

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITE DE DOUALA

THE UNIVERSITY OF DOUALA

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
POLYTECHNIQUE DE DOUALA

NATIONAL HIGH POLYTECHNIC
SCHOOL OF DOUALA

DÉPARTAMENT DE METEOROLOGIE
B.P 2701 Douala

DEPARTEMENT OF METEOTOLOGY
P.O. Box 2701 Douala

Email:infos.udla@univ.douala.com

Email:https://www.univ-douala.cm

**Modélisation prédictive des conditions
des conditions météorologiques marégraphiques
du Port Autonome de Douala
à partir l'IA**

Rédigé par :

ENGOULOU Thierry
Matricule : 22G00824

Encadré par :

NOM Prénom
Grade
Lieu de service

NOM Prénom
Grade
Lieu de service

Dédice

Je dédie ce travail à famille nucléaire qui m'a toujours soutenue et qui m'encourage sans relache dans tout ce que j'entreprend.

Remerciements

Je remercie M. xxxx

- xxxx
- xxx

Table des matières

Liste des Abréviations

IA : Intelligence Artificielle

LSTM : Long Short Term Memory

API : Application Programming Interface

CAPC-AC : Centre D'application pour les Prévisions Climatiques en Afrique Centrale

OMM : Organisation Météorologiques Mondiale

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

CSV : comma Separated Values

CNN : Convolutional Neural Network

GPS : Global Positioning System

Streamlit : Framework Python pour Créer des Applications Web de Visualisation

Tensorflow : Bibliothèque Open Source de Machine Learning Développé par Google

ONR : Observation National des Risques

UTC : Coordinated Universal Time

ONACC : Observatoire National sur les Changements Climatiques

GUI : Graphical User Interface

DMN : Direction de la Météorologie National

MAE : Mean Absolute Error

ML : Machine Learning

MAPE : Mean Absolute Error

RMSE : Root Mean Squared Error

RCP : Représentation Concentration Pathways

CDO : Climate Data Operator

MongoDB : Base de Données NoSQL Orienté Document

OpenWeather : Plateforme de Données Météorologique en Ligne

WRF : Weather Research and Forecasting Model Ligne

GEBCO : General Chart of the Oceans Model Ligne

SM2,SM3,SM4 : Station Météorologique Marégraphiques 2,3 et 4 du Port Autonome de Douala

Autonome Port Autonome de Douala

OMI : Organisation Maritime Internationale

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

PAD : Port Autonome de Douala

AWS : Automatic Weather Stations

Table des figures

Liste des tableaux

Resumé

-1- deee

Dans un contexte de vulnérabilité croissante face aux événements météorologiques extrêmes et à la montée du niveau de la mer, ce travail propose le développement d'un système de prévision météorologique et marégraphique pour le Port Autonome de Douala. En s'appuyant sur des données collectées auprès de stations locales (SM2, SM3, SM4) du Port Autonome de Douala, complétées par des sources externes (OpenWeatherMap, Windy, Copernicus,...), un modèle de deep learning de type LSTM a été entraîné pour prédire la température et les précipitations à court terme. Les données sont stockées dans une base MongoDB et accessibles via une API Flask, tandis que l'interface web de visualisation, développée avec Streamlit et React.... , permet une analyse dynamique et interactive des paramètres. Cette plateforme a été pensée pour un usage opérationnel quotidien, notamment pour appuyer la prise de décision dans les secteurs portuaire, maritime et urbain.

Mots-clés : Port Autonome de Douala ,MachineLearning , Intelligence Artificielle, Long Short Term Memory ,Application Programming Interface,Séries Temporelle, PrévisionMétéorologique et Marégraphique.

Abstract

XXXX

-2- deee

Introduction Générale

Le changement climatique, l'urbanisation rapide et la pression croissante sur les zones côtières rendent la prévision météorologique et marégraphique plus que jamais indispensable, notamment dans des villes comme Douala. En tant que principal port maritime du Cameroun et plaque tournante économique, Douala est particulièrement exposée aux phénomènes climatiques extrêmes (précipitations intenses, houles, montée des eaux,...) qui peuvent affecter la sécurité portuaire, les activités de pêche, le transport maritime, ainsi que les infrastructures côtières. Or, les systèmes de prévision disponibles sont souvent globaux, peu localisés, ou limités dans leur accessibilité en temps réel. Cette problématique soulève la nécessité de concevoir une solution locale, automatisée, intégrant à la fois des données collectées en temps réel sur le terrain et des algorithmes d'intelligence artificielle adaptés à la nature séquentielle des phénomènes météorologiques.

-3- Contexte général et Problématique

-3-1- Contexte général

Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation des événements météorologiques extrêmes (pluies intenses, houles, submersions, etc.), les régions côtières comme celle de Douala deviennent particulièrement vulnérables aux aléas climatiques. Ces phénomènes affectent non seulement la sécurité des infrastructures portuaires, mais aussi les activités économiques liées au commerce maritime, à la pêche, ou encore à la gestion urbaine. Face à ces enjeux, les technologies d'intelligence artificielle et en particulier les modèles de deep learning comme le LSTM (Long Short-Term Memory) offrent de nouvelles perspectives pour analyser et prédire les séries temporelles météorologiques avec une précision accrue. En parallèle, la vulgarisation des outils de visualisation web comme Streamlit,... permet de rendre ces données accessibles et compréhensibles pour les utilisateurs finaux.

Notre travail s'inscrit ainsi dans une démarche d'aide à la décision en temps réel, en combinant :

- La collecte automatisée de données météo à partir d'OpenWeatherMap.
- L'entraînement d'un modèle prédictif LSTM multivarié pour la température et la précipitation .

- Développer une interface web interactive de visualisation et de diffusion en temps réel des prévisions .
- L'intégration d'outils de prévision tiers (Windy, Copernicus) pour compléter l'analyse
- Le développement d'une application web interactive pour la visualisation, l'analyse, et la diffusion quotidienne des prévisions.

-3-2- Problématique

Développer une solution complète de prévision en temps réel des paramètres météorologiques et marégraphiques dans le port de Douala, en combinant des données locales, un modèle prédictif basé sur les réseaux LSTM et une interface web interactive

-3-3- Objectifs

- Structurer les données météorologiques et marégraphiques issues des stations SM2, SM3 et SM4 du Port Autonome de Douala, ainsi que de sources ouvertes comme Open-WeatherMap.
- Mettre en œuvre un processus de prétraitement des données (nettoyage, normalisation, séquençage) adapté aux modèles de séries temporelles multivariées.
- Concevoir, entraîner et valider un modèle de deep learning (LSTM) pour la prédiction à court terme de la température et des précipitations.
- Développer une plateforme web permettant la visualisation des données, des prévisions et l'accès aux outils d'aide à la décision.
- Préparer l'intégration de modèles marégraphiques externes (Windy, Copernicus) pour enrichir les prévisions maritimes futures.

Chapitre I

État de l’art scientifique

Introduction

Dans un contexte mondial marqué par l’accélération des dérèglements climatiques, la maîtrise des paramètres météorologiques et marégraphiques constitue un enjeu stratégique pour les zones côtières à forte densité d’activités économiques, notamment les ports [?]. Le Port Autonome de Douala est particulièrement vulnérable aux variations du niveau de la mer, aux précipitations extrêmes, et aux tempêtes côtières [?]. Les avancées récentes en matière de technologies d’observation, combinées à la modélisation mathématique et à l’intelligence artificielle, offrent de nouvelles perspectives pour anticiper et gérer ces phénomènes [?]. Ainsi, l’introduction du machine learning dans le traitement des séries temporelles environnementales ouvre la voie à des prévisions plus fines, plus réactives, et mieux contextualisées localement [?]

