGuard, avec notamment leurs noms, rôles et dates de dernière connexion.

Toutefois, le système dispose de 4 rôles que peut avoir un utilisateur :

- **Administrateurs** : Gestion Complète du système
- **Points Focaux** : Gestions des utilisateurs de par pays
- **Éditeurs** : Gère l'enregistrement des catastrophes
- **Prévisionnistes** : Gère les Prévisions et Alertes météorologiques

Tous les utilisateurs disposent de profils en ligne accessibles par des liens directs, facilitant la gestion administrative. Les profils incluent des coordonnées telles que courriels et contacts. La gestion centralisée des profils permet d'assurer un contrôle et une supervision efficaces des accès.

Figure 16 : Profil des Utilisateurs

Ce profil utilisateur appartient à un administrateur du système, connecté récemment avec des droits d'administration. Il est responsable de la surveillance de plusieurs zones géographiques, dont certaines localisées à des coordonnées spécifiques. La dernière connexion a été enregistrée à une date récente, indiquant une activité régulière. La gestion de ces zones implique des responsabilités en termes de suivi et de contrôle, assurant une supervision efficace du système.

4.2. Module Évaluation de la Vulnérabilité Climatique

4.2.1. Tableau de bord

Sondage	Terminés	En cours	Questions
1	1	0	164

Risque	Actions
10,0/10	Y aoundé ACTUEL

Niveau de risque	Nombre
Très faible	0
Faible	0
Moderé	0
Bon	0
Très élevé	1

Figure 17: Tableau de bord des vulnérabilités

ClimGuard est un outil de vulnérabilité conçu pour réaliser des sondages sur diverses localités, notamment en Afrique centrale, afin d'évaluer les risques liés à la vulnérabilité environnementale ou sociale. Les résultats actuels montrent une majorité de questions recensées avec une seule localité, Yaoundé, dont le niveau de risque est évalué comme élevé ou très élevé. L'outil permet de suivre la progression des enquêtes, d'identifier rapidement les zones à risque critique, et de prendre des mesures adaptées. Le système utilise des sondages pour collecter des données sur le terrain. L'état actuel indique que 164 questions ont été posées, avec peu de sondages en cours ou terminés. La localité de Yaoundé est sous surveillance avec une progression de 100 % et un risque élevé. Le risque global est réparti en plusieurs niveaux dont très faible, faible, modéré, élevé, et très élevé. La majorité des risqués identifiés sont classés comme très élevé ou élevé dans certaines localités.

4.2.2. Détails des sondages

Le rapport présente les résultats d'un sondage réalisé à Yaoundé portant sur la vulnérabilité face aux risques climatiques. Selon les métriques évaluées, la sensibilité est modérée à 5,4, l'exposition est également moyenne à 5,7, tandis que la capacité d'adaptation est relativement élevée à 6,4. Cependant, le risque global reste élevé à 10,0, indiquant une vulnérabilité préoccupante malgré une capacité d'adaptation certaine. La phase de collecte de données est entièrement terminée avec 82 questions répondues, permettant une évaluation complète de la situation locale.

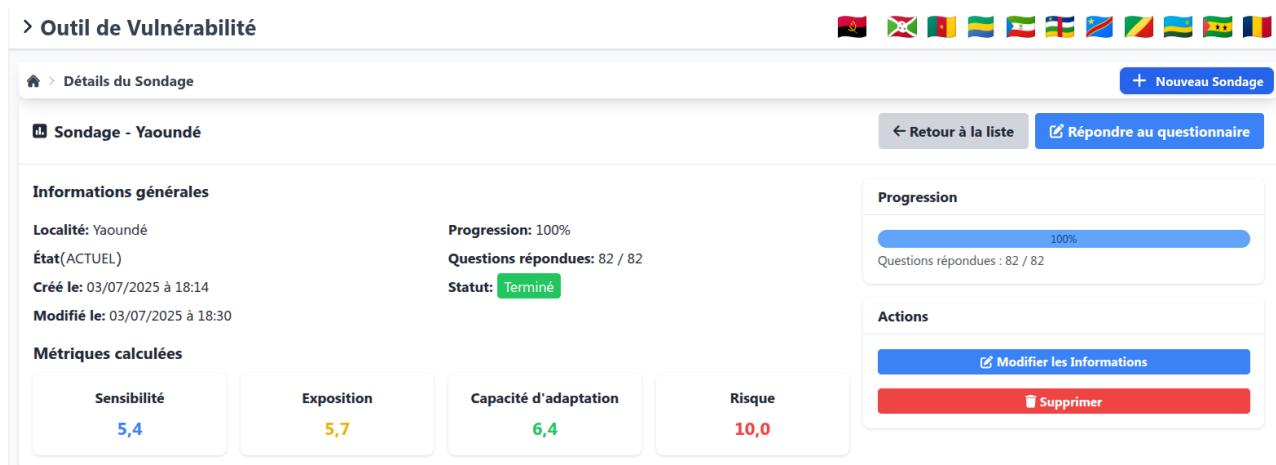


Figure 18: Détails des sondages

Le sondage à Yaoundé a été réalisé avec une progression de 100 %, incluant 82 questions totalement répondues. La sensibilité aux risques climatiques est évaluée à 5,4 sur une échelle probable. Le niveau d'exposition aux facteurs climatiques est modéré, à 5,7. La capacité d'adaptation de la localité est relativement forte, à 6,4. Le risque global demeure élevé, à 10,0, malgré les capacités d'adaptation. La collecte des données est totalement achevée, permettant une analyse complète. Les résultats soulignent la nécessité de renforcer les mesures face aux risques climatiques dans la région.

4.2.2. Questionnaires du sondages

The screenshot shows the ClimGuard platform's vulnerability assessment tool. On the left, a sidebar menu includes 'Accueil', 'Tableau de bord', 'Outil de Vulnérabilité' (selected), 'Catastrophes', 'Prévisions Météo', 'Alertes Météo', 'Données', 'Paramètres', and 'Utilisateurs'. A user profile for 'DASSI TENE' is at the bottom. The main area is titled 'Outil de Vulnérabilité' and 'Évaluation de la Vulnérabilité'. It displays survey results for Yaoundé, Yaoundé, with 82/82 questions answered. A green box says 'Sondage terminé ! Ce sondage a été complété le 03/07/2025 18:30. Vous pouvez encore modifier vos réponses si nécessaire.' Below are four colored boxes: purple ('Risques: 10,0/10, Risque très élevé'), yellow ('Exposition: 5,7/10'), red ('Sensibilité: 5,4/10'), and green ('Capacité d'adaptation: 6,4/10'). The right side shows a survey section titled '1/4 - RISQUES (ACTUEL)' with four questions about temperature variability, seasonal temperature variability, volcanic activity, and seismic activity, each with three response options: 'Oui, plus élevé que d'habitude', 'Oui, moins que d'habitude', and 'Non, pas vraiment'. A row of national flags is at the top right, and a '+ Nouveau Sondage' button is in the top right corner.

Figure 19: Questionnaires du sondage

Le document présente un outil nommé ClimGuard destiné à évaluer la vulnérabilité face aux risques climatiques et naturels dans une région donnée. Il explore différents types de risques tels que la variabilité des températures, la fréquence et l'impact des événements extrêmes comme les volcans, tremblements de terre, tornades, orages de grêle, chutes de neige, incendies, inondations et sécheresses, en mettant l'accent sur leur occurrence, leur intensité et leur impact sur la population et l'environnement. L'outil permet aussi d'analyser les tendances sur plusieurs années, les variations saisonnières, ainsi que la fréquence des précipitations et des épisodes météorologiques extrêmes, afin d'aider à mieux comprendre la vulnérabilité régionale face à ces phénomènes.

Le questionnaire évalue la variabilité de température sur des périodes interannuelles et saisonnières dans la région concernée. Il identifie la fréquence de impacts liés aux volcans, tremblements de terre, tornades, grêle, neige, incendies, inondations et sécheresses, en distinguant entre impact direct, indirect ou absent. Il analyse l'évolution de l'intensité et de l'étendue des catastrophes naturelles, comme les inondations et sécheresses, ainsi que leur cohérence temporelle annuelle. L'outil intègre une évaluation de la fréquence des précipitations fortes et leur variabilité saisonnière et interannuelle. Il met en évidence le stress lié à la chaleur et aux risques hydriques ressentis par la population lors des journées chaudes ou d'épisodes extrêmes.

La démarche aide à comprendre la vulnérabilité régionale et locale face aux changements climatiques et aux événements météorologiques extrêmes.

4.3. Module Gestion des Catastrophes

Le module de gestion des catastrophes de ClimGuard est conçu pour fournir aux décideurs, aux acteurs de la gestion de crises et aux équipes de secours un outil complet pour le suivi, l'évaluation et la réponse face aux événements climatiques extrêmes. Son objectif principal est de centraliser l'information relative aux catastrophes, d'établir des rapports précis et de générer des statistiques essentielles pour orienter efficacement la planification et la prise de décision à travers quelques fonctionnalités clés.

4.3.2. Enregistrement en temps réel

Lorsqu'une catastrophe est détectée ou signalée, le module permet d'enregistrer toutes les informations relatives à l'événement : localisation, type de phénomène (inondation, sécheresse, tempête, incendie, etc.), intensité, date et heure, ainsi que les actions entreprises.

