



**HAL**  
open science

# Assessing and predicting extreme events in Western France

Ayyoub Frifra

► **To cite this version:**

Ayyoub Frifra. Assessing and predicting extreme events in Western France. Geography. Nantes Université; Centre marocain des sciences sociales – Université Hassan II, Ain Chock, Casablanca, 2024. English. NNT: 2024NANU2012 . tel-04908208

**HAL Id: tel-04908208**

**<https://theses.hal.science/tel-04908208v1>**

Submitted on 23 Jan 2025

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

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



# THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE  
FACULTE DES SCIENCES AIN CHOCK, UNIVERSITE  
HASSAN II DE CASABLANCA

ECOLE DOCTORALE N° 604  
*Sociétés, Temps, Territoires*  
Spécialité : *Géographie et Géomatique*

Par

**Ayyoub FRIFRA**

**Assessing and Predicting Extreme Events in Western France**

**Évaluation et Prédiction des Événements Extrêmes dans l'Ouest de la France**

Thèse présentée et soutenue à Casablanca le 28 décembre 2024

Unité de recherche : Littoral Environnement Télédétection Géomatique (LETG), UMR 6554 CNRS

## Rapporteurs avant soutenance :

Rafika HAJJI Professeure, Institut Agronomique et Vétérinaire HASSAN II (IAV)  
Sanaa NAKHLI Professeure, Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme (INAU)

## Composition du Jury :

Présidente : Aude ZINGRAFF-HAMED l'environnement de Strasbourg (ENGEES)	Maître de conférences, HDR, École nationale du génie de l'eau et de
Examineurs : Mouncef SEDRATI Mehdi MAANAN	Maître de conférences, Université Bretagne Sud
Dir. de thèse : Mohamed MAANAN	Professeur, Université Hassan II de Casablanca
Co-dir. de thèse : Hassan RHINANE	Maître de conférences, HDR, Nantes Université
	Professeur, Université Hassan II de Casablanca

# Résumé Substantiel

Historiquement, les zones côtières ont fonctionné comme des centres vitaux de l'activité humaine en raison de leurs ressources naturelles abondantes et de leurs positions stratégiques. Ces zones sont des composantes vitales de plusieurs économies nationales, facilitant diverses activités sociales et économiques situées le long de la mer. Le progrès continu dans ces régions illustre leur valeur intrinsèque, soutenue par la population substantielle qui y réside. Plus de 600 millions de personnes dans le monde vivent dans des zones côtières situées à une altitude inférieure à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer. Parallèlement, environ 2,4 milliards de personnes, soit 40 % de la population mondiale, résident à moins de 100 kilomètres du littoral, et les prévisions indiquent que cette proportion pourrait atteindre 50 % d'ici à 2030.

Les régions côtières présentent une complexité et une densité d'urbanisation plus importantes que les régions non-côtières. En outre, l'urbanisation dans les régions côtières se développe à un rythme très rapide. En France, par exemple, la densité de développement en bord de mer est quatre fois supérieure à la moyenne nationale. La plupart des mégapoles du monde sont situées dans des zones côtières, ce qui démontre une tendance mondiale à l'expansion urbaine dans ces endroits. Cette tendance à vivre sur le littoral devrait se poursuivre ou s'aggraver et elle est motivée non seulement par le potentiel économique qu'offrent ces lieux, mais aussi par leurs avantages culturels et récréatifs spécifiques, la disponibilité des ressources marines et un lien personnel avec l'interface entre la terre et l'eau. Par conséquent, ces sites ont acquis une importance prépondérante dans la quête du développement durable et dans la gestion environnementale.

