
Table des matières

INTRODUCTION	ii
I Objectifs du stage	ii
I.1 Objectif général	iii
1 Méthodologie de recherche	1
I Zone d'étude : Port Autonome de Douala	1
II Représentation spatiale de la zone	2
III Influence du port sur le climat local	2
IV Rôle stratégique du port à l'échelle nationale	3
V Présentation du système d'acquisition	3
V.1 Collecte des données	3
V.2 Plateforme de stockage	4
V.3 Visualisation des données	4
V.4 Présentation des variables utilisées	5
VI Modélisation prédictive des données	6
VI.1 Filtrage des données	6
VI.2 Prétraitement des données	6
VI.3 Validation du modèle	6
VII Plateforme de visualisation des données et prévisions	7
VIII Intégration et déploiement	7
VIII.1 Déploiement des données	7
VIII.2 Déploiement des sites web	7
2 RÉSULTATS ET DISCUSSION	8
I Modélisation avec LSTM	8
I.1 Entraînement du modèle prédictif	8
I.2 Résultats de la prédiction avec LSTM	9
I.3 Analyse des Résultats	10

II	Validation du modèle LSMT	11
II.1	Justification méthodologique de la comparaison	11
II.2	Choix justifié du modèle LSTM	12
II.3	Analyse des performances comparées des modèles	12
III	Résultats de la prévision météoroogique des conditions météorologique au PAD . . .	14
III.1	Conception de l'interface web de visualisation	14
3	PRRÉSENTATION DE L'APPLICATION DÉVELOPPÉE	19
.2	Page 1 – Accueil	20
.3	Page 2 – Carte des Stations	21
.4	Page 3 – Données en Temps Réel	22
.5	Page 4 – État du Chenal	23
.6	Page 4 – Alertes Météorologiques	24
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES		26
Conclusion générale		26

INTRODUCTION

Au cours de mon stage effectué au sein du Port Autonome de Douala, j'ai eu l'opportunité de travailler sur une problématique actuelle et stratégique : modélisation prédictive des conditions météorologique aux Port Autonome de Douala(PAD), notamment dans le chenal du PAD. En tant que principal port maritime du Cameroun et centre névralgique de l'économie nationale, Douala est régulièrement confrontée à des phénomènes climatiques extrêmes tels que les précipitations intenses, les houles ou encore la montée du niveau des eaux. Ces événements représentent un risque majeur pour la sécurité portuaire, les infrastructures côtières, les activités de pêche et le transport maritime. Face à ces enjeux, mon stage s'est inscrit dans une démarche de recherche et de développement d'une solution locale, automatisée, capable de fournir des prévisions météorologiques plus précises et accessibles en temps réel. Ce projet repose sur l'intégration de données collectées sur le terrain et l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle adaptés à la nature séquentielle des phénomènes météorologiques. Ce rapport présente le cadre de mon stage, les missions qui m'ont été confiées, les outils mobilisés, ainsi que les résultats obtenus. Il met également en lumière les compétences que j'ai pu développer et les enseignements que je tire de cette expérience professionnelle.

I Objectifs du stage

Les objectifs principaux de mon stage étaient les suivants :

- Mettre en place un système automatisé de collecte de données météorologiques via l'API OpenWeatherMap.
- Entraîner un modèle prédictif LSTM multivarié pour anticiper les variations de température et de précipitations.
- Développer une interface web interactive pour la visualisation et la diffusion des prévisions en temps réel.
- Intégrer des outils de prévision externes (Windy, Copernicus) afin d'enrichir l'analyse.
- Concevoir une application web accessible, intuitive et utile pour les acteurs locaux.

I.1 Objectif général

L'objectif principal de mon stage était de concevoir une solution opérationnelle de prévision météorologique adaptée aux besoins du Port Autonome de Douala. Cette solution vise à améliorer la gestion des risques climatiques en milieu côtier, en combinant des données locales en temps réel, un modèle prédictif basé sur les réseaux de neurones LSTM (*Long Short-Term Memory*), et une interface web interactive destinée aux utilisateurs finaux.

Ce projet s'inscrit dans une démarche d'innovation technologique, en mobilisant des outils d'intelligence artificielle pour la modélisation des variables météorologiques, avec une application concrète aux enjeux portuaires et urbains de Douala. Mon rôle a consisté à participer activement à chaque étape du développement, de la collecte des données à la mise en ligne de l'application.

Présentation de la structure d'accueil

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, il a été demandé de réaliser un stage académique de 3 mois dans une structure en rapport avec le domaine de l'ingénierie industrielle. Le **Port Autonome de Douala (PAD)** est la structure d'attache retenue pour ce projet de fin d'étude. Dans cette partie, l'historique, la mission et l'organisation de l'entreprise sont présentés.

I. Historique du PAD

Les premiers aménagements portuaires auraient été entrepris en 1881 par la firme allemande Woermann-Linie à la suite d'un accord avec les compagnies européennes, en commençant par des bateaux-pontons amarrés au milieu du fleuve. À l'origine, le port n'était qu'un simple terre-plein construit au niveau du village Akwa.

La construction d'un véritable quai en béton sera entreprise à la fin du XIX^e siècle par les Allemands sous l'autorité du gouverneur. À l'indépendance du Cameroun, le port est transféré à l'Office National des Ports du Cameroun (ONPC).

Le Port Autonome de Douala, sous sa forme juridique actuelle, est né en 1999. Créé par décret présidentiel n°99/130 du 15 juin 1999, le PAD est une entreprise publique propriétaire du principal port en activité au Cameroun. Il appartient à l'État Camerounais.

Depuis sa création, le PAD a connu plusieurs directeurs généraux, dont l'actuel est **Monsieur Cyrus NGO'O**, en poste depuis 2016. Le tableau A1-1 en Annexe 1 renseigne sur les différents responsables qui se sont succédé.

II. Objet social du PAD

Société à capital public dotée de la personnalité juridique et de l'autonomie financière, le PAD assure la gestion, la promotion et le marketing du port de Douala. À ce titre, il est chargé :

- De l'assistance et de l'accueil des navires ;
- Des travaux d'équipement, d'extension du port ainsi que de la création et de l'aménagement des zones industrielles portuaires ;

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

- De la sécurité et de la police des opérations d'exploitation portuaire ;
- De la maîtrise d'ouvrage des travaux confiés aux entreprises spécialisées, y compris le dragage.

III. Description générale

Le Port Autonome de Douala est situé dans l'estuaire du fleuve Wouri sur la côte littorale, ouvrant sur l'océan Atlantique. Il assure environ 95% du trafic portuaire national camerounais et constitue le principal port de la zone CEMAC. Il dessert également les pays voisins sans accès à la mer tels que le Tchad et la République Centrafricaine grâce à des accords bilatéraux.

TABLE 1 – Fiche signalétique du PAD

Raison sociale	Port Autonome de Douala
Sigle	PAD
Création	Décret présidentiel n°99/130 du 15 juin 1999
Siège social	Douala, Cameroun
Adresse	BP 4020, Guichet Unique, Bonanjo, Douala
Localisation	04°03'5 N, 09°41'8 E, dans le Golfe de Guinée
Dirigeants	DG : M. Cyrus NGO'O DGA : M. MOUKOKO NJOH Charles Michaux PCA : M. Shey Jones YEMBE
Téléphones	+237 233 42 01 33 / 233 42 73 22 / 233 43 55 84
Fax	+237 233 42 67 97
Site web	www.portdedouala-cameroun.cm
Email	pad@portdedouala-cameroun.com
Activités Accès	Gestion, aménagement et exploitation portuaire Port d'estuaire relié à la mer par un chenal de 50 km Largeur du chenal : 150 m Profondeur : -7,00 m (+2,0 m de marnage) 39 bouées de balisage latéral (système A)
Liaisons terrestres	20 km de route bitumée vers l'hinterland 20 km de voies ferrées (Douala–Ngaoundéré) Extensions routières vers le Tchad et la RCA
Terminaux	Céréalier, Conteneurs, Bois, Mixte fruitier, Minéralier, Pétrolier, Port de pêche
Services	<i>Aux navires</i> : pilotage, remorquage, lamanage, réparation, consignation, ravitaillement, séjour à quai <i>À la marchandise</i> : manutention, stockage, transit, industrie

IV. Situation géographique

Le Cameroun dispose d'une façade maritime d'environ 400 km sur l'océan Atlantique. Le PAD est localisé à Douala, à l'embouchure du fleuve Wouri, sur la côte littorale. Il constitue la principale

port maritime du pays, situé à mi-chemin entre l'Afrique du Nord et l'Afrique australe.

C'est un port d'estuaire, c'est-à-dire établi sur un fleuve mais influencé par la mer. Ses coordonnées géographiques sont $04^{\circ}03'5$ de latitude Nord et $09^{\circ}41'8$ de longitude Est. Il couvre une superficie de 1000 hectares, dont 600 sont actuellement exploités.

1-Accès maritime au Port Autonome de Douala

Venant de la mer, l'accès au Port Autonome de Douala (PAD) se fait en empruntant un chenal de navigation d'environ 50 km, divisé en deux segments d'égale longueur. Ce chenal est balisé par des bouées lumineuses conformes au système latéral uniforme, garantissant la sécurité de la navigation, de jour comme de nuit.

- **Le chenal extérieur**, long de 25 km, s'étend entre la bouée d'atterrissement (Wouri Buoy) et la bouée de base.
- **Le chenal intérieur**, également long de 25 km, débute à la bouée de base et s'étend jusqu'à la bouée située au kilomètre 40, au niveau du pont sur le Wouri. Il est large d'environ 150 mètres cf Figure1.

Ces deux tronçons assurent un lien fluide entre la haute mer et les infrastructures portuaires, permettant l'accès des navires au terminal du PAD dans des conditions optimales.

