

MASTER SML

**SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL
MENTION**

**EXPERTISE ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT LITTORAL**

Sarah Djeneba TOLO

Risques côtiers en Finistère :
Vulnérabilité des routes côtières à
l'érosion et la submersion marine.

Mémoire de stage de Master 2

Année Universitaire **2020-2021**

Structure d'accueil : **Laboratoire LETG Brest-Géomer**

Tuteur universitaire : **Alain HENAFF**

Maître de stage : **Nicolas LE DANTEC**



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon tuteur universitaire Alain Hénaff grâce à qui j'ai pu effectuer mon stage de fin d'études de master au sein du laboratoire LETG-Brest Géomer UMR 6554 CNRS dans le cadre du projet OSIRISC. Je tiens à remercier également mon maître de stage Nicolas Le Dantec chercheur LGO UMR 6538 CNRS, qui a accepté de suivre ce travail. Je leur suis très reconnaissante pour leurs conseils, remarques et leur disponibilité malgré leur emploi du temps très chargé. J'ai beaucoup appris à leurs côtés.

Par la même occasion, j'adresse mes remerciements à Iwan Le Berre LETG-Brest Géomer, pour sa disponibilité et ses remarques très constructives. Je lui suis reconnaissante pour son aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Aussi, je tiens à remercier toute l'équipe du laboratoire LETG-Brest Géomer.

Enfin, j'adresse mes chaleureux remerciements à l'équipe enseignante du master EGEL pour ses deux années de formation. J'ai beaucoup appris au cours de ces deux années. Je remercie toute la promotion EGEL 2021.

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire	3
Sigles et abréviations.....	4
Résumé	6
Abstract	7
INTRODUCTION.....	8
Partie 1 : contexte du stage et présentation de la zone d'étude	11
1-1 Projets de gestions des risques côtiers	11
1-2 Missions du stage.....	13
1-2 Présentation de la zone d'étude	17
Partie 2 : Méthodologie	19
2-1 Recherche bibliographique	19
2-2 Caractérisation de la vulnérabilité des portions de routes départementales face à l'érosion et la submersion marines dans le Finistère.....	20
2-3 Calcul de l'indice de vulnérabilité « IVRAC »	29
Partie 3 : Résultats et discussions.....	30
3-1 Recherche bibliographique	30
3-2 Caractérisation de la vulnérabilité des portions de routes départementales face à l'érosion et la submersion marine dans le Finistère	33
CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE	55
Webographie	57
Liste des figures, des tableaux et des annexes.....	58
Table des matières	60
ANNEXES	62

Sigles et abréviations

AAP	: Appel à projet
AMURE	: Centre de droit et d'économie de la mer
ANR	: Agence Nationale de la Recherche
ANR FRQC ARICO	: Adaptation aux Risques Côtiers
CEREMA	: Centre d'Études et d'expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CETMEF	: Centre d'Études Techniques, Maritimes et Fluviales
ANR COCORISCO	: COnnnaissance, COmpréhension et gestion des RISques Côtiers
EGEL	: Expertise et Gestion de l'Environnement Littoral
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ICV	: Indice Côtier de Vulnérabilité
INSEE	: Institut National de la Statistique et des Études Économique
IUEM	: Institut Universitaire Européen de la Mer, Université de Bretagne Occidentale
IVRAC	: Indice de Vulnérabilité des Routes aux Aléas Côtiers
LETG	: Laboratoire Littoral, Environnement, Télédétection et Géomatique
LGO	: Laboratoire Géosciences Océan
LP3C	: Laboratoire de Psychologie : Cognition, Comportement, Communication
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NGF	: Nivellement Général de la France
OSIRISC	: vers un Observatoire de Suivi Intégré des RISques Côtiers

OSU : Observatoire des Sciences de l'Univers
PPR : Plan de Prévention des Risques
SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
UBO : Université de Bretagne Occidentale
UQAR : Université du Québec à Rimouski

Résumé

Dans l'optique d'évaluer la vulnérabilité des routes départementales du Finistère aux aléas côtiers, nous avons utilisé et adapté au contexte géographique local, une méthode IVRAC, développée par des chercheurs québécois.

Deux missions essentielles ont été effectuées au cours de ce stage : (1) la réalisation de l'état des lieux au niveau national et international des outils de diagnostic et de suivi de la sensibilité et de vulnérabilité des réseaux viaires aux risques côtiers au travers une revue bibliographique. Puis (2) la caractérisation de la vulnérabilité des segments de routes départementales aux risques d'érosion et de submersion marines.

La synthèse bibliographique au niveau national révèle une absence d'étude sur les outils de diagnostic, de suivi de la vulnérabilité et de sensibilité des réseaux viaires aux aléas côtiers. A ce niveau, les études sur les risques côtiers sont plus axées sur la vulnérabilité systémique de la zone côtière. De plus, au niveau international, l'étude sur la vulnérabilité des routes côtières à l'érosion et à la submersion marines a été réalisée par le Québec. Cette étude a permis de développer un indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers (IVRAC).

La caractérisation de la vulnérabilité des routes départementales aux risques côtiers avec la méthode québécoise s'appuie sur 9 variables au niveau du Finistère. Ces variables sont basées sur trois critères : l'exposition de la route, les caractéristiques du segment de route et les caractéristiques du réseau routier. En fonction des données mise à notre disposition, le traitement de l'exposition des routes à l'érosion ne donne aucun résultat. En ce qui concerne l'exposition des routes à la submersion marines, l'analyse statistique montre, pour un total de 3262,25 kilomètres de routes départementales dont 1360,11 kilomètres de routes littorales et estuariennes ; seulement 57,38 kilomètres de segments de routes départementales sont potentiellement inondables. Les caractéristiques du segment de routes ont permis d'avoir les différents scores au niveau de la quantité de véhicules qui transite sur le segment de route et des personnes directement affectées en cas d'aléas. Enfin, les résultats des caractéristiques du réseau routier ont permis de détecter la longueur des voies de déviation des segments de routes potentiellement inondables.

Mots-clés : vulnérabilité, routes côtières, érosion, submersion marine, Finistère.

Abstract

In order to evaluate the vulnerability of the departmental roads of Finistère to coastal hazards, we used and adapted to the geographical context a method developed (CREFVI) by Quebec researchers.

Two essential missions were carried out during this training course: (1) the realization of the state of the art at the national and international level of the tools of diagnosis and follow-up of the sensitivity and vulnerability of the road networks to the coastal risks by a bibliographical review (2) the characterization of the sensitivity of the segments of departmental roads to the risks of erosion and marine submersion.

The bibliographic synthesis at the national level reveals the absence of studies on the tools for diagnosis and monitoring of the vulnerability and sensitivity of road networks to coastal hazards. At this level, studies on coastal risks are more focused on the systemic vulnerability of the coastal zone. In addition, at the international level, the study on the vulnerability of coastal roads to marine erosion and submersion was conducted by Quebec. This study allowed the development of an index of vulnerability of roads to coastal hazards (IVRAC).

The characterization of the vulnerability of departmental roads to coastal hazards with the Quebec method is based on 9 variables in Finistère. These variables are based on three criteria: road exposure, road segment characteristics and road network characteristics. Based on the data at our disposal, the treatment of road exposure to erosion does not yield any results. Regarding the exposure of roads to marine flooding, the statistical analysis shows that, for a total of 3262.25 kilometers of departmental roads, of which 1360.11 kilometers are coastal and estuarine roads, only 57.38 kilometers of departmental road segments are potentially floodable. The characteristics of the road segment allowed to have the different scores at the level of the quantity of vehicles that transit on the road segment and the people directly affected in case of hazards. Finally, the results of the road network characteristics allowed the detection of the length of the detour routes of the potentially floodable road segments.

Keywords : vulnerability, coastal roads, erosion, marine submersion, Finistère.

INTRODUCTION

Selon le rapport du GIEC (2007), on assistera à une hausse du niveau de la mer due au changement climatique sur les prochaines décennies. En raison des dangers liés à l'élévation du niveau marin (phénomène naturel) et des facteurs anthropiques, les inquiétudes de la société face aux risques côtiers (érosion, submersion), ne cessent de prendre de l'ampleur. On assiste pour cela à une forte demande des acteurs politiques en matière de développement et déploiement de méthodes, des outils de diagnostic, de suivi et d'aide à la décision en terme de gestion des risques côtiers (Meur-Férec et *al.*, 2020).

Les risques littoraux d'érosion et de submersion marines poussent la France à la mise en place des outils de gestion des risques côtiers (Marie-Laure Lambert, 2013).

L'épisode dramatique de la tempête *Xynthia* en février 2010 qui a occasionné 47 morts sur la côte Atlantique, incite la France à mettre l'accent sur le déploiement de dispositifs de gestion des risques côtiers (Vinet *et al.*, 2012). Cette catastrophe, qui a marqué la conscience collective sur les risques de submersion marine, fut à l'origine de la mise en place d'une stratégie nationale de gestion du trait de côte (Medde, 2012) qui s'articule, sur le littoral, avec la stratégie nationale de gestion des risques d'inondations (2014).

Parmi les risques littoraux, deux sont incontournables dans l'analyse, il s'agit des risques d'érosion et de submersion marines. Ces deux phénomènes ont la particularité de rendre vulnérable le littoral, à travers ses composantes naturelle et artificielle. L'artificialisation des zones côtières pour l'urbanisation des villes et le développement des activités de pêches, de commerces etc. passent initialement par la mise en place de voies de transport, notamment les voies bitumées pour le transport automobile. Ces infrastructures de transports sont indispensables pour le développement économique et social d'un territoire.