I-1- Le contexte portuaire et ses enjeux environnementaux

I-1-1- Contexte portuaire

Le Port Autonome de Douala, joue un rôle stratégique dans l’économie nationale et sous-régionale. Situé dans l’estuaire du Wouri, il assure environ 95 % du trafic maritime national et constitue un axe de transit majeur pour les pays enclavés tels que le Tchad et la République Centrafricaine [?]. Rapport annuel d’activités 2023 : Performances, attractivité et compétitivité du port de Douala-Bonabéri. Douala, Cameroun.). Cette localisation lui confère une importance logistique mais aussi une vulnérabilité accrue aux variations naturelles telles que les marées, les crues et l’érosion côtière [?]. Effets du changement climatique sur l’érosion et les inondations

côtières au Bénin, en Côte d'Ivoire, en Mauritanie, au Sénégal et au Togo. Le PAD est également un centre d'activités complexes (commerce, pêche, hydrocarbures, douanes, etc.), ce qui nécessite une planification efficace des opérations portuaires. Or, ces activités sont fortement conditionnées par les facteurs météorologiques et marins, comme la visibilité, le vent, les vagues, ou encore les niveaux d'eau [?].

I-1-2- Enjeux environnementaux

Le littoral camerounais est exposé à de nombreux aléas naturels, dont l'élévation du niveau de la mer, les tempêtes tropicales et les inondations. Ces phénomènes sont exacerbés par les effets du changement climatique, en particulier dans la zone côtière de Douala, où les précipitations abondantes combinées à un réseau de drainage urbain insuffisant aggravent les risques d'inondations [?]

De plus, la pollution marine et les activités humaines (dragage, rejet d'eaux usées, déforestation des mangroves) affectent la biodiversité et modifient les équilibres naturels du port [?].

I-2- Données météorologiques et marégraphiques

I-2-1- Types de données météorologiques

Les données météorologiques utilisées dans les systèmes de prévision portuaire incluent principalement : la température de l'air, la pression atmosphérique, l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent, les précipitations, la visibilité et parfois la couverture nuageuse [?]. Ces variables sont mesurées à l'aide de capteurs installés sur des stations météorologiques automatisées, souvent couplées à des instruments GPS pour la géolocalisation [?]. Ces informations sont généralement collectées à intervalles réguliers (chaque 10 à 60 minutes...) afin de permettre des analyses de séries temporelles et d'éventuelles détections d'anomalies. Elles sont cruciales pour les manœuvres portuaires, la sécurité des navires à quai ou en approche, ainsi que pour la planification des escales [?].

I-2-2- Types de données marégraphiques

Les données marégraphiques se divisent principalement en deux catégories : les données de hauteur de la surface marine et les données de mesures associées. Les données de hauteur peuvent être instantanées ou moyennes sur une période donnée, et sont enregistrées par des marégraphes de surface ou plongeurs. Les mesures associées incluent la pression, la température et la conductivité de l'eau, ainsi que la pression atmosphérique. Les données marégraphiques désignent les mesures du niveau de la mer en un point donné, généralement obtenu grâce à des

capteurs marégraphiques, à radar ou à pression, installés sur les quais ou les bouées [?]. Les variables marégraphiques comprennent : le niveau moyen de la mer, les hauteurs de marées, la période des vagues, et parfois les vitesses de courants marins [?]. Dans les ports tropicaux comme Douala, ces données sont sensibles aux effets de la marée semi-diurne, aux variations saisonnières induites par les précipitations, ainsi qu'aux remontées d'eau liées à l'embouchure du fleuve Wouri [?].

Schema

FIGURE 1 – *Anomalies de la température moyenne mondiale de l'air (lignes pleines) et de l'élévation thermostérique du niveau de la mer (lignes pointillées) par rapport à la moyenne de 2000-19 pour les scénarios RCP6.0, RCP4.5 et RCP2.6.*

I-2-3- Importance des données météorologiques et marégraphiques

L'exploitation des données météorologiques et marégraphiques permettent d'anticiper les conditions critiques pour les opérations portuaires, telles que les vents violents pouvant gêner l'accostage ou le déchargement des navires, ou encore les épisodes de fortes pluies pouvant provoquer des interruptions logistiques [?]. À long terme, ces données permettent également de modéliser des tendances climatiques locales, utiles pour la planification des infrastructures portuaires [?]. Dans le cas du PAD, la connaissance en temps réel de la vitesse et de la direction du vent, par exemple, est un paramètre essentiel pour le pilotage et la sécurité maritime dans l'estuaire du Wouri [?]. Explorer de nouvelles voies dans la météorologie maritime. Ils nous permettent de se projeter dans le futur et avoir une connaissance de l'état de l'atmosphère

– évolution du climat mondial à long terme :

Les courbes pleines représentent les anomalies (écarts) de la température moyenne mondiale de l'air, tandis que les courbes pointillées montrent l'élévation du niveau de la mer due à la dilatation thermique des océans (appelée élévation thermostérique), le tout, Les zones ombrées mettent en évidence les horizons temporels d'intérêt et leurs années de référence nominales. L'image du bas montre les anomalies spatiales par rapport à la moyenne 2000-19 pour les climats de 2100, de 2200 et de 2500 selon les trois RCP [?].

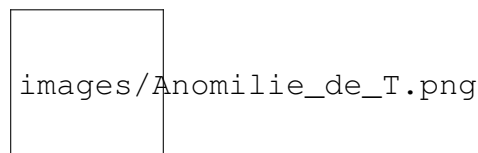


FIGURE 2 – *Anomalies de la température moyenne mondiale de l'air (lignes pleines) et de l'élévation thermostérique du niveau de la mer (lignes pointillées) par rapport à la moyenne de 2000-19 pour les scénarios RCP6.0, RCP4.5 et RCP2.6.*

Le manque de données marégraphiques et météorologiques fiables peut ne pas être la cause directe d'un chavirage, mais il constitue un facteur aggravant dans plusieurs incidents maritimes. Voici quelques exemples illustrant :

- **Le chavirage du trimaran *Solitaires en Peloton* – ARSEP (2024)** Ce trimaran de la classe *Ocean Fifty* a chaviré au sud de l'Espagne lors d'un convoyage de retour. Le skipper Thibaut Vauchel-Camus a expliqué que le bateau a fait un « soleil » en pleine nuit, probablement à cause d'un déséquilibre soudain ou d'une rafale mal anticipée. Cependant, les causes sont : **Conditions météorologiques extrêmes** : vents forts, bourrasques ou orages ; **Erreur de navigation ou de stratégie** : mauvaise évaluation des trajectoires ou des phénomènes météo ; **Problèmes techniques ou mécaniques** : défaillances d'équipements ou problèmes structurels ; **Mauvaise gestion du vent ou des vagues** : surtout lors de manœuvres à haute vitesse).

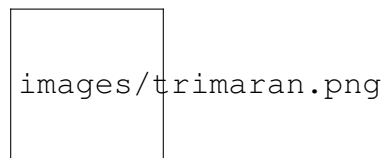


FIGURE 3 – *Le trimaran Solitaires en Peloton – ARSEP a chaviré fin 2024, apparemment au large de l'Espagne. Après cet incident, le bateau a été ramené au port pour des réparations importantes, incluant un chantier hivernal. Il a été remis à l'eau en mai 2025*

- **Le cas du Cougar Ace (2006)** Ce navire transportant des véhicules a chaviré au large de l'Alaska lors d'un transfert de ballast. Bien que l'incident soit principalement lié à une mauvaise gestion de la stabilité, une meilleure connaissance des conditions locales, y compris les variations du niveau de la mer, aurait pu contribuer à éviter l'accident [?]