The screenshot shows the 'Nouvelle Catastrophe' (New Disaster) form within the ClimGuard web application. The left sidebar contains navigation links such as Accueil, Tableau de bord, Outil de Vunérabilité, Catastrophes (selected), Prévisions Météo, Alertes Météo, Données, Paramètres, and Utilisateurs. The main form is titled 'Nouvelle Catastrophe' and includes fields for Localité (with dropdowns for Pays, Région, Département, Nom de la Localité, Longitude, and Latitude), Date de Début and Date de Fin (date pickers), Source (Nom de la source and Source Web URL), Aléas (with a 'Sélectionner' button), Impacts (with a 'Sélectionner' button), Cibles (with a 'Sélectionner' button), and numerical fields for Nombre de Blessés, Nombre de Malades, Nombre de Disparus, and Nombre de Morts, each with an 'Indéterminé' option. There are also fields for Titre (Title) and Description/Commentaire (Description/Commentary). A green 'Enregistrer' (Register) button is at the bottom. Below the form are sections for 'Images / vidéos de la catastrophe' (Images / Videos of the disaster) and 'Conditions Météorologiques associées à la catastrophe' (Associated Meteorological Conditions), both with a note: 'Veuillez d'abord enregistrer les informations sur la catastrophe' (Please first register information about the disaster). The footer includes a copyright notice 'Copyright © 2025 - Tous droits réservés', and links for 'À propos', 'Politique de confidentialité', and 'Licence'.

Figure 20: Enregistrement des Catastrophes

4.3.2. Rapports automatisés

ClimGuard automatise la génération de rapports périodiques ou ad hoc qui synthétisent les événements, leur fréquence, leur impact humain et matériel, et les réponses apportées. Ces rapports peuvent être exportés en formats PDF ou Excel pour l'usage des services d'urgence, des partenaires ou des autorités régionales. Ces rapports sont regroupés selon différents critères :

- Temporelle (Années, Mois, Semaines, Jours)

- Pays
- Villes
- Cibles
- Impacts
- Aléas

RAPPORTS SUR LES CATASTROPHES 22/02/2024 - 18/04/2025		
RAPPORT ANNUEL	Année	Nombre d'événements
RAPPORT MENSUEL	Mois	Nombre d'événements
RAPPORT HEBDOMADAIRE	Semaine	Nombre d'événements
RAPPORT PAR PAYS	Pays	Nombre d'événements
RAPPORT PAR VILLE	Ville	Nombre d'événements
RAPPORT PAR TYPE DE CIBLE	Type de Cible	Nombre d'événements
RAPPORT PAR IMPACT	Impact	Nombre d'événements
RAPPORT PAR ALEAS	Catégorie	Nombre d'événements

Figure 21: Section Rapport sur les Catastrophes

4.3.2. Statistiques et Analyses

Le module compile des données historiques sur les catastrophes climatiques, permettant aux décideurs d'identifier les tendances, les zones à forte fréquence d'événements, et d'établir des modèles prédictifs pour anticiper les risques futurs. Il Comprend différents graphiques qui sont :

- La répartition géographique
- L'évolution temporelle du nombre de catastrophes
- La répartition selon les dangers
- L'impact humain
- Le nombre de cas d'inondation par année et mois
- Le nombre de désastre par pays
- Le nombre de catastrophe par pays et par type de danger

Tout événement, rapport ou statistique est stocké dans une base de données centralisée. Cela facilite la consultation future, l'évaluation des stratégies d'intervention, et le reporting aux partenaires financiers ou institutions internationales.

Répartition géographique



Figure 22: Répartition géographique des catastrophes

La figure 21 présente le nombre de catastrophes par pays. L'échelle sur le côté droit indique des valeurs allant de 1 à 6, ce qui correspond au nombre de catastrophes.

Impact humain



Figure 23: Statistique sur les Impacts

Cette image présente trois diagrammes circulaires représentant l'impact humain d'un événement. Chaque diagramme montre la répartition en pourcentage de quatre catégories : Décédés, Autres, Blessés et Disparus. Le premier diagramme montre une répartition égale de 50% pour les Décédés et les Autres. Le deuxième diagramme montre également une répartition égale de 50% pour les Décédés et les Blessés. Le troisième diagramme montre que 100% des personnes touchées sont dans la

catégorie Décédés. Cette représentation visuelle permet de comprendre rapidement l'impact humain de l'événement en question, avec une focus sur les conséquences les plus graves (décès).

Répartition par danger

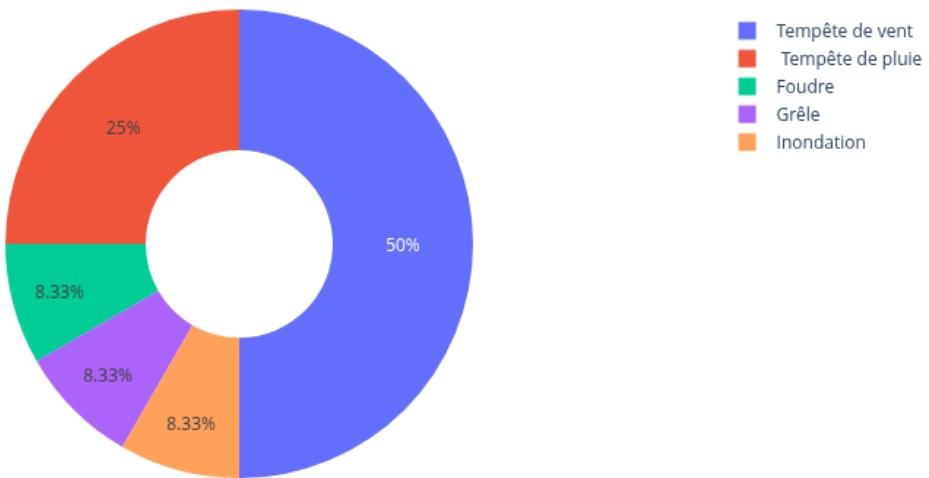


Figure 24: Répartition des catastrophes par Danger

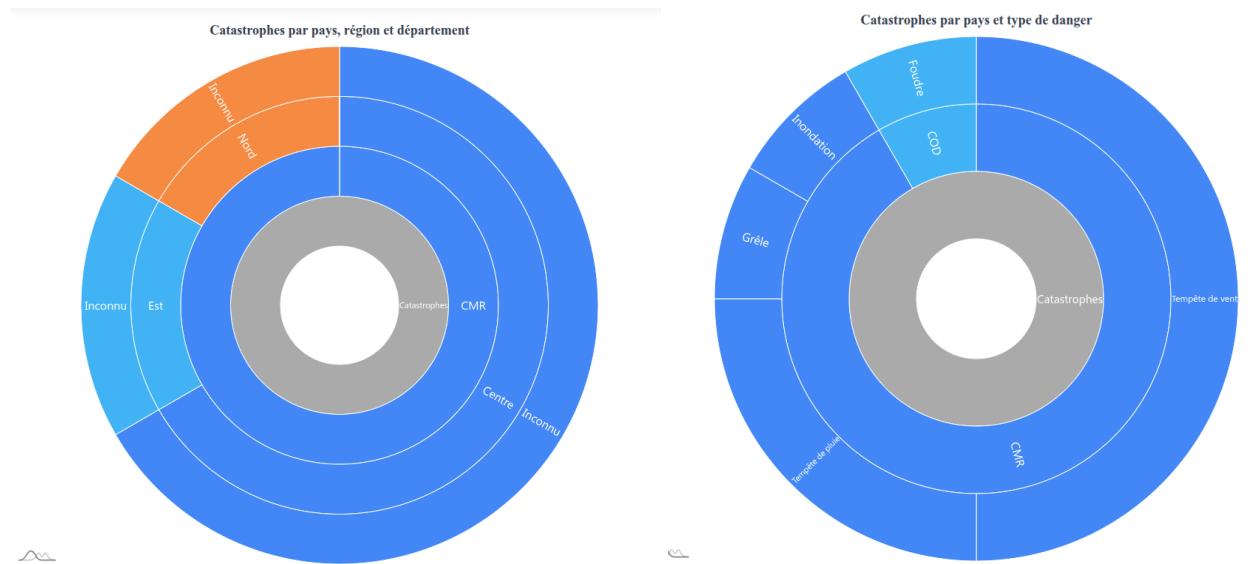


Figure 25: Catastrophes par pays, région et type de danger

Ensemble, ces deux images fournissent une vue d'ensemble de la répartition géographique et par type de danger des catastrophes naturelles dans une région donnée. Cela peut aider à identifier les zones et les risques les plus critiques afin de mieux se préparer et répondre à ces événements.

Évolution temporelle

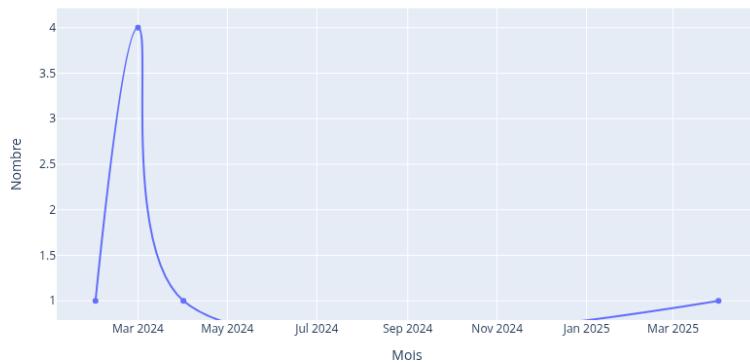


Figure 26: Evolution temporelle des catastrophes

Ce module est un instrument stratégique pour la gouvernance locale et nationale. Il permet d'organiser une réponse coordonnée, de mesurer l'efficacité des actions passées, et d'adapter les stratégies de gestion des catastrophes en se basant sur des données factuelles et bien structurées. La disponibilité de statistiques fiables aide à orienter la planification des investissements en infrastructures résilientes et à améliorer la préparation communautaire. Les simulations et exercices pratiques ont montré que le module de gestion des catastrophes facilite l'analyse, accélère la prise de décision, et réduit le délai de réponse.