Cependant, ces infrastructures de transport (routes côtières), tout comme le littoral dans son ensemble sont, en réalité vulnérables aux risques côtiers. Les routes côtières sont directement ou indirectement exposées aux impacts des risques d'érosion côtière et de la submersion marine. La submersion marine occasionnée par la tempête *Xynthia* a eu pour conséquence l'inondation de plusieurs routes départementales côtières, entraînant la coupure de nombreuses voies de

transport dans plusieurs départements de l'ouest. Ainsi, dans le Finistère, cette catastrophe a engendré la coupure de la route départementale D10 entre Plouescat et Goulven.

En outre, plusieurs routes départementales des communes du Finistère sont sensibles aux risques côtiers. Ainsi, la date du 06/01/2021 est marquée par la sortie de la Flèche de son lit dans la commune de Goulven ce qui provoque l'inondation de la départementale D10 qui relie la commune à Plouescat. Cette inondation a occasionné une interruption du trafic sur la voie et la mise en place d'une voie de déviation. Par conséquent, si la sensibilité des routes côtières à ces aléas, est identifiée, elle nécessite néanmoins d'être mieux cernée, par exemple en termes de topologie des réseaux, dont certaines portions peuvent constituer localement les seules voies d'évacuation potentielles des populations en cas d'aléas.

La définition exacte de la vulnérabilité est très délicate, voir complexe. La vulnérabilité selon la littérature scientifique connaît plusieurs définitions parfois divergentes en fonction des chercheurs et du domaine de recherche (D'Ercole, 1994 ; Adger, 2006 ; Paul, 2013 ; Nguyen et al., 2016). Certains auteurs, définissent le concept de vulnérabilité comme étant une éventuelle exposition à un risque (Gabor et Griffith, 1980). D'autres, le perçoivent comme le niveau d'action négative occasionnée par une ou des actions/événements dangereux (Cutter, 1996). La vulnérabilité peut être souvent définie comme une impossibilité à faire face aux incidents négatifs occasionnés par un aléa (McCarthy et al., 2001). De ce fait, au vu des différentes définitions que connaît le concept de vulnérabilité, il est nécessaire et primordial d'insérer notre réflexion dans la vulnérabilité systémique. L'accélération et l'évolution dans le temps des quatre composantes de la vulnérabilité systémique transforment régulièrement la vulnérabilité des espaces côtiers. Il est donc important et primordial de mettre en relation, dans une approche multi aléas les quatre composantes que sont, les enjeux, la gestion et les représentations sociales afin d'entreprendre une meilleure gestion des risques d'érosion côtière et de submersion marines. Ainsi, nous définissons l'exposition d'une infrastructure (route) à un aléa comme étant sa probabilité d'être affectée par ledit aléa (Füssel et Klein, 2006), la sensibilité comme le niveau auquel la côte est affectée ou modifiée par une perturbation (McCarthy et al., 2001) et la capacité d'adaptation comme l'ensemble des mesures structurelles et organisationnelles mises en place pour minimiser les conséquences prévisibles d'un ou plusieurs aléas (Smit et Wandel 2006). Dans le cadre de cette étude, la vulnérabilité des infrastructures routières dépend du niveau d'exposition ainsi que de la sensibilité de la côte aux aléas (érosion côtière et submersion marine), des routes et de la capacité d'adaptation mise en place pour réduire les impacts négatifs des aléas sur le littoral.

Ce présent travail vise à contribuer à la connaissance de la vulnérabilité des routes départementales côtières face aux risques d'érosion et de submersion marines en Finistère. Il se base sur une méthode développée par le Québec (Drejza *et al.*, 2015 ;2019). Cette méthodologie est appliquée aux routes côtières du Finistère. C'est dans le cadre de l'observatoire OSIRISC et le partenariat entre la France et le Québec (projet ARICO) que s'est effectué notre stage de fin d'étude du master Expertise et Gestion de l'Environnement Littoral (EGEL). Ce stage s'est déroulé du 01 juin au 29 octobre 2021 au LETG. Ce rapport de stage est scindé en trois grandes parties. Une première partie consacrée au contexte général et aux différentes missions du stage. La seconde partie est axée sur la méthodologie adoptée pour atteindre les différents objectifs du stage. Enfin, la troisième partie est consacrée à l'interprétation des résultats obtenus et à leur discussion.

Partie 1 : contexte du stage et présentation de la zone d'étude

Depuis quelques années, la gestion des risques littoraux en Finistère mobilise de nombreuses expertises de différents acteurs scientifiques, politiques et professionnels à travers des appels à projets et la mise en place de partenariats dans le but de mutualiser les compétences pour une meilleure gestion de risques côtiers et permettre aux différentes collectivités littorales de développer des stratégies de gestion de leurs différents linéaires côtiers. Dans cette partie, le premier point est consacré à la présentation des différents projets et partenariat de gestion des risques côtiers au niveau du Finistère en rapport avec notre stage. Le second décrit les différentes missions de notre stage. Enfin, le troisième point présente les caractéristiques physiques de la zone d'étude.

1-1 Projets de gestions des risques côtiers

Ce point présente, dans un ordre chronologique, les différents grands projets et partenariats qui sont liés à notre stage de fin d'études de master Expertise et Gestion de l'Environnement Littoral (EGEL). Ces projets sont menés en collaboration entre les chercheurs, professionnels, et les acteurs politiques en matière de stratégie de gestion du littoral en Finistère.

1-1-1 OSIRICS

Depuis plusieurs années, le laboratoire LETG-Géomer de Brest mène des recherches axées sur les risques côtiers. Le projet OSIRISC est la suite des travaux de recherche sur les risques littoraux réalisés par la même équipe ANR COCORISCO (COonnaissance, COmpréhension et gestion des RISques COtliers) de 2011 à 2015. Porté par L'OSU IUEM, le projet a vu le jour suite à un appel à projet lancé par la Fondation de France (projet n° 1539 de la Fondation de France), au sein de son programme « Quel littoral pour demain ». Il est financé sur une durée de 3 ans (2016-2020).

OSIRISC (vers un observatoire intégré des risques côtiers), est un projet qui a pour but d'améliorer la connaissance sur les risques côtiers en intégrant à la fois les phénomènes naturels et les facteurs anthropiques. Ce projet a pour perspective une gestion à long terme des risques côtiers et est centré sur le suivi de la vulnérabilité systémique au travers de ses quatre composantes que sont les aléas, les enjeux, la gestion et les représentations sociales. Ce suivi

est mis en place par le projet en définissant des indicateurs et des indices multicritères pertinents de chaque composante et des indices de la vulnérabilité systémique.

OSIRISC est un projet qui fait appel à plusieurs disciplines scientifiques. Pour ce faire, il est mené en collaboration de plusieurs laboratoires (LETG, AMURE, LGO et LP3C) au sein de l'IUEM. Ce projet a débouché sur la création de l'observatoire des risques côtiers OSIRISC. <https://www.risques-cotiers.fr/observer/observation-initiative-chercheurs/>

1-1-2 Litto 'Risques

Porté par les chercheurs de l'UBO, le CEREMA et le Conseil Départemental du Finistère, le partenariat Litto 'Risques a été mis en place en mai 2019. Son but est d'accompagner les différentes collectivités littorales sur la gestion des risques littoraux d'érosion côtière et de submersion marine avec des méthodologies scientifiques et techniques. Ce partenariat, traite de 3 grandes missions à savoir : l'observation du littoral, la gestion du trait de côte et le suivi des évolutions de la vulnérabilité face à ces risques.

Le partenariat Litto 'Risques est axé autour de 5 grands objectifs à savoir :

- Contribuer à l'acquisition de données relatives à l'observation des risques côtiers et à la diffusion de ces données à l'échelle du département ;
- Apporter un appui aux collectivités pour la définition et la réalisation de leurs projets d'aménagement du littoral ;
- Accompagner les collectivités littorales finistériennes dans la construction d'une vision prospective de leur territoire pour anticiper les phénomènes d'évolution du trait de côte ;
- Fédérer les acteurs du Département ayant un intérêt pour le suivi de la vulnérabilité du littoral ;
- Réaliser des actions de vulgarisation et de sensibilisation sur les enjeux départementaux et les solutions de gestion de l'érosion littorale.

En effet, l'accompagnement d'une collectivité par ce partenariat <https://www.risques-cotiers.fr/connaitre-les-risques-cotiers/projets/littorisques/>, se faire par une demande auprès du Conseil Départemental. Cette demande est soumise à une analyse sur une durée de 15 jours afin d'examiner l'appui scientifique et méthodologique que pourrait apporter ce partenariat à la collectivité ayant fait la demande. Aussi, il est important de mentionner que ce partenariat a

pour mission de proposer un diagnostic territorial et non une assistance dans la stratégie de gestion du littoral auprès des collectivités.

1-1-3 ARICO

Inscrit dans un projet de recherche ANR France Québec, d'une durée de 3 ans, entre octobre 2020 et septembre 2023, le projet ARICO s'articule autour de la production de scénarios socio-écologico-économiques. Ces scénarios visent à appréhender la capacité d'adaptation des populations et des territoires côtiers soumis aux aléas littoraux dans le contexte du changement climatique. Il traite de trois questions de recherche (voir Annexe 1) à savoir :

- Comprendre la vulnérabilité systémique par la connaissance à la fois des dynamiques naturelles et sociales ;
- Analyser les politiques publiques, la dynamique des acteurs et l'usage des outils de gestion entre la France et le Canada ;
- Caractériser et analyser les capacités d'adaptation et de résilience des communautés côtières des deux territoires.