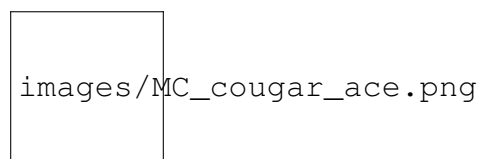


FIGURE 4 – *Le MV Cougar Ace, un roulier battant pavillon singapourien, a connu un incident notable en 2006. (<https://grassrootsmotorsports.com/forum/off-topic-discussion/anybody-remember-the-cougar-ace-the-ship-transporting-mazdas-that-rolled-over-in-2006/81969/page1/>)*

- **Le naufrage du MV Derbyshire (1980)** : Ce vraquier britannique a coulé en mer de Chine méridionale avec 44 personnes à bord. Bien que les causes aient été attribuées à des vagues extrêmes, les enquêtes ont révélé un manque de données précises sur les pressions sous-marines et les hauteurs de vagues, ce qui a limité la compréhension des mécanismes de rupture

de la coque. Cet événement a conduit à une amélioration des systèmes de mesure océanographique et à la reconnaissance de l'importance des données marégraphiques dans la conception navale [?]

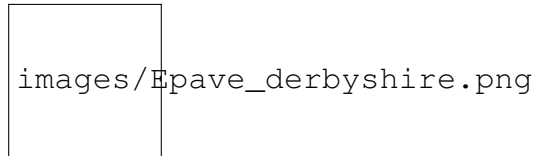


FIGURE 5 – *Le MV Cougar Ace, un roulier battant pavillon singapourien, a connu un incident notable en 2006. (<https://grassrootsmotorsports.com/forum/off-topic-discussion/anybody-remember-the-cougar-ace-the-ship-transporting-mazdas-that-rolled-over-in-2006/81969/page1/>)*

-Ports d'Afrique de l'Ouest :Des rapports de l'UNESCO et de l'OMI ont souligné que le manque de stations marégraphiques fiables dans des ports comme ceux du Golfe de Guinée augmente les risques pour les navires, notamment lors des manœuvres en période de marée mal anticipée. L'absence de données en temps réel peut compromettre la sécurité des opérations portuaires.

Parlant des Normes de stabilité et conception navale,des articles spécialisés, comme celui de Chasse Marée, rappellent que la stabilité d'un navire dépend aussi de la connaissance précise des conditions maritimes, y compris les marées. L'application de normes comme l'ISO 12217 repose sur des données fiables pour évaluer la résistance au chavirement.

Nous avons des ports qui ont augmenté leurs chiffres d'affaire en intégrant la météo dans leurs espace portuaire,nous pouvons parler de :

- HAROPA PORT (France) :Le groupement HAROPA (Le Havre, Rouen, Paris) a vu son chiffre d'affaires grimper à 437 millions d'euros en 2024 , en hausse de 3,6 %. Cette croissance est liée à une meilleure gestion logistique, notamment grâce à des outils numériques intégrant des données météorologiques et maritimes pour optimiser les escales, les transbordements et les flux multimodaux(HAROPA PORT. (2025) [?].

- Port d'Itajaí (Brésil) :En 2017, ce port a dû fermer pendant près d'un mois à cause de fortes précipitations. Depuis, il a investi dans des systèmes de prévision météorologique et hydrologique pour anticiper les événements extrêmes. Ces mesures ont permis de réduire les interruptions d'activité , ce qui a un impact direct sur la performance économique [?].

-Port de Rotterdam (Pays-Bas) :Bien qu'aucun chiffre précis ne soit cité ici, Rotterdam est un pionnier dans l'utilisation de jumeaux numériques intégrant des données météo, marégraphiques et logistiques. Cela permet d'optimiser les fenêtres d'accostage et de réduire les temps d'attente, ce qui améliore la productivité globale [?]. Les données marégraphiques sont tout aussi importantes, car elles conditionnent directement l'accessibilité des quais et des

chenaux d'accès portuaires. Une faible marée peut interdire à certains navires de manœuvrer, tandis qu'une surcote marine due à une tempête peut submerger des installations côtières [?].

I-3- Intelligence Artificielle et Machine Learning

I-3-1- Définitions

L'Intelligence Artificielle est un domaine de l'informatique qui vise à créer des systèmes capables d'accomplir des tâches nécessitant normalement l'intelligence humaine, telles que la reconnaissance vocale, la prise de décision, l'apprentissage ou la compréhension du langage [?]. Elle englobe des sous-domaines tels que la robotique, le traitement automatique des langues, la vision par ordinateur et l'apprentissage automatique (machine learning).

Le Machine Learning est une branche de l'IA qui consiste à entraîner des algorithmes à partir de données, afin qu'ils puissent faire des prédictions ou prendre des décisions sans avoir été explicitement programmés pour cela [?]. Il s'appuie sur des techniques statistiques et algorithmiques pour extraire des relations cachées dans les données .

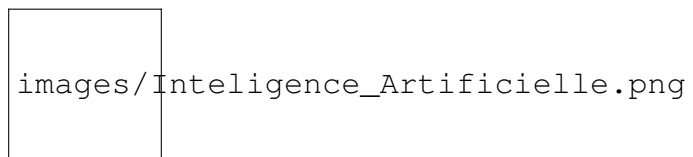


FIGURE 6 – *Le MV Cougar Ace, un roulier battant pavillon singapourien, a connu un incident notable en 2006. (<https://grassrootsmotorsports.com/forum/off-topic-discussion/anybody-remember-the-cougar-ace-the-ship-transporting-mazdas-that-rolled-over-in-2006/81969/page1/>)*

I-3-2- Évolution de l'intelligence artificielle

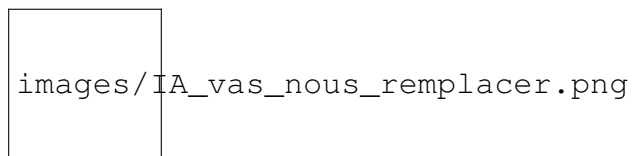


FIGURE 7 – l'IA va-t-elle nous remplacer ?

Le développement de l'IA a connu plusieurs phases, marquées par des avancées techniques et des périodes de stagnation appelées "AI winters". Les débuts remontent aux années 1950 avec des pionniers comme Alan Turing et John McCarthy. Cependant, c'est dans les années

2010 que l'IA a connu une accélération significative, grâce à l'explosion des volumes de données (big data), à la puissance de calcul accrue et à la généralisation des réseaux de neurones profonds (deep learning) [?]. Aujourd'hui, l'IA est appliquée dans des domaines aussi variés que la santé, les transports, la finance ou encore la prévision environnementale, notamment pour l'analyse de séries temporelles climatiques [?] .

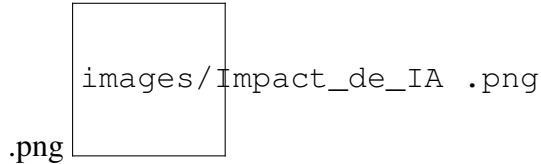


FIGURE 8 – Impact de l'automatisation sur l'emploi (<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

L'intelligence artificielle ne vise pas à remplacer l'humain, mais plutôt à automatiser certaines tâches, souvent répétitives, dangereuses ou très complexes. Par exemple, dans des domaines comme la médecine, l'aviation ou la logistique portuaire, l'IA peut analyser des volumes massifs de données pour aider à la prise de décision, sans pour autant se substituer à l'expertise humaine

I-3-3- Le machine learning appliqué aux séries temporelles environnementales

Les séries temporelles sont des ensembles de données chronologiques dans lesquelles les observations sont indexées dans le temps. En météorologie et en marégraphie, ces séries sont essentielles pour détecter des tendances, anomalies ou régularités [?]. Le machine learning permet d'exploiter ces séries pour la modélisation prédictive. Des algorithmes comme les régressions linéaires, les forêts aléatoires (random forests), ou les réseaux de neurones récurrents sont capables de prédire les valeurs futures à partir d'un historique de données [?] . Ces modèles apprennent automatiquement les comportements complexes, parfois non linéaires, qui régissent les phénomènes naturels tels que les marées, les vents ou les précipitations.