4.4. Module de Prévisions Météorologiques

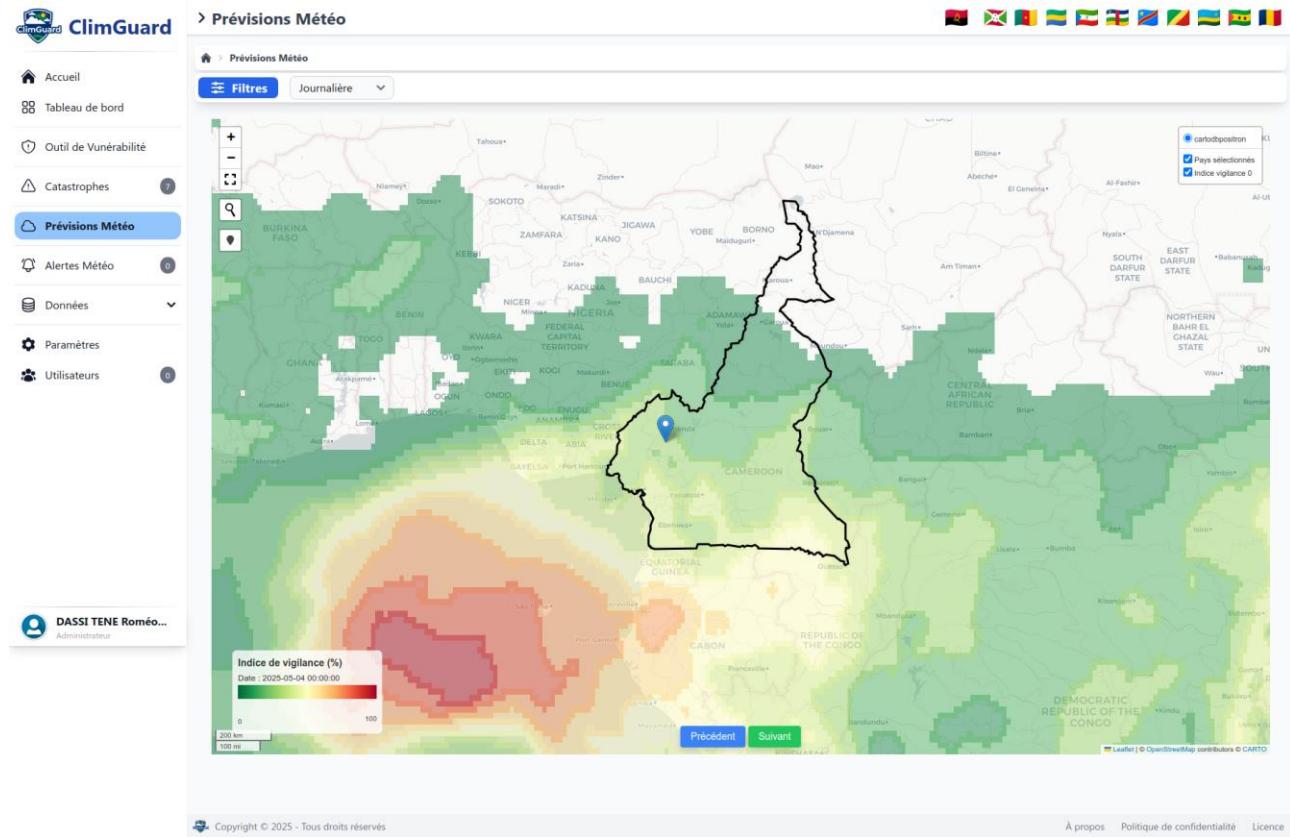
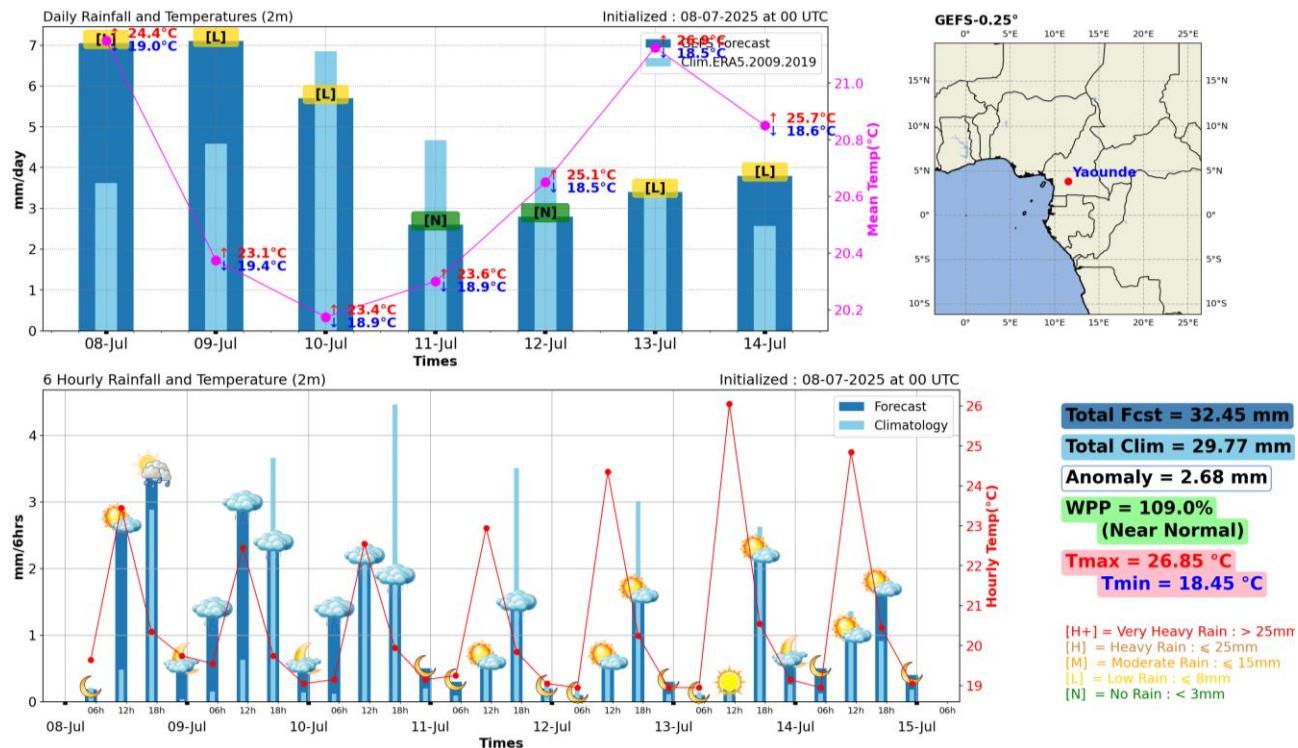


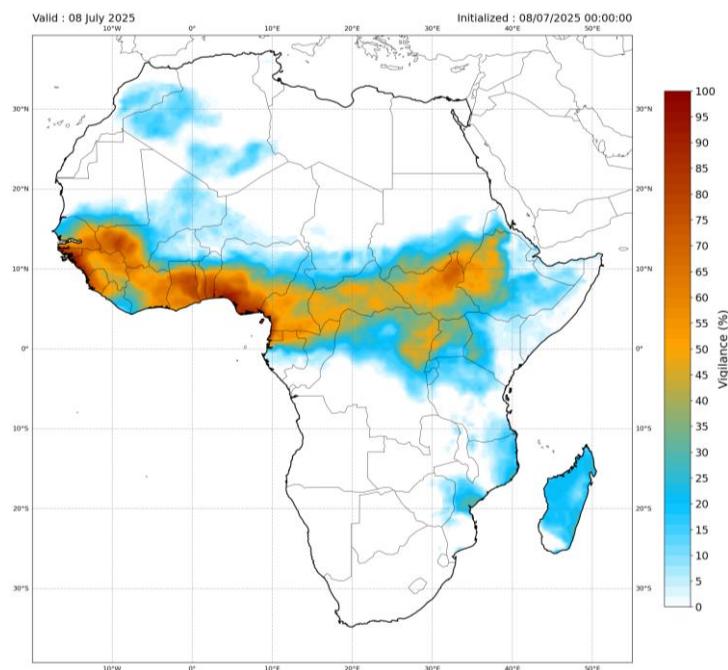
Figure 27 : Carte interactives dédiée aux prévisions météorologiques

4.4.1. Fortes Précipitations : Indice d'Inondation



4.4.2. Indice de vigilance des précipitations

Il serait pertinent d'intégrer ces données dans un système d'alerte précoce pour renforcer la préparation et la réponse aux événements observés. La tendance montre l'importance de suivre en temps réel les indices pour ajuster rapidement les mesures de gestion de crises.