Le projet a reçu un cofinancement FRQ-ANR 2019 suite à un AAP franco-québécois dans le domaine maritime. Ce projet piloté par les chercheurs de L'UQAR du Canada et les chercheurs de l'UBO, fait appel aux professionnels dans le domaine de la gestion des risques côtiers à travers plusieurs rôles :

- Co-constructeurs de méthodes opérationnelles (comme dans les projets Osirisc et Résilience), <https://www.risques-cotiers.fr/connaitre-les-risques-cotiers/projets/arico/>
- Pourvoyeurs de connaissances (application des politiques publiques, dynamiques de territoires...)
- Conseillers, relecteurs d'analyses scientifiques plus théoriques etc.

1-2 Missions du stage

Le stage s'est déroulé du mois de juin à octobre 2021. Il s'inscrit dans le cadre du projet ARICO et du partenariat Litto 'Risques, dans le contexte du déploiement de l'observatoire OSIRISC en matière de gestion de risques côtiers. Les différentes missions du stage ont été effectuées sur le site de l'IUEM au sein du laboratoire LETG. Les missions du stage se divisent en deux grands objectifs. D'abord, réaliser un état des lieux au niveau national et international des outils de

diagnostic et de suivi de la sensibilité et de vulnérabilité des réseaux viaires aux risques côtiers par une revue bibliographique. Ensuite, Caractériser la sensibilité des portions de routes côtières départementales dans le Finistère, notamment en utilisant et en les adaptant au contexte géographique, les outils mis au point par la partie québécoise du projet.

1-2-1 Recherche documentaire

La revue bibliographique est une étape très importante de la recherche scientifique. Elle facilite la compréhension du sujet et permet aussi d'avoir un aperçu global de ce qui a été réalisé autour d'un thème traité. Dans notre étude, cette revue de littérature se base particulièrement sur la recherche au niveau national et international des différents outils de diagnostic et de suivi de la sensibilité et de vulnérabilité des réseaux viaires aux risques côtiers (érosion et submersion marine). Il s'agit donc de trouver, à travers la littérature, les différentes méthodes et outils mis en place pour caractériser la vulnérabilité et la sensibilité des routes côtières face aux risques d'érosion et de submersion marines. Cette recherche a pour but d'avoir une bonne connaissance des outils de gestions et de suivi de la vulnérabilité des routes côtières face aux aléas et aussi de comprendre les différentes méthodes développées au niveau national et international à cet effet. Il s'agit alors de recenser un panorama d'articles scientifiques, de rapports, d'ouvrages, de livres qui sont en rapport avec le sujet de recherche par la suite faire une synthèse des différentes méthodes ou outils de diagnostic recensés lors de cette revue de littérature. L'objectif de cette étude est d'appliquer la méthode québécoise.

1-2-2 Caractérisation de la sensibilité des routes départementales face aux aléas (érosion et submersion marine) dans le Finistère par la méthode mise en place par le Québec.

Dans le contexte du changement climatique, un indice pour quantifier la vulnérabilité des routes côtières face aux risques d'érosion côtière et de submersion marine, nommé IVRAC a été élaboré par des chercheurs de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), en collaboration avec le Ministère des transports du Québec, tant pour les court (2020), moyen (2060) et long termes (2100), Drejza *et al.*, (2019).

Cet indice est composé de deux sous-indices, à savoir un sous-indice d'érosion côtière et un sous-indice de submersion marine. La procédure de calcul de l'indice IVRAC du Québec s'effectue pour le territoire du Québec en intégrant quatorze (14) paramètres (voir tableau en

annexe 2). Les différents paramètres qui servent au calcul d'indice IVRAC, sont adaptés ou modifiés en fonction des données disponibles et aussi selon les caractéristiques de la zone d'étude. Les paramètres de calcul de cet indice sont basés sur trois (3) grands éléments qui sont :

- L'exposition des routes aux aléas,
- Les caractéristiques du segment de route,

Il s'agit des différents paramètres qui permettent d'analyser la vulnérabilité d'un tronçon de route. Dans cette étude, il s'agit du flux journalier de véhicule sur le segment de route et des personnes les plus touchées.

- Les caractéristiques du réseau routier.

Il s'agit, de la présence ou l'absence de voies de déviation, ainsi que l'accès aux services de secours.

Dans notre étude, nous appliquerons et adapterons la méthode mise en place par le Québec sur le territoire du Finistère selon les données actuelles à notre disposition afin de caractériser la sensibilité des routes départementales face aux risques d'érosion et de submersion marines. Pour ce faire, il s'agira dans un premier temps, sur la base des différents paramètres de la méthode québécoise (cf. tableau 1), de recenser les différentes données nécessaires et disponibles présentement, ce qui permettra d'avoir les différents paramètres (cf tableau 2) adaptables sur le territoire du Finistère et relatifs à l'exposition de la route, aux caractéristiques du segment de routes et aux caractéristiques du réseau routier pour le calcul de l'indice de vulnérabilité. Ensuite, il s'agira de mettre en place un protocole de travail pour le traitement des différentes données, tout en faisant référence à la méthode québécoise. Cette démarche aboutira à la mise en place d'une méthode pour la caractérisation de la vulnérabilité des routes côtières finistériennes aux aléas. Enfin, des indicateurs et des indices de suivi à long terme de la vulnérabilité des routes départementales du Finistère seront proposés. Un rapport méthodologique et technique ainsi que la synthèse des résultats obtenus seront rédigés. La base de données sera produite, utilisée et analysée sur la vulnérabilité des routes départementales aux risques d'érosion et de submersion marines.

Tableau 1: Paramètres du territoire québécois

Paramètres québécois	Erosion	Submersion marine	Paramètres retenus	Paramètres non retenus
Date d'exposition de la route à l'érosion	+		+	
Épaisseur d'eau sur la route		+	+	
Largeur de plage		+		+
Distance entre la route et la côte	+	+	+	
Quantité de véhicule circulant sur la route	+	+	+	
Population résidant directement sur le segment de route	+	+	+	
Propension à réparer la route aisément	+			+
Rang côtier (nombre d'infrastructure entre la route et la côte)	+			
Présence d'infrastructure connexes	+			+
Sécurité des usagers vis-à-vis à l'érosion	+			+
Sécurité des usagers vis-à-vis à la submersion (Déferlement violent)		+		+
Présence d'une voie de contournement	+	+	+	
Possibilité d'accès pour les pompiers (ou détour et si oui, de quelle longueur)	+	+	+	
Accès à l'hôpital (ou détour et si oui, de quelle longueur)	+	+	+	

Dans cette étude, 9 paramètres (cf. tableau 2) sur les 14 proposés (cf tableau 1) par le Québec ont été retenus. Les paramètres non retenus dépendent des caractéristiques du territoire, mais aussi des données actuelles à notre disposition. Certains des paramètres sont obtenus par campagne de terrain ou sont inexistantes sur le territoire du Finistère.

Tableau 2: Paramètres retenus pour le calcul d'indice de vulnérabilité des routes en Finistère

Paramètres	Sous-indice érosion	Sous-indice submersion
Date d'exposition de la route à l'érosion Nécessite les éléments suivants : Taux de migration possible du trait de côte Recul évènementiel du trait de côte	+	
Epaisseur d'eau sur la route		+
Distance entre la route et la côte	+	+
Quantité de véhicules circulant par jour	+	+
Population résidant directement sur le segment de route	+	+
Rang côtier (nombre d'infrastructures entre la côte et le segment de routes)	+	
Présence de voie de contournement (et si oui, de quelle longueur)	+	+
Possibilité d'accès pour les pompiers (ou détour et si oui, de quelle longueur)	+	+
Accès à l'hôpital (ou détour et si oui, de quelle longueur)	+	+

1-2 Présentation de la zone d'étude

Premier département maritime de la France métropolitaine, avec 1200 km de linéaire côtier (¼ du littoral métropolitain), le Finistère est bordé par la Manche au nord ainsi que par l'océan Atlantique à l'ouest et au sud. Il dispose d'un littoral important avec une identité maritime fort remarquable, qui se traduit dans son économie et sa grande diversité paysagère.

Le département du Finistère dispose de littoraux très variés (cf. figure 1). Il est composé, de plages, de cordons de galets, de falaises, zones basses etc.

Figure 1 : Caractéristiques physiques du littoral Finistère



Partie 2 : Méthodologie

Cette partie présente les différentes méthodes adoptées pour la réalisation des missions du stage. Dans un premier temps, la méthode utilisée pour la recherche documentaire sur les outils de diagnostic et de suivi de la sensibilité et de vulnérabilité des réseaux viaires aux risques côtiers. Ensuite, celle utilisée pour caractériser la sensibilité des portions de routes côtières départementales face à l'érosion côtière et à la submersion marine dans le Finistère.

2-1 Recherche bibliographique

Le premier objectif de cette étude est de réaliser un état des lieux au niveau national et international des outils de diagnostic et de suivi de la sensibilité et de vulnérabilité des réseaux viaires aux risques côtiers (érosion et submersion marine) par une recherche bibliographique. Cette étape, se focalise sur la recherche d'articles scientifiques, de rapports, de livres et ouvrages qui traitent de la gestion de risques côtiers, plus particulièrement sur la vulnérabilité des routes côtières aux risques de submersion marine et d'érosion côtière.

D'abord, nous avons identifié les différents mots-clés qui se rattachent au sujet dans le but de faciliter la recherche et avoir des documents précis sur le sujet traité qui est la vulnérabilité et la sensibilité des routes côtières aux risques d'érosion et de submersion marine.

Ensuite, nous avons fait des recherches à partir de ces mots-clés sur les différents moteurs de recherche (Google scholar, Google) et aussi sur les bibliothèques en lignes de l'Université de Bretagne occidentale. Aussi, nous avons procédé à une recherche d'articles scientifique sur la plateforme de base de données Web of Science à cause de sa facilité en matière de recherche bibliographique et aussi pour le panorama de revues scientifiques que propose ce moteur. Il faut noter que, sur cette plateforme, la recherche s'effectue avec des mots-clés en anglais. Ainsi, le tableau 1 ci-dessous présente les différents mots-clés utilisés lors de notre recherche documentaire sur cette plateforme.