I-3-4- Fonction du modèle LSTM

Les Long Short-Term Memory sont une architecture particulière des RNN conçue pour surmonter le problème du "gradient qui disparaît" [?]. Ils possèdent des mécanismes appelés "portes" (qui sont comme des filtres automatiques) qui régulent le flux d'information, permettant au réseau de retenir ou d'oublier certaines informations sur de longues périodes. Les LSTM sont particulièrement efficaces dans le domaine des prévisions environnementales, car ils sont capables de mémoriser les cycles temporels comme les cycles de marée ou les tendances saisonnières, tout en réagissant à des changements brusques comme les événements extrêmes

météorologiques [?]. Dans le contexte du Port Autonome de Douala, l'utilisation d'un LSTM permettrait de modéliser avec précision les conditions météorologiques et marégraphiques en prenant en compte la variabilité temporelle propre à la zone [?].

I-4- Prévision marégraphique et météorologique

I-4-1- Prévision des niveaux d'eau

La prévision des marées repose historiquement sur l'analyse harmonique, une méthode qui décompose les niveaux marins en une somme d'ondes sinusoïdales liées à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil [?]. Toutefois, cette approche atteint ses limites dans les zones portuaires complexes où les interactions entre les facteurs astronomiques et météorologiques sont non linéaires. D'où l'intérêt de méthodes plus modernes fondées sur l'apprentissage automatique [?]. Les réseaux de neurones, notamment les modèles LSTM, permettent aujourd'hui de prédire le niveau de la mer avec une grande précision en intégrant aussi bien les composantes astronomiques que les influences atmosphériques telles que la pression ou le vent [?]

I-4-2- Prévision des marées

La prévision des niveaux d'eau dans les estuaires et les zones côtières comme le Port de Douala est un enjeu crucial pour la sécurité maritime et la gestion des infrastructures [?]. Les facteurs qui influencent le niveau de l'eau sont multiples : marée, débit fluvial, pression atmosphérique, vent, et houle [?]. Des modèles hybrides combinant données in-situ et modèles statistiques ou réseaux neuronaux profonds sont de plus en plus utilisés dans les ports tropicaux. Ils permettent d'anticiper les périodes de submersion ou d'étiage et d'ajuster les opérations portuaires en conséquence [?]

I-4-3- Prévision météorologique locale

La prévision météorologique à échelle locale est rendue difficile par l'influence de facteurs microscopiques : topographie, urbanisation, effets de mer, ... À Douala, le climat équatorial humide complique davantage les prévisions en raison de la variabilité des précipitations et des vents [?]. Les modèles numériques comme WRF sont utilisés à cette fin, mais leur précision augmente lorsque leurs sorties sont corrigées par des modèles de machine learning utilisant des observations locales [?]. Des techniques de nowcasting, comme les modèles LSTM ou CNN-LSTM, sont également efficaces pour des prévisions horaires en temps réel [?]

I-4-4- Gestion des anomalies et des événements extrêmes

La gestion des événements extrêmes (orages violents, marées de tempête, vagues de submersion) exige des systèmes d'alerte précoces basés sur des prédicteurs sensibles aux changements soudains [?]. Les modèles classiques de prévision échouent souvent face à ces anomalies, car ils sont calibrés sur des données "normales". Les techniques d'apprentissage profond, comme les auto-encodeurs ou les LSTM robustes, sont capables de détecter des patterns atypiques dans les séries temporelles [?]

I-5- Données ouvertes et valorisation open data

I-5-1- La notion d'open data et son impact scientifique

Le concept de données ouvertes désigne les données accessibles librement par tous, sans restrictions techniques ou légales, et pouvant être utilisées, modifiées et partagées (Open Knowledge Foundation. (2015). The Open Definition : Defining Open in Open Data, Open Content and Open Knowledge.

). Dans le contexte environnemental, cette ouverture permet une démocratisation de l'accès à l'information, un renforcement de la transparence, et surtout une accélération de l'innovation scientifique [?]. De nombreuses institutions internationales, telles que la NASA, la NOAA ou encore l'OMM, encouragent la mise à disposition libre de données climatiques pour soutenir la recherche, la gouvernance environnementale et la prévention des risques naturels [?]

I-5-2- Importance pour la prévision environnementale locale

Pour des pays comme le Cameroun, où les infrastructures de mesure sont encore limitées, les initiatives open data permettent de combler les lacunes d'observation grâce à l'intégration de sources satellites, capteurs citoyens ou réseaux collaboratifs comme GLOBE ou OpenWeatherMap [?]. Dans le cas du Port Autonome de Douala, l'accès libre aux données météo-marégraphiques peut améliorer significativement les prévisions, l'alerte précoce, et la gestion des opérations portuaires [?]. De plus, la réutilisation des données par les développeurs, chercheurs et startups favorise l'émergence d'applications utiles : cartographies interactives, systèmes de veille maritime, visualisations en temps réel, etc [?].

I-5-3- Valorisation scientifique et économique des données ouvertes

Les données ouvertes ne sont pas uniquement un support technique ; elles représentent un levier stratégique de développement économique. Dans de nombreux pays, elles ont favorisé

l'apparition d'écosystèmes d'innovation autour des données climatiques et marines [?]. En Europe par exemple, l'initiative Copernicus a permis la création de centaines de services à haute valeur ajoutée, dans les domaines de l'agriculture, de la pêche, de la logistique ou de la gestion des catastrophes [?].

I-5-4- Enjeux éthiques, techniques et de souveraineté

Malgré ses avantages, l'open data soulève également des enjeux critiques : la qualité des données, leur sécurité, la protection de la vie privée, et surtout la souveraineté numérique des pays du Sud [?]. Une stratégie de données ouvertes doit donc reposer sur des principes éthiques clairs, une gouvernance partagée entre acteurs publics, privés et communautaires, et des outils open source adaptés aux contextes locaux.

Conclusion

Cette revue de littérature a permis de souligner la complexité et la multidimensionalité des processus météo-marégraphiques affectant les zones portuaires. Le Port Autonome de Douala illustre bien la nécessité d'une observation fine et d'une anticipation rigoureuse des variables environnementales, notamment dans un contexte de changement climatique et d'urbanisation rapide [?]. L'analyse a mis en évidence que les données météorologiques et marégraphiques, bien que parfois fragmentées ou hétérogènes, constituent un socle essentiel pour toute démarche de prévision [?]. Les techniques d'intelligence artificielle, et plus particulièrement les réseaux neuronaux récurrents de type LSTM, apparaissent comme des outils prometteurs pour modéliser les dynamiques non linéaires de ces séries temporelles [?]. Enfin, la valorisation des données à travers des plateformes open data constitue un levier de transparence, d'innovation et d'appropriation citoyenne, à condition que les questions d'éthique, de gouvernance et d'accessibilité soient pleinement intégrées [?].