Résider à proximité du littoral présente des avantages évidents. Toutefois, cela expose également les populations à un certain nombre de menaces croissantes résultant de catastrophes naturelles plus graves et plus fréquentes dans ces endroits. Les zones côtières, qui sont des régions fortement habitées et économiquement importantes, sont exposées à plusieurs dangers côtiers, notamment les tempêtes côtières. Les tempêtes, qui se caractérisent par des vents puissants, des vagues d'une hauteur et d'un niveau de mer extrêmes et des pluies généralement violentes, provoquent des dégâts humains, économiques et écologiques considérables. Les tempêtes sont reconnues comme l'un des aléas naturels les plus redoutables à l'échelle mondiale, causant des effets dévastateurs dans les zones côtières en raison de leur faible élévation et d'une

densité de population élevée. Parmi les exemples récents de tempêtes, citons l'ouragan Katrina, qui a frappé le littoral de la Louisiane en 2005, le cyclone Sidr au Bangladesh en 2007, la tempête Xynthia en France en 2010, l'ouragan Sandy dans les Caraïbes, le New Jersey et New York en 2012, le typhon Haiyan aux Philippines en 2013, les tempêtes hivernales de 2013/2014 au Royaume-Uni et le cyclone tropical Pam au Vanuatu en 2015.

Une caractéristique fondamentale des tempêtes côtières, qui les différencie d'autres événements catastrophiques tels que les tsunamis, est leur genèse à partir de perturbations atmosphériques au-dessus des océans. Bien qu'il existe d'autres formes de perturbations, la majorité des tempêtes à l'échelle mondiale résulte de deux principaux systèmes synoptiques : les cyclones tropicaux et les cyclones extratropicaux. Ces derniers sont les principaux phénomènes météorologiques aux latitudes moyennes. Alors que les cyclones extratropicaux aient généralement des vents de surface moins violents que ceux des tempêtes tropicales, leur déplacement lent et leur grande taille leur permettent d'affecter de vastes sections du littoral et de rester au large pendant de longues périodes. Par conséquent, les cyclones extratropicaux peuvent avoir des impacts côtiers comparables, voire plus graves, que ceux induits par les tempêtes tropicales.

En Europe, les tempêtes de vent hivernales, engendrées par des cyclones extratropicaux, constituent les menaces naturelles les plus significatives pour le continent. Ces tempêtes extratropicales, qui se forment dans l'Atlantique Nord et se déplacent vers l'est en direction de l'Europe, touchent régulièrement les régions côtières du Royaume-Uni, de l'Irlande, de l'Allemagne, de la France, des Pays-Bas et du Danemark. L'Europe subit presque chaque année des tempêtes de vent provoquées par ces cyclones extratropicaux. Parmi ces tempêtes catastrophiques, citons Anatol, Lothar et Martin de décembre 1999, qui ont causé des dégâts d'une valeur d'environ 13,5 milliards d'USD et fait plus de 150 victimes. La tempête Xynthia de février 2010 a également causé 64 décès et des pertes économiques totales d'au moins 3,6 milliards d'euros dans le Sud de l'Europe.

Les impacts du changement climatique devraient être particulièrement graves sur les côtes, en raison de leur exposition accrue aux effets associés, notamment l'élévation future du niveau de la mer. Le changement climatique devrait accroître la fréquence des tempêtes dans les latitudes moyennes, ce qui se traduira par des ondes de tempête plus marquées et des vagues plus hautes. Les scénarios projetés jusqu'en 2100 indiquent une augmentation de la force des tempêtes hivernales dans l'Atlantique Nord et en Europe occidentale. Les prévisions des pertes liées aux tempêtes indiquent une augmentation dans la région Nord-Ouest de l'Europe ; une hausse de 2,5 °C des températures pourrait entraîner une augmentation de 23 % des pertes liées aux

tempêtes en Europe. Au cours des dernières décennies, l'attention s'est portée sur le danger accru et la probabilité plus élevée de ces tempêtes en raison du changement climatique et de l'augmentation de la vulnérabilité. La fréquence accrue des tempêtes a conduit les services météorologiques de France, du Portugal, d'Espagne et de Belgique à attribuer des noms aux tempêtes afin de mieux informer le public et les médias, tout en contribuant à sensibiliser le public aux tempêtes et aux avertissements associés, ainsi qu'aux recommandations de sécurité opportunes.

