

Sujet de Thèse de Doctorat

Titre : Représentativité et incertitudes de l'aléa cyclone dans les Territoires Français d'Outre-Mer

Equipe encadrante : Xavier Bertin (DR, LIENS), Swen Jullien (CR, LOPS), Guillaume Dodet (CR, LOPS)

Laboratoire d'accueil : LOPS, Brest

Profil du candidat : Titulaire d'un master 2 (ou équivalent) comprenant une ou plusieurs des spécialités suivantes : Océanographie physique, Dynamique de l'atmosphère, Sciences des données

Financement (acquis) : 50% PPR FUTURISKS, 50% Ifremer (ODE)

Candidatures à transmettre à : xbertin@univ-lr.fr, swen.jullien@ifremer.fr, guillaume.dodet@ifremer.fr

Contexte et positionnement

En raison de leur localisation (intertropicale et hyper-océanique), de l'augmentation des enjeux humains (population, infrastructures, systèmes de production) dans les zones côtières basses, et d'économies climato-dépendantes, les Territoires Français ultramarins tropicaux (Antilles françaises, Mayotte, La Réunion, Nouvelle Calédonie, Polynésie française) sont fortement exposés aux aléas météo-marins et en première ligne des impacts du changement climatique (élévation du niveau marin, intensification des épisodes pluvieux intenses et des cyclones intenses, augmentation des niveaux marins extrêmes et de la fréquence des vagues de chaleur marines). Parmi ces aléas, les cyclones tropicaux sont les phénomènes les plus extrêmes de l'atmosphère tropicale. Les vents associés peuvent souffler à plus de 250 km/h, ils peuvent générer des vagues de plus de 10 m de hauteur et des pluies diluviennes. Dans les zones littorales basses, les inondations induites par les cyclones sont les catastrophes les plus dévastatrices et représentent plus de 90 % des pertes humaines et de biens (Pielke et al. 2008). Ces inondations résultent d'une combinaison de facteurs physiques : la surcote atmosphérique (anomalie positive du niveau marin induite par les vents et la pression atmosphérique), la surélévation du niveau marin le long du rivage du fait de la dissipation des vagues (wave setup), les épisodes de franchissement des obstacles littoraux tels que les dunes ou les digues par les vagues et des ondes longues dites infragravitaires et les précipitations. A ces facteurs physiques peuvent s'ajouter des facteurs humains et géographiques associés à l'organisation et la gestion du territoire.

Le projet FUTURISKS, financé par le Programme Prioritaire de Recherche Océan et Climat 2023-2028, vise à améliorer (i) la compréhension des processus qui contrôlent l'érosion côtière et la submersion marine, (ii) l'analyse des impacts en cascade et phénomènes d'amplification en jeu dans les événements combinés d'origine météo-marine, et (iii) les politiques de réduction des risques et d'adaptation au changement climatique dans les territoires insulaires d'Outre-Mer français. La thèse proposée se positionne dans le premier work package du projet FUTURISKS, qui porte sur l'évaluation des aléas et impacts des événements majeurs ayant touchés les territoires français d'outre-mer depuis les années 80.

La caractérisation et la prévision des phénomènes de submersion marine nécessite de modéliser correctement à la fois le champ de vent des cyclones, les précipitations, le champ de vague ainsi que les interactions entre les vagues et la circulation littorale (elles-mêmes fortement dépendantes de la topographie et de la nature du fond). Le premier jalon consiste donc à modéliser des conditions réalistes de forçage atmosphérique et de vagues incidentes, ce qui est un défi en soi. Les cyclones sont en effet des événements extrêmes avec de très forts gradients de vent, qui sont actuellement mal représentés dans les modèles globaux et les réanalyses (e.g. Hodges et al. 2017). Ils génèrent des états de mer complexes et extrêmes qui sont difficiles à observer et à modéliser avec précision (e.g. Holthuijsen et al. 2012) et qui rétroagissent, via la modulation des flux à l'interface air-mer, sur l'évolution des cyclones. De plus, la répartition spatiale des cyclones, éparses et présentant une forte variabilité inter-annuelle, rend leur observation et leur évaluation statistique difficiles.