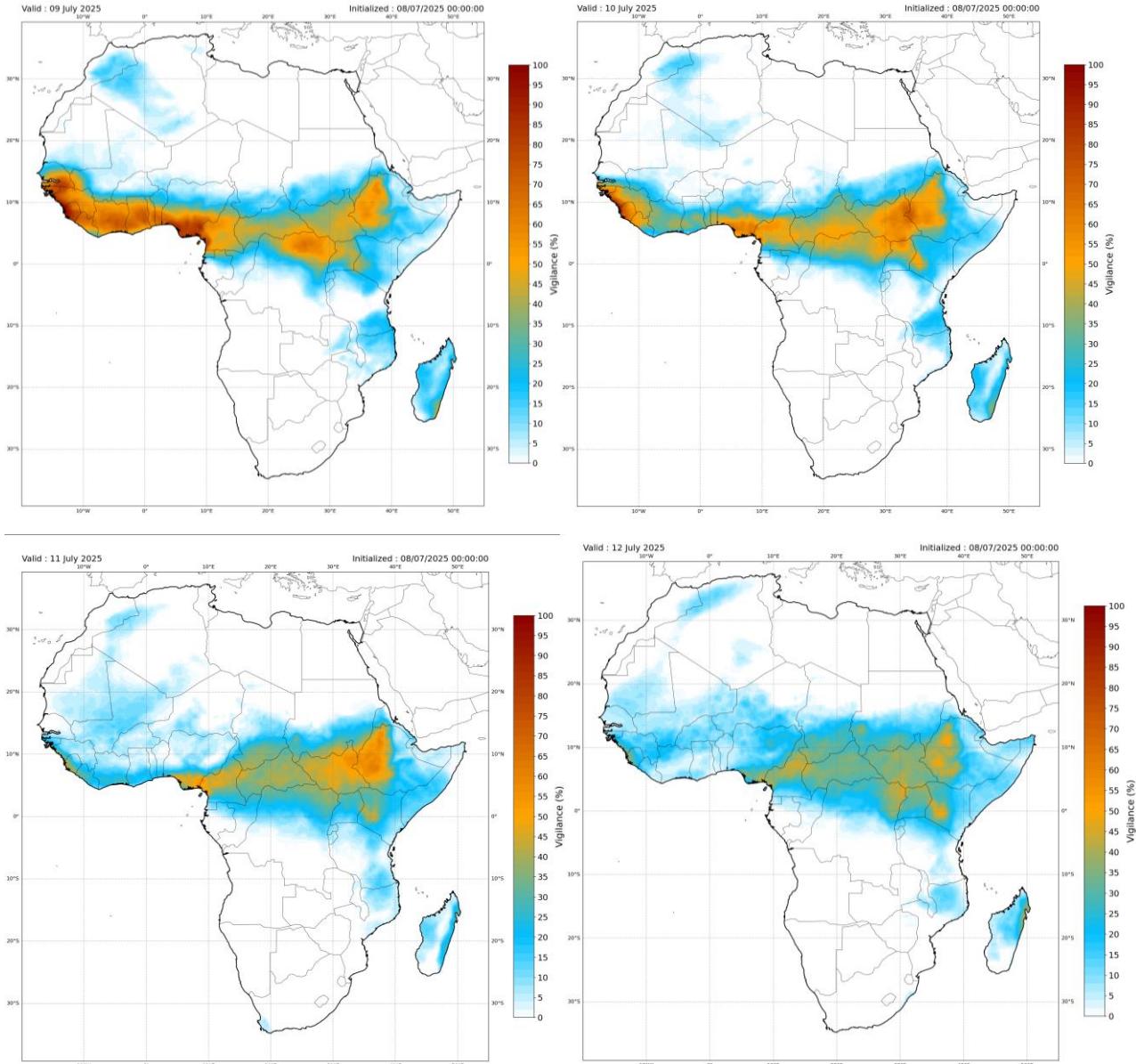


Figure 28 : Indice de vigilance des précipitations

L'indice de vigilance diminue progressivement sur plusieurs jours, indicatif d'une intensification probable des événements ou risques liés aux fortes précipitations durant les premiers jours. L'Afrique de l'Ouest et centrale apparaissent comme des zones clés de vigilance, demandant une surveillance renforcée. Ces cartes peuvent aider les décideurs et les gestionnaires de crise à anticiper et à préparer des mesures adaptées, en mettant l'accent sur les régions à haut risque.

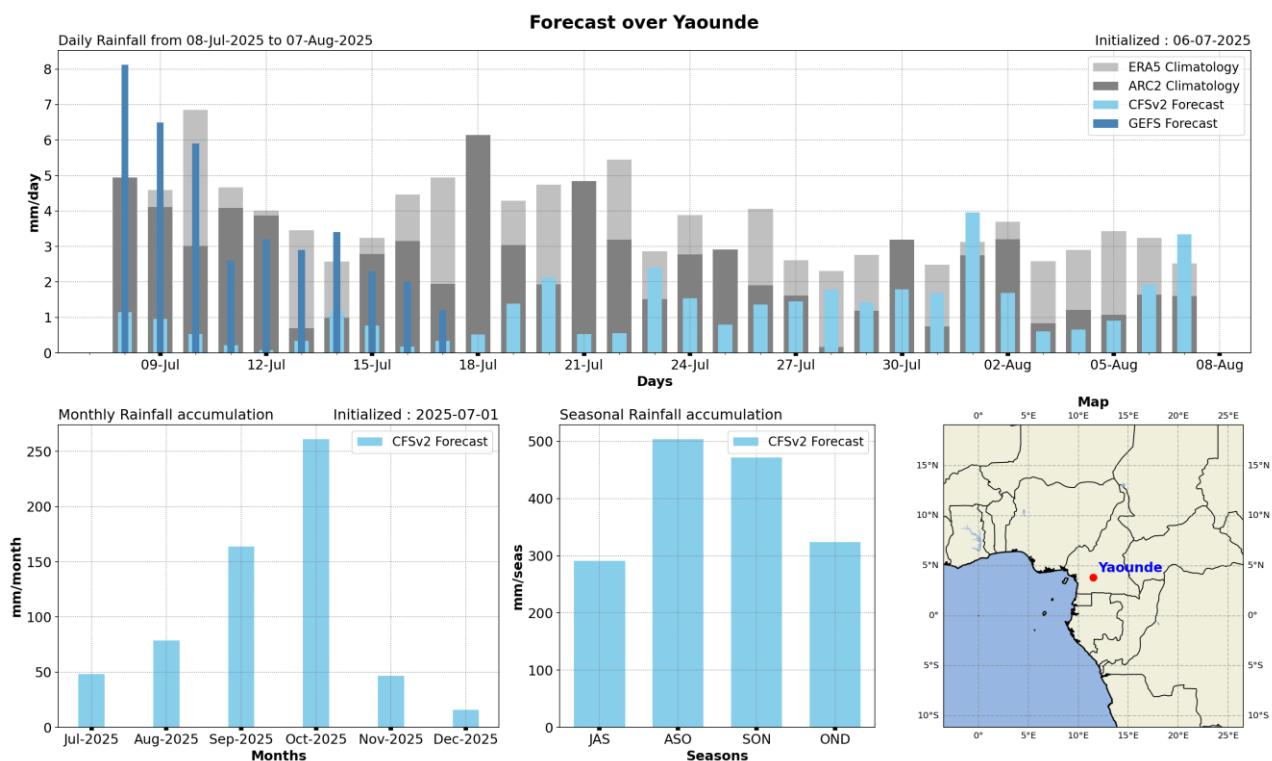
4.4.3. Vagues de Chaleurs

L'analyse de l'évolution temporelle des vagues de chaleur met en évidence des tendances préoccupantes au niveau régional :

- Fréquence et Intensité : On observe une augmentation du nombre de vagues de chaleur ces dernières années, avec une récurrence plus élevée. L'intensité des épisodes caniculaires semble également s'être renforcée, avec des températures maximales plus élevées que par le passé.
- Durée : La durée moyenne des vagues de chaleur a eu tendance à s'allonger ces dernières années. Certains épisodes particulièrement longs et intenses ont été enregistrés, dépassant parfois les 10 jours consécutifs.
- Répartition Géographique : Les zones touchées par les vagues de chaleur se sont étendues, y compris dans des régions historiquement moins exposées. Des disparités géographiques persistent, avec certaines zones connaissant des épisodes encore plus marqués.
- Impacts : Ces vagues de chaleur ont engendré des impacts significatifs, notamment sur la santé des populations les plus vulnérables. Les secteurs économiques comme l'agriculture et le tourisme ont également subi des conséquences importantes.

Ces évolutions préoccupantes soulignent la nécessité de renforcer les mesures d'adaptation et de prévention face à ce phénomène climatique majeur, qui risque de s'accentuer dans les années à venir.

4.4.4. Démarrage des Saisons



4.5. Module des Alertes Météorologiques

The screenshot shows the ClimGuard platform interface. On the left, a sidebar contains navigation links: Accueil, Tableau de bord, Outil de Vunérabilité, Catastrophes (with a notification count of 5), Prévisions Météo, Alertes Météo (selected, with a notification count of 0), Données, Paramètres, and Utilisateurs. The main content area is titled 'Bulletins' and displays 'BULLETIN DECADAIRE CLIMAT ET EAU N°20, ,'. It features a map of Cameroon with hydrological risk zones (Normal, Crues fréquentes, Inondation importante, Inondation grave) and a detailed 'II- PREVISIONS ET IMPACTS' section. The right side shows the 'BULLETIN DECADAIRE CLIMAT ET EAU N°20' header, publication details (Publié le: 10 juillet 2025 01:00, Échéance: 10 jours), a 'Lieux:' field, a 'Détails:' section with a note about flooding risks, and a 'Modifier' button. Below this is a 'Alertes associées au Bulletin' section with a 'Générer une alerte' button. At the bottom, there's a footer with DASSI Administrator information, copyright notice (Copyright © 2025 - Tous droits réservés), and links to A propos, Politique de confidentialité, and Licence.

4.5.1. Surveillance des Phénomènes Météorologiques

Le module intègre des données provenant de sources satellites (GFS, GEFS, ERA5, CHIRPS, Copernicus), de stations météorologiques déployées localement, et d'autres capteurs pour suivre en permanence des paramètres tels que :

- Précipitations : intensité, temporalité, localisation
- Température : maximale, minimale, relative
- Vents : vitesse, direction
- Humidité : taux d'humidité relative

4.5.2. Détection des Phénomènes Extrêmes

Des seuils critiques sont fixés pour chaque indicateur (ex : précipitations supérieures à une valeur donnée, vents dépassant une certaine vitesse, températures extrêmes). Lorsqu'un seuil est franchi ou qu'un modèle anticipateur prévoit un événement potentiellement dangereux, le système déclenche une alerte. Selon la configuration du modèle, les utilisateurs ayant un rôle de prévisionniste ou autre sont alertés, et par la suite un bulletins d'alerte est généré publié par ceux-ci.

4.5.3. Bulletins Météorologique Associés aux Alertes

4.5.3.1. Bulletins Des Catastrophes

Les bulletins de vigilance multirisques météorologiques comme celui-ci offrent une synthèse complète des risques climatiques et météorologiques pouvant impacter un territoire. Ils permettent d'anticiper et de préparer efficacement les populations, les autorités et les acteurs concernés face à des phénomènes météorologiques extrêmes ou potentiellement dangereux.