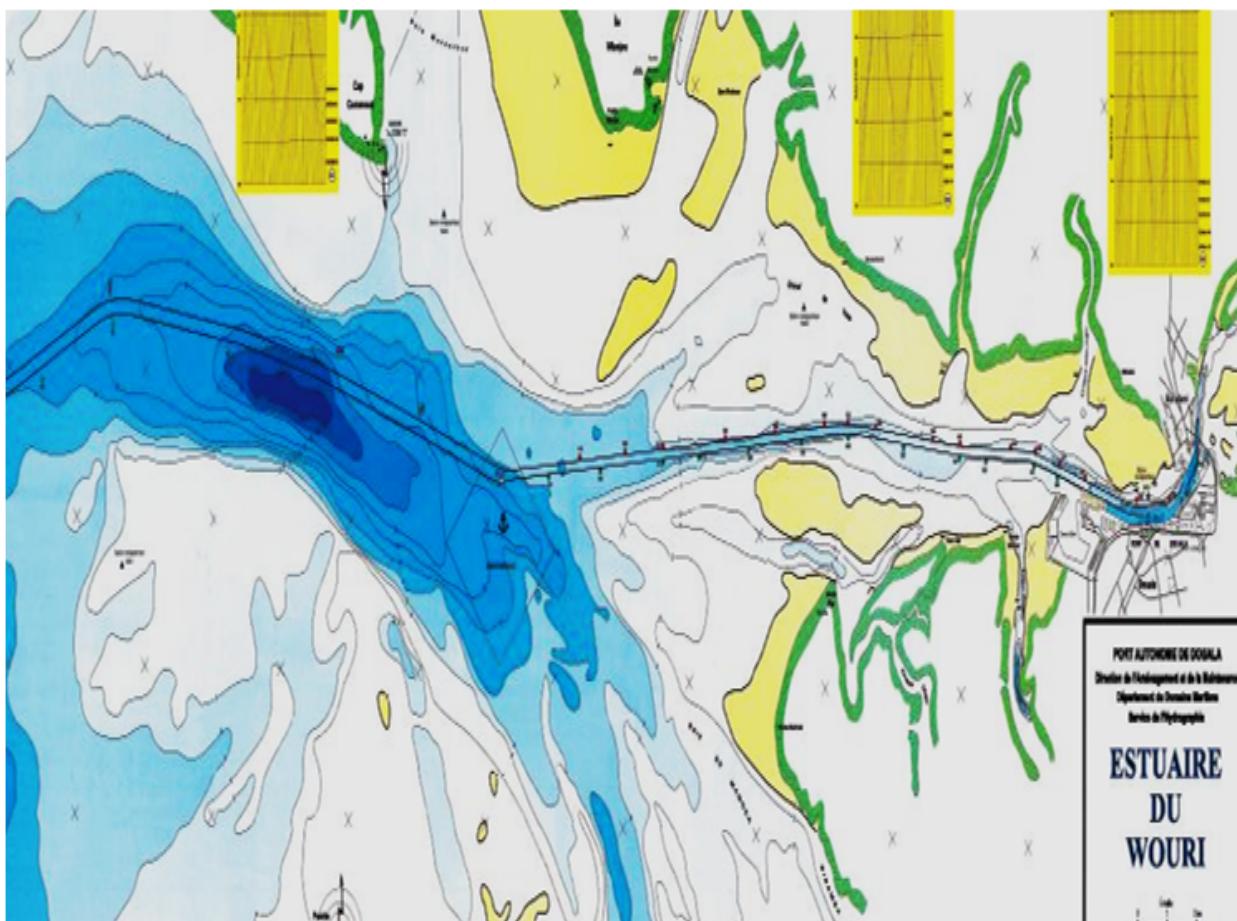


FIGURE 1 – Estuaire du Wouri

V. Missions, objectifs et services du Port Autonome de Douala (PAD)

V.1 Missions

Le port de Douala est accessible par un long chenal de 50 km divisé en deux parties : 25 km à l'intérieur et 25 km à l'extérieur, balisé par des bouées lumineuses. Il assure la gestion, la promotion et le marketing du Port de Douala. À ce titre, il est chargé :

- 1** De la coordination générale des activités portuaires ;
- 2** De l'assistance et de l'accueil des navires ;
- 3** Des travaux d'équipements, d'extension, d'entretien du port ainsi que de la création et de l'aménagement des zones industrielles portuaires ;
- 4** De la gestion, de la maintenance et du renouvellement des équipements portuaires qui lui sont affectés ;
- 5** De la sécurité et de la police des opérations d'exploitation portuaire ;

- 6** De la maîtrise d'ouvrage des travaux confiés aux entreprises spécialisées, y compris le dragage ;
- 7** De la sûreté du chenal ;
- 8** De la promotion de la place portuaire.

V.2 Objectifs

- 1** Le chenal intérieur, large de 150 m, est régulièrement dragué à la côte de -7 m. Des efforts sont en cours pour atteindre -8,5 m, permettant le passage de navires calant jusqu'à 11 m, grâce à l'amplitude des marées.
- 2** Le PAD est engagé depuis plusieurs années dans un vaste processus de normalisation et de modernisation de ses infrastructures, visant à se hisser aux standards internationaux et à devenir un catalyseur de croissance économique nationale.
- 3** « Le Port Autonome de Douala est engagé depuis quatre années dans un vaste processus de normalisation de toutes ses activités... », déclarait M. Cyrus NGO'O, Directeur Général du PAD, le 13 janvier 2021.

V.3 Offre de services

1. Services aux navires

Le port fonctionne 24h/24 sous la supervision de la capitainerie. Les services fournis comprennent :

- 1** Aide à la navigation (chenal balisé et illuminé) ;
- 2** Pilotage ;
- 3** Remorquage et lamanage ;
- 4** Avitaillement ;
- 5** Réparation navale ;
- 6** Chargement/déchargement ;
- 7** Sécurité et surveillance.

2. Services à la marchandise

Le PAD met à disposition :

- 1** 1000 ha de réserve foncière (600 ha exploités) ;
- 2** 66 000 m² de magasins banalisés ;
- 3** Plus de 10 millions de tonnes de capacité annuelle de traitement ;

- 4** 15 millions de tonnes de capacité de stockage ;
- 5** 80 000 m² de surface pour trafic conventionnel ;
- 6** 10 km de quais ;
- 7** Divers terminaux : conteneurs, bois, minéralier, fruitier, pêche, industrie ;
- 8** 9 postes à quai pour trafic conventionnel ;
- 9** 2 zones logistiques pour les hydrocarbures ;
- 10** Zone industrielle portuaire (rive droite du Wouri) ;
- 11** Zones d'entreposage longue durée ;
- 12** 20 km de routes bitumées vers l'hinterland (Sud/Est/Ouest) ;
- 13** 20 km de voies ferrées vers le Nord Cameroun, avec extension vers le Tchad et la RCA.

3. Services divers

Le port abrite plus de 80% des industries camerounaises, notamment :

- 1** **CIMENCAM** : transformation de clinker en ciment ;
- 2** **DANGOTE** : idem ;
- 3** **Les Grands Moulins** : transformation de blé en farine ;
- 4** **COMETAL** : transformation du fer en carrosserie.

V.4 Organisation de l'entreprise

Le Port Autonome de Douala est organisé de manière pyramidale, avec à sa tête :

- 1** Un Conseil d'administration ;
- 2** Un Directeur Général ;
- 3** Un Directeur Général Adjoint.

Au centre de l'édifice, on retrouve plusieurs directions spécialisées. L'organigramme à la Figure 2 illustre cette structure.

VI. Présentation de la Direction du Dragage et de la Logistique Maritime

La Direction du Dragage et de la Logistique Maritime est placée sous l'autorité d'un Directeur, assisté éventuellement d'un Directeur Adjoint. Elle a pour mission de superviser toutes les activités relatives :

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

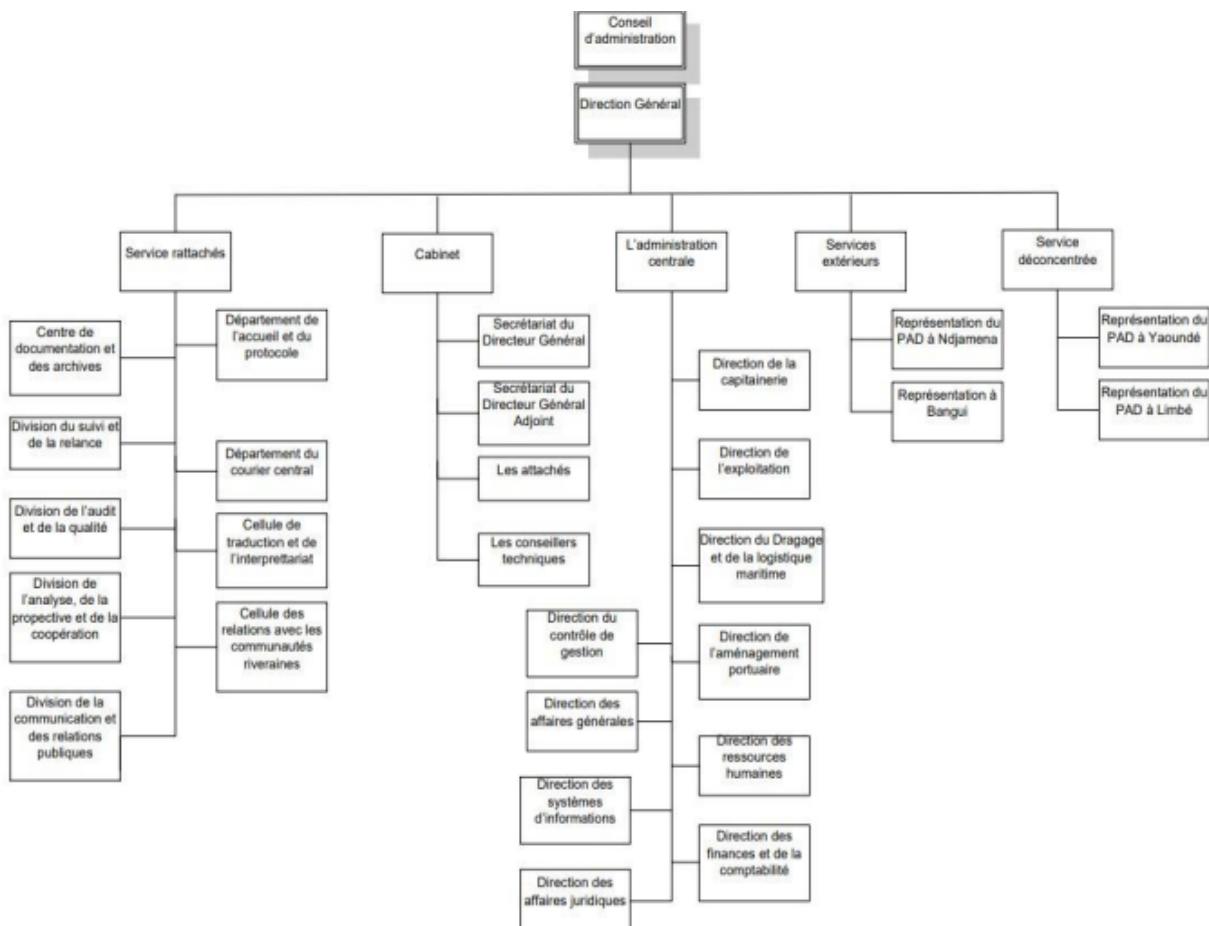


FIGURE 2 – Organigramme du PAD

- 1** Aux travaux de dragage et maritimes ;
- 2** À la logistique maritime ;
- 3** À la sûreté et sécurité de navigation dans le chenal et les plans d'eau.

Les principales responsabilités de la DDLM sont :

- 1** L'aménagement, la rénovation et l'entretien des infrastructures et superstructures maritimes, ainsi que leurs équipements ;
- 2** Le dragage d'entretien et d'approfondissement ;
- 3** La mise en place des aides à la navigation selon les normes AISIM ;
- 4** Le suivi des tirants d'eau et des plans de relevés de fonds ;
- 5** La préparation des contrats de prestation (en lien avec les directions juridiques et financières) ;
- 6** Le contrôle des travaux réalisés par des prestataires externes ;
- 7** L'étude des phénomènes liés à l'environnement maritime ;
- 8** La gestion de la maintenance du parc des engins nautiques ;
- 9** Les relations avec la Marine Marchande et les sociétés de classification ;

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

10 La logistique des engins nautiques.

Méthodologie de recherche

Au cours de mon stage, j'ai été impliqué dans le développement d'une solution de prévision météorologique appliquée au Port Autonome de Douala (PAD), dans un contexte marqué par des enjeux climatiques croissants. La méthodologie adoptée repose sur une combinaison rigoureuse de données environnementales fiables, d'outils technologiques avancés et d'approches algorithmiques adaptées aux phénomènes séquentiels.

Mon travail s'est articulé autour de plusieurs étapes clés :

- La caractérisation de la zone d'étude, avec une attention particulière portée aux spécificités géographiques et climatiques du PAD.
- L'acquisition et la préparation des données météorologiques et marégraphiques, issues de stations locales (SM2, SM3, SM4, Akwa).
- L'entraînement d'un modèle LSTM (*Long Short-Term Memory*), reconnu pour sa robustesse dans l'analyse des séries temporelles non linéaires.
- Le développement d'une interface web interactive, conçue avec Streamlit et React, permettant une visualisation en temps réel des prévisions à des fins de surveillance, de planification portuaire et de gestion des risques.

I Zone d'étude : Port Autonome de Douala

La zone d'étude couvre le système de stations météorologiques et marégraphiques déployées dans la ville de Douala, capitale économique du Cameroun. Le PAD, qui concentre plus de 95 % du trafic maritime national, est fortement exposé aux aléas climatiques du Golfe de Guinée. Son positionnement entre l'estuaire du Wouri et la plaine côtière en fait une zone vulnérable aux inondations, à l'ensablement et à la montée du niveau de la mer.