Tableau 3: Exemples de mots-clés utilisés dans web of sciences pour la recherche documentaire.

Mots-clés	
Outils de diagnostic	Diagnostic methods
Outils de suivi	Monitoring Tools; Monitoring methods; Indicator;
Sensibilité	sensitivity
Vulnérabilité	Vulnerability fragility
Réseaux viaires	Road network Coastal road
Erosion côtière	Coastal erosion; Coastal dynamic; Variation in sea level; Coastal drift; Retreat of the coastline
Submersion marine	Marine submersion; Flooding; Sea level rise; over flow

Enfin, au vu de la précision du sujet traité, nous avons effectué notre recherche documentaire à partir de la bibliographie de l'article scientifique québécois dont le titre est : « Quantifying road vulnerability to coastal hazards : Development of a synthetic index » (Susan Drejzaa et al 2019). Cette méthode a été adoptée dans le but d'avoir plus de documents en rapport avec le thème de recherche.

2-2 Caractérisation de la vulnérabilité des portions de routes départementales face à l'érosion et la submersion marines dans le Finistère

À ce point, nous utiliserons en fonction des paramètres retenus (cf. tableau 1) la méthode développée par les chercheurs en collaboration avec le Ministère des transports sur 9 sites du territoire québécois. Comme mentionné plus haut, cette méthode nommée IVRAC prend en compte trois (3) critères bien précis qui permettent de caractériser la vulnérabilité des routes face à l'érosion et la submersion marines. Ces 3 critères sont :

- L'exposition du segment de routes ;
- Les caractéristiques du segment de route ;
- Les caractéristiques du réseau routier

2-2-1 Données disponibles utilisées

Le calcul d'indice de vulnérabilité intègre plusieurs paramètres. Pour cela, il est nécessaire de mobiliser plusieurs bases de données pour obtenir les différents paramètres qui permettent de caractériser la vulnérabilité des routes aux aléas côtiers. Les différentes données

Utilisées dans cette étude sont présentées par le tableau 3 suivant :

Tableau 4: Inventaire des données disponibles collectées

Nom	Echelle	Date de création	Projection	Producteur
Trait de côte naturel récent	1/2500	2015	Lambert 93	CEREMA
Evolution du trait de cote	1/100000	2015	Lambert 93	CEREMA
Trait de côte Histolitt	1/25000	1992	Lambert 93	SHOM et IGN
Carroyage	200 m	2015	Lambert 93	INSEE
A2O1_Subm-poly	1/100000	2009	Lambert 93	CEREMA
Niveaux extrêmes	0 IGN	2012	Lambert 93	SHOM et CETMEF
Centres incendies	1/5000		Lambert 93	IGN
MNT Litto3D	5m	2014	Lambert 93	SHOM
Ouvrages littoraux	1/2000	2017	Lambert 93	CEREMA
BD_TOPO (tronçon de route)	1/10000	2021	Lambert 93	IGN
Réseau routier 29	1/5000	2018	Lambert 93	Conseil départementale
Centre de santé	CSV	2020	Lambert 93	IGN

Les données de géolocalisation des centres de santé ont été téléchargées sur le site du gouvernement à partir de ce lien [FINESS Extraction du Fichier des établissements - data.gouv.fr](https://data.gouv.fr). Elles sont au format csv (fichier Excel) et date de 2020. Nous avons alors extrait de cette donnée de base, celle du Finistère. Ainsi, dans le but d’avoir uniquement les centres de santé disponible 24H/24 nous avons effectué des tris et gardé les données nécessaires pour notre étude.

À partir des données (cf. tableau 3) téléchargées, nous allons détailler aux points suivants les procédures de traitement des données pour obtenir les différents paramètres (cf. tableau 1) qui permettent d’évaluer la sensibilité des routes côtières à l’érosion et à la submersion marine pour le département du Finistère.

2-2-2 Exposition des infrastructures routières aux aléas côtiers

En vue d’évaluer la vulnérabilité des routes à l’érosion et la submersion marines, il est primordial dans un premier temps, de déterminer si ces routes sont exposées à cet aléa ou non. Ensuite, il faut caractériser leur sensibilité en cas d’éventuels aléas. En ce qui concerne

l'exposition des routes à l'érosion et à la submersion marines les deux points suivants nous présentent la méthodologie adoptée à cet effet.

Il est important de mentionner que toutes les données utilisées dans cette étude ont fait l'objet de tris, dans le but d'obtenir des fichiers moins lourds pour la suite du travail. Il s'agit d'extraire, à partir des données de base, celles du Finistère, plus particulièrement celles des communes littorales et estuariennes. Aussi, nous avons segmenté le fichier de routes départementales en des segments de 100 m, afin d'appliquer les procédures de traitement, uniquement sur les portions de routes qui seront exposées donc impactées par les aléas.

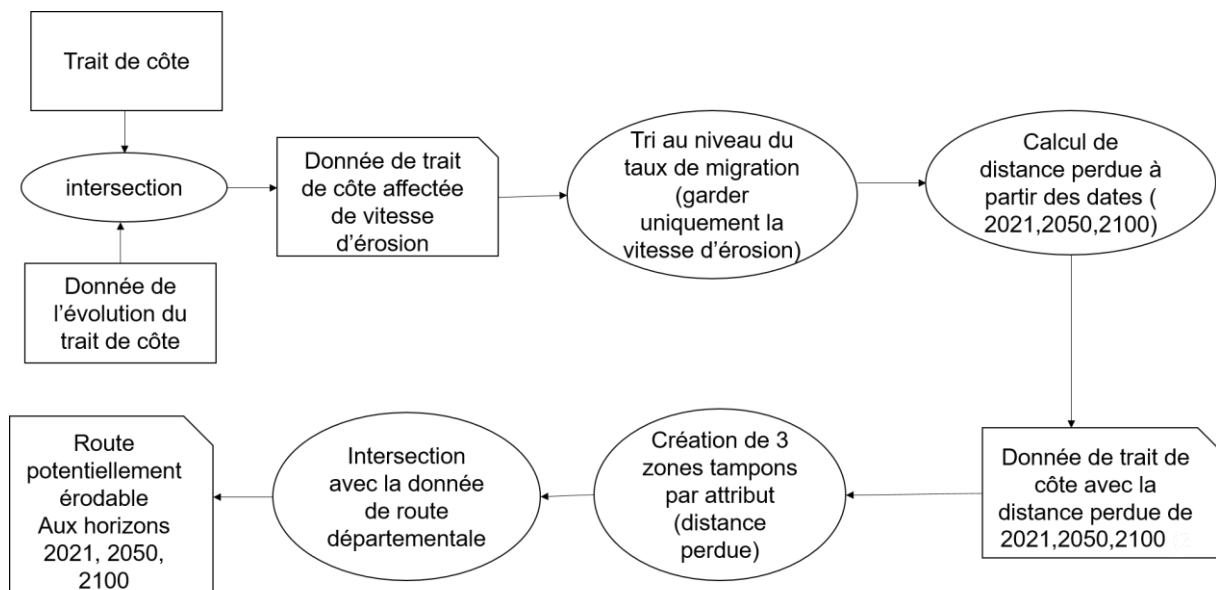
2-2-2-1 Exposition à l'érosion

Concernant l'exposition des routes côtières à l'érosion, nous avons utilisé trois données principales. Il s'agit de la donnée du trait de côte, celle de l'évolution du trait de côte et la donnée de route départementale segmentée (en segments de 100 m) du Finistère. La méthode adoptée se décline en plusieurs étapes (cf. Figure 2).

D'abord, nous avons intersecté les données du trait de côte et de l'évolution du trait de côte, pour avoir des données de trait de côte affectées de taux de recul probable (m/an). Ensuite, nous avons procédé à un tri au niveau du champ de taux de migration de la table attributaire afin de garder uniquement les taux d'érosion. Ainsi, sachant que la donnée d'évolution du trait de côte date de 2015 et que le taux de recul est mesuré en m/an, nous avons calculé la distance perdue à trois horizons temporels (2021, 2050 et 2100). De ce fait, nous avons créé des zones tampons par attribut à partir de ces trois horizons. Enfin, pour obtenir les données de segments de routes potentiellement érodables nous avons procédé à l'intersection/superposition des données routes départementales avec chacune des zones tampons afin de déterminer les routes potentiellement érodables à ses trois années d'études.

Cette même procédure est appliquée avec les routes communales afin d'identifier les segments de routes potentiellement érodables au niveau des différentes communes du Finistère. Ce qui permettra de quantifier la vulnérabilité de ces routes communales face à la submersion et l'érosion côtière.

Figure 2 : Schéma conceptuel de l'identification de routes potentiellement érodables



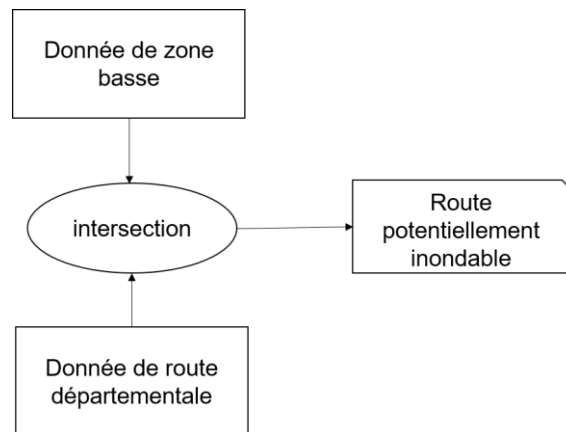
2-2-2-2 Exposition à la submersion marine

Cette partie présente les deux méthodes adoptées pour déterminer les segments de routes potentiellement inondables. D'abord, la méthode adoptée pour déterminer les segments de routes potentiellement inondables actuellement est présentée. Ensuite, celle adoptée pour modéliser les segments de routes potentiellement inondables à l'horizon 2100 est proposée.