L'élévation du niveau de la mer, une autre conséquence bien acceptée du changement climatique, est considérée au niveau international comme une grave menace, en particulier pour les régions de faible altitude et densément peuplées. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) anticipe que le changement climatique provoquera une élévation du niveau moyen des mers au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, entraînant ainsi une transformation significative des littoraux. Pour de nombreuses régions côtières, les estimations de l'élévation globale du niveau de la mer d'ici 2100 sont équivalentes aux augmentations extrêmes mais temporaires du niveau de l'eau dues aux tempêtes d'aujourd'hui. En conséquence, le XXI<sup>e</sup> siècle verra des changements substantiels dans les régimes d'inondation côtière, avec des événements actuels, intenses mais inhabituels, qui deviendront plus fréquents, présentant un grave danger pour la sécurité et la durabilité des populations côtières dans le monde entier. L'élévation du niveau de la mer a un effet exponentiel sur la fréquence des inondations côtières, et même une augmentation minime peut avoir une influence disproportionnée sur la fréquence des inondations côtières. En outre, l'augmentation de la fréquence des inondations devrait exacerber toute une série de problèmes côtiers connexes, notamment l'érosion côtière. L'augmentation de l'exposition, du danger et de la probabilité de ces risques côtiers (tempêtes et inondations) souligne la nécessité vitale de les analyser et de les prévoir afin de minimiser et d'atténuer leurs effets dévastateurs.

Cette recherche est motivée par le besoin urgent de mieux comprendre et de prévoir les risques côtiers dans l'Ouest de la France, car ces régions ont été historiquement exposées à des événements catastrophiques, entraînant d'importantes pertes économiques et humaines. À la lumière de ces défis, de nouvelles stratégies de prévision et de réduction des impacts de ces menaces sont désespérément nécessaires. Par conséquent, cette thèse, intitulée *Évaluation et prévision des événements extrêmes dans l'Ouest de la France*, vise à améliorer notre compréhension et nos capacités de prévision des risques côtiers en appliquant des techniques de pointe (algorithmes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond). Ces modèles prédictifs, sophistiqués peuvent remplacer les modèles traditionnels et conventionnels dans la

prédiction de ces événements extrêmes, ce qui permet de disposer d'un délai important pour réagir avec succès et prendre des mesures d'atténuation. Ils surpassent également les techniques précédentes en termes de coût de calcul et de précision des prévisions. En outre, l'utilisation de modèles basés sur l'apprentissage automatique et profond pour prévoir et réduire les risques côtiers est compatible avec les objectifs de réduction des risques de catastrophe et de développement durable à l'échelle mondiale. Par conséquent, il est essentiel de poursuivre les avancées de la recherche dans ce domaine afin de sauver des vies et des infrastructures, tout en renforçant la résilience et la capacité d'adaptation des communautés côtières face aux défis posés par le changement climatique.

Dans le contexte du risque croissant lié aux aléas côtiers, amplifié par le changement climatique, cette thèse vise à répondre à une série de questions essentielles pour améliorer notre gestion des risques. Les questions principales suivantes orientent la recherche :

- 1) Comment les approches avancées d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond peuvent-elles être appliquées pour améliorer la prévision des risques côtiers sur la côte Ouest de la France ? L'objectif est de créer des modèles de prévision capables de prédire avec précision l'occurrence et les caractéristiques des risques côtiers tels que les tempêtes. L'accent est mis sur l'application d'algorithmes de pointe pour capturer la dynamique complexe de ces événements graves, en améliorant la précision et la fiabilité de la prédiction.
- 2) Quelles sont les perspectives probables d'expansion urbaine future dans les régions côtières, et comment peut-on les projeter afin de mieux se préparer aux risques côtiers et d'en atténuer l'impact ? Il comprend l'application de la modélisation du développement urbain pour simuler et anticiper l'expansion de l'urbanisation dans les zones côtières. L'étude est conçue pour explorer comment les enjeux humains futurs, en termes de développement des infrastructures, pourraient évoluer en réponse aux facteurs et aux contraintes de la croissance urbaine.
- 3) Comment mesurer les conséquences des risques côtiers sur l'expansion urbaine future et la vulnérabilité des régions côtières ? L'objectif est d'examiner comment les changements prévus dans les paysages urbains pourraient modifier la vulnérabilité de ces sites aux catastrophes côtières. Il vise l'analyse des conséquences probables des tempêtes côtières et de l'élévation du niveau de la mer sur les futures zones urbaines. L'étude cherche à proposer des moyens de réduire les menaces qui pèsent sur ces infrastructures urbaines.