Durant mon stage, j'ai pu observer comment les conditions atmosphériques (températures, vents, précipitations) et marines (houles, marées, niveaux d'eau) influencent directement les opérations portuaires. La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour garantir la sécurité des infrastructures et la fluidité des échanges.

II Représentation spatiale de la zone

Grâce à l'intégration d'un système d'information géographique (SIG), j'ai pu cartographier les zones à risque, les points de collecte de données et les principales infrastructures du port. Cette représentation spatiale a permis de mieux comprendre l'interconnexion entre le port, le fleuve Wouri, les zones industrielles (Bonabéri, Bassa), les quartiers résidentiels inondables (Akwa Nord, Bépanda) et les mangroves en dégradation.

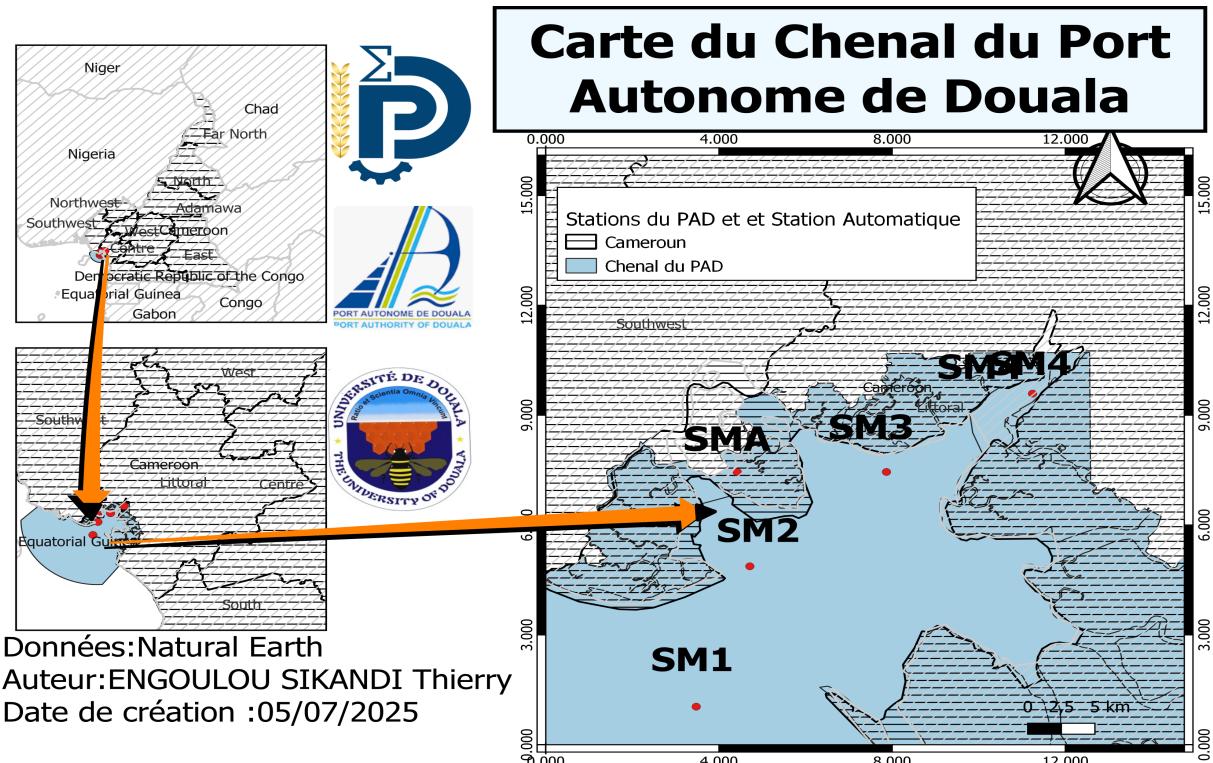


FIGURE 1.1 – Zone d'étude

III Influence du port sur le climat local

Le PAD n'est pas seulement affecté par les conditions météorologiques : il les influence également. Son implantation en zone côtière humide génère des interactions complexes entre les masses d'air maritimes et continentales. J'ai pu constater que le port :

- Modifie les courants d'air locaux,
- Accentue les effets d'îlot de chaleur urbain par ses infrastructures métalliques et bétonnées,
- Favorise une humidité ambiante élevée, liée aux eaux stagnantes et aux flux fluvio-marins.

Ces phénomènes rendent les équipements portuaires particulièrement sensibles aux vents violents, aux averses tropicales et aux tempêtes locales. Une prévision fiable permet d'anticiper ces risques et d'adapter les mesures de sécurité pour les grues, les conteneurs et les opérations de déchargement.

IV Rôle stratégique du port à l'échelle nationale

Le Port de Douala joue un rôle central dans la veille climatique nationale. Il constitue un point d'observation privilégié pour plusieurs réseaux météorologiques (Météo Cameroun, Université de Douala, etc.) et alimente les systèmes de prévision régionaux. Les données collectées sont essentielles pour :

- Le suivi des cyclones tropicaux et des orages côtiers,
- La prévision des marées pour la navigation,
- La modélisation du climat national.

Durant mon stage, j'ai contribué à la structuration de ces flux de données, en veillant à leur qualité et à leur intégration dans les modèles prédictifs. Ces informations sont cruciales pour les agences nationales et les partenaires internationaux dans la gestion des risques climatiques.

V Présentation du système d'acquisition

Les stations installées autour du Port Autonome de Douala (PAD), notamment SM2, SM3 et SM4, assurent la collecte de données météorologiques et marégraphiques en temps réel. Ces données sont transmises par radiofréquence et stockées dans des fichiers texte. Les graphiques en temps réel (température, niveau de la mer, vent, etc.) sont partiellement visibles sur la Figure 1.3.

V.1 Collecte des données

Le système d'acquisition mis en place repose sur un chaînage technologique automatisé, combinant la collecte, la transmission, le stockage et la visualisation locale des données environnementales via le cloud. Ce système est modulaire, évolutif et basé sur des composants open source. Certaines stations ne capturent pas toutes les variables nécessaires, notamment les précipitations. Une station de substitution située à Akwa a donc été intégrée via l'API OpenWeatherMap pour garantir la disponibilité des cibles du modèle (voir Figure 1.2).

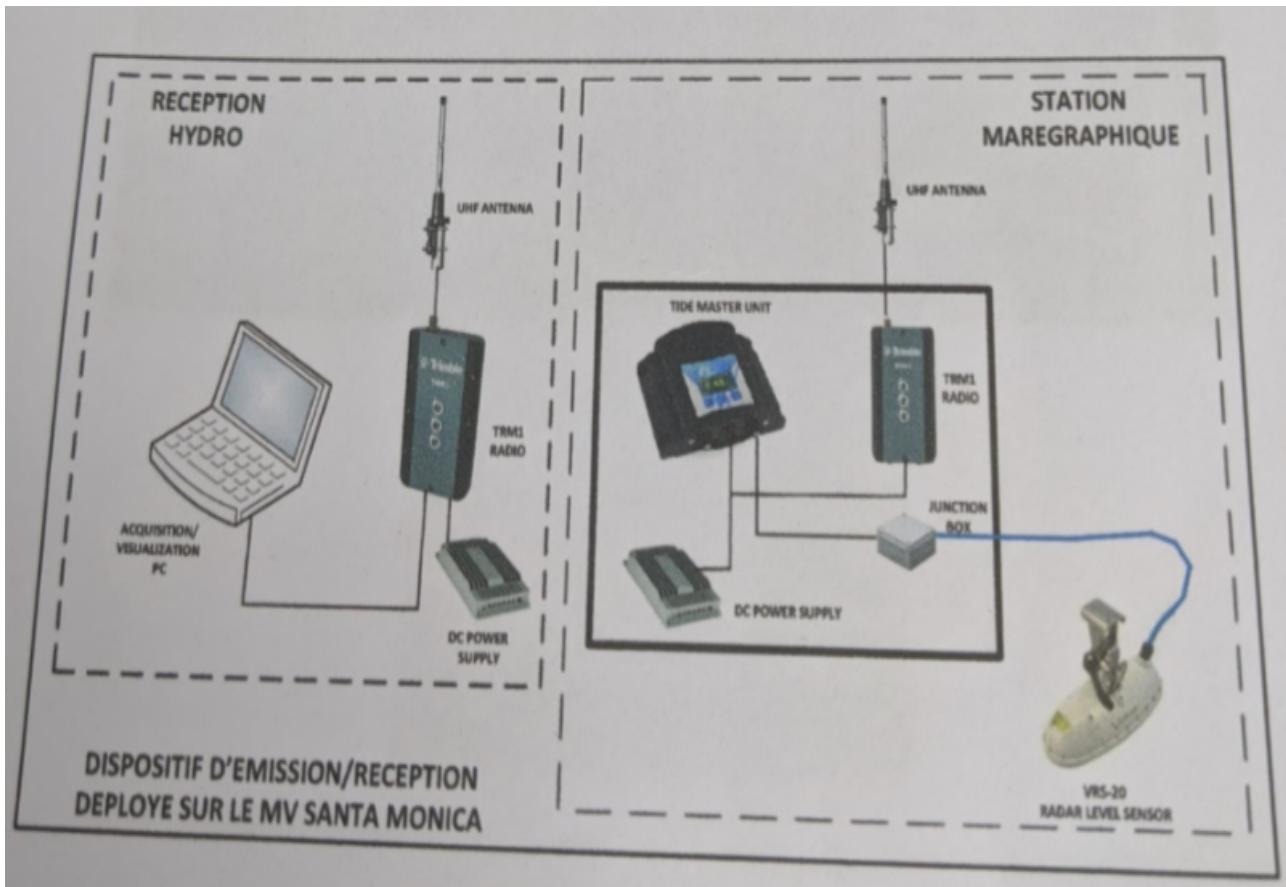


FIGURE 1.2 – Système d’acquisition des données au PAD

V.2 Plateforme de stockage

Les données sont centralisées dans une base MongoDB et dans des fichiers Excel, accessibles à distance via une API REST développée avec Flask. Cette API permet de requêter les observations par station, date ou plage temporelle. Elle est hébergée sur la plateforme Render pour garantir robustesse et accessibilité.

V.3 Visualisation des données

Les données sont affichées dynamiquement sur une interface web développée avec Streamlit et React. Elle présente :

- Les dernières observations des stations (SM2, SM3, SM4 et station externe),
- Des graphes temporels par station et paramètre,
- Une carte interactive alimentée par Folium et Plotly,
- Des prévisions météorologiques enrichies par des iframes Windy et Copernicus.

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA



FIGURE 1.3 – Visualisation locale des données du PAD

V.4 Présentation des variables utilisées

Les variables exploitées incluent : température de l'air, humidité, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique, précipitations, hauteur de marée (TIDE HEIGHT) et SURGE. Ces données ont été collectées sur une période suffisante pour entraîner les modèles prédictifs. Les fichiers sources sont sauvegardés en Excel et traités automatiquement via des scripts Python.