Chapitre II

Méthodologie de collecte ,de traitement et de modélisation

Introduction

La modélisation prédictive des conditions environnementales repose sur une méthodologie rigoureuse intégrant à la fois des données fiables, des outils technologiques adaptés et une approche algorithmique performante. Ce chapitre présente le cadre opérationnel de notre étude, en commençant par la zone géographique d'intérêt, à savoir le Port Autonome de Douala , principal carrefour maritime du Cameroun situé entre 4°02'N et 9°41'E. Les différentes étapes méthodologiques sont détaillées : depuis la caractérisation de la zone d'étude jusqu'à l'acquisition , la préparation des données météorologiques et marégraphiques. L'accent est mis sur les outils de mesure utilisés (stations SM2, SM3, SM4), la structure des bases de données, ainsi que les traitements algorithmiques appliqués aux séries temporelles. Le choix du modèle LSTM est justifié par sa robustesse dans l'analyse des phénomènes séquentiels non linéaires typiques des données environnementales. Par ailleurs, nous décrivons les processus de visualisation via une plateforme interactive développée avec Streamlit et react, permettant un accès en temps réel aux données et aux prévisions, à des fins de surveillance, de planification portuaire et de gestion des risques.

II-1- Zone d'étude

La zone d'étude retenue pour ce mémoire est le système constitué du (le Port Autonome de Douala, les stations SM2, SM3 et SM4, la station Automatique de d'Akwa) situé dans la ville de Douala, capitale économique du Cameroun. Le PAD est le principal port maritime

du pays, représentant à lui seul plus de 95 % du trafic maritime national [?] . Bilan des activités portuaires 2023. Douala, Cameroun : Direction Générale du PAD.). En tant que plateforme logistique d'envergure, le port est fortement influencé par des facteurs environnementaux, notamment les conditions météorologiques (températures, vents, précipitations,...) et les conditions marégraphiques (niveaux d'eau, houle, marées). Son positionnement géographique dans la plaine côtière du Golfe de Guinée, combiné à la proximité de l'estuaire du fleuve Wouri, rend le port particulièrement vulnérable aux inondations, à l'ensablement et à la montée du niveau de la mer [?] Synthèse disponible via Hysacam – Déchets et inondations

). La maîtrise des conditions atmosphériques et marines y est donc essentielle pour garantir la continuité des opérations portuaires et la sécurité des installations. schema Coordonnées géographiques approximatives du PAD : Latitude : 4.029° N Longitude : 9.672° E Altitude moyenne : 3 à 5 m au-dessus du niveau de la mer Schema du PAD

II-1-1- Représentation de la zone d'étude

La cartographie de la zone d'étude met en évidence l'interconnexion entre le port, le fleuve Wouri, les zones industrielles (Bonabéri, Bassa), les quartiers résidentiels inondables (Akwa Nord, Bépanda), ainsi que les zones de mangroves en dégradation. Le port s'étend sur plus de 1 000 hectares avec plusieurs quais, terminaux pétroliers, silos et bassins de radoub. Une série de stations météorologiques et marégraphiques sont déployées dans cette zone pour surveiller les conditions climatiques et marines en temps réel. L'utilisation d'un système d'information géographique dans ce travail permet de représenter spatialement les zones à risque, les points de collecte de données et les principales infrastructures du port. Cela facilite la corrélation entre les variations météorologiques et les impacts observés sur l'activité portuaire. Schema du PAD

II-1-2- Rôle du port dans les conditions météorologiques de Douala

Le PAD influence, mais est aussi influencé par, les conditions météorologiques locales. Son implantation en zone côtière humide génère une interaction constante entre les masses d'air maritimes et continentales. Le port contribue à :

- Modifier les courants d'air locaux
- accentuer les effets d'îlot de chaleur urbain du fait de ses infrastructures métalliques et bétonnées,

- favoriser l’humidité ambiante, en raison de la présence d’eaux stagnantes, de zones marécageuses et de flux fluvio-marins continus.

Par ailleurs, les équipements portuaires sont particulièrement sensibles aux vents forts, averses tropicales et aux tempêtes locales souvent intenses en saison des pluies . Une prévision fiable de ces phénomènes permet de renforcer les mesures de sécurité, notamment pour les grues, les conteneurs et les opérations de déchargement.

II-1-3- Rôle du port dans les conditions météorologiques nationales

En tant que point stratégique d’échanges économiques, le Port de Douala joue un rôle central dans la régulation des conditions météorologiques locales avec des effets d’amplification à l’échelle régionale. Il constitue un hub d’observation pour plusieurs réseaux météorologiques (Météo Cameroun, Université de Douala, ...) qui alimentent les systèmes nationaux de veille climatique. Son positionnement sur le littoral camerounais en fait un point de référence météorologique national, notamment pour :

- Le suivi des cyclones tropicaux et orages côtiers,
- La prévision des marées pour la navigation fluviale et maritime,
- La collecte de données atmosphériques utiles à la modélisation du climat national.

Les données issues de ses capteurs sont cruciales pour l’alerte précoce en cas d’événements extrêmes, la planification portuaire, mais aussi la calibration de modèles climatiques régionaux utilisés par les agences nationales et partenaires internationaux.

II-2- Présentation des équipements météorologiques et maréographiques du PAD

Le Port Autonome de Douala (PAD), compte tenu de sa position géographique stratégique et de son rôle dans le commerce maritime national, a mis en place un ensemble d’équipements scientifiques pour surveiller les conditions environnementales. Ces dispositifs permettent une acquisition en temps réel de paramètres météorologiques et maréographiques essentiels à la navigation, à la sécurité portuaire et à la planification logistique. Ces instruments sont installés sur différents sites du port et sont exploités par plusieurs entités, notamment Météo Cameroun, le Service hydrographique du PAD et des partenaires techniques comme l’Université de Douala. L’automatisation et la télémessure permettent une transmission continue des données vers des plateformes locales et cloud, facilitant la prévision et la visualisation des phénomènes.

II-2-1- Équipements météorologiques

commentaire

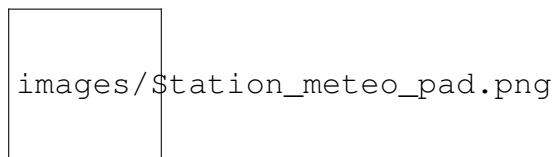


FIGURE 9 – Impact de l'automatisation sur l'emploi
(<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

II-2-1-1- Équipements maréographiques

commentaire



FIGURE 10 – Impact de l'automatisation sur l'emploi
(<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

II-2-2- Présentation , fonctionnement et système d'acquisition de données des stations du PAD

Les stations installées autour du Port Autonome de Douala génèrent des données, La collecte des données météorologiques repose sur deux sources principales : les stations du Port Autonome de Douala (notamment SM2, SM3, et SM4), via radio fréquence et ces données sont stocker en fichier tex :

Graphiques temps réel (température, niveau de la mer, vent, etc.) via dashboards suivant la photo suivant.

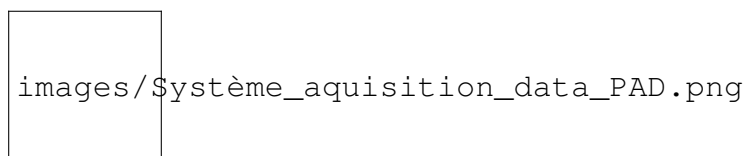


FIGURE 11 – Impact de l'automatisation sur l'emploi
(<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

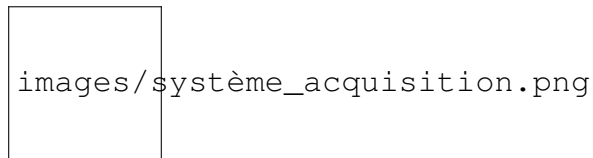


FIGURE 12 – Impact de l’automatisation sur l’emploi (<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

II-3- Système de gestion et de visualisation des données

II-3-1- Collecte des données

Le système d’acquisition de données mis en place dans le cadre de ce projet repose sur un chaînage technologique automatisé, combinant la collecte, la transmission, le stockage et la visualisation local des données environnementales issues du Port Autonome de Douala via cloud. Ce système est fondé sur une approche temps réel, modulaire et évolutive, intégrant des composants open source et des solutions cloud pour faciliter la prévision et l’analyse continue. En effet, certaines stations du port ne capturent pas encore toutes les variables nécessaires pour l’entraînement d’un modèle complet, en particulier les précipitations. C’est pourquoi une station de substitution située à Akwa, proche du port, a été intégrée via OpenWeatherMap pour garantir la disponibilité des cibles (targets) du modèle.