En résolvant ces problèmes, la thèse vise à contribuer aux domaines de la prévision et de la gestion des risques, ainsi qu'à la planification urbaine, en présentant une stratégie complète de défense des zones côtières contre les menaces croissantes posées par le changement climatique.

La thèse est structurée en cinq chapitres clés pour répondre aux préoccupations de la recherche, chacun abordant un élément important de l'étude. Les chapitres 1 et 2 évaluent les recherches sur les risques côtiers et les variables favorisant la susceptibilité, et présentent la région étudiée, constituent la base de l'étude. Le chapitre 3 détaille les méthodes d'étude, tandis que les chapitres 4 et 5 utilisent des approches de modélisation complexes pour estimer et analyser les menaces futures. La technique choisie dans cette thèse intègre des outils de modélisation d'apprentissage automatique, d'apprentissage profond et d'expansion urbaine pour étudier et prévoir les événements extrêmes (risques côtiers) le long de la côte Atlantique française. L'étude a développé une stratégie unique à double modèle, utilisant Long Short-Term Memory (LSTM) pour la prévision des caractéristiques des tempêtes et Extreme Gradient Boosting (XGBoost) pour la prévision de leur occurrence. En outre, un modèle hybride Multi-Layer Perceptron-Markov Chain (MLP-Markov) a été utilisé pour modéliser la croissance urbaine future et la vulnérabilité aux inondations côtières. Cette méthode analytique complète a permis d'inclure à la fois les variables naturelles et anthropiques contribuant à la vulnérabilité côtière, établissant ainsi un cadre approfondi pour la prévision et l'analyse des risques présentés par les événements extrêmes sur la côte Atlantique française. L'approche méthodologique peut être divisée en trois phases fondamentales :

Prévision des caractéristiques des tempêtes à l'aide de LSTM : la première phase utilise le modèle LSTM pour anticiper les multiples variables des tempêtes telles que la hauteur et la période des vagues, la vitesse du vent, l'humidité, la température et la pression. L'étude a utilisé des données de séries temporelles multivariées en combinant les données des bouées en mer et les enregistrements historiques des tempêtes de 1996 à 2020. Les tâches essentielles de cette phase comprenaient le prétraitement des données d'entrée (imputation médiane pour les valeurs manquantes et normalisation avec le score standard), la détermination des fenêtres temporelles appropriées sur la base de l'analyse de l'autocorrélation, et le réglage des hyperparamètres à l'aide de Keras Tuner basé sur une technique d'optimisation bayésienne. Le modèle LSTM généré a été testé par validation croisée et évalué à l'aide de mesures de performance telles que l'erreur quadratique moyenne, l'erreur absolue moyenne, l'erreur absolue moyenne en pourcentage et le coefficient de détermination.

Prédiction de l'occurrence des tempêtes à l'aide de XGBoost : contrairement à la première phase, qui utilisait les caractéristiques historiques des tempêtes pour prédire celles à venir, l'objectif de la deuxième phase était d'anticiper l'occurrence des tempêtes sur la base de leurs propriétés. Par conséquent, un classificateur binaire XGBoost a été développé en utilisant les six caractéristiques comme entrées et l'occurrence des tempêtes comme sortie du modèle. Le modèle a été entraîné à l'aide de la validation croisée k-fold stratifiée, et le réglage des hyperparamètres a été effectué par optimisation bayésienne à l'aide du package Hyperopt. Le modèle a été évalué à l'aide des métriques extraites de la matrice de confusion, notamment le rappel (recall) et la spécificité, ainsi que la courbe des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC). Cette phase a permis d'établir un cadre solide pour anticiper l'occurrence possible des tempêtes sur la base de paramètres environnementaux.