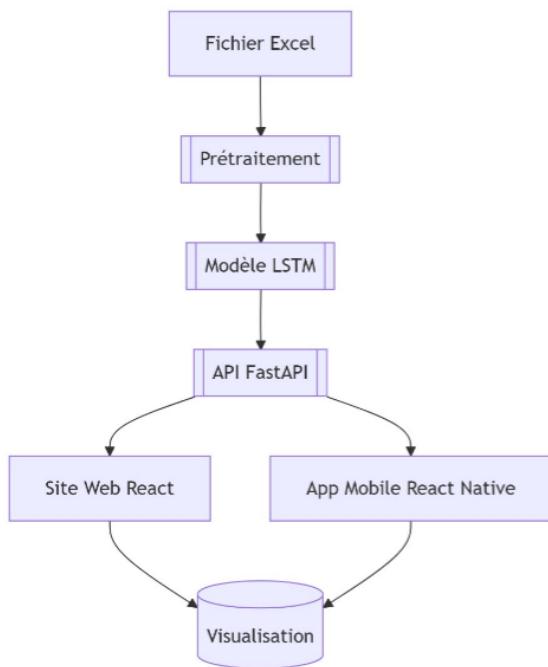


FIGURE 1.4 – Architecture du système de traitement

VI Modélisation prédictive des données

VI.1 Filtrage des données

Un nettoyage initial est effectué pour retirer les colonnes non numériques ou mal formatées. Les chaînes de caractères, coordonnées géographiques et dates sont converties ou supprimées si non exploitables.

VI.2 Prétraitement des données

Le script `data_preprocessing.py` assure :

- La normalisation via `MinMaxScaler`,
- Le découpage en séquences temporelles (entre 10 et 20 pas de temps),
- La création des jeux d’entraînement et de test.

Le modèle LSTM multivarié est implémenté avec `Keras`, comprenant plusieurs couches LSTM, du `Dropout` et un `EarlyStopping`. Il prédit la température et les précipitations sur un horizon de 7 jours.

VI.3 Validation du modèle

La validation respecte l’ordre chronologique des données :

- Les données anciennes servent à l’entraînement,

- Une période intermédiaire pour la validation,
- Les données récentes pour le test final.

Une validation glissante (*walk-forward*) est utilisée pour tester la robustesse du modèle sur différentes fenêtres temporelles. Les performances sont évaluées avec trois métriques :

- **MAE** : erreur moyenne quotidienne,
- **RMSE** : met en évidence les erreurs importantes,
- **MAPE** : erreur relative en pourcentage.

VII Plateforme de visualisation des données et prévisions

Le site web développé avec **Streamlit** et **React** propose une interface interactive comprenant :

- 1** Une carte Folium avec les stations géolocalisées,
- 2** Des graphiques dynamiques par station et paramètre,
- 3** Une mini-carte animée Windy,
- 4** Une interface de téléchargement CSV.

Une section supplémentaire affiche chaque matin les prévisions météorologiques basées sur le modèle LSTM et les données externes (WRF, Windy, Copernicus).

VIII Intégration et déploiement

VIII.1 Déploiement des données

- 1** Une API Flask connectée à une base MongoDB Atlas hébergée sur Render, servant les données en temps réel consulter le site pour plus information.

VIII.2 Déploiement des sites web

- 2** Une interface web Streamlit et react également déployée sur Render (consulter le site pour plus information)

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.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus à l'issue de l'entraînement du modèle LSTM montrent une capacité satisfaisante à prédire les variables météorologiques ciblées, notamment la température et les précipitations. Les courbes de prédition générées sur l'horizon de sept jours présentent une bonne cohérence avec les données réelles, en particulier pour les tendances générales et les variations saisonnières.

Les performances du modèle ont été évaluées à l'aide des métriques MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error) et MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Ces indicateurs ont permis de quantifier l'écart entre les valeurs observées et les prédictions, tout en mettant en évidence les épisodes extrêmes moins bien anticipés.

I Modélisation avec LSTM

I.1 Entrainement du modèle prédictif

Les résultats montrent que :

- Le MAE reste faible pour la température, indiquant une bonne précision quotidienne.
- Le RMSE est légèrement plus élevé pour les précipitations, ce qui reflète la difficulté à prédire les épisodes pluvieux intenses.
- Le MAPE est stable pour la température, mais plus variable pour les précipitations, notamment en cas de faibles valeurs observées.

Ces résultats confirment la pertinence du modèle LSTM pour une application locale en zone côtière, tout en soulignant la nécessité d'une amélioration continue, notamment par l'intégration de nouvelles variables et l'optimisation des hyperparamètres.

La Figure 2.2 illustre un exemple de prédition sur une semaine, comparée aux observations réelles. On y observe une bonne corrélation entre les deux courbes, avec des écarts modérés sur les jours de forte instabilité climatique.

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

```
(tf-env) PS C:\Users\RODRIGUE SINGOR\Desktop\travail_fait\model_LSTM\Scripts> python data_preprocessing_attention.py
Colonnes détectées : ['Date et Heure', 'ID Station', 'Latitude', 'Longitude', 'Ville', 'Région', 'Pays', 'Description météo', 'Température (°C)', 'Pression (hPa)', 'Humidité (%)', 'Vitesse du vent (m/s)', 'Précipitation (mm)']
✓ X_train shape : (154, 10, 6)
✓ y_train shape : (154, 2)
✓ X_test shape : (39, 10, 6)
✓ y_test shape : (39, 2)
```

FIGURE 2.1 – Sortie de du traitement et du test du modèle

I.2 Résultats de la prédition avec LSTM

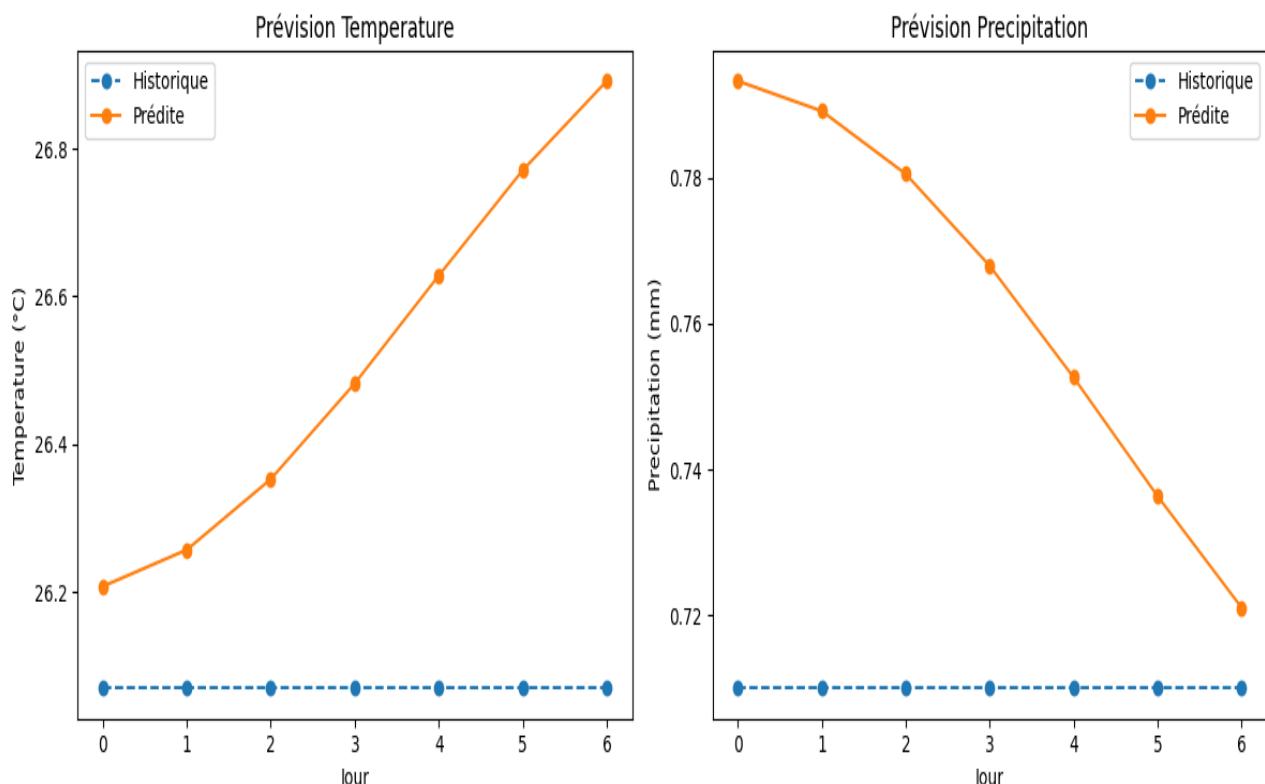


FIGURE 2.2 – Sortie du 1er time_steps

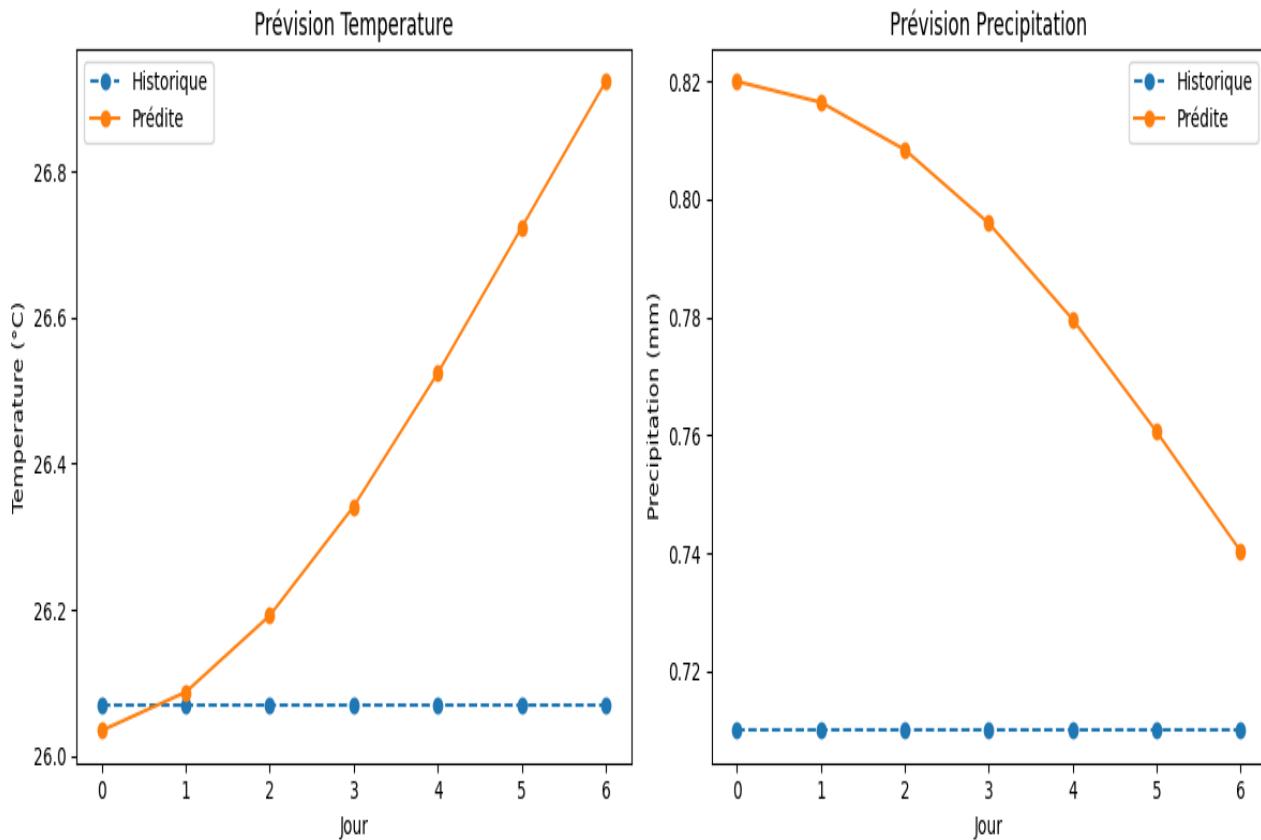


FIGURE 2.3 – Sortie du 2ième time_steps

I.3 Analyse des Résultats

begincenter Le modèle LSTM prédit, pour les jours 0 à 6 selon les figures 2.2,2.2,2.3 nous montre une **hausse progressive de la température** pour les 3 pas de temps, allant d'environ 26,04, °C à 26,92, °C, ainsi qu'une **baisse régulière des précipitations**, de 0,82,mm à 0,74,mm. Ces variations contrastent avec les valeurs historiques quasiment constantes (26,07, °C et 0,71,mm), ce qui indique que le modèle ne se contente pas d'une moyenne stationnaire, mais parvient à capturer des **tendances temporelles**, un réchauffement modéré (+0,88, °C) et une baisse des précipitations (-0,08,mm) sur une semaine. Ce comportement illustre la capacité des réseaux LSTM à modéliser les *dépendances séquentielles* dans les séries temporelles. Par ailleurs, l'évaluation de la qualité des prédictions repose sur l'analyse de métriques d'erreur telles que la *Mean Absolute Error (MAE)* et la *Root Mean Square Error (RMSE)*. La MAE mesure l'erreur moyenne absolue, offrant une interprétation directe en unité de mesure (°C ou mm), tandis que la RMSE accorde un poids plus important aux erreurs importantes, ce qui permet de détecter les fluctuations mal anticipées par le modèle.