Ce type de bulletin fournit une cartographie des zones à risque en utilisant un système de niveaux d'alerte (souvent codés par couleurs) pour différentes catégories de dangers, telles que :

- **Températures extrêmes** (très hautes ou très basses)
- **Vents forts**
- **Précipitations abondantes ou inondations**
- **Poussière ou dust**
- **Autres phénomènes météorologiques extrêmes**

1. Mardi, le 15 Octobre 2024/ Tuesday 15th October 2024

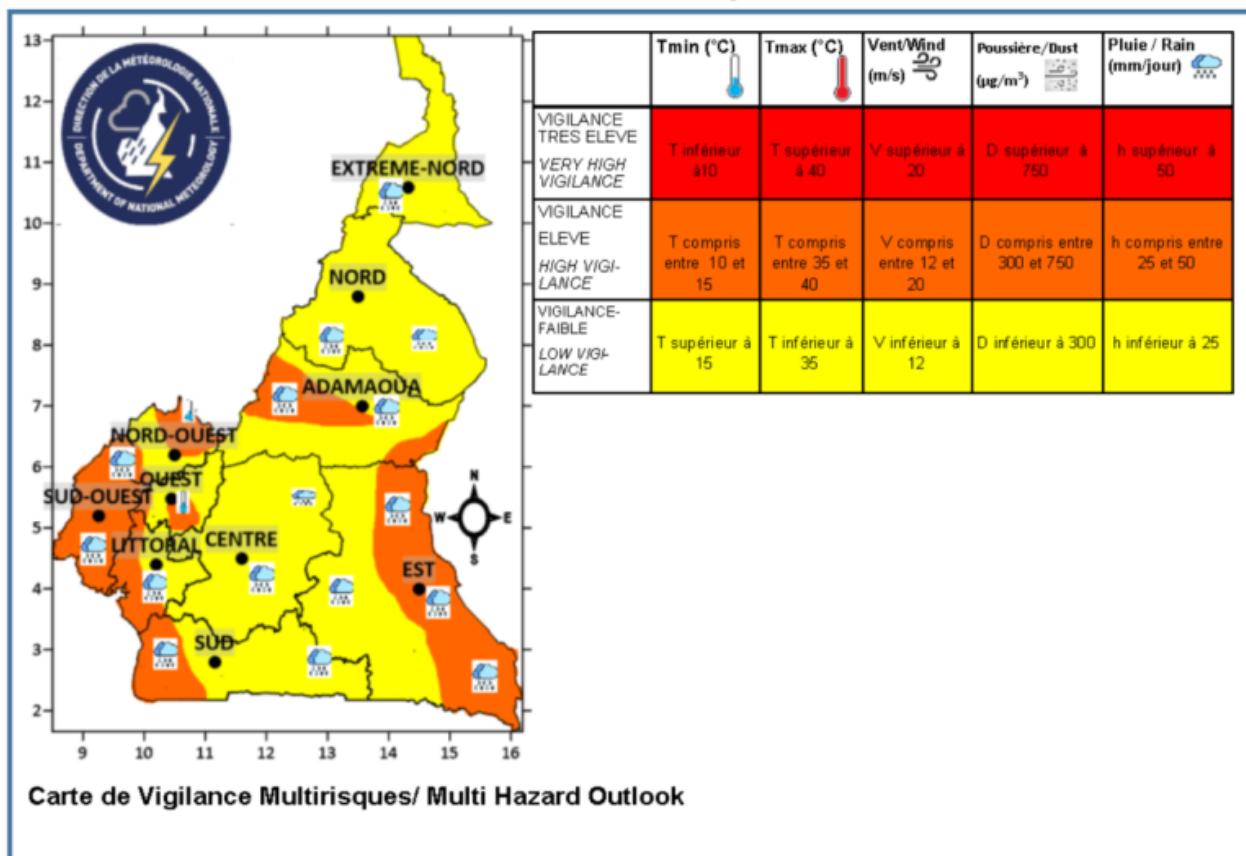


Figure 29: Bulletin Multirisque

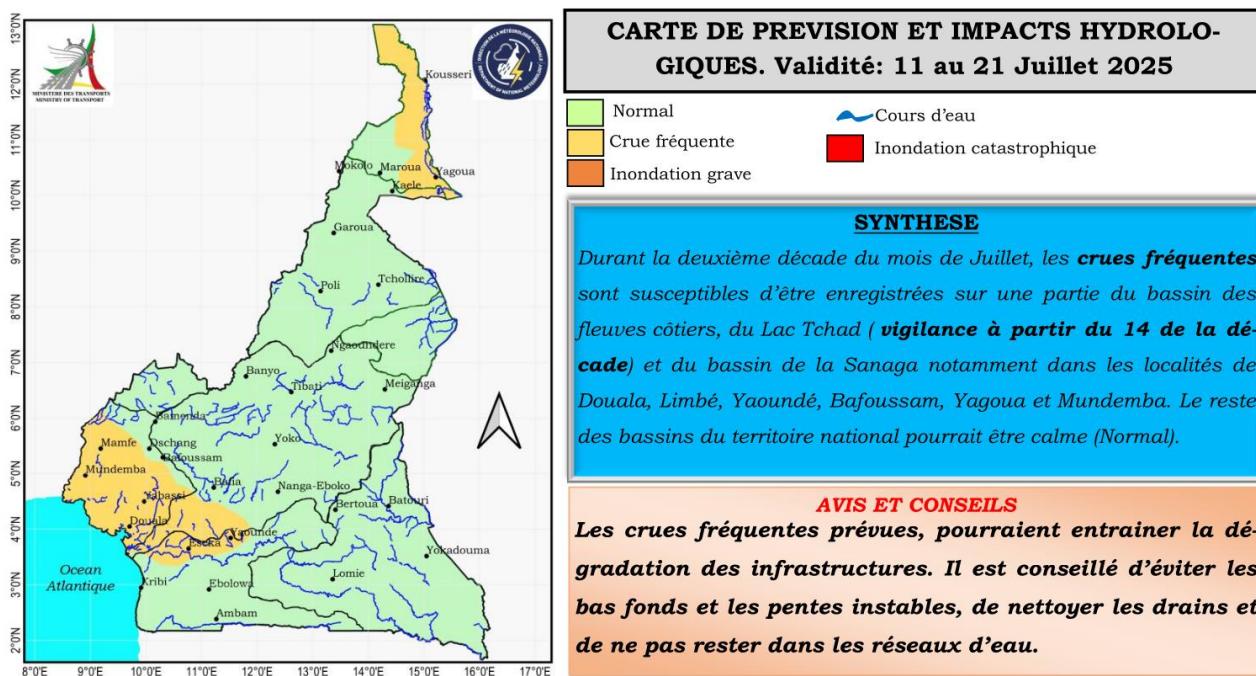


Figure 30: Prévision et Impact Hydrologique

4.5.3.3. Bulletins des Prévisions Météorologiques sur les Villes

VILLES /TOWNS	TEMPERATURES MIN / MAX	VENDREDI/FRIDAY	SAMEDI/SATURDAY	
		NUIT/NIGHT	MATIN/MORNING	APRES-MIDI/AFTERNOON
Bamenda (NW)	16°C 20°C	50% ☁	30% ☁	50% ☁
Douala (LT)	24°C 28°C	60% ☁	50% ☁	30% ☁
Yaoundé (CE)	21°C 26°C	20% ☁	☀	20% ☁
Buea (SW)	17°C 19°C	60% ☁	30% ☁	30% ☁
Ebolowa (S)	21°C 26°C	20% ☁	☀	20% ☁
Bertoua (E)	20°C 26°C	20% ☁	30% ☁	20% ☁
Ngaoundéré (AD)	17°C 23°C	50% ☁	30% ☁	50% ☁
Garoua (N)	23°C 30°C	30% ☁	30% ☁	20% ☁
Maroua (FN)	24°C 31°C	30% ☁	30% ☁	30% ☁
Bafoussam (W)	16°C 22°C	30% ☁	20% ☁	30% ☁

Equipe de prévisionnistes / Forecasters : NDONKOU NINA GAELLE, NTSAMA NGOUA MARIE CLAIRE, LAKOOU TEBEZEU EUGENE-DERRICK, NDICHOUT MOLOU EMMANUEL LAMBLUN, CHIENDE KOYEU LÉONEL, MODI MBOG ESTHER, NGUILAMBOUHE CHRISTIAN, GUEMDJOE TAKAM MERVEILLE.

Sous la Coordination Technique de / Under the technical coordination of : AMBESI HANS NDONWI : Chef du Service des Prévisions Météorologiques / Service Head for Weather Forecasts

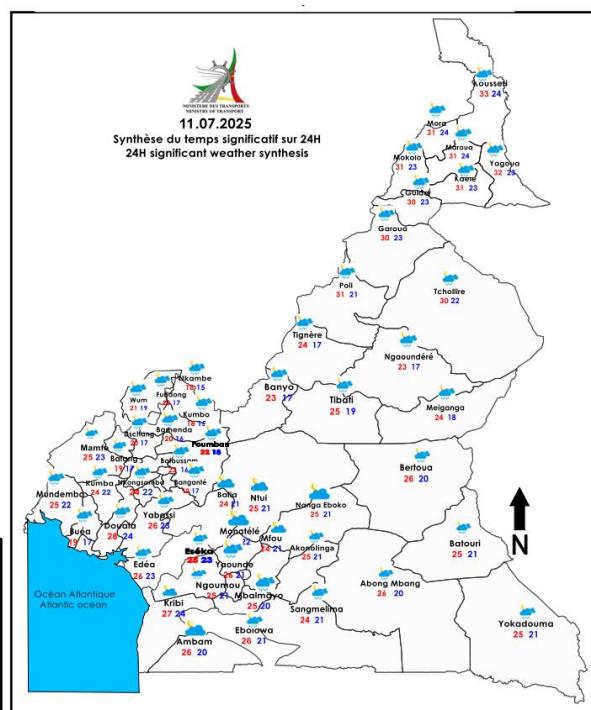


Figure 31: Bulletin de Prévision sur les villes

La carte présente les prévisions météorologiques pour un pays le 11 juillet 2025, indiquant le temps significatif sur 24 heures dans différentes régions. Elle montre les conditions météorologiques

attendues, avec des icônes de nuages et des températures maximales et minimales pour chaque zone. La carte est orientée avec le nord en haut et couvre l'ensemble du territoire, fournissant une synthèse claire des prévisions pour la journée.