Simulation de la croissance urbaine future et évaluation des risques d'inondation à l'aide de MLP-Markov : la troisième phase a analysé les risques futurs en prédisant les modèles de croissance urbaine sur la côte vendéenne, qui a été désignée comme la principale région d'étude. Le modèle MLP-Markov a utilisé des données historiques sur l'occupation et l'utilisation du sol (LULC) de 2006, 2019 et 2022, ainsi que les facteurs uniques de l'expansion urbaine dans la région de recherche, pour prévoir les futurs modèles d'urbanisation en 2060 et 2100 selon trois scénarios : statu quo, protection de l'environnement et planification urbaine stratégique. Les résultats du modèle ont été intégrés aux zones inondables à haut risque en cas de tempête et aux estimations du GIEC concernant l'élévation du niveau de la mer, ce qui a permis d'évaluer la vulnérabilité probable des futures zones urbaines aux inondations côtières. Cette combinaison permet d'appréhender pleinement les conséquences à long terme du changement climatique et de l'urbanisation sur la vulnérabilité côtière.

Cette étude a produit plusieurs résultats significatifs et a apporté des contributions essentielles dans les domaines de la prévision des risques côtiers, de la modélisation de la croissance urbaine et de la gestion des risques. Les principaux résultats et contributions sont énumérés ci-dessous:

Progrès dans la prévision des tempêtes : cette thèse apporte une contribution considérable en construisant et en utilisant des modèles d'apprentissage automatique et profond pour prédire les caractéristiques et l'occurrence des tempêtes. Grâce à la prédiction de variables telles que la vitesse du vent, la température, la pression, l'humidité, la hauteur et la période des vagues, le modèle LSTM a pu décrire avec précision la dynamique temporelle des tempêtes. Le modèle a généré des prédictions précises pour la majorité des caractéristiques des tempêtes en fusionnant les enregistrements historiques des tempêtes avec des données de séries temporelles

multivariées. Le modèle XGBoost a complété le modèle LSTM en anticipant l'occurrence des tempêtes sur la base de leurs propriétés. L'utilisation d'un classificateur binaire pour prévoir l'occurrence des tempêtes s'est avérée extrêmement efficace, avec des mesures de performance solides démontrant l'utilité du modèle dans des applications concrètes. En plus d'améliorer notre compréhension de la dynamique des tempêtes, cette technique à double modèle fournit un outil utile pour la météorologie opérationnelle, où les alertes précoces de tempêtes sont vitales pour la planification des catastrophes.

L'approche de recherche employée dans cette thèse représente une avancée significative par rapport aux études précédentes sur la prévision des tempêtes, en adoptant une stratégie intégrée unique qui combine les modèles LSTM et XGBoost pour anticiper une large gamme de propriétés des tempêtes ainsi que leur occurrence sur la côte ouest de la France. Les recherches précédentes ont abordé la question comme un problème de régression, en utilisant ces modèles d'apprentissage automatique et profond indépendamment et en se concentrant sur la prédiction d'une seule caractéristique, telle que la hauteur des vagues. Une compréhension plus complète de la dynamique des tempêtes est fournie par la méthode actuelle, qui élargit la portée de la prévision pour inclure une plus grande gamme de variables de tempête, combine les approches de régression et de classification, et combine les capacités de LSTM et XGBoost pour permettre une prédiction approfondie d'une variété de paramètres de tempête ainsi que la prédiction des jours d'occurrence des tempêtes. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour améliorer la préparation aux tempêtes et les mesures de réduction des risques. La technique utilisée dans cette thèse représente un développement substantiel dans la prévision des tempêtes, et elle n'est pas seulement pertinente pour la côte ouest de la France, mais elle a également le potentiel d'être adaptée et utilisée au niveau international.