II-3-2- Plateforme de stockage

Les données collectées sont centralisées dans une base de données MongoDB et dans un fichier exell , accessible à distance via une API REST développée avec Flask. Cette API permet de requêter les observations récentes par station, par date, ou selon une limite spécifiée. Elle facilite l’intégration des données dans d’autres systèmes, y compris dans les interfaces de visualisation web. Pour la robustesse et l’accessibilité, cette API est hébergée sur la plateforme Render (<https://data-real-time-2.onrender.com/donnees> et ...).

II-3-3- Visualisation des données

Les données sont affichées dynamiquement sur une interface développée avec Streamlit et react (<https://sitepad-3.onrender.com/>). Elle présente les dernières observations des stations (SM2, SM3, SM4 et station externe), affiche des graphes temporels par station et paramètre, et fournit une carte interactive alimentée par Folium et Plotly sans oublier les prévisions météorologique et maritime. Un iframe Windy et copernicus sont également intégrés pour enrichir l’expérience utilisateur avec des prévisions animées en temps réel.

II-3-4- Présentation des variables utilisées

Les variables utilisées incluent la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent, la pression atmosphérique, direction du vent, précipitation, la hauteur de marée (TIDE HEIGHT) et le SURGE. Ces données ont été collectées sur une période suffisante pour entraîner des modèles de prévision. Les fichiers sources sont sauvegardés dans des formats Excel, puis traités automatiquement via des scripts Python.

II-4- Modélisation prédictive des données

II-4-1- Filtrage des données

Un premier nettoyage est effectué pour retirer les colonnes non numériques ou mal formatées. Les chaînes de caractères, coordonnées géographiques, et dates sont converties ou supprimées lorsque non exploitables. Cette étape est primordiale pour s'assurer que les modèles reçoivent uniquement des données valides.

II-4-2- Prétraitement des données

Un script dédié (`data_preprocessing.py`) assure le traitement des séries temporelles : normalisation (`MinMaxScaler`), découpage en séquences (`time_steps` variant entre 10 et 20), création des jeux de données d'entraînement et de test. Les scalers sont sauvegardés pour une réutilisation cohérente lors de l'inférence.

Le modèle choisi est un LSTM multivarié, implémenté avec Keras. Il comprend plusieurs couches LSTM empilées et des mécanismes de régularisation (`Dropout`, `EarlyStopping`). L'objectif est de prédire la température et les précipitations sur un horizon de 7 jours. Le modèle est entraîné sur les données des stations (SM2, SM3, SM4 et Akwa).

II-5- Développement du site de visualisation

II-5-1- Plateforme de visualisation des données et prévisions en temps réel

Le site web développé avec Streamlit et react propose une visualisation interactive des paramètres météo. Il contient :

- Une carte **Folium** avec les stations géolocalisées.

- Des graphiques dynamiques par station/paramètre.
- Une mini-carte animée **Windy** pour le vent.
- Une interface de téléchargement **CSV**.

Une section supplémentaire est prévue pour afficher chaque matin les prévisions météorologiques et marégraphiques, basées sur le modèle LSTM ainsi que sur les données externes (WRF, Windy, Copernicus).

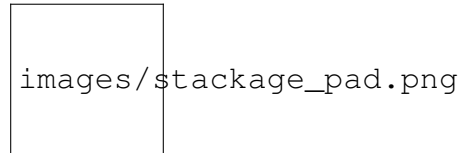


FIGURE 13 – Impact de l’automatisation sur l’emploi (<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

II-6- Limites et perspectives de la méthodologie

II-6-1- Limites matérielles

Les stations du Port Autonome de Douala (SM2, SM3, SM4) n’enregistrent pas toutes les variables nécessaires à une modélisation complète. L’absence de capteurs de précipitations a nécessité le recours à des sources externes comme OpenWeatherMap. De plus, les infrastructures locales ne permettent pas un hébergement serveur 24h/24 fiable sans passer par une plateforme cloud.

II-6-2- Limites logicielles

Le modèle LSTM nécessite un prétraitement rigoureux et une mise à jour régulière. Les prédictions sont sensibles aux séquences manquantes. Par ailleurs, l’intégration de données issues de plateformes tierces (Windy, Copernicus) dans un site web nécessite une gestion des droits d’accès, des APIs externes et une adaptation du format. Le modèle de maré n’a pas été automatisée, mais repose pour l’instant sur l’interprétation d’outils comme Windy ou Copernicus. Cette méthodologie constitue une première base solide pour un système complet de prévision météorologique et marégraphique localisé à Douala, en combinant des données issues de stations réelles et de services numériques avancés.

Conclusion

Le Ce chapitre a permis de décrire en détail l'architecture technique et méthodologique mise en place pour la prévision météorologique et marégraphique à Douala. À travers l'intégration des données issues des stations SM2, SM3 et SM4 du Port Autonome de Douala, complétées par des sources externes fiables comme OpenWeatherMap, un système robuste d'acquisition, de traitement et de visualisation des données a été établi. La modélisation prédictive basée sur les réseaux de neurones LSTM permet de fournir des prévisions multivariées, avec des performances validées selon plusieurs métriques. En parallèle, un site web interactif a été développé pour la diffusion en temps réel des données et des prévisions, appuyé par une infrastructure cloud (Render, MongoDB, google sheets) garantissant l'accessibilité à distance. Malgré certaines limitations matérielles (capteurs incomplets) et logicielles (connexion internet et l'automatisation du modèle des marées), cette approche constitue une base innovante et évolutive pour la surveillance météorologique locale. Elle ouvre également des perspectives d'intégration de prévisions plus avancées via des outils comme WRF, Windy ou Copernicus.

Chapitre III

Résultats et discussion

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble du processus pratique mis en œuvre pour la réalisation du système de prévision météorologique et marégraphique à Douala puis précisément aux Port Autonome de Douala. Cette phase intègre l'entraînement du modèle LSTM, l'évaluation de ses performances, la conception de l'interface web de visualisation ainsi que le déploiement de l'application sur le web. L'objectif final est de proposer un outil accessible, capable de fournir quotidiennement des prévisions fiables généré par un prévisioniste en s'appuyant à la fois sur les données collectées localement et sur des ressources numériques avancées

III-1- Entraînement du modèle prédictif

L'entraînement du modèle s'est basé sur les données météorologiques multivariées collectées auprès des stations SM2, SM3 et SM4 du Port Autonome de Douala, complétées par les données issues d'OpenWeatherMap pour les précipitations. Le modèle est un réseau LSTM multivarié construit avec Keras et TensorFlow. Après un prétraitement rigoureux (nettoyage, normalisation et séquençage), les données ont été divisées en ensembles d'apprentissage (80 %) et de test (20 %). Différents time_steps ont été testés (10, 15, 20) pour déterminer la meilleure fenêtre temporelle pour la prédiction. Le modèle a été entraîné pour prédire deux cibles : la température et les précipitations, sur un horizon de sept jours. Un EarlyStopping a été utilisé pour éviter l'overfitting.