4.5.3.3. Bulletins de Prévision Météo Marine

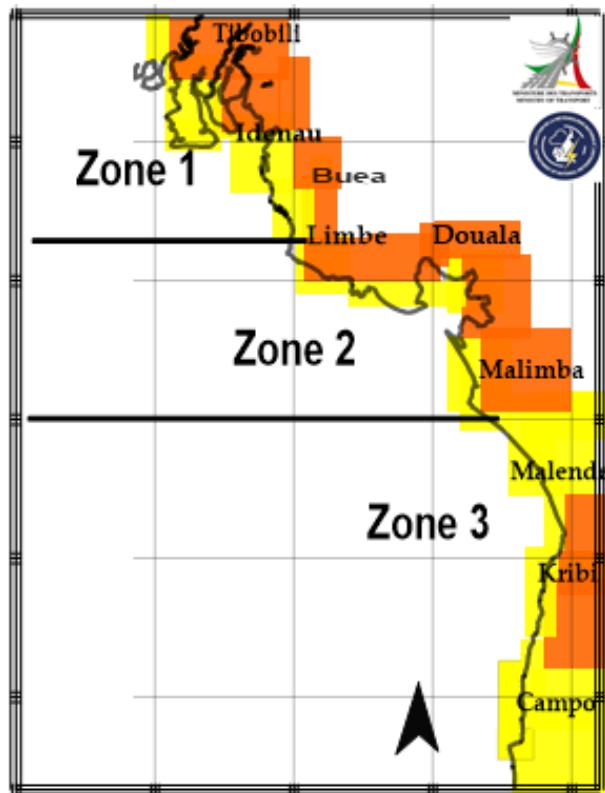


Figure 32: Carte météo de la côte camerounaise

Cette carte est issue du bulletin météo pour la côte camerounaise et sont structurés en trois zones principales, avec des niveaux de vigilance climatologique.

- **La Zone 1** (en haut) inclut des localités comme Tikobil, Idemanu, et Buea, avec une vigilance absolue (orange).
- **La Zone 2** (au centre) couvre des localités telles que Limbe, Douala, Malimba, et Malend, avec une vigilance très vigilante (orange).
- **La Zone 3** (en bas) comprend Kribi et Campo, également en vigilance orange.

Le bulletin indique qu'il y aura des pluies modérées à fortes jusqu'au 11 juillet 2025, avec des vents atteignant 21 noeuds, une faible houle, et une visibilité réduite durant la nuit et le matin, notamment entre Tibobili et Idemanu, ainsi que de Limbé à Malimba. La mer sera peu agitée, avec un état de vigilance accru dans la région concernée.

4.5.4. Gestion des niveaux de vigilance

ClimGuard classe les alertes selon différents niveaux (jaune, orange, rouge) correspondant à la gravité du phénomène. Ces niveaux sont accompagnés de recommandations spécifiques, telles que la sécurisation des infrastructures, l'évacuation des zones à risque ou la mise en garde contre des vagues de chaleur ou de froid.

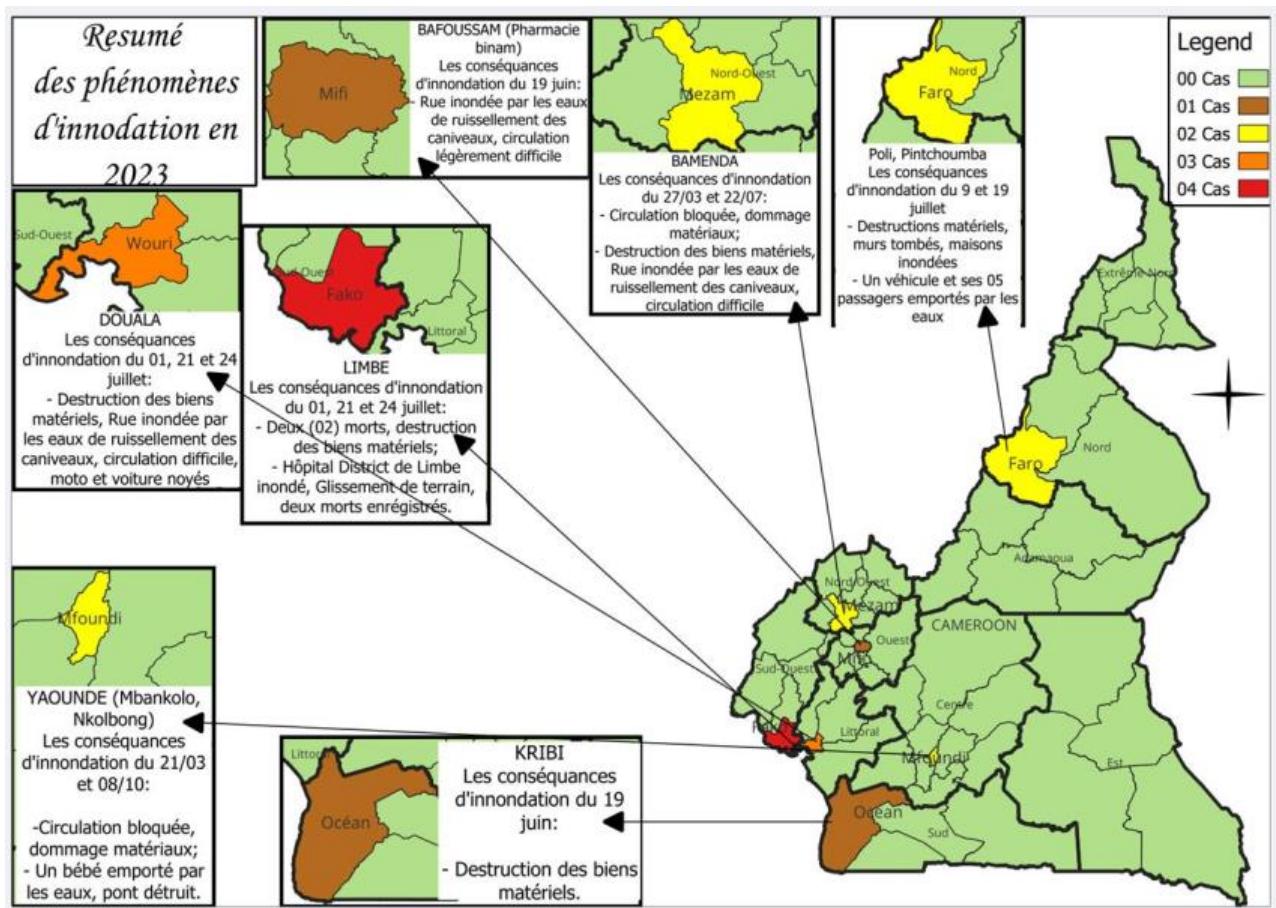


Figure 33: Résumé des Inondations en 2023

4.5.5. Diffusion multicanal

Actuellement le seul canal de diffusion actif est par E-mail. ClimGuard compte intégrer les alertes diffusées via un réseau de canaux de communication adaptés : Emails, SMS, radios communautaires, notifications mobile, affichages dans les espaces publics. L'objectif est d'assurer une diffusion rapide et accessible, même dans les zones rurales ou à faible connectivité. La plateforme utilise également des messages préenregistrés dans plusieurs langues locales pour garantir la compréhension par tous.

4.6. Coût estimatif du projet

4.6.1. Calendrier des activités

Ce tableau présente le calendrier des activités du projet ClimGuard, structuré en trois phases principales. Chaque phase est définie par sa durée et ses objectifs spécifiques, permettant de suivre l'avancement du projet de manière organisée. La planification minutieuse des étapes garantit une mise en œuvre efficace et une maintenance continue de l'outil.

Tableau 4: Calendrier estimatif des activités

Phases	Durée	Détails
Phase 1 : Développement Initial	03 mois	Création de la structure de base, cartes interactives et pages régionales.
Phase 2 : Développement Final	04 mois	Intégration des fonctionnalités avancées, tests et optimisation.
Phase 3 : Maintenance	02 année	Mise à jour du contenu et maintenance technique.

4.6.2. Jours de Travail Estimés

Ce tableau détaille les jours de travail estimés pour chaque tâche nécessaire à la réalisation du projet ClimGuard. Il offre une vue d'ensemble des efforts requis pour chaque étape, facilitant ainsi la gestion des ressources et la planification des délais. L'estimation totale des jours de travail est recalculée pour refléter avec précision les efforts nécessaires, y compris la maintenance annuelle.

Tableau 5: Jours de Travail Estimés

Tâches	Jours Estimés
Recherche et Planification	10 jours
Conception de l'Interface	15 jours
Développement des Modules	60 jours
Intégration des Fonctionnalités	45 jours
Tests et Optimisation	30 jours
Documentation et Formation	15 jours
Maintenance (annuelle)	24 jours/an

Total Estimé : 175 Jours (hors maintenance)

4.6.3. Estimation Total du Budget

Ce tableau présente l'estimation totale du budget pour le projet ClimGuard, incluant les coûts associés aux ressources humaines, aux outils et aux services d'hébergement. L'évaluation financière est cruciale pour assurer la viabilité du projet et pour garantir que toutes les dépenses sont prises en

compte. Le total estimé a été recalculé pour refléter les coûts réels associés aux tâches et à la maintenance.