Simulation de la croissance urbaine future et évaluation des risques d'inondation : En utilisant le modèle MLP-Markov pour estimer le développement urbain futur dans la région côtière de la Vendée, dans l'Ouest de la France, la thèse a contribué aux disciplines de la planification urbaine et de l'évaluation des risques d'inondation. L'objectif principal de l'étude était d'identifier et d'analyser les impacts probables des tempêtes violentes et de l'élévation du niveau de la mer sur l'exposition future aux inondations urbaines afin de promouvoir la planification urbaine durable et la réduction des risques d'inondation. Les principales contributions de la recherche sont l'application du modèle MLP-Markov, rarement utilisé pour prévoir la susceptibilité future des zones urbaines aux inondations, ainsi que l'intégration de la modélisation du développement urbain basée sur différents scénarios de croissance avec à la

fois le changement climatique et le risque d'inondation. En outre, la recherche examine les conséquences des tempêtes extrêmes en plus de l'élévation du niveau de la mer.

L'étude a examiné comment différentes décisions politiques peuvent avoir un impact sur la distribution géographique des futures zones urbaines en établissant trois scénarios alternatifs : statu quo, protection de l'environnement et planification urbaine stratégique. Les résultats indiquent que la planification urbaine stratégique, axée sur la croissance contrôlée et la préservation de l'environnement, génère le plus faible nombre de futures zones vulnérables aux inondations. Les réglementations et la gestion de l'urbanisation peuvent jouer un rôle clé dans la prévention de la vulnérabilité future aux inondations urbaines. Afin de limiter efficacement les risques d'inondation dans la zone d'étude et d'éloigner l'expansion urbaine future des sites côtiers sujets aux inondations, les efforts de planification futurs doivent prendre en compte les effets à long terme de l'élévation du niveau de la mer et mettre en œuvre des stratégies de planification plus efficaces et des contraintes d'urbanisation plus strictes.

La thèse a fourni une étude complète des impacts possibles de l'expansion urbaine dans les zones côtières sur la vulnérabilité aux inondations en intégrant les évaluations des risques d'inondation avec la modélisation de la croissance urbaine. Une compréhension plus précise des risques futurs a été rendue possible par la combinaison de la modélisation de la croissance urbaine, des estimations de l'élévation du niveau de la mer et des zones inondables à haut risque. Cela a permis d'obtenir une image claire de la manière dont les événements extrêmes futurs et le changement climatique peuvent affecter les régions urbaines côtières. Cette méthode fournit des données essentielles aux décideurs politiques et aux urbanistes qui tentent de réduire les risques d'inondation tout en permettant une croissance future dans les zones côtières.

Cadre intégré d'évaluation des risques : une innovation importante de cette thèse est la conception d'une approche intégrée d'évaluation des risques, qui intègre la prévision des tempêtes avec la croissance urbaine et les évaluations de la vulnérabilité. Ce paradigme aborde les aspects humains et environnementaux menant à la vulnérabilité, donnant une approche complète de la gestion des risques côtiers. En plus d'améliorer notre compréhension des risques côtiers, ce cadre intégré soutient des initiatives plus larges visant à réduire le risque de catastrophes face au changement climatique mondial. Cette étude aide les communautés côtières à atteindre leurs objectifs de développement durable et de résilience climatique en offrant un outil de prévision qui peut guider les mesures d'atténuation.