Dans ce contexte, cette thèse vise à caractériser les événements cycloniques passés et leur représentativité en terme de risques pour les territoires via la mise en œuvre de simulations numériques rétrospectives des événements ayant généré un aléa/risque significatif sur les territoires concernés, ainsi que l'analyse des modes de variabilité climatique atmosphérique et des vagues (e.g. Dodet et al., 2020 ; Dutheil et al., 2021). Il s'agira de travailler sur 2 problématiques majeures :

- **L'incertitude de l'aléa modélisé associée à la représentation des champs de vent, de précipitation et de vagues qui dépendent fortement de la représentation des interactions air-mer**
- **La représentativité de ces événements historiques d'un point de vue statistique (probabilité/fréquence d'occurrence, mode de variabilité climatique, tendances à long-terme)**

Ce travail sera accompagné de travaux réalisés dans le cadre du projet sur l'étude d'archives historiques des inondations induites par les tempêtes, la quantification des variations du niveau de la mer et des mouvements terrestres verticaux (e.g., Ballu et al., 2019), l'étude de scénarios futurs à échelle réduite pour les régions insulaires (e.g. Martinez-Asensio et al. 2019), ainsi que l'évaluation des impacts morphologiques et sur les sociétés (e.g. Rey et al., 2019) pour reconstruire des Trajectoires d'Exposition et de Vulnérabilité des territoires insulaires aux aléas climatiques (e.g. Duvat et al., 2021b). Cette thèse sera réalisée en collaboration étroite avec une seconde basée au laboratoire LIENSs à La Rochelle et qui visera à étudier à très haute résolution les niveaux extrêmes et les submersions marines associées aux événements majeurs ayant frappé les territoires d'outremer français au cours des dernières décennies.

Détails du sujet

A. Etat de l'art

Physique des cyclones : la question des interactions air-mer

La prévision et la caractérisation, même a posteriori, des événements cycloniques reste un défi à l'heure actuelle. Ce sont des phénomènes extrêmes, multi-échelles (les structures convectives à l'intérieur d'un cyclone sont de l'ordre de la centaine de mètre quand le cyclone tout entier mesure entre 500 et 1000 km de diamètre) et leur dynamique est fortement couplée que ce soit entre les échelles du cyclone (e.g. Wang and Wu 2004) ou avec les éléments externes que sont le flux synoptique atmosphérique, et la surface océanique (e.g. Holland 1997, Bender and Ginis 2000, Jullien et al. 2014, Holthuisjsen et al. 2012). La représentation des flux à l'interface air-mer est un point crucial pour la modélisation des cyclones, ces derniers puisant leur énergie de l'évaporation des eaux tropicales chaudes. Ces flux air-mer sont pourtant encore relativement mal connus et représentés (par manque d'observations). Sous les vents extrêmes des cyclones, la direction et la vitesse du vent changent très rapidement, générant des houles croisées, qui ne sont pas en équilibre avec le forçage du vent auxquelles s'ajoutent embruns, gouttelettes et écume. L'océan est par ailleurs soumis à un mélange et une advection verticale forte sous l'effet du vortex cyclonique qui engendrent un sillage froid, une modification de stratification et des courants proche-inertiels. Tous ces processus peuvent avoir un impact considérable sur les échanges entre l'océan et l'atmosphère (e.g. Bao et al., 2000, Doyle et al., 2002, Chen et Curcic, 2015, Bender and Ginis 2000, Jullien et al. 2014) et affecter de ce fait le transfert d'énergie aux cyclones et leur dissipation. La complexité de l'interface océanique sous les cyclones est telle qu'il est difficile de savoir si la physique conventionnelle prise en compte pour représenter les interactions océan-vagues-atmosphère et les flux air-mer est pertinente pour modéliser correctement l'évolution des cyclones tropicaux. Leur représentation et paramétrisation restent des sujets de recherche actifs et ne font pas toujours consensus (e.g. Jarosz et al., 2007 ; Soloviev et Lukas, 2010 ; Holthuisjsen et al., 2012 ; Bryant and Akbar 2016). Une des problématiques de la thèse s'attachera donc à évaluer comment ces paramétrisations impactent l'aléa modélisé et quelles incertitudes celles-ci apportent sur la représentation de cet aléa.