❖ Submersion marine actuelle

En ce qui concerne l'exposition des routes à la submersion marine actuelle, elle s'appuie sur deux jeux de données principaux. Il s'agit de la donnée de zone basse du littoral et de la donnée de route départementale segmentée. À partir de ces deux données de bases, nous avons effectué une intersection pour obtenir, en fichier de sortie, une donnée de routes potentiellement inondables (cf. figure 3).

Figure 3 : Schéma conceptuel de l'identification de routes potentiellement submersibles actuellement



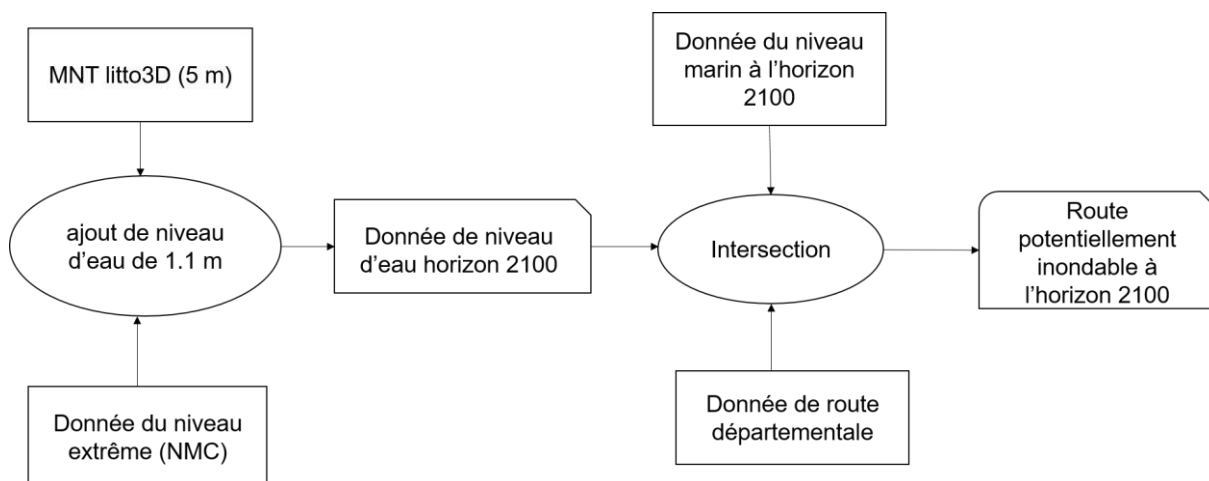
Cette même méthode est appliquée sur les routes communales dans le but de déterminer les segments de routes potentiellement inondables actuellement. Ceci permettra de détecter les voies de déviations des segments de routes départementales potentiellement inondables qui est un des points abordés dans la suite du travail.

❖ Submersion marine à l'horizon 2100

Ensuite, pour savoir quelles seront les routes côtières, potentiellement inondables à l'horizon 2100, nous avons effectué une modélisation à partir de trois données principales. Il s'agit, de la donnée du niveau extrême (correspondant au niveau marin centennal calculé par le SHOM et le CETMEF entre 2008 et 2012), du modèle numérique de terrain Litto 3D et du fichier de routes départementales du Finistère. Il faut mentionner que ce traitement ne s'est pas fait à l'échelle du Finistère, mais plutôt de quelques communes pour la simple raison que les données du MNT Litto 3D sont lourdes et ne sont fournis que par dalle ce qui rend le téléchargement et le traitement des données très complexe. Ainsi, pour déterminer les routes potentiellement inondables à l'horizon 2100, nous nous sommes d'abord basés sur le scénario du GIEC dans son rapport de 2013 (selon le GIEC, en raison du changement climatique, il y'aura une augmentation de 1,1 m du niveau de la mer pour le modèle RCP8.5). Ainsi, avec les données du niveau extrême du SHOM (2012) et du MNT Litto 3D nous avons effectué une modélisation en ajoutant 1,1 m de hauteur d'eau aux niveaux extrêmes afin d'avoir la projection à l'horizon 2100 du niveau de la mer. Par exemple, ces niveaux marins pour les zones sélectionnées

correspondent à 4,5 et 4,65 m NGF pour la commune de Penmarch et Guilvinec et 6,3 et 6,45 m NGF pour Goulven et Tréfleze.

Figure 4 : Schéma conceptuel de l'identification de routes potentiellement submersibles à l'horizon 2100.



En effet, pour chaque paramètre nécessaire pour la caractérisation de la vulnérabilité des segments de routes, les résultats sont discrétisés en 5 classes, dans le but d'attribuer des scores intégrés dans l'équation de calcul de l'indice de vulnérabilité des routes aux risques d'érosion côtière et de submersion marine. De ce fait, nous utilisons la formule de centile de l'outil Excel pour aboutir à cette discrétisation.

Selon le résultat obtenu à la suite du traitement de l'exposition des segments de routes à la submersion marine, les classes sont déterminées à partir du niveau d'eau possible sur le segment de route (cf. tableau 4). C'est le premier paramètre lié à l'exposition de la route.

Tableau 5: Détails des classes exposition des routes à la submersion marine (niveau d'eau).

Niveau d'eau en mètre (score submersion)	
Définition	Score
0	1
0 à 0.5 m	2
0.5 à 1.5 m	3
1.5 à 2.5 m	4
Plus de 2.5 m	5

❖ Distance entre la route et la côte

La distance entre la route et la côte est le second paramètre de l'exposition des segments de routes à la submersion marine. Cette distance est mesurée dans cette étude entre le trait de côte Histolitt et les segments de routes potentiellement inondables. Le fichier de trait de côte (Histolitt) a été choisi, pour ce calcul, car il est numérisé de façon continue sur l'ensemble du littoral contrairement au fichier de trait de côte naturel récent du CEREMA qui à certains endroits, connaît des ruptures.

Le calcul s'effectue de façon automatiquement dans le logiciel Arcgis. L'outil qui permet d'effectuer ce calcul de distance se nomme « NEAR » et se trouve dans l'onglet 'Arc Toolbox' du logiciel Arcgis. À partir du résultat généré par ce traitement pour les routes potentiellement inondables, les différentes classes sont alors déterminées et des scores sont attribués en fonction du degré de vulnérabilité à chaque segment de routes. Plus le segment de route est proche de la côte plus il est susceptible d'être le plus impacté en cas d'aléa.

Tableau 6: Détails des classes de la distance entre la côte et les segments de routes partiellement inondables

Distance route/côte (score distance)	
Définition	Score
Moins de 8,39 m	5
8,39 à 18,92 m	4
18,92 à 65,75 m	3
65,75 à 257,76 m	2
Plus de 257,76 m	1

2-2-3 Caractéristiques du segment de route

Les caractéristiques qui permettent de déterminer la vulnérabilité d'une route aux aléas côtiers (érosion et submersion marines) prennent en compte plusieurs paramètres. Ainsi, les différents paramètres pris en compte dans cette étude sont en rapport avec des données actuelles à notre disposition concernant l'aléa de submersion marine. Une fois ces paramètres, identifiés, des scores sont alors déterminés pour chacun de ces paramètres afin de les intégrer dans la formule de calcul d'indice.

2-2-3-1 Nombres de véhicules

Ce paramètre est très important dans la caractérisation de la vulnérabilité de la route aux aléas. Il permet de déterminer à travers le nombre de véhicules qui transite chaque jour (moyenne journalière annuelle) sur le segment de route, la quantité de personnes susceptibles d'être affectées en cas de rupture du trafic sur le segment de route concernée. En raison de la donnée à notre disposition, pour déterminer les classes (cf. tableau 6) de ce paramètre, nous avons utilisé, dans le fichier de trafic routier, la moyenne journalière annuelle de l'année 2018 de tous les véhicules qui transitent sur le segment de route.

2-2-3-2 Population affectée

Ce paramètre permet d'appréhender le nombre de personnes qui pourrait être affecté (population vulnérable) en cas d'aléas. Il prend en compte les personnes résidant directement sur le segment de route potentiellement inondable, qui ne peuvent se rendre à un endroit ou être accessibles qu'en empruntant uniquement cette voie. Dans notre étude, le nombre de personnes pouvant être affectées en cas d'aléa est déterminé par une « analyse spatiale ». Il s'agit de déterminer le nombre d'individus par ménage qui se trouve dans la zone impactée par l'aléa. La méthode ici, s'appuie sur la donnée carroyée (2015) de l'INSEE afin d'obtenir la moyenne des personnes qui seront touchées lorsque la route sera impactée par un aléa.

La donnée carroyée fournie par carreau de 200 m, ne couvre pas, dans certains secteurs du littoral finistérien, tous les bâtiments des zones susceptibles d'être impactées par les aléas (voir annexe 3). Dans ce genre de cas, nous allons alors procéder par décompte du nombre de carreaux concernés par les segments de route potentiellement inondable. En admettant que 1 carreau équivaut à 100 % de la population, lorsqu'on est face à un carreau touché à moitié, au tiers et au quart, on détermine en fonction la moyenne de personne possible d'être affectée. Dans un autre cas de figure (voir annexe 4), il suffit d'utiliser l'outil de sélection pour sélectionner les carreaux concernés afin d'avoir le nombre de personnes touchées.