En conclusion, cette thèse a fait des progrès importants dans l'amélioration de la prévision et de l'évaluation des risques côtiers sur l'ensemble de la côte Atlantique française. Un cadre intégré pour l'évaluation des risques futurs et l'orientation des politiques de gestion côtière a été rendu possible par l'utilisation d'une nouvelle technique qui combine des modèles d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond avec des simulations d'expansion urbaine. Les conclusions de la recherche fournissent des informations essentielles pour la préparation aux catastrophes, le développement urbain et la résilience climatique dans les régions côtières. Alors que le changement climatique continue d'aggraver les risques côtiers, une recherche continue sera nécessaire pour créer des outils de prédiction plus précis et des plans d'atténuation des risques plus efficaces. La thèse soutient cet effort plus large en montrant le potentiel des méthodes d'apprentissage automatique et profond et de la modélisation d'urbanisation dans l'amélioration de notre compréhension de la vulnérabilité côtière et de notre capacité à protéger les communautés côtières contre les menaces croissantes posées par les événements extrêmes et les effets du changement climatique.

## Titre : Évaluation et Prédiction des Événements Extrêmes dans l'Ouest de la France

**Mots clés :** Risques côtiers ; prédiction des tempêtes ; intelligence artificielle ; modélisation de la croissance urbaine ; submersion marine ; changement climatique

**Résumé :** Les régions côtières sont de plus en plus exposées à des événements extrêmes en raison des impacts combinés du changement climatique et de l'urbanisation. Cette thèse examine les risques côtiers le long de la côte ouest de la France, en mettant l'accent sur la prévision des tempêtes et la simulation de la vulnérabilité future aux inondations côtières.

Des approches d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond ont été utilisées pour améliorer la prédiction des aléas et évaluer les risques futurs. Une nouvelle méthodologie combinant Long Short-Term Memory (LSTM) et Extreme Gradient Boosting (XGBoost) est proposée pour prévoir les caractéristiques et l'occurrence des tempêtes le long de la côte ouest de la France. Parallèlement, un système de modélisation du développement urbain a été appliqué pour prédire

les scénarios d'expansion future en Vendée, en analysant la susceptibilité aux inondations. Un réseau de neurones artificiels combiné à une chaîne de Markov a permis de simuler trois scénarios de croissance urbaine : statu quo, protection de l'environnement et planification urbaine stratégique. Les zones inondables à haut risque et les estimations de l'élévation future du niveau de la mer ont ensuite été utilisées pour évaluer les risques d'inondation futurs dans le cadre de chaque scénario de croissance. Les résultats montrent l'efficacité des modèles LSTM et XGBoost pour la prévision des caractéristiques et de l'occurrence des tempêtes. L'approche de modélisation de la croissance urbaine révèle les zones vulnérables aux inondations dans chaque scénario. Cette thèse fournit des outils pour renforcer la résilience et la durabilité dans les zones côtières.

## Titre : Assessing and Predicting Extreme Events in Western France

**Keywords :** Coastal hazards ; storm prediction ; artificial intelligence ; urban growth modeling ; coastal flooding ; climate change

**Abstract :** Coastal regions are increasingly exposed to extreme events due to the combined impacts of climate change and urbanization. This thesis examines coastal hazards along France's western coast, emphasizing storm prediction and the simulation of future vulnerability to coastal urban flooding.

The research employs machine learning (ML) and deep learning (DL) approaches to improve hazard prediction and assess potential future risks. It introduces a novel methodology that combines Long Short-Term Memory (LSTM) and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) to forecast storm features and occurrences along the western coast of France. Additionally, an urban development modeling system was applied to predict future expansion scenarios in the Vendée region, analyzing potential flood

susceptibility under each scenario. An Artificial Neural Network combined with a Markov Chain was utilized to simulate three future urban growth scenarios: business-as-usual, environmental protection, and strategic urban planning. High-risk flood zones and future sea level rise estimates were then used to assess future flood risk under each growth scenario. The research findings demonstrate the efficiency of LSTM and XGBoost in predicting storm characteristics and occurrences. Moreover, the urban growth modeling approach forecasts future development sites and specific urban areas vulnerable to flooding, allowing for the evaluation of the impact of various development trajectories on future flood risk. This thesis contributes to coastal hazard prediction, urban planning, and risk management, providing useful tools for improving resilience and sustainability in coastal zones.