Tableau 6: Estimation Total du Budget

Éléments	Coût Estimé (FCFA)
Tarif Journalier (150 000 FCFA/jour)	26 250 000 FCFA
Outils et Logiciels	1 850 000 FCFA
Hébergement Web	500 000 FCFA
Total Estimé	28 600 000 FCFA

Les tableaux sont bien structurés et fournissent une vue d'ensemble claire du calendrier, des jours de travail et du budget. Quelques précisions supplémentaires sur les éléments de maintenance et les coûts d'hébergement pourraient renforcer la clarté du projet. Cette proposition peut être adapté en fonction des exigences du projet.

4.7. Perspectives du projet

Les travaux menés dans le cadre de cette étude offrent plusieurs pistes de développement et d'approfondissement pour renforcer l'efficacité et la portée de ClimGuard. D'une part, l'intégration de nouvelles sources de données, notamment des capteurs à faible coût, des satellites et des réseaux communautaires, pourrait améliorer la précision des alertes et leur adaptabilité aux conditions locales.

D'autre part, la consolidation de la participation communautaire et la sensibilisation des populations restent essentielles. La mise en place d'ateliers de formation, de campagnes d'information multilingues, et l'implication active de leaders locaux favoriseront une meilleure acceptation et une réaction plus rapide face aux alertes.

Sur le plan technologique, le développement d'outils mobiles et de plateformes accessibles même en zones à faible connectivité permettra d'étendre la couverture et la résilience du système dans les régions les plus vulnérables. La compatibilité avec des technologies innovantes, telles que l'intelligence artificielle pour l'analyse prédictive ou l'apprentissage automatique, pourrait également renforcer la capacité à anticiper les événements extrêmes. Sans oublier l'intégration de nouveaux produits de prévision Météorologiques tel que l'Indice de Risque d'Inondation (IRI) et biend'autres.

Enfin, il sera crucial d'assurer la pérennité institutionnelle et financière du dispositif. La formalisation de partenariats locaux, régionaux et internationaux, incluant les gouvernements, ONG, institutions de recherche, et acteurs privé , garantira la continuité de ClimGuard dans le temps, tout en favorisant son adaptation aux évolutions socio-environnementales.

En résumé, les perspectives d'évolution de ClimGuard résident dans l'amélioration continue de ses fonctionnalités, l'intégration de nouvelles technologies, le renforcement des capacités communautaires, ainsi que la consolidation de partenariats durables. Ces axes permettront de faire de ClimGuard un outil robuste, adapté et durable pour la gestion des risques climatiques en Afrique centrale et au-delà.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le changement climatique représente un défi inédit pour les pays d'Afrique Centrale, en particulier au Cameroun, amplifiant les vulnérabilités sociales, économiques et environnementales. Face à cette réalité, l'outil ClimGuard s'affirme comme une solution innovante et intégrée, capable de transformer la gestion des risques climatiques à l'échelle régionale. En combinant efficacement des données climatiques et socio-économiques, il offre une approche holistique permettant non seulement d'évaluer la vulnérabilité, mais aussi de planifier et de déployer des interventions adaptées, grâce à une diffusion d'alertes précoce et contextualisées.

L'efficacité de ClimGuard, souligne son potentiel à renforcer significativement la résilience des communautés face aux aléas climatiques. La plateforme facilite également la coordination entre décideurs, ONG et acteurs locaux, favorisant la création de territoires plus résilients, capables d'anticiper et de répondre efficacement aux catastrophes naturelles telles que inondations, sécheresses ou vagues de chaleur.

Ce rapport a permis de concevoir et mettre en œuvre l'un des premiers outils axés sur les impacts et les prévisions climatiques en Afrique centrale. Son approche multidimensionnelle, intégrant collecte de données, analyse spatiale et modules d'alerte, a démontré sa pertinence technique et opérationnelle. Toutefois, pour optimiser son déploiement, il est essentiel de relever les défis identifiés, notamment liés aux limitations des données, à la connectivité ou à l'acceptation communautaire, en respectant la diversité socio-environnementale de la région.

En perspective, cette initiative constitue une étape clé vers l'établissement d'une stratégie régionale intégrée de gestion des risques climatiques, axée sur la prévention, la préparation et la réponse rapide. La poursuite du développement, du renforcement des capacités et de la diffusion de ClimGuard sera déterminante pour accompagner durablement la région vers une meilleure résilience climatique, en alignement avec les Objectifs de développement durable, la protection des populations et la gestion responsable des ressources naturelles.

Pour l'avenir, il est impératif de promouvoir l'adoption à grande échelle de ClimGuard et de renforcer les partenariats afin d'enrichir ses fonctionnalités et étendre sa portée. En intégrant en continu les retours d'expérience des utilisateurs et en améliorant la qualité des données, ClimGuard a le potentiel de devenir un outil incontournable dans la gestion des catastrophes climatiques, constituant ainsi un pilier pour un développement durable, inclusif et résilient en Afrique Centrale et au-delà.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

1. **GIEC. (2021).** Rapport du GIEC sur le climat : Un constat alarmant.
2. **IPCC. (2013).** Changement climatique 2013 : Les éléments scientifiques. In GIEC, 5ème rapport d'évaluation.
3. **IPCC. (2018).** Global warming of 1.5 °C, Special report.
4. **IPCC. (2021).** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
5. **IPCC. (2022).** Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
6. **Mastrorillo, M., et al. (2016).** The role of social networks in climate change adaptation: A review of the literature. *Global Environmental Change*, 39, 131-148.
7. **Niang, I., et al. (2014).** Africa. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge University Press.
8. **World Bank. (2016).** Climate Change and Agriculture in Africa: Impacts, Adaptation, and Opportunities. Washington, DC: World Bank.
9. **UNISDR. (2015).** Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
10. **Schwerdtle, P. N., et al. (2018).** The role of disaster risk reduction in climate change adaptation. *Environmental Science & Policy*, 88, 1-9.
11. **Pauchant, T. C., & Mitroff, I. I. (1992).** Transforming the Crisis Management Process. *The Journal of Business Strategy*, 13(4), 40-47.
12. **Mastrorillo, M., et al. (2016).** Early warning systems: A review of the literature. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, 1-11.
13. **Chambers, R. (1994).** Participatory Rural Appraisal (PRA): Analysis of Experience. *World Development*, 22(9), 1253-1268.
14. **Agarwal, B. (2001).** Participatory Exclusions, Community Forestry, and Gender: An Analysis for South Asia and a Conceptual Framework. *World Development*, 29(10), 1623-1648.
15. **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2021).** Un constat alarmant. Rapport du GIEC sur le climat.

16. **GIEC. (2013).** Changement climatique 2013 : Les éléments scientifiques. In GIEC, 5ème rapport d'évaluation.
17. **IPCC. (2018).** Global warming of 1.5 °C, Special report.
18. **Rigaud, K., et al. (2019).** Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration. Banque Mondiale.
19. **Scheffran, J., Link, M., & Schilling, J. (2019).** Climate and Conflict in Africa. *Oxford Research Encyclopedia*.
20. **Abdou, H., et al. (2020).** Perception du changement climatique des éleveurs et stratégies d'adaptation au Niger. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*.
21. **Ayantunde, A., et al. (2015).** Paysage de l'Agriculture Intelligente face au Climat en Afrique de l'Ouest : Production animale. CCAFS.
22. **Kimaro, E.G., et al. (2018).** Climate change perception and impacts on cattle production in Tanzania. *Pastoralism*.
23. **Turner, M.D., et al. (2011).** Farmer-herder conflicts and resource access in the Sahel. *Journal of Development Studies*.
24. **ACMAD. (2022).** Climate Information Tool for Agriculture: User Guide.
25. **Denenodji, A., et al. (2018).** Télédétection pour la caractérisation des espaces irrigués au Tchad.
26. **OCHA. (2022).** Rapport sur les inondations au Tchad.
- World Meteorological Organization (2023). State of Climate Services in Africa.
- Musau et al. (2021). Machine Learning for Weather Forecasting in Resource-Limited Settings, *Nature Climate Change*.
27. Projet FOCUS-Africa (Horizon 2020) sur l'adaptation aux extrêmes climatiques.
28. <https://www.bezkoder.com/django-rest-api/>
29. <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/drr-focus-areas/climate-action-and-disaster-risk-reduction>
30. T. L. (1980) – The analytic hierarchy process
31. L. G. Vargas, T. L. Saaty (1991) – Prediction, projection and forecasting

ANNEXES

Tableau 7: Dangers ou Aléas

Français	Anglais	Espagnol	Portugais
Inondation	Flood	Inundación	Inundação
Séisme	Earthquake	Terremoto	Terremoto
Tsunami	Tsunami	Tsunami	Tsunami
Cyclone	Cyclone	Ciclón	Ciclone
Tempête de vent	Windstorm	Tormenta de viento	Tempestade de vento
Tempête de pluie	Rainstorm	Tormenta de lluvia	Tempestade de chuva
Tempête de sable	Sandstorm	Tormenta de arena	Tempestade de areia
Sécheresse	Drought	Sequía	Seca
Foudre	Lightning	Relámpago	Relâmpago
Glissement de terrain	Landslide	Deslizamiento de tierra	Deslizamento de terra
Canicule	Heatwave	Ola de calor	Onda de calor
Grêle	Hail	Granizo	Granizo
Incendie de brousse	Bushfire	Incendio de matorral	Incêndio de savana
Épidémie	Epidemic	Epidemia	Epidemia
Crue soudaine	Flash flood	Inundación repentina	Enchente súbita
Pollution de l'air	Air pollution	Contaminación del aire	Poluição do ar
Érosion côtière	Coastal erosion	Erosión costera	Erosão costeira
Invasion acridienne	Locust invasion	Invasión de langostas	Invasão de gafanhotos
Invasion de criquets	Locust invasion	Invasión de langostas	Invasão de gafanhotos
Maladies tropicales	Tropical diseases	Enfermedades tropicales	Doenças tropicais
Déforestation	Deforestation	Deforestación	Desmatamento
Pollution de l'eau	Water pollution	Contaminación del agua	Poluição da água
Famine	Famine	Hambruna	Fome