Distributions cycloniques et incertitudes

Les cyclones sont par ailleurs des événements relativement rares (90 cyclones par an à l'échelle globale), leur distribution spatiale est éparse, variable chaque année et soumise à la fois aux modes de variabilité climatique naturelle (e.g. Vincent et al. 2011) et anthropique (e.g. Dutheil et al. 2020) et à une stochasticité intrinsèque à la dynamique atmosphérique à ces échelles (e.g. Jourdain et al. 2011, Zhao et al. 2009). Certaines portions de littoraux n'ont jamais ou peu été impactées, et le nombre de cyclones paraît insuffisant pour estimer le risque d'occurrence et la récurrence de l'aléa. De plus, plusieurs paramètres influencent les inondations associées aux cyclones (Lin et Emanuel, 2015) : les paramètres propres au cyclone lui-même (trajectoire, intensité, taille, vitesse de translation...), les vagues qu'il engendre et leur transformation avant d'arriver à la côte, le contexte géographique (bathymétrie, topographie, géomorphologie, occupation des sols, rivières, ouvrages...). S'ajoute à cela que des observations fiables et représentatives de l'activité cyclonique ne sont disponibles que depuis l'ère satellitaire, et les séries temporelles couvrent donc au mieux une quarantaine d'années. La caractérisation des périodes de retours associées aux épisodes de submersion majeures ne peut donc s'appuyer que sur une extrapolation au-delà de la plage de données disponibles (Caires, 2011). Évaluer et explorer la représentativité des événements historiques quant au risque de submersion dans une approche passé-présent-futur n'est donc pas évident.

Une approche consiste à générer un grand nombre de cyclones synthétiques sur une base d'apprentissage de trajectoires et intensité existantes (e.g. Nederhoff et al., 2021, Bloemendaal et al. 2022). Cela permet d'augmenter significativement la taille de l'échantillon et donc d'obtenir une statistique plus robuste. Pour ensuite être capable de modéliser l'aléa associé à ces événements il faut alors générer un champ de vent, de pression, de précipitation, et de vagues associé aux trajectoires et intensités de ces cyclones synthétiques. Il s'agit alors de sélectionner les cas les plus représentatifs, et à les simuler grâce à des modèles déterministes. Des méthodes de ce type ont récemment été proposées (e.g. van Vloten et al. 2022, Bekker et al. 2022) pour la modélisation vagues-submersion en s'appuyant sur des modèles paramétriques de cyclones qui représentent un champ de vent de surface idéalisé basé sur un ensemble de paramètres réduit (vent maximum, latitude, pression centrale et ambiante, e.g. Holland 1980, Willoughby et al. 2006). Ces modèles simplifiés ne représentant pas la complexité et la grande variabilité sur de petites échelles des champs atmosphériques, la sensibilité de ces méthodes au champ de vent prescrit reste à évaluer.

B. Approche méthodologique envisagée

Dans l'objectif d'explorer la représentativité et les incertitudes de l'aléa cyclone dans les Territoires Français d'Outre-Mer, l'approche envisagée dans la thèse s'appuie tout d'abord sur la mise en place de simulations dynamiques réalistes d'événements passés, puis sur la mise en place de simulations probabilistes d'événements pouvant impacter les territoires. Le premier volet permettra d'adresser les questions des incertitudes liées à la représentation physique des événements au travers de modèles dynamiques ou de modèles simplifiés. Le second volet s'intéressera à caractériser la représentativité de ces événements passés quant à l'incertitude d'occurrence de tels événements (variabilité climatique et intrinsèque).