2-2-4 Caractéristiques du segment de route au sein du réseau

Ce critère prend en compte deux éléments essentiels pour évaluer l'importance des segments de routes potentiellement inondables ou érodables au sein du réseau routier. Il s'agit d'abord, de la présence ou non de voies de contournement lors d'une interruption du trafic sur un segment impacté par un aléa (érosion ou submersion). Le second élément pris en compte par ce critère est l'analyse de l'accès aux services de secours essentiels, à savoir les services des pompiers et les hôpitaux comprenant des services d'urgence disponibles 24h/24. Les classes de ces deux variables (pompiers et hôpital) tiennent compte de la distance en kilomètres de détour nécessaires et aussi du temps de ce parcours.

2-2-4-1 Voie de déviation

Les voies de contournement considérées dans cette étude de caractérisation de la sensibilité des routes départementales aux aléas sont les tronçons de routes carrossables utilisées par les automobiles, en tenant compte des routes communales, potentiellement inondables. Pour ce faire, les pistes cyclables, les sentiers, les chemins, les escaliers, etc., ont été supprimés de la base de données de tronçons de route qui est utilisée pour déterminer les voies de contournement des routes potentiellement inondables.

Au vu de la donnée de route disponible à ce jour, la méthodologie adaptée pour déterminer les voies de contournement est « l'analyse spatiale », par numérisation des voies de contournement avec l'outil de « traçage » d'Arcgis. Cet outil, permet, de créer des segments tout en se basant sur des entités déjà existantes. Ainsi, pas de solution automatisable, nous l'avons effectué manuellement.

En effet, la table attributaire des données de routes manque de certaines informations pour un calcul d'itinéraire avec l'outil « Network analyst » du logiciel Arcgis. Network analyst permet, de créer une zone isochrone en cas de rupture de trafic sur route impactée par un aléa. Il s'agit, de trouver l'itinéraire le plus court à partir d'un temps de parcours bien défini. Cette méthode utilise les données de routes dites « intelligentes ». Les données utilisées par cette fonction doivent contenir plusieurs informations telles que le sens de circulation, les sens interdits, les limitations de vitesse, etc.

2-2-4-2 Accès aux services de secours

L'accès aux services de secours élémentaires (pompiers et hôpitaux) est un paramètre indispensable dans l'analyse de la vulnérabilité des routes aux aléas côtiers. Il s'agit, en cas de segments de routes impactés par un aléa, du moyen par lequel les personnes (dont les plus vulnérables) pourront rejoindre ou être accessibles par les secours. Dans notre étude, selon l'emplacement de ses différents services, ce paramètre obligatoire, prend compte le temps de détour à effectuer en cas d'interruption du trafic sur un segment de route impacté et aussi les personnes susceptibles d'être affectées en cas d'aléas. Il est intégré dans le calcul d'indice par une matrice en reprenant la longueur du kilomètre de déviation, ainsi que le nombre de personnes les plus touchées.

2-3 Calcul de l'indice de vulnérabilité « IVRAC »

Une fois l'ensemble des paramètres identifiés et les scores intégrés dans la base de données, il est alors possible d'effectuer le calcul de l'indice de vulnérabilité des routes côtières aux risques d'érosion et de submersion marine. La méthode de calcul de l'IVRAC s'effectue en trois étapes :

- Calcul de l'indice de vulnérabilité à l'érosion ;
- Calcul de l'indice de vulnérabilité à la submersion marine ;
- Calcul de l'indice de vulnérabilité global (érosion et submersion marines).

Les scores des différents paramètres retenus sont multipliés entre eux puis divisés par le nombre total de paramètres. Le résultat est la racine carrée du calcul. L'indice de vulnérabilité global est la somme des résultats de calcul des deux indices (érosion et submersion marines) divisée par deux.

Le calcul d'indice de la vulnérabilité des routes aux risques d'érosion et de submersion marines ne se fera pas dans cette étude. La raison est que l'objectif de cette étude est la mise en place du protocole de traitement pour aboutir aux différents indicateurs qui seront intégrés dans la base de données.

Partie 3 : Résultats et discussions

Dans cette partie sont présentés les résultats obtenus. Il s'agit des résultats de la recherche bibliographique et de la caractérisation de la sensibilité des routes départementales côtières aux risques d'érosion et de submersion marine.

3-1 Recherche bibliographique

Notre revue de littérature au niveau national et international sur les outils de diagnostic et de suivi de la sensibilité et la vulnérabilité des réseaux viaires aux risques côtiers (érosion et submersion marines) a permis d'obtenir quelques documents qui ont servi pour la synthèse bibliographique. Il est important de mentionner que la recherche à partir des mots-clés en anglais effectué sur la plateforme Web of Science n'a donné aucun résultat.

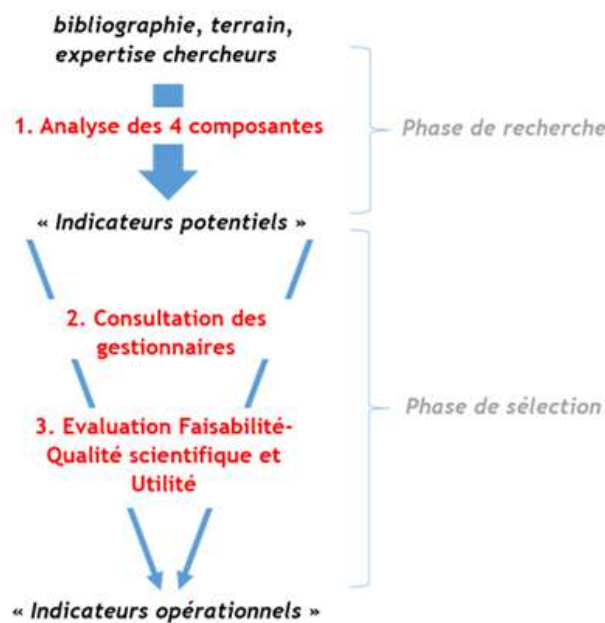
3-1-1 Au niveau national

À ce niveau, sur la base de notre recherche bibliographique, force est de constater qu'aucun outil de diagnostic et de suivi de la vulnérabilité spécifique des routes aux aléas côtiers (érosion et submersion marine) n'a été développé actuellement. En effet, la majeure partie des études menées au niveau national sur le concept de vulnérabilité porte sur la zone côtière dans son ensemble. Ainsi, une étude de Meur-Férec et al. (2008) sur la vulnérabilité côtière a permis de mettre en place un outil authentique d'évaluation et d'analyse pour diagnostiquer le littoral au travers de toute sa composition spatiale. Cet outil permet d'analyser, pour un secteur donné les risques potentiels, les enjeux existants, les techniques de gestion des risques employées, les événements passés et les catastrophes, et la perception des risques par la population et les acteurs concernés. Il intègre 5 grilles distinctes mais additionnelles. Chaque grille de cet outil contient des indicateurs qui servent d'analyse multicritères de la vulnérabilité côtière. Toutes les grilles exploitent une architecture identique et suivent une logique commune avec 3 colonnes primaires. De plus, une autre étude de Meur-Férec et al. (2020) sur la vulnérabilité systémique à l'érosion et à la submersion marine est menée en collaboration avec des chercheurs interdisciplinaires. Il s'agit d'un article dans lequel la méthodologie employée dans l'observatoire OSIRISC est expliquée. Cette étude propose un outil de suivi de la vulnérabilité à l'érosion et la submersion marine.

La méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines a été effectuée avec un cadre de méthodologie commun en croisant plusieurs disciplines. Ce travail a connu plusieurs étapes (cf. figure 5).

Cet outil a été mis en place, d'abord en se basant sur les indicateurs des 4 composantes de la vulnérabilité. Ensuite choisi de développer des indicateurs indépendants entre eux permettant, dans une deuxième étape, d'explorer les combinaisons d'indicateurs afin de générer des indices pertinents.

Figure 5 : Les étapes de la méthode de construction des indicateurs (Meur-Férec et al. 2020).



Le manque d'outil au niveau national émane de la politique française qui est basée sur le pouvoir de décentralisation. En effet, la loi française contraint les communes soumises à un plan de prévention des risques (PPR), la mise en place d'un plan de sauvegarde au niveau de leur collectivité. <https://www.landerneau.bzh/plan-de-prvention-des-risques-dinondation/>.

Par conséquent, chaque commune concernée par un PPR met en place un plan communal de sauvegarde. Il s'agit, de document d'information préventive et de protection de sa population sur les éventuels risques potentiels. De ce fait, au sein de chaque collectivité, réside une cellule chargée de gestion des risques. Cette cellule a pour vocation, de développer des outils de gestion des risques au niveau communal. Ces outils étant développés localement, ils ne sont souvent pas utilisés au niveau national, cela est dû au fait que chaque commune développe ces outils en fonction de l'aléa auquel il fait face et des moyens à leur disposition.

3-1-2 Au niveau international

Sur le plan international, le résultat est identique qu'au national. La majeure partie des études adopte la méthodologie de calcul d'indice de vulnérabilité de la zone côtière (ICV) créé par l'USGS (United States Geological Survey) dans son ensemble ce qui n'exclut pas pour autant l'étude de l'exposition des routes.

De ce fait, une étude de Sasi *et al.*, (2019) sur la « cartographie et l'analyse de la vulnérabilité physique du littoral de Tamil nadu en inde » a permis d'évaluer la vulnérabilité des tronçons de routes au travers de six paramètres. Les paramètres tels que, la géomorphologie, les changements de rivage, la pente côtière et l'élévation relative du niveau de la mer, la hauteur moyenne significative des vagues et marnage moyen ont permis d'estimer l'indice de vulnérabilité des tronçons de route de la côte. Aussi, l'étude de Sadio *et al.*, (2019) sur « l'Évaluation de la vulnérabilité du secteur de la zone côtière à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick » se base sur le calcul d'indices côtiers. L'Indice côtier de vulnérabilité calculé dans cette étude est identique à celui utilisé dans Theiler et Hammar-Klose (1999). Au niveau des infrastructures, cette étude à travers la méthode de ICV, a permis de déterminer l'exposition des routes aux risques d'érosion et de submersion marine.