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

TABLE 2.1 – Erreurs MAE et RMSE par modèle pour les deux variables étudiées
 Tableau 3.0-Erreurs MAE et RMSE par modèle pour les deux variables étudiées

Modèle	Variable	MAE	RMSE
LSTM	Température (°C)	0,63	0,84
ARIMA	Température (°C)	2,29	2,49
Persistance	Température (°C)	1,67	1,80
LSTM	Précipitation (mm)	0,94	1,38
ARIMA	Précipitation (mm)	0,36	0,41
Persistance	Précipitation (mm)	1,11	1,50

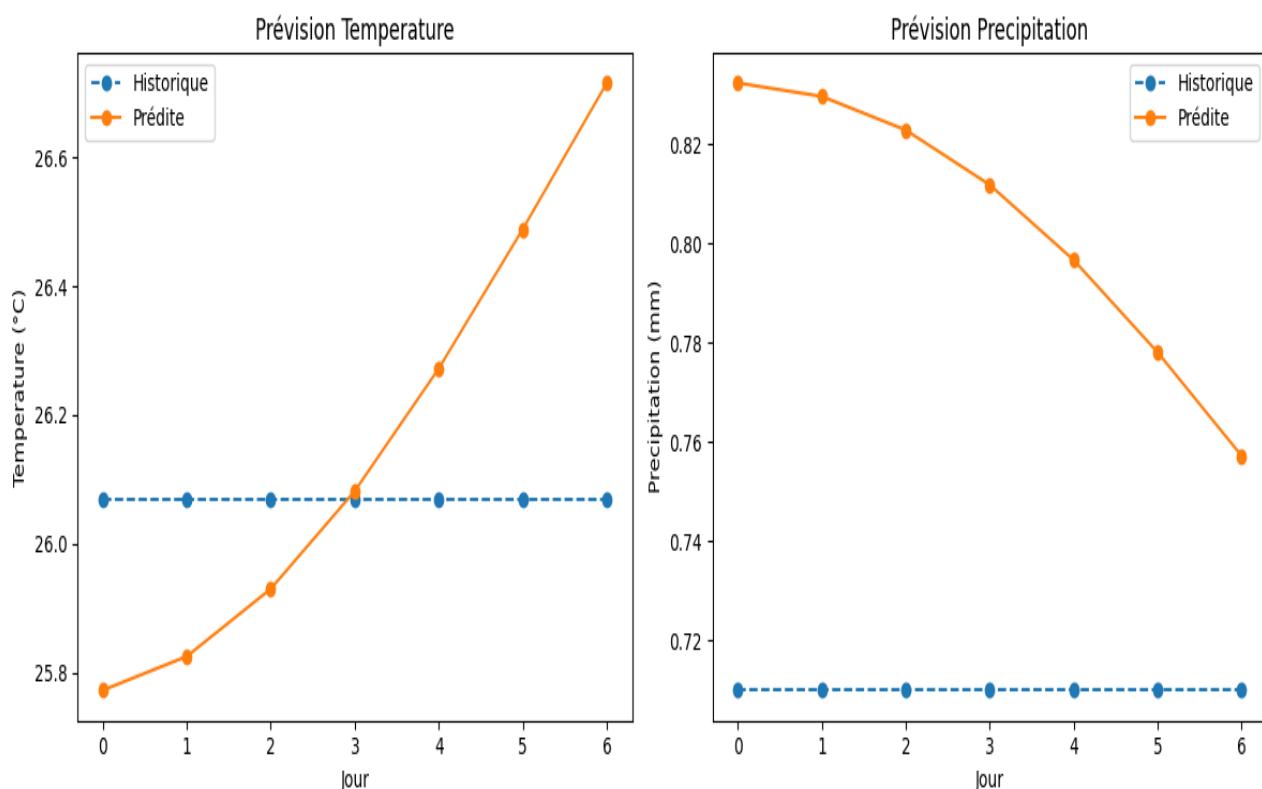


FIGURE 2.4 – Sortie du 3ième time_steps

II Validation du modèle LSMT

II.1 Justification méthodologique de la comparaison

II.2 Choix justifié du modèle LSTM

TABLE 2.2 – Comparaison des performances des modèles CNN 1D, LSTM et BiLSTM

Modèle	MSE	MAE	RMSE	R ²
CNN 1D	0.4	0.4	0.6	0.6
LSTM	0.4	0.4	0.6	0.6
BiLSTM	0.4	0.4	0.6	0.6

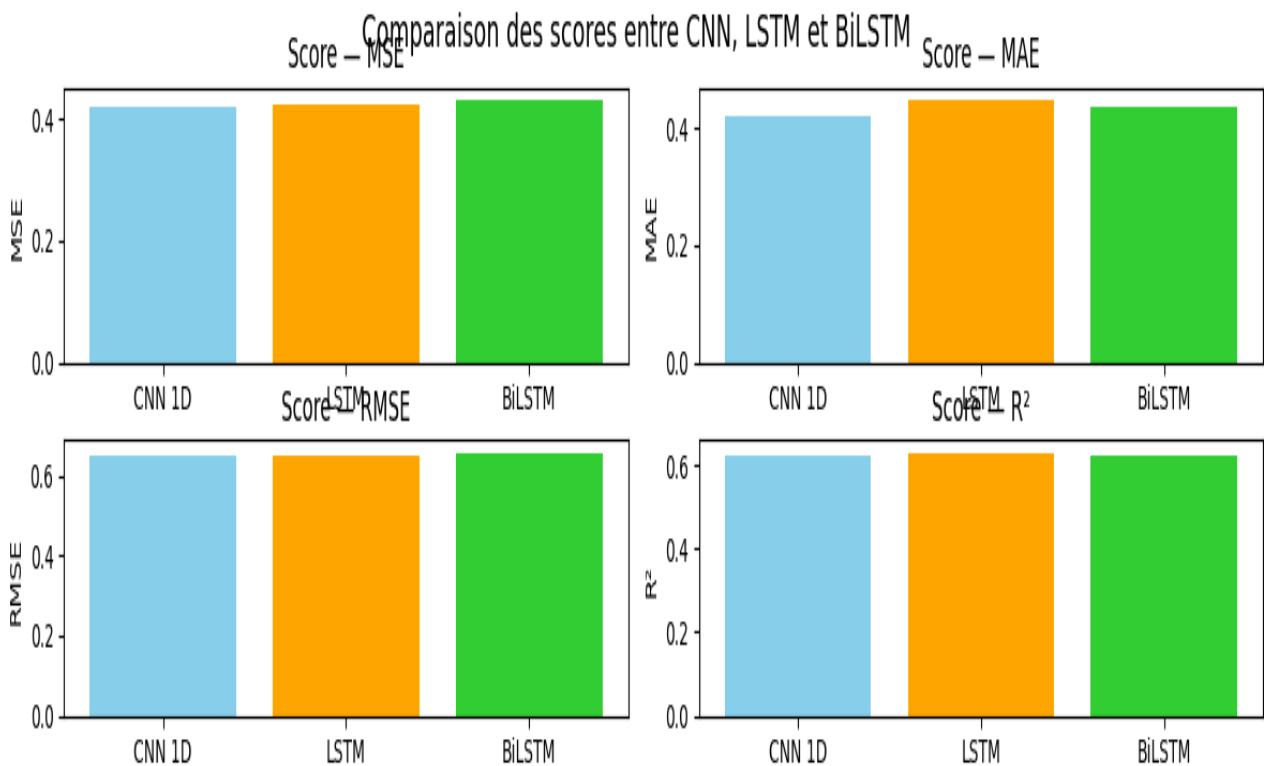


FIGURE 2.5 – Comparaison des modeles D'IA

II.3 Analyse des performances comparées des modèles

Selon la Figure 2.5, les résultats obtenus montrent que les trois modèles — **CNN 1D**, **LSTM** et **BiLSTM** — présentent des performances *quasi identiques* sur le jeu de données météorologiques utilisé. Les métriques observées sont les suivantes : MSE = 0,4, MAE = 0,4, RMSE = 0,6 et coefficient de détermination R^2 = 0,6.

Cette similarité peut s'expliquer par la nature du jeu de données, relativement peu bruité et faiblement non linéaire, ou par des paramètres d'entraînement communs entre les modèles. Ces résultats suggèrent que des architectures **plus simples comme le CNN 1D** peuvent suffire dans certains cas, sans nécessiter la complexité computationnelle du BiLSTM.

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

Toutefois, une évaluation sur des données plus complexes ou à plus grande échelle permettrait de mieux distinguer les forces spécifiques de chaque architecture. En particulier, dans des environnements dynamiques comme les zones portuaires, la capacité à modéliser des séquences longues et des interactions non linéaires devient cruciale.

Compte tenu de la structure potentiellement chaotique des données météorologiques, le recours au **LSTM** apparaît pleinement justifié. Son architecture à mémoire récurrente lui permet :

- d'apprendre des séquences temporelles longues,
- d'anticiper les tendances saisonnières,
- d'atténuer l'impact des fluctuations aléatoires.

Là où les modèles ARIMA et Persistance restent limités par leurs fondements linéaires ou naïfs (voir Figure 2.6), le LSTM démontre une valeur prédictive tangible et une généralisation plus robuste sur les deux variables étudiées. Bien qu'exigeant en ressources pour l'entraînement, il s'impose comme la solution la plus adaptée pour des prévisions à la fois précises et résilientes dans un environnement portuaire exposé à des aléas météorologiques complexes.