FIGURE 14 – *Les précipitations saisonnières et les SPI saisonnier du Cameroun de 1990-2024*

III-2- Modélisation avec LSTM

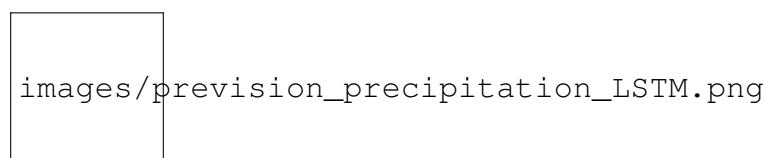


FIGURE 15 – Impact de l'automatisation sur l'emploi
(<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

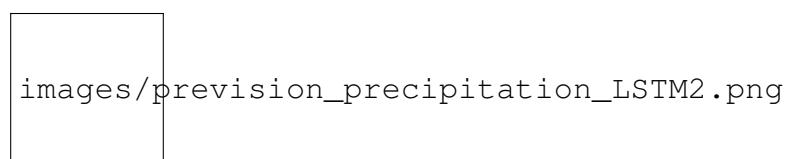


FIGURE 16 – Impact de l'automatisation sur l'emploi
(<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

III-3- Résultats de la prédiction

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide de trois métriques principales :

- **MAE** (Mean Absolute Error)
- **RMSE** (Root Mean Squared Error)

- **MAPE** (Mean Absolute Percentage Error), uniquement sur la température

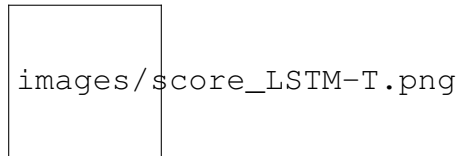


FIGURE 17 – Impact de l’automatisation sur l’emploi (<https://fr.beincrypto.com/apprendre/intelligence-artificielle-remplacer-humain/>)

Les résultats montrent une capacité du modèle à capturer les tendances journalières de la température et des précipitations. Des comparaisons graphiques entre les prédictions et les données réelles sur 7 jours montrent une cohérence satisfaisante. La configuration avec `time_steps = 15` a donné les meilleures performances avec un MAE inférieur à 1.2 pour la température. Des mécanismes de correction post-prédiction ont également été intégrés, notamment pour filtrer les valeurs aberrantes et corriger les prédictions négatives sur les précipitations.

III-4- Conception de l’interface web de visualisation

L’interface utilisateur a été développée avec **Streamlit**, permettant une visualisation interactive des données météo et marégraphiques. Elle comprend :

- Une carte **Folium** des stations géolocalisées.
- Des graphiques **Plotly** pour analyser l’évolution des paramètres par station.
- Un accès aux données historiques avec options de filtrage.
- Une mini-carte **Windy** embarquée pour la prévision du vent en temps réel.

Un module spécifique est également prévu pour publier chaque matin une prévision automatique de la journée en se basant sur le modèle LSTM et sur des données exogènes (WRF, Copernicus, Windy).

III-5- Intégration et déploiement

- Une API Flask connectée à une base MongoDB Atlas hébergée sur Render, servant les données en temps réel : <https://data-real-time-2.onrender.com/donnees>.
- Une interface web Streamlit également déployée sur Render : <https://sitepad-3.onrender.com/>

Ce découplage permet une architecture flexible et évolutive, où la base de données et la logique de prédiction peuvent être mises à jour indépendamment de l’interface utilisateur.

III-6- Perspectives d’évolution

Plusieurs améliorations peuvent être envisagées :

- Intégration d'un modèle spécifique pour la prévision marégraphique à partir de données historiques du port
- Automatisation complète du processus de prédiction quotidienne avec envoi des résultats via email ou notification mobile.
- Amélioration du modèle en testant des architectures hybrides (CNN-LSTM, Transformer)
- Renforcement de la sécurité et authentification des accès à l'API.

III-7- Application

L'application développée permet aux utilisateurs (agents portuaires, pêcheurs, autorités locales) d'accéder à des informations météorologiques et marégraphiques actualisées. Chaque matin, une nouvelle prévision est générée à partir des données récentes et publiée en ligne. La carte interactive et les graphiques permettent une analyse spatio-temporelle des phénomènes. Cette solution a été pensée comme un outil de support à la décision, accessible sur le web, et extensible à d'autres régions côtières du Cameroun.

Conclusion

Ce chapitre a présenté la mise en œuvre concrète du système de prévision météo à Douala, depuis l'entraînement du modèle LSTM jusqu'à son intégration dans une application web interactive. Grâce à une architecture modulaire, à une automatisation du flux de données, et à une interface conviviale, cette solution constitue une base fonctionnelle pour la prévision en temps réel. Elle ouvre la voie à une généralisation à d'autres sites et à une intégration progressive de modèles marégraphiques avancés

Conclusion Générale

Ce travail a permis de concevoir et de mettre en œuvre un système de prévision météorologique et marégraphique localisé sur Douala, en combinant des sources de données locales (stations SM2, SM3, SM4) et ouvertes (OpenWeatherMap, Windy, Copernicus), avec des techniques avancées de modélisation (LSTM). L'approche suivie, à la fois technique et opérationnelle, a abouti à la création d'un outil fonctionnel, accessible via une interface web, offrant à ses utilisateurs une visualisation claire des conditions météo passées, actuelles et prédites. Au-delà des résultats satisfaisants obtenus en matière de précision, cette plateforme ouvre la voie à une utilisation régulière sur le terrain, notamment dans les domaines portuaire, maritime et urbain. Elle démontre également la faisabilité de solutions locales et modernes, basées sur l'intelligence artificielle, pour répondre aux défis climatiques dans les pays en développement. Des perspectives d'amélioration restent ouvertes, notamment pour intégrer une modélisation spécifique des marées, automatiser la génération et la diffusion des prévisions, ou encore étendre le système à d'autres zones côtières du Cameroun et de la sous-région.

**Résumé des principaux résultats Contribution du mémoire Perspective de
recherche et recommandation pour mise place du sysystème**

Bibliographie

- [1] Abraham, J., & Li, X. (2019). *Improving local weather forecasts using machine learning correction of WRF outputs*. Environmental Modelling & Software, **119**, 312–324. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.06.005>
- [2] Akinsanola, A. A., & Ogunjobi, K. O. (2015). *Analysis of rainfall and temperature variability over Nigeria*. Theoretical and Applied Climatology, **123**, 369–384. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1350-7>
- [3] Bianchi, F. M., Livi, L., & Alippi, C. (2017). *Investigating echo-state networks dynamics by means of recurrence analysis*. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, **29**(2), 427–439. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2017.2663841>
- [4] Boko, M., Niang, I., Nyong, A., et al. (2007). *Africa. Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. In M. Parry et al. (Eds.), Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 433–467.
- [5] Bremnes, J. B. (2020). *Ensemble postprocessing using quantile function regression based on quantile forests*. Monthly Weather Review, **148**(1), 403–414. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0220.1>
- [6] Bruckmann, L., Amanejieu, A., Zogning Moffo, M. O., & Ozer, P. (2019). *Urbanisation, risques naturels et résilience dans un contexte de changement climatique à Douala (Cameroun)*. EchoGéo, **48**. <https://doi.org/10.4000/echogeo.17483>
- [7] Chalapathy, R., & Chawla, S. (2019). *Deep Learning for Anomaly Detection : A Survey*. arXiv preprint arXiv :1901.03407. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.03407>
- [8] Commission océanographique intergouvernementale de l’UNESCO (COI-UNESCO). (2016). *Manuel sur la mesure et l’interprétation du niveau de la mer – Volume V : Marégraphes radar* (Manuels et guides n°14, vol. 5). Paris, France : COI-UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246981_fre
- [9] Doumbia, M., Kristensen, P., Desramaut, N., Sarraf, M., & Croitoru, L. (2020). *Évaluation des coûts économiques de la dégradation de l’environnement : Cas de la région du Grand Abidjan*. Documents de travail de la Banque mondiale. <https://documents.worldbank.org/curated/en/985041599010605269>
- [10] European Commission. (2019). *Copernicus Work Programme 2019*. <https://www.copernicus.eu>