En effet, peu d'études ont été menées au niveau de la vulnérabilité spécifique des routes aux risques d'érosion et de submersion marines. Ainsi, l'étude de Johnston *et al.*, (2014) sur « Évaluation de la vulnérabilité des infrastructures côtières à l'élévation du niveau de la mer à l'aide d'une analyse multicritère à Scarborough, Maine (États-Unis) » utilise une méthode simple et structurée pour déterminer la vulnérabilité des routes aux inondations. Cette méthode s'appuie sur des techniques SIG par l'analyse multicritères qui permet de déterminer les routes impactées par submersion marine. Une autre étude réalisée par Overton et Fisher (2005) sur la vulnérabilité des routes côtières de Caroline du Nord aux dommages causés par l'érosion a permis d'identifier, à partir de 2003, la vulnérabilité potentielle des routes pour une période de 20 ans. Cette étude utilise deux variables : (1) l'analyse à long terme basée sur les taux de changement du littoral et l'emplacement de l'autoroute, (2) une analyse à court terme basée sur la simulation de tempêtes individuelles.

Ces différentes études mettent en exergue plus l'exposition des routes aux risques d'érosion et de submersion marines et non la caractérisation de la vulnérabilité spécifique des routes aux risques d'érosion et de submersion marines.

Cependant, en fonction de nos recherches, le seul pays ayant mis en place un outil de diagnostic et de suivi de la vulnérabilité des réseaux viaires aux risques d'érosion et de submersion marine reste le Québec. Le Québec est, à ce jour, le pays ayant mené plusieurs recherches sur la vulnérabilité des routes aux aléas côtiers dans son intégralité au travers des 4 composantes de la vulnérabilité systémique. Ainsi, Drejza *et al.*, (2014), Boyer-Villemare *et al.*, (2014) et Drejza *et al.*, (2019), ont menés des études sur la « Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques ». Les études ont été menées selon trois volets. D'abord une étude sur la caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion. Ensuite, une autre sur l'analyse des stratégies internationales et les recommandations en matière de réduction de la vulnérabilité des infrastructures de transport face aux risques naturels côtiers. Enfin, une dernière a été réalisée sur le développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins. Ces différentes études (Drejza *et al.*, 2014, Boyer-Villemare *et al.*, 2014 et Drejza *et al.*, 2019) ont permis de développer l'indice de vulnérabilité des routes côtières aux risques d'érosion et de submersion marine.

3-2 Caractérisation de la vulnérabilité des portions de routes départementales face à l'érosion et la submersion marine dans le Finistère

Les résultats des différents paramètres retenus pour déterminer la vulnérabilité des routes départementales aux aléas côtiers sont présentés dans cette partie.

3-2-1 Expositions des routes aux aléas

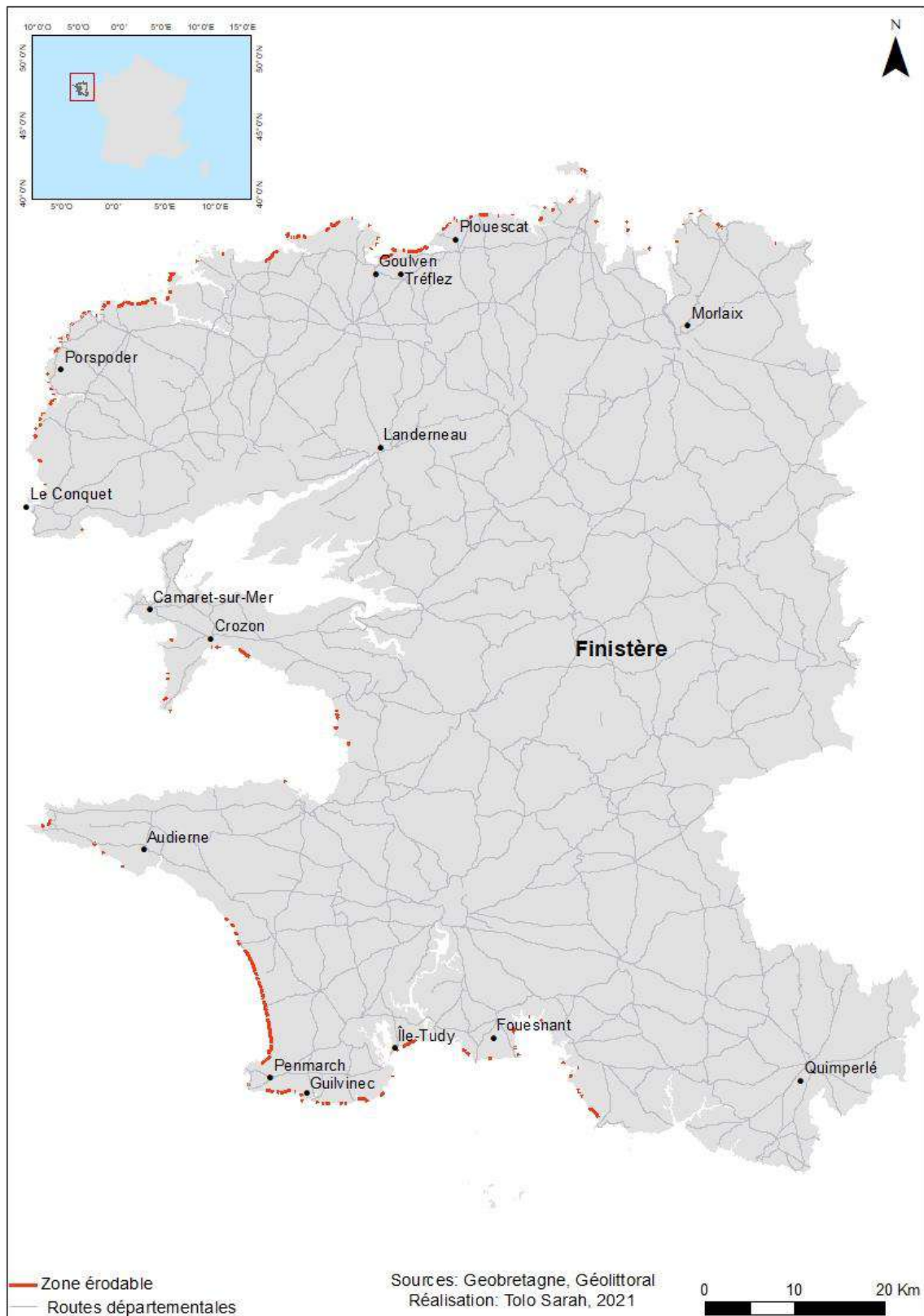
Les résultats de traitement pour déterminer les segments des routes exposées aux risques d'érosion et de submersion marines sont présentés au point suivant.

3-2-1-1 Exposition à l'érosion

Le traitement de l'exposition des routes au risque d'érosion nous montre (cf. figure 6) les zones ayant des données de taux d'érosion en 2015. Ces zones sont le recul du trait de côte. Les zones

tampons aux 3 horizons temporels (2021,2050 et 2100) d'études ont été déterminées à partir de ce taux d'évolution.

Figure 6 : Zone érodable sur le littoral finistérien en 2015.