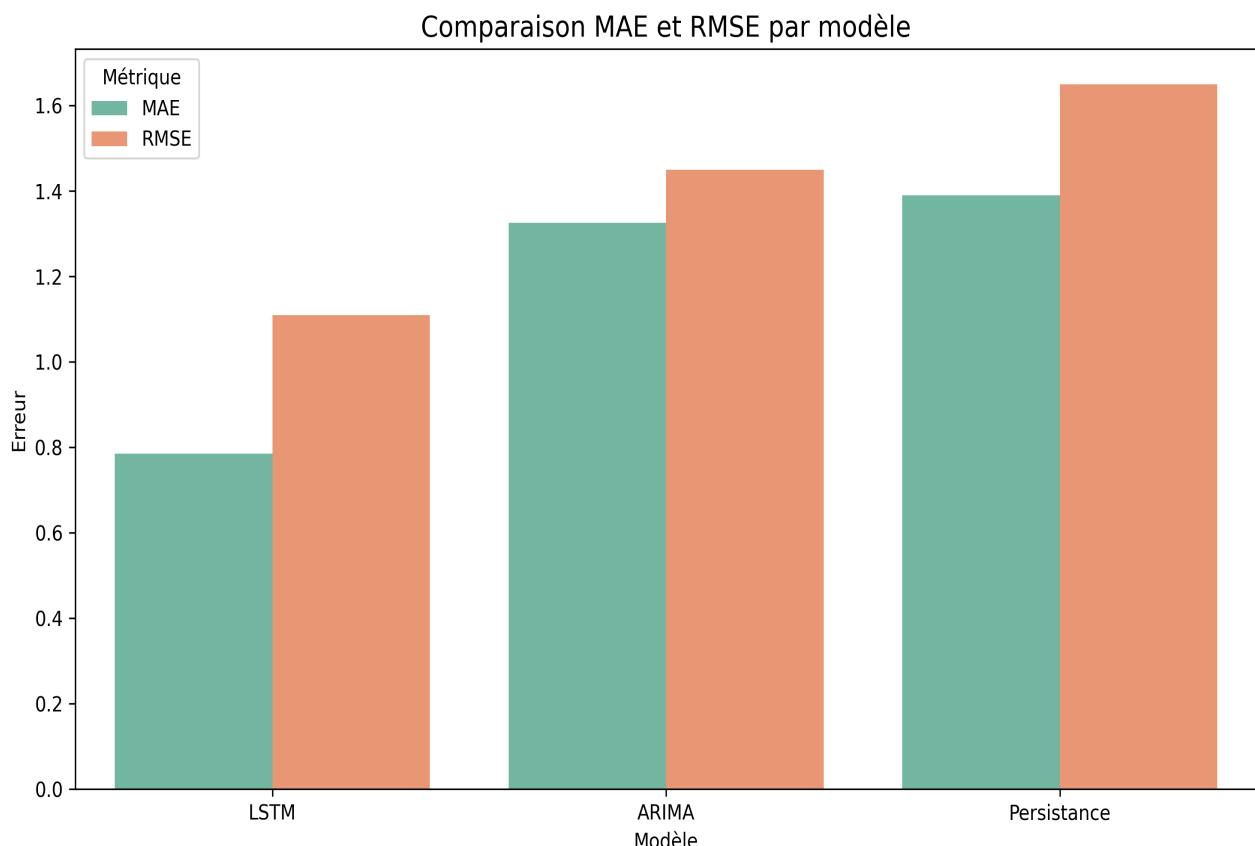


FIGURE 2.6 – Comparaison des métriques

III Résultats de la prévision météoroogique des conditions météorologique au PAD

III.1 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 :

- 1** Une carte **Folium** des stations géolocalisées.

Carte interactive des stations météo

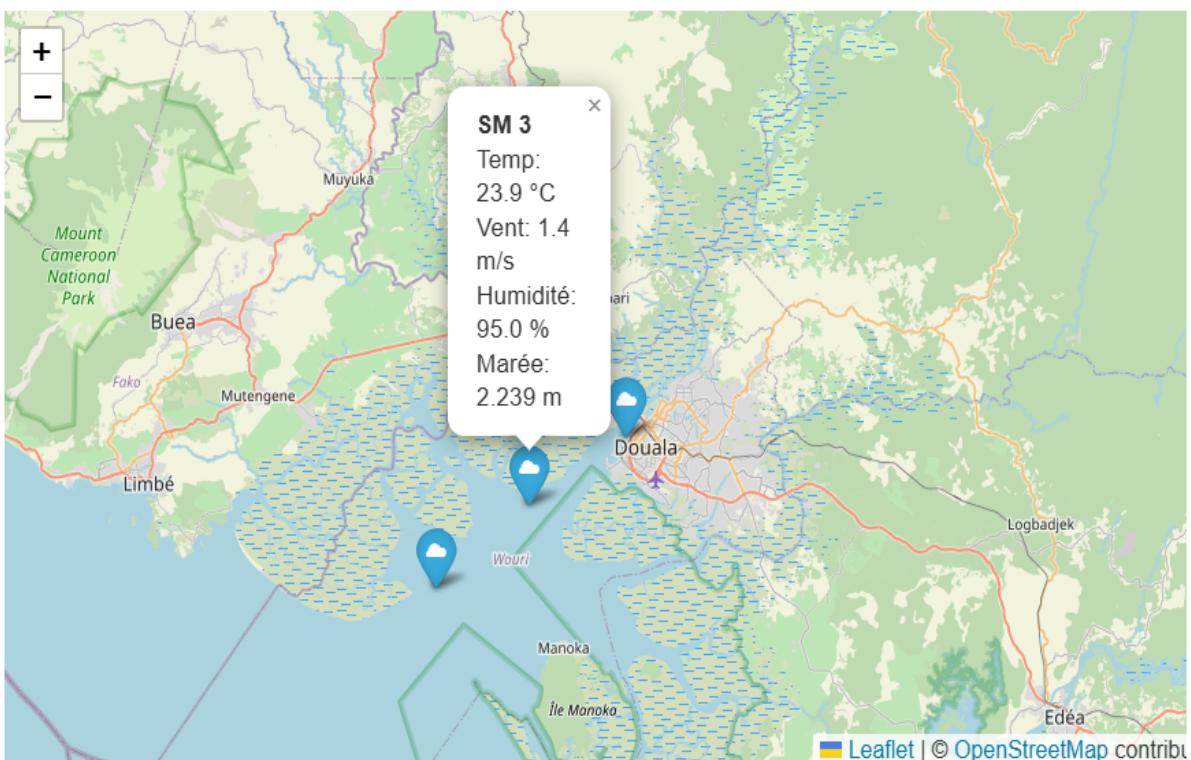


FIGURE 2.7 – visualisation des paramètres météorologiques sur chaque station

La Figure 2.7 montre l'évolution de chaque paramètres afin non seulement d'avoir connaissance aux station défectueuse et ensuite de faire une comparaison entre les différentes station .

Un accès aux données historiques avec options de filtrage voir Figure 2.8.

Une mini-carte **Windy** embarquée pour la prévision du vent en temps réel cf Figure 2.10. 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).

- 2** Des graphiques **Plotly** pour analyser l'évolution des paramètres par station cf Figure 2.8.

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA



FIGURE 2.8 – évolution des paramètres par station (pour plus de detail consulter le site

3] prévision precipitation et température à partir de LSTM et d'autres modèles voir Figure2.11.



FIGURE 2.9 – évolution des paramètres par station (pour plus de detail consulter le site ...

🌐 Carte météo animée - Windy

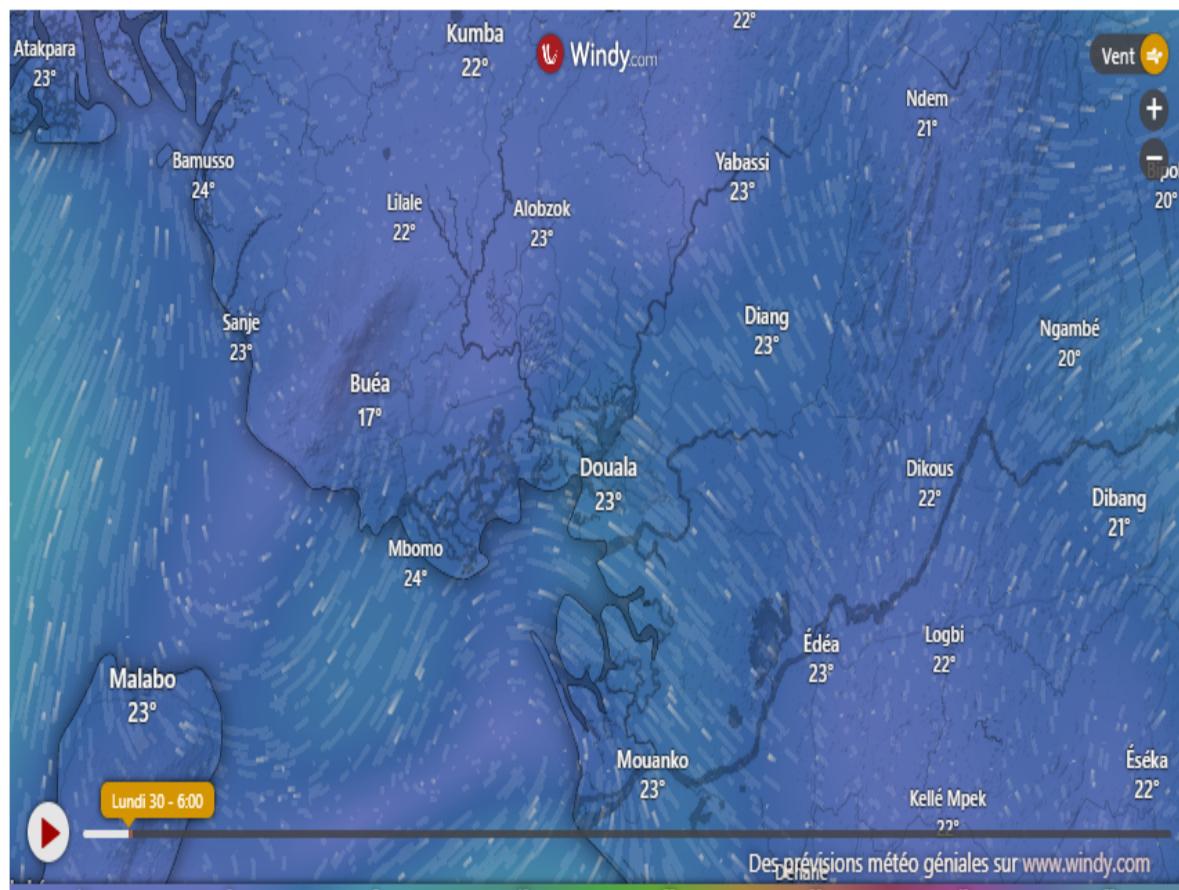


FIGURE 2.10 – Extrait de Windy pour les prévisions (pour plus de détail consulter le site