- [11] Fernandes, M. J., Silva, R. A., & Costa, A. (2020). *Machine learning approaches for tidal level prediction in estuarine environments*. Ocean Engineering, **209**, 107453. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107453>
- [12] Gaillarde, G. (2001). *Efforts des vagues sur le pont des navires vraquiers type Capesize ou Panamax. Le naufrage du M.V. Derbyshire et ses conséquences*. Mémoire technique, ATMA – Association Technique Maritime et Aéronautique, n°2389.
- [13] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [14] Grand port fluvio-maritime de l’axe Seine. (2024). *Bilan annuel 2024 : Résultats, investissements et transition numérique*. Le Havre, Rouen, Paris : Grand port fluvio-maritime de l’axe Seine.
- [15] Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., & Schmidhuber, J. (2017). *LSTM : A Search Space Odyssey*. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, **28**(10), 2222–2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
- [16] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). *Long Short-Term Memory*. Neural Computation, **9**(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- [17] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting : Principles and Practice* (2^e éd.). OTexts. <https://otexts.com/fpp3/>
- [18] Janssen, M., Charalabidis, Y., & Zuiderwijk, A. (2012). *Benefits, Adoption Barriers and Myths of Open Data and Open Government*. Information Systems Management, **29**(4), 258–268. <https://doi.org/10.1080/10580530.2012.716740>
- [19] Kitchin, R. (2014). *The Data Revolution : Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781473909472>
- [20] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). *Deep learning*. Nature, **521**, 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- [21] Lyon, B., Winter, J. M., & Horton, R. M. (2021). *Climate change projections beyond 2100 : A call for long-term thinking*. Global Change Biology, **27**(19), 4704–4712. <https://doi.org/10.1111/gcb.15748>
- [22] Madianou, M. (2019). *Technocolonialism : Digital Innovation and Data Practices in the Humanitarian Response to Refugee Crises*. Social Media + Society, **5**(3). <https://doi.org/10.1177/2056305119863146>
- [23] Martins, K., Ferreira, Ó., & Matias, A. (2019). *Coastal flooding and overtopping hazards in port infrastructures : A case study from southern Europe*. Natural Hazards and Earth System Sciences, **19**(4), 889–905. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-889-2019>
- [24] Ministère de l’Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable (MINEPDED). (2022). *Rapport sur les vulnérabilités environnementales urbaines à Douala*. Yaoundé, Cameroun : MINEPDED.

- [25] Mitchell, T. M. (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill.
- [26] Morozov, E. (2019). *Cartographie 4.0 : naviguer avec les cartes du XXI^e siècle*. Responsabilité & Environnement, n°94.
- [27] Murara, P., & Marengo, J. A. (2018). *Daily precipitation extremes and their variations in the Itajaí River Basin, Brazil*. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **130**(2), 123–138. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0531-8>
- [28] Ngatcha Nguiffo, J., Tchindjang, M., & Nguendo-Yongsi, H. B. (2021). *Vulnérabilité des espaces urbains à Douala*. Université de Douala.
- [29] Nicholls, R. J., Hanson, S., Herweijer, C., Patmore, N., Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Chateau, J., & Muir-Wood, R. (2008). *Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes : Exposure Estimates*. OECD Environment Working Papers, No. 1. <https://doi.org/10.1787/011766488208>
- [30] Open Knowledge Foundation. (2015). *The Open Definition*. <https://okfn.org>
- [31] Organisation météorologique mondiale (OMM). (2018). *Guide de l'assistance météorologique aux activités maritimes* (Édition 2018, OMM-N° 471). Genève, Suisse : OMM. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5426
- [32] Organisation météorologique mondiale (OMM). (2021). *État du climat mondial 2021*. Genève, Suisse : OMM. https://library.wmo.int/viewer/54009/download?file=1290_Statement_2021_fr.pdf&type=
- [33] Organisation météorologique mondiale (OMM). (2023). *État des ressources en eau dans le monde 2022*. Rapport technique OMM-N° 1333. Genève, Suisse : OMM. <https://library.wmo.int/idurl/4/1333>
- [34] Oueslati, B., Becker, A., & Ng, A. K. Y. (2019). *Climate change adaptation planning in port infrastructure : A global review*. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, **72**, 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.05.005>
- [35] Port Autonome de Douala (PAD). (2023–2024). *Rapports techniques et bilans d'activités*. <https://meteocameroun.gov.cm>
- [36] Peña, J. M., Torres, J., & García, M. (2020). *Automatic weather stations and GPS integration for high-resolution environmental monitoring*. *Sensors*, **20**(12), 3456. <https://doi.org/10.3390/s20123456>
- [37] Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). (2021). *Perspectives environnementales mondiales (GEO-6) pour l'Afrique*. Nairobi, Kenya : PNUE. <https://www.unep.org/resources/report/global-environment-outlook-6-africa>
- [38] Pugh, D. T., & Woodworth, P. L. (2014). *Sea-Level Science : Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>

- [39] Port of Rotterdam Authority & IBM. (2018). *Smart Port Vision : Digital Twin and IoT for Operational Optimization*. Rotterdam, Pays-Bas : Port of Rotterdam Authority.
- [40] Port of Rotterdam Authority & IBM. (2018). *Smart Port Vision : Digital Twin and IoT for Operational Optimization*. Rotterdam, Pays-Bas : Port of Rotterdam Authority.
- [41] Russell, S. J., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence : A Modern Approach* (4^e éd.). Pearson.
- [42] Shamshirband, S., Fathi, M., Dehzangi, A., & Chau, K. W. (2020). *A review of artificial intelligence techniques for short-term load forecasting in smart grids*. Applied Sciences, **10**(2), 590. <https://doi.org/10.3390/app10020590>
- [43] Shi, X., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D.-Y., Wong, W.-K., & Woo, W.-C. (2015). *Convolutional LSTM Network : A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting*. NeurIPS, **28**, 802–810. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.04214>
- [44] Tang, L., Zhang, Y., & Chen, X. (2021). *Impact of extreme weather on port logistics : A case study of wind-induced disruptions*. Journal of Transport Geography, **93**, 103045. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103045>
- [45] UNDRR. (2022). *Alerte précoce et action rapide pour tous*. <https://iddrr.undrr.org/media>
- [46] UNECA. (2020). *Open Data for Africa : Empowering Local Innovation*. <https://uneca.org>
- [47] U.S. Coast Guard & Alaska Department of Environmental Conservation. (2006). *Incident Report : M/V Cougar Ace listing event – Ballast water exchange failure*. Anchorage, Alaska.
- [48] Wang, B., Liu, S., Wu, W., Wang, J., & Shen, D. (2021). *Multi-step ahead short-term predictions of storm surge level using CNN and LSTM network*. Acta Oceanologica Sinica, **40**, 104–118. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1763-9>.
- [49] Zhang, G., Eddy Patuwo, B., & Hu, M. Y. (2020). *Forecasting with artificial neural networks : The state of the art revisited*. International Journal of Forecasting, **36**(1), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.05.001>
- [50] Zhou, J., Liang, W., & Goude, Y. (2022). *Prévision de débits fluviaux à l'aide de modèles hybrides : Application aux bassins versants français*. Projet de Master, Université Paris-Saclay

Annexes

Annexe 1 : Quelques inondations au Cameroun