Tableau 8: Impacts

Français	Anglais	Espagnol	Portugais
Blessures	Injuries	Lesiones	Ferimentos
Décès	Deaths	Muertes	Mortes
Pertes économiques	Economic losses	Pérdidas económicas	Perdas econômicas
Destruction de biens	Property destruction	Destrucción de bienes	Destruição de bens
Déplacement de population	Population displacement	Desplazamiento de población	Deslocamento populacional
Pollution	Pollution	Contaminación	Poluição
Pénurie d'eau	Water shortage	Escasez de agua	Escassez de água
Pénurie alimentaire	Food shortage	Escasez de alimentos	Escassez de alimentos
Interruption des services	Service interruption	Interrupción de servicios	Interrupção de serviços
Maladies	Diseases	Enfermedades	Doenças
Perturbation sociale	Social disruption	Perturbación social	Perturbação social
Impact sur la santé mentale	Mental health impact	Impacto en la salud mental	Impacto na saúde mental

Perturbation économique	Economic disruption	Perturbación económica	Perturbação econômica
-------------------------	---------------------	------------------------	-----------------------

Tableau 9: Types de Cible

Français	Anglais	Espagnol	Portugais
Humain	Human	Humano	Humano
Matériel	Material	Material	Material
Économique	Economic	Económico	Econômico
Environnemental	Environmental	Ambiental	Ambiental
Social	Social	Social	Social
Culturel	Cultural	Cultural	Cultural
Infrastructure	Infrastructure	Infraestructura	Infraestrutura

Tableau 10: Cibles

Français	Anglais	Espagnol	Portugais	Types
Population	Population	Población	População	["Humain"]
Infrastructures	Infrastructure	Infraestructura	Infraestrutura	["Matériel", "Infrastructure"]
Cultures	Crops	Cultivos	Culturas	["Matériel"]
Animaux	Animals	Animales	Animais	["Humain"]
Environnement	Environment	Medio ambiente	Meio ambiente	["Environnemental"]
Économie	Economy	Economía	Economia	["Économique"]
Santé	Health	Salud	Saúde	["Humain"]
Transports	Transport	Transporte	Transporte	["Matériel"]
Énergie	Energy	Energía	Energia	["Matériel"]
Eau	Water	Agua	Água	["Matériel"]
Communication	Communication	Comunicación	Comunicação	["Matériel"]
Éducation	Education	Educación	Educação	["Social"]
Services de santé	Health services	Servicios de salud	Serviços de saúde	["Humain"]

Tableau 11: Extrait d'Echelle de vulnérabilité du questionnaire

Question	Catégorie	Facteur	Réponse	Valeur	Poids
Votre région connaît-elle une variabilité saisonnière des températures ?	RISQUES	Saisons	Oui, plus élevé que d'habitude	7.5	3.0
Votre région connaît-elle une variabilité saisonnière des températures ?	RISQUES	Saisons	Oui, moins que d'habitude	4.0	2.0
Votre région connaît-elle une variabilité saisonnière des températures ?	RISQUES	Saisons	Non, pas vraiment	1.0	1.0
Votre région connaît-elle une variabilité de température interannuelle ?	RISQUES	Tendances annuelles	Oui, plus élevé que d'habitude	8.0	3.5

Votre région connaît-elle une variabilité de température interannuelle ?	RISQUES	Tendances annuelles	Oui, moins que d'habitude	3.5	2.0
Votre région connaît-elle une variabilité de température interannuelle ?	RISQUES	Tendances annuelles	Non, pas vraiment	1.0	1.0
Pendant les journées les plus chaudes, êtes-vous affecté par le stress lié à la chaleur ?	RISQUES	Journées chaudes	Oui	9.0	4.0
Pendant les journées les plus chaudes, êtes-vous affecté par le stress lié à la chaleur ?	RISQUES	Journées chaudes	Parfois	6.0	3.0
Pendant les journées les plus chaudes, êtes-vous affecté par le stress lié à la chaleur ?	RISQUES	Journées chaudes	Non	1.0	1.0
Votre région connaît-elle une variabilité saisonnière des précipitations ?	RISQUES	Saisons	Oui, plus élevé que d'habitude	8.0	3.5
Votre région connaît-elle une variabilité saisonnière des précipitations ?	RISQUES	Saisons	Oui, moins que d'habitude	4.0	2.0
Votre région connaît-elle une variabilité saisonnière des précipitations ?	RISQUES	Saisons	Non, pas vraiment	1.0	1.0
Votre région connaît-elle une variabilité interannuelle des précipitations ?	RISQUES	Tendances annuelles	Oui, plus élevé que d'habitude	8.5	4.0
Votre région connaît-elle une variabilité interannuelle des précipitations ?	RISQUES	Tendances annuelles	Oui, moins que d'habitude	3.5	2.0
Votre région connaît-elle une variabilité interannuelle des précipitations ?	RISQUES	Tendances annuelles	Non, pas vraiment	1.0	1.0
Les fortes pluies sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Fortes pluies	Oui	8.0	3.5
Les fortes pluies sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Fortes pluies	Parfois	5.0	2.5
Les fortes pluies sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Fortes pluies	Non	1.0	1.0
Les sécheresses sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Événements	Oui	9.0	4.0
Les sécheresses sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Événements	Parfois	6.0	3.0
Les sécheresses sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Événements	Non	1.0	1.0
Si des sécheresses se produisent, se produisent-elles à la même période de l'année ?	RISQUES	Timing	Souvent	7.0	3.0
Si des sécheresses se produisent, se produisent-elles à la même période de l'année ?	RISQUES	Timing	Parfois	5.0	2.5

Si des sécheresses se produisent, se produisent-elles à la même période de l'année ?	RISQUES	Timing	Non applicable	1.0	1.0
Si des sécheresses se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Oui, mais plus	8.0	3.5
Si des sécheresses se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Oui, mais moins	4.0	2.0
Si des sécheresses se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Aucun changement	5.0	2.5
Si des sécheresses se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Non applicable	1.0	1.0
Lorsque des sécheresses surviennent, ont-elles un impact sur une partie ou un aspect de votre région ?	RISQUES	Effet	Souvent	8.0	3.5
Lorsque des sécheresses surviennent, ont-elles un impact sur une partie ou un aspect de votre région ?	RISQUES	Effet	Parfois	5.0	2.5
Lorsque des sécheresses surviennent, ont-elles un impact sur une partie ou un aspect de votre région ?	RISQUES	Effet	Non applicable	1.0	1.0
Les inondations sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Événement	Oui	8.5	4.0
Les inondations sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Événement	Parfois	6.0	3.0
Les inondations sont-elles fréquentes dans votre région ?	RISQUES	Événement	Non	1.0	1.0
Si des inondations se produisent, se produisent-elles à la même période de l'année ?	RISQUES	Période	Souvent	7.0	3.0
Si des inondations se produisent, se produisent-elles à la même période de l'année ?	RISQUES	Période	Parfois	5.0	2.5
Si des inondations se produisent, se produisent-elles à la même période de l'année ?	RISQUES	Période	Non applicable	1.0	1.0
Si des inondations se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Oui, mais plus	8.5	4.0
Si des inondations se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Oui, mais moins	4.0	2.0
Si des inondations se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Aucun changement	5.0	2.5
Si des inondations se produisent, leur étendue et leur intensité changent-elles ?	RISQUES	Étendre	Non applicable	1.0	1.0

In [1]: %runfile /home/dassi/Documents/SCRIPTS_DASSI/Previs_Hebdomadières_new/Meteogrammes_Seasonnal.py --wdir
Prévisions du : 20250708
Initialisations de : 00H00
Download PWAT ens ... (Variable 1/6)
100% [██████████] 40/40 [00:00<00:00, 511.76it/s]
Download TP ens ... (Variable 2/6)
100% [██████████] 40/40 [02:00<00:00, 3.01s/it]
Download T2m ens ... (Variable 3/6)
100% [██████████] 40/40 [08:31<00:00, 12.78s/it]
Download T2m ens ... (Variable 4/6)
100% [██████████] 40/40 [03:08<00:00, 4.72s/it]
Download TP ens ... (Variable 5/6)
100% [██████████] 40/40 [02:18<00:00, 3.47s/it]
Download RH_ens ... (Variable 6/6)
5% [■] 2/40 [00:09<03:08, 4.95s/it] Attempt 1/2000 failed. Retrying in 5.0s...
100% [██████████] 40/40 [04:10<00:00, 6.25s/it]
Convert PWAT ens ... (Variable 1/6)
100% [██████████] 40/40 [00:23<00:00, 1.69it/s]
Convert TP_ens ... (Variable 2/6)
28% [■] 11/40 [00:06<00:15, 1.84it/s]

Figure 34: Automatisation et traitement de données

The screenshot shows the Visual Studio Code interface with several tabs open, including 'models.py', 'welcome.html', 'bulletin.html', 'login.html', and 'sign_up_login.html'. The 'models.py' tab contains Python code for a Django model named 'Sondage'. The code includes methods for calculating sensitivity and adaptive capacity based on survey responses. The 'welcome.html' tab shows a template for a user interface with sections for bulletin title, date of publication, period covered, and a summary section. The 'bulletin.html' tab shows a more detailed template for a bulletin page with sections for extreme phenomena, forecasts, and recommendations. The 'login.html' and 'sign_up_login.html' tabs show templates for user authentication pages.

Figure 35: Interface de développement Visual Studio Code