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

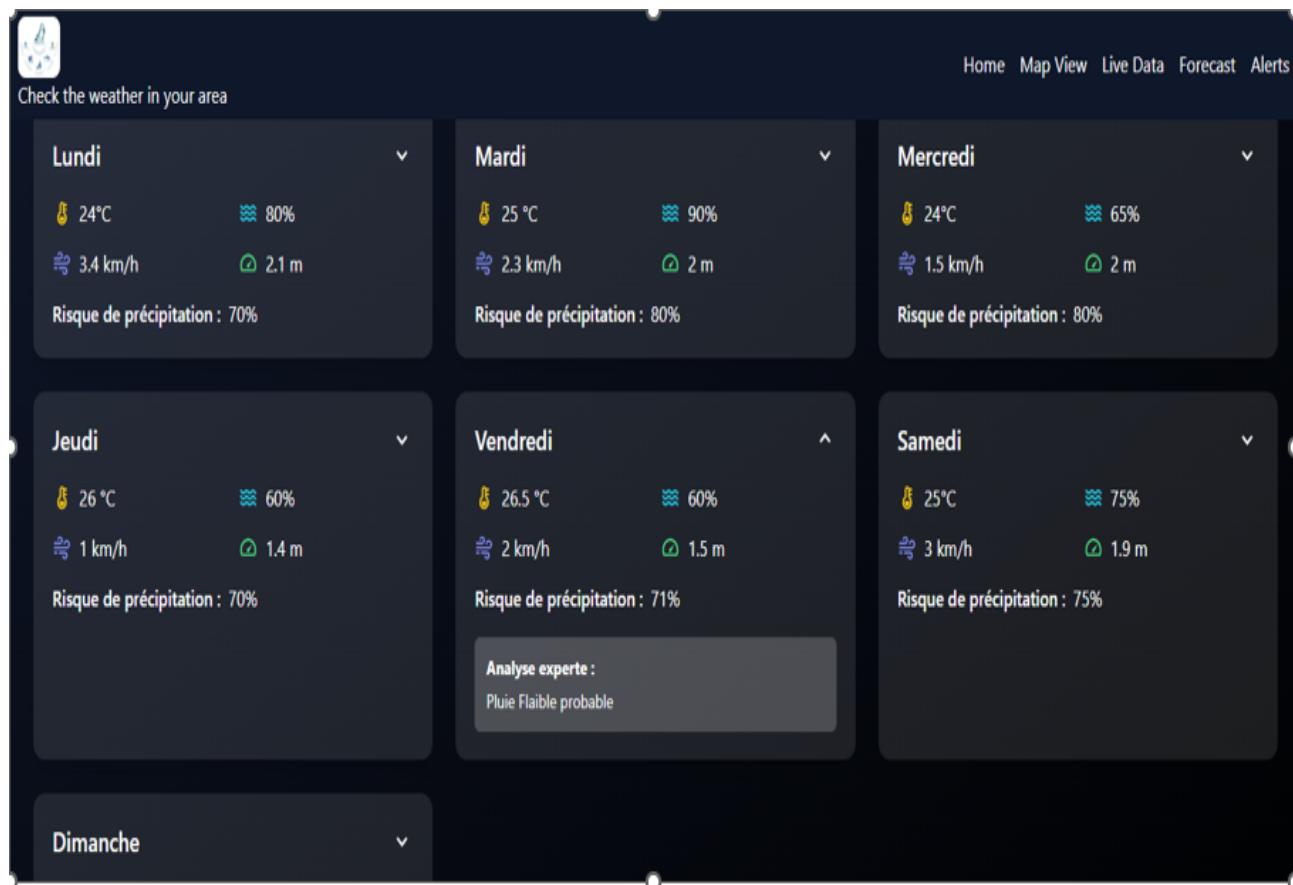


FIGURE 2.11 – Visualisation de la prevision météorologique du Chenal du Port Autonome de Doual valide du 30/6/25 à 00TU au 06/7/25 à 00TU

PRRÉSENTATION DE L'APPLICATION DÉVELOPPEE

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.

Le lien de cette application Web est : <https://projet-vq97.onrender.com>

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

.2 Page 1 – Accueil

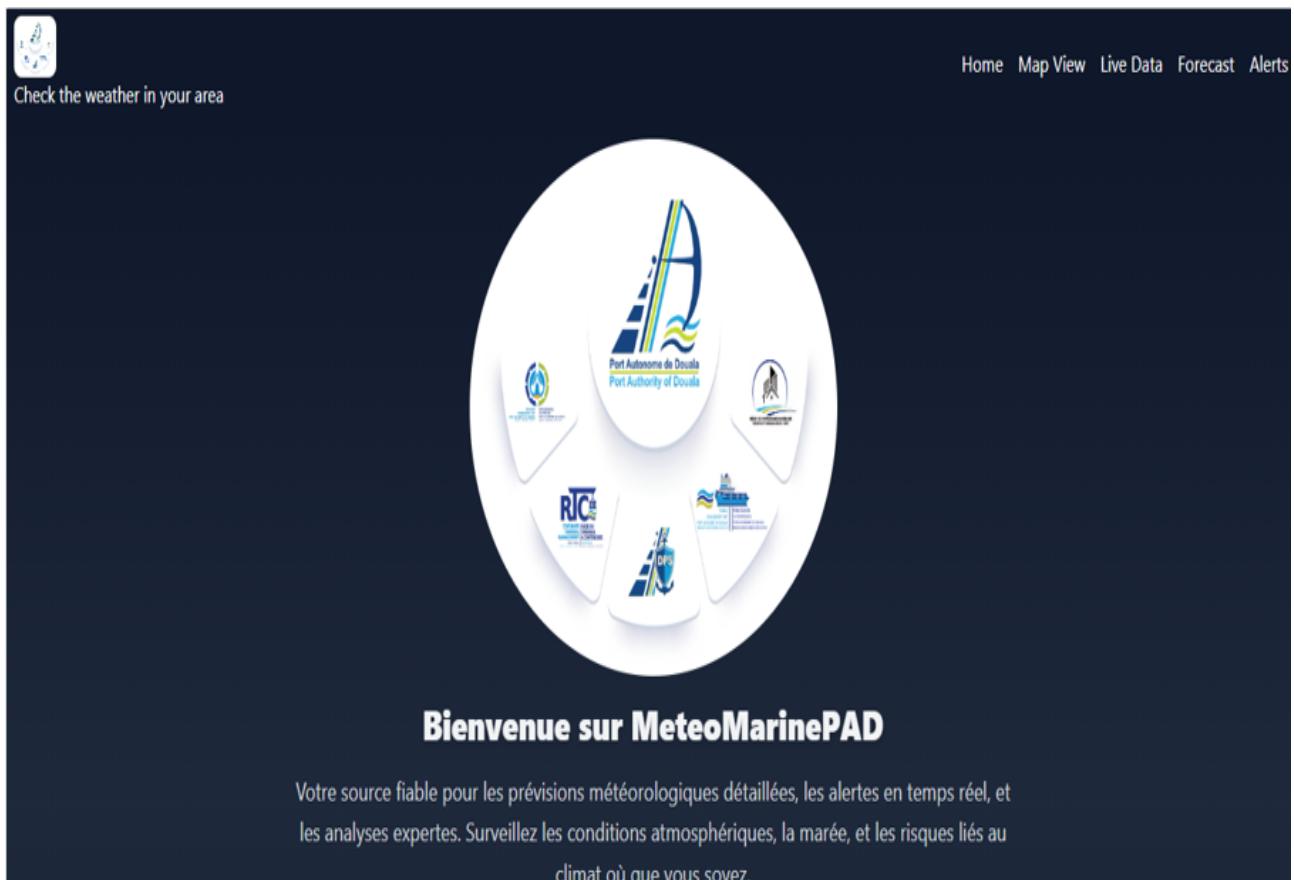


FIGURE 3.1 – page Accueil (pour plus de detail consulter le site <https://projet-vq97.onrender.com>)

La figure 3.12 nous montre une Présentation générale de l’objectif du système et orientation de l’utilisateur vers les différentes fonctionnalités.

.3 Page 2 – Carte des Stations

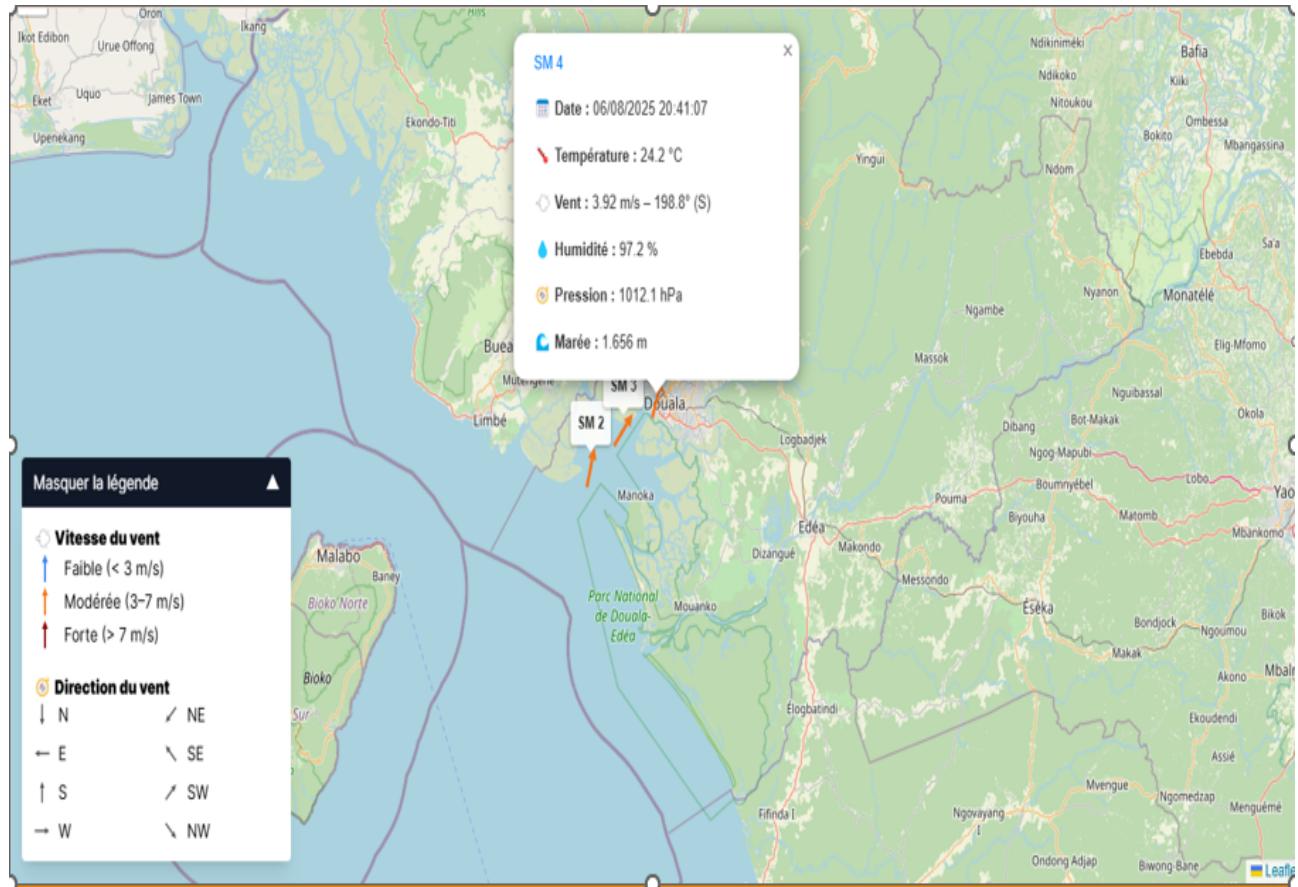


FIGURE 3.2 – Affichage et visualisation des données (pour plus de détail consulter le site <https://projet-vq97.onrender.com>)

La figure 3.13 Affiche les stations fonctionnelles sur une carte interactive. Pour chaque station, les paramètres météorologiques (température, vent, pression, etc.) sont visualisables selon les normes de l’Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Un graphique multi-station permet de comparer les mesures .