1. Représentation physique et incertitudes

a. Modélisation dynamique des événements historiques impactants

Dans le cadre du projet FUTURISKS, une liste de cyclones ayant fortement impacté les territoires d'intérêt du projet (i.e. Antilles françaises, Mayotte, La Réunion, Nouvelle Calédonie, Polynésie française) a été dressée. Il s'agira dans un premier temps de modéliser ces événements historiques avec un système de modélisation couplée, permettant une représentation la plus réaliste possible de ces événements. Pour ce faire, le modèle 3D atmosphérique WRF (Weather Research and Forecast), le modèle spectral d'état de mer WaveWatch III et le modèle océanique CROCO (Coastal and Region Ocean COmmunity model) seront utilisés. Ces modèles offrent des facilités de mise en œuvre de configurations et une capacité de raffinement d'échelle permettant la résolution de systèmes de fine échelle et d'intensité forte tels que les cyclones tropicaux. Ce système de modélisation a d'ores et déjà été utilisé et mis en place sur des configurations similaires (e.g. Jullien et al., 2014, Lengaigne et al. 2018, Pianezze et al. 2018,

Vinour et al. 2023). Une évaluation des champs modélisés sera conduite par comparaison aux observations satellite disponibles, et aux éventuelles simulations opérationnelles lorsqu'elles existent.

b. Exploration de l'incertitude de l'aléa modélisé

Afin d'étudier la sensibilité de l'aléa modélisé à la représentation des cyclones et de l'interface air-mer, des tests de sensibilité à la paramétrisation et représentation des flux à l'interface air-mer (spatialisation de la rugosité, réponse océanique) seront réalisés, ainsi qu'une comparaison avec des modèles paramétriques. Il s'agira d'analyser la variabilité (spatiale et en intensité) du champ de vent et de pression et son impact sur les champs de vagues et de la circulation générés à l'abord des récifs. Une étroite collaboration avec un autre doctorant, recruté dans le cadre du projet FUTURISKS et qui travaillera sur l'analyse à haute résolution des niveaux marins extrêmes et submersions associés à ces événements, pourrait permettre d'explorer la sensibilité des champs de forçages modélisés sur les surcote et submersions.

2. Représentativité statistique et incertitudes

a. Modélisation statistique des événements impactants les territoires à long terme

Une base de données de cyclones synthétiques sera générée sur une base d'apprentissage des trajectoires et intensité existantes via l'utilisation d'outils tels que TCWISE ou STORM (e.g. Nederhoff et al., 2021, Bloemendaal et al. 2022). Ces outils ont déjà été mis en place autour de la Nouvelle-Calédonie dans le cadre d'un projet précédent (IRD-DIMENC-Météo-France) et seront déployés sur les autres territoires d'intérêt. Un travail de sélection des événements représentatifs afin de couvrir l'espace dimensionnel sera conduit au travers d'outils statistiques (e.g. clustering, maximum difference algorithms, etc) et d'une analyse de la variabilité long-terme observée des cyclones et des paramètres environnementaux influençant leurs distributions. Des séries longues d'observations satellitaires (altimétrie, SAR, radiomètre, ...) et de réanalyses seront utilisées à cet effet.

b. Exploration de la représentativité des événements historiques

Il s'agira alors d'évaluer si les événements historiques modélisés dans la partie 1, et ayant significativement impacté les territoires d'outre mer, sont représentatifs de l'aléa passé et possiblement futur. La représentativité des événements historiques en comparaison des distributions synthétiques produites en partie 2a sera analysée (positionnement des événements passés dans une vue statistique, association à des périodes de retour, à l'influence des modes de variabilité climatique). La sensibilité aux incertitudes des trajectoires, angle d'incidence, tailles, intensités, vitesses de translation et représentation du champ de vent (en s'appuyant sur les résultats de la partie 1.b) pourra être explorée.