.4 Page 3 – Données en Temps Réel

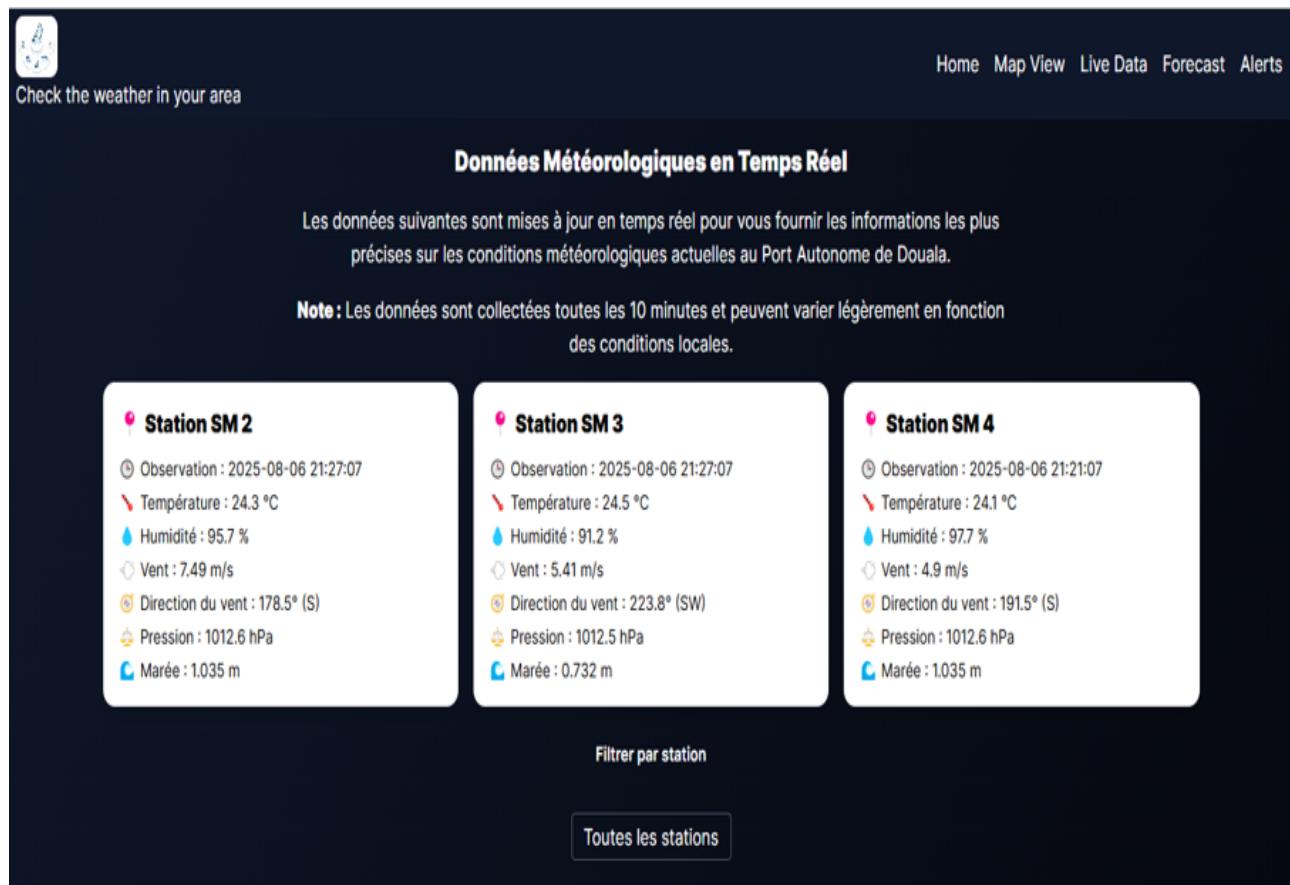


FIGURE 3.3 – Affichage et téléchargement des données (pour plus de détail consulter le site <https://projet-vq97.onrender.com>)

La figure Fig 3.14 Affichage des dernières données collectées des stations. Une fonctionnalité de téléchargement sécurisé est intégrée : l'utilisateur envoie une requête, qui est validée par l'administrateur. Une fois acceptée, un lien de téléchargement lui est envoyé par e-mail .

.5 Page 4 – État du Chenal

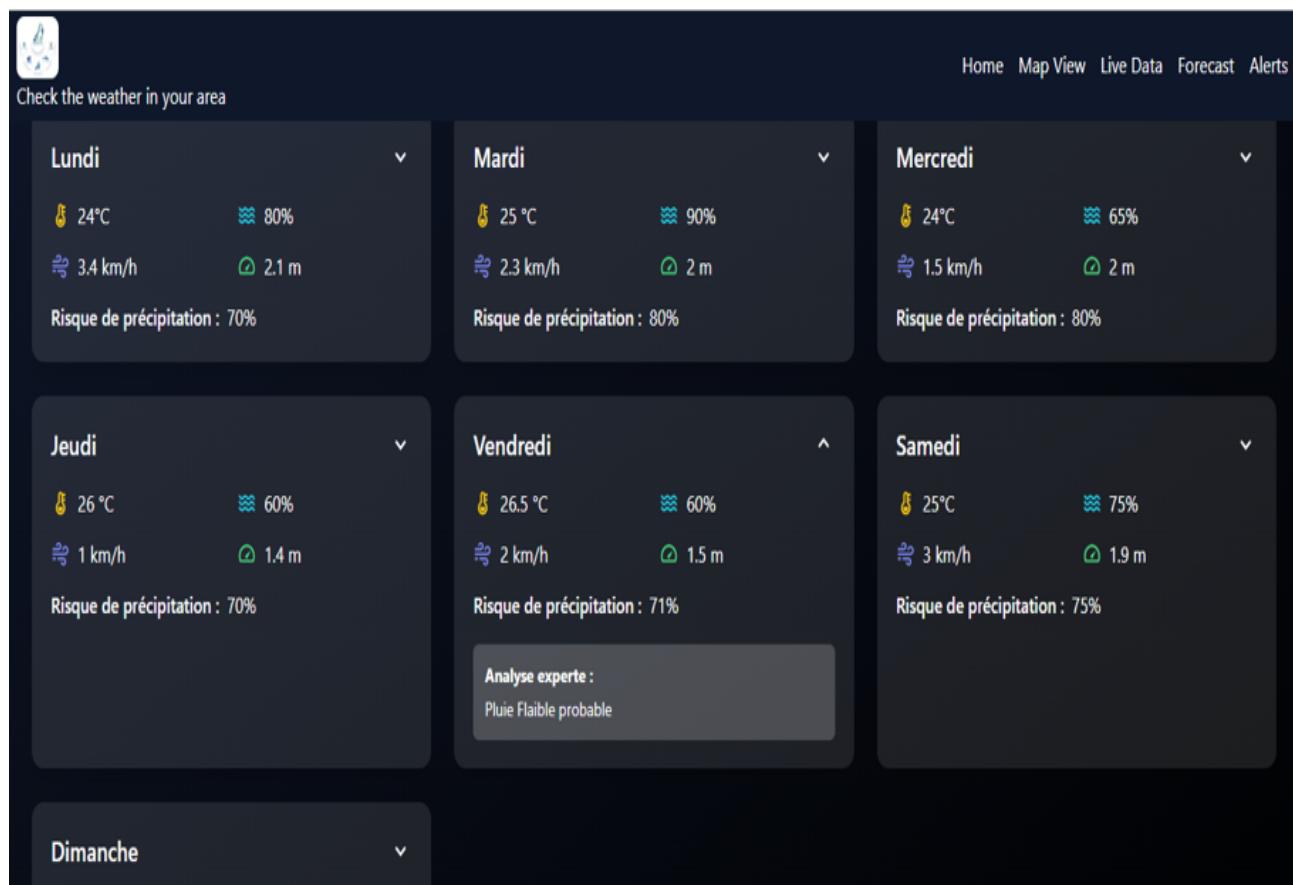


FIGURE 3.4 – État du Chenal (pour plus de detail consulter le site <https://projet-vq97.onrender.com>)

Cette page fournit une vue globale de l'atmosphère dans le chenal du PAD, avec les phénomènes météorologiques observés, ainsi que des prévisions valables pour une semaine voir figure 3.15.

.6 Page 4 – Alertes Météorologiques

The screenshot displays a weather alert interface with a dark background. At the top, there's a red lightning bolt icon followed by the text "Alertes Météo". Below this is a green button labeled "Afficher uniquement les alertes" (Show only alerts). The interface is divided into three vertical sections, each representing a day of the week:

- Lundi**:
 - Alerte :** -soyons prudent aux maladies hydrique ;les inondations sur les zones proches des cotes. -Attention aux déchargeement des marchandises sensible à la pluie. -Navigation risqué dans le chenal externe.
 - Prévisions :**-Des pluies orageuses modérées à forte pourraient arroser certaines zones côtières. - Des courants Marins importants dans le chenal intérieur et extérieur .
- Mardi**:
 - Alerte :** -Attention aux déchargeement des marchandises sensible à la pluie. -Navigation risqué dans le chenal externe.
 - Prévisions :**-Des pluies orageuses d'intensité faible à modérée sont attendues sur les cotes du fait de l'épaisseur de la mousson.
- Mercredi**:
 - Alerte :** -Attention aux inondations -Navigation légèrement stable mais Attention aux chenal extérieur
 - Prévisions :**-Développement d'orages et quelques averses. -Le chenal externe sera instable avec un risque de précipitations forte et de faibles pluie à modéré dans le chenal intérieur

FIGURE 3.5 – Alertes Météorologiques (pour plus de détail consulter le site <https://projet-vq97.onrender.com>)

Cette page fournit une vue globale de l'atmosphère dans le chenal du PAD, avec les phénomènes météorologiques observés, ainsi que des prévisions valables pour une semaine voir figure 3.16.

L’application développée constitue une avancée significative dans la gestion météorologique portuaire au Cameroun. Grâce à son interface intuitive et ses fonctionnalités variées — carte interactive, visualisation multi-station, données en temps réel, alertes et prévisions — elle offre aux utilisateurs un outil complet d’aide à la décision.

Accessible en ligne, cette plateforme permet aux agents portuaires, pêcheurs et autorités locales de suivre l’évolution des conditions atmosphériques et marégraphiques, d’anticiper les risques et d’optimiser leurs opérations. Sa modularité et son extensibilité ouvrent la voie à une généralisation vers d’autres zones côtières du pays.

En intégrant des technologies modernes (Streamlit, React, API Flask) et des modèles intelligents (LSTM), cette solution illustre le potentiel de l’intelligence artificielle appliquée à la surveillance environnementale. Elle s’inscrit dans une dynamique de modernisation numérique, de sécurité maritime et de résilience climatique.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Ce stage, réalisé au Port Autonome de Douala, s'est inscrit dans une démarche de modernisation des outils de prévision météorologique en milieu portuaire. L'objectif principal était de concevoir une solution intelligente, capable de fournir des prévisions atmosphériques et marégraphiques fiables, en s'appuyant sur des données locales et des algorithmes d'intelligence artificielle.

À travers les différentes missions qui m'ont été confiées — collecte et traitement des données, modélisation prédictive avec LSTM, développement d'une interface web interactive — j'ai pu mobiliser et approfondir mes compétences en programmation, en analyse de séries temporelles, et en conception d'applications orientées utilisateur.

Le système développé a démontré sa pertinence opérationnelle : il permet une visualisation en temps réel, une planification intelligente des activités portuaires, et une meilleure anticipation des risques climatiques. L'intégration de sources externes (OpenWeatherMap, WRF, Copernicus) et l'ouverture vers des technologies web modernes (Streamlit, React, Flask) ont renforcé la robustesse et l'accessibilité de la solution.

Ce stage m'a également permis de prendre conscience des enjeux liés à la gestion environnementale en zone côtière, et de l'importance d'une approche interdisciplinaire mêlant données, technologie et expertise métier.

Malgré certaines limites identifiées (manque de redondance capteur, dépendance à la connectivité, optimisation du modèle), les perspectives d'évolution sont prometteuses :

- Extension du système à d'autres ports nationaux,
- Intégration de données satellites (NOAA, Copernicus),
- Développement d'une version mobile ou d'une application native,
- Renforcement de l'équipe par des experts météorologues,
- Hybridation des modèles (LSTM + CNN ou Transformers).

En conclusion, ce stage a été une expérience formatrice, tant sur le plan technique que pro-

MODÉLISATION PRÉdictive DES CONDITIONS MÉTÉORologiques AUX PORT AUTONOME DE DOUALA À PARTIR DE L'IA

fessionnel. Il m'a permis de contribuer à un projet concret, porteur d'innovation et aligné avec les objectifs de développement durable et de sécurité maritime du Cameroun.

Perspectives d'évolution

Plusieurs améliorations peuvent être envisagées :

- Achat d'un super calculateur afin de tourner ces propres modèles .
- Installation d'une connexion illimitée et très fluide.
- Automatisation complète du processus de prédiction quotidienne avec envoi des résultats via email ou notification mobile.

- Amélioration du modèle
- Renforcement de la sécurité et authentification des accès à l'API.

Annexes

1-TideMasterExpress.pdf

2-Lien vers le dépôt GitHub du projet

Le code source complet, la source de données ainsi que les scripts,l'ensemble des graphes et document utilisé ; d'entraînement et de visualisation sont disponibles sur GitHub à l'adresse suivante :

https://github.com/Thierry-Engoulou/projet_fin_d_etude