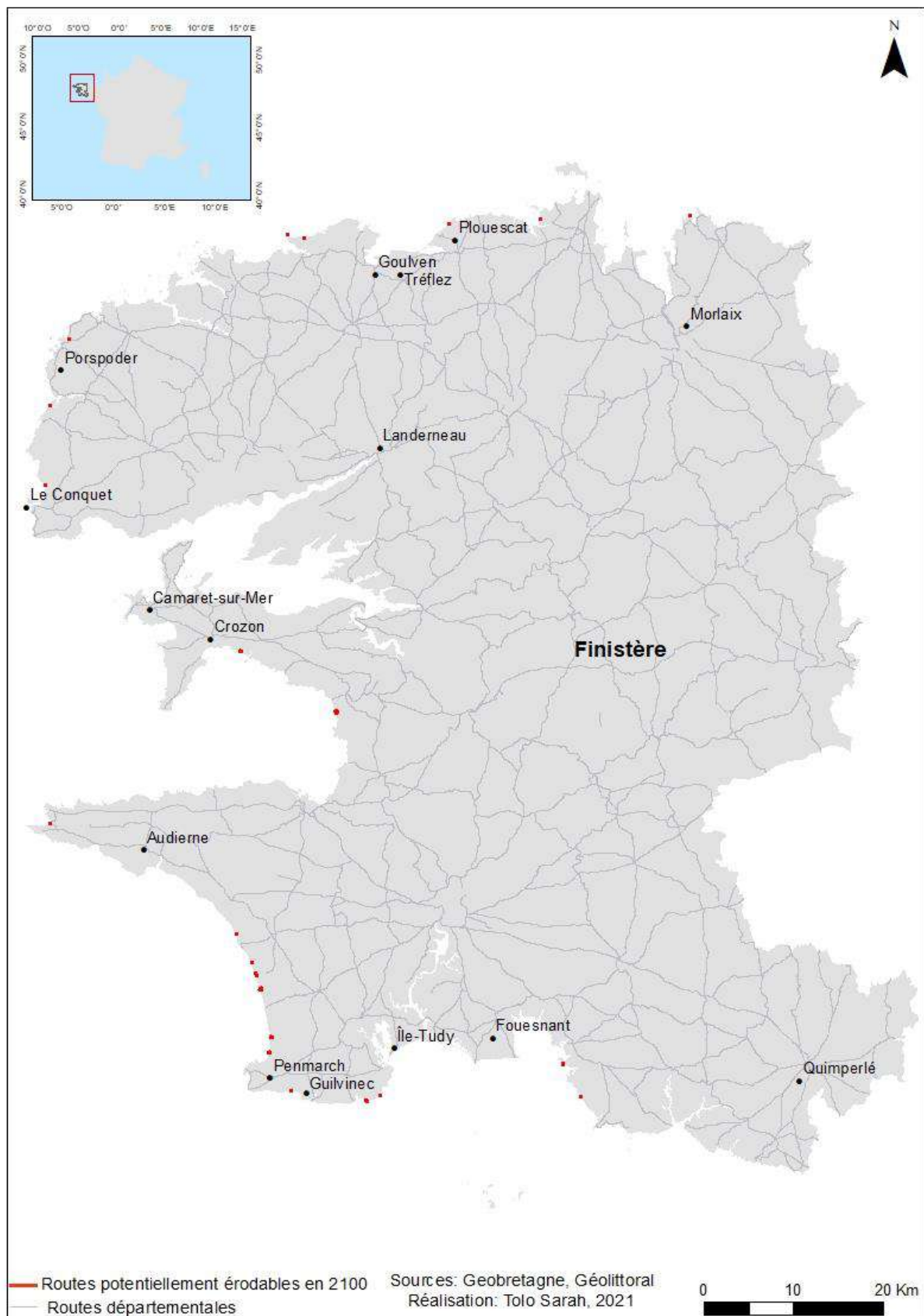


En effet, comme mentionné plus haut pour évaluer l'exposition des segments de routes à l'érosion, on superpose le fichier de routes départementales étape par étape sur les trois zones tampons créées à partir de la distance perdue. Le traitement avec ces trois différentes dates, n'a pas abouti à un résultat. On obtient comme résultat, un fichier vide en sortie

Si l'on tient compte des résultats obtenus à la suite du traitement avec la méthode appliquée, cela sous-entend qu'il n'y a pas de routes départementales potentiellement érodables à ces trois dates, selon les données dont nous disposons.

En effet, la même procédure est appliquée avec les données de routes communales. Après le processus de traitement on obtient des résultats. La figure 7 ci-dessous indique les routes communales potentiellement érodables à l'horizon 2100.

Figure 7 : Routes communales potentiellement érodables à l'horizon 2100.



Cependant, les résultats obtenus avec les routes communales ne sont pas satisfaisants et peu concluants. En réalité, lorsqu'on visualise à une échelle plus grande (cf. figure 8), dans le but d'apporter une analyse sur le résultat obtenu, on constate que ce ne sont pas les tronçons de routes communales qui sont touchés, mais plutôt des portions de chemins.

Figure 8 : Portion de route potentiellement érodable.



Ces résultats obtenus au niveau de l'exposition des routes à l'érosion sont probablement liés à plusieurs raisons. D'abord la qualité des données utilisées n'est pas de bonne résolution. Ensuite, la présence des ouvrages de protection à certains endroits de la côte du Finistère ne permet pas d'avoir des zones potentiellement érodable.

En outre, comme nous le savions, les routes côtières au niveau de certaine commune du Finistère sont impactées par le phénomène d'érosion. De ce fait, la route côtière de la presqu'île de Crozon est sur le point de s'effondrer en mer. Les routes dans cette commune littorale sont sur des falaises qui subissent les impacts liés aux aléas d'érosion et de submersion marines.

Enfin, pour cette méthode il est nécessaire d'avoir des données récentes avec de bonne résolution ce qui pourrait donner des résultats plus satisfaisants. Il sera donc primordial pour

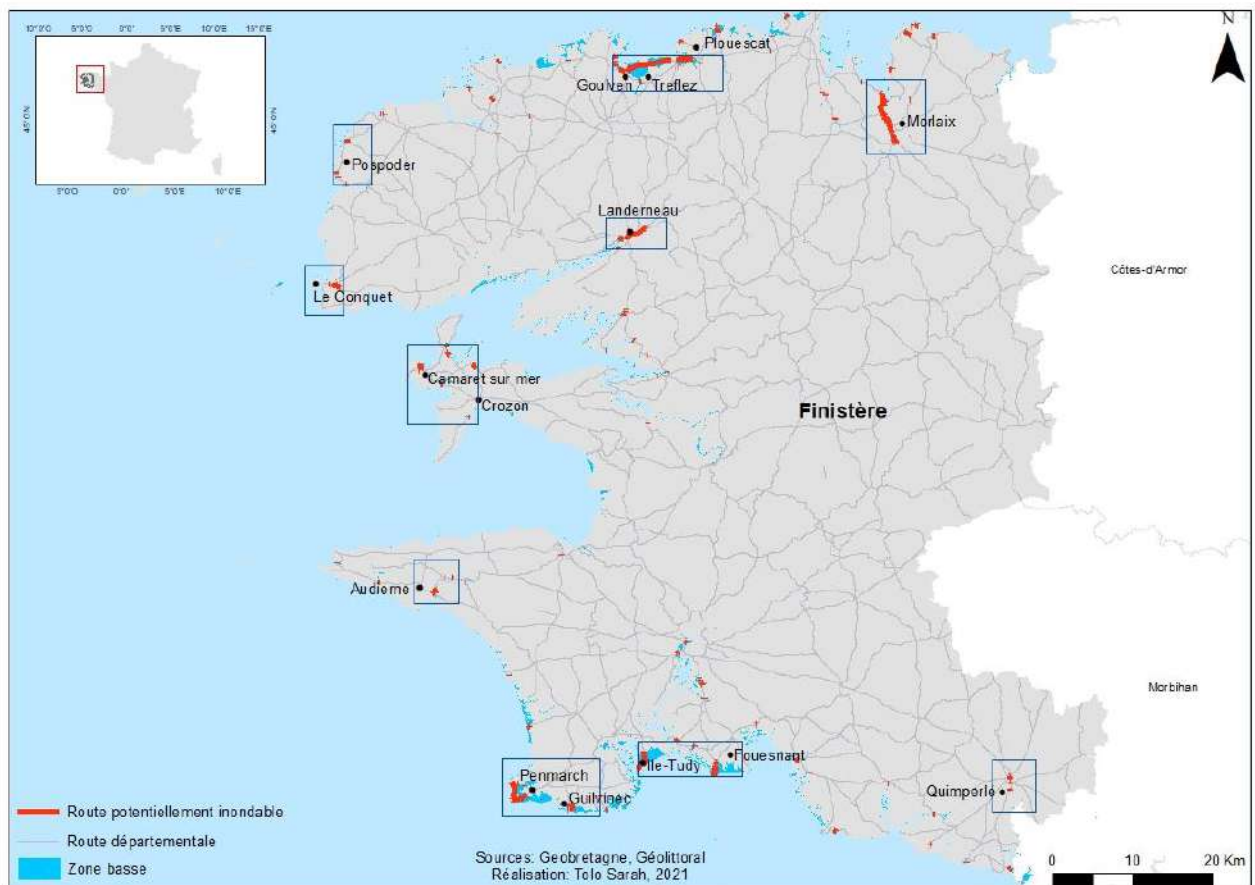
les prochaines études de numériser les routes côtières à l'échelle 1/600 comme l'ont fait les chercheurs de l'université du Québec pour quantifier la vulnérabilité des routes à l'est du Québec face à l'érosion et à la submersion marine.

3-2-1-2 Exposition des routes à la submersion marine

❖ Submersion marine actuelle

Plusieurs communes littorales et estuariennes du Finistère sont actuellement concernées par la submersion marine des routes départementales. Quelques sites sont présentés par la figure 9. Ainsi, tous les segments de routes vulnérables à la submersion marine se trouvent au niveau des zones basses littorales.

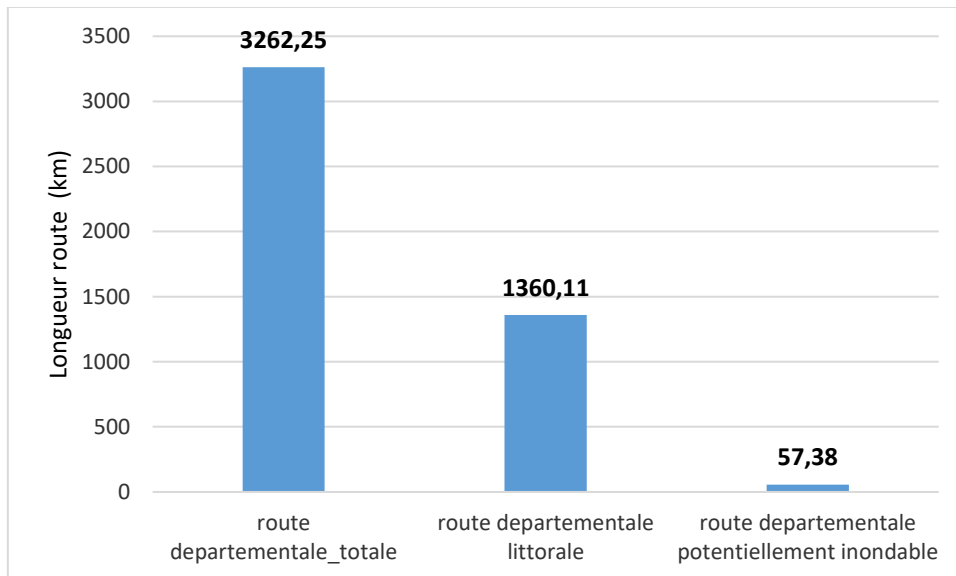
Figure 9 : Routes départementales potentiellement inondables actuellement.



L'analyse statistique des différents résultats obtenus sur l'exposition des routes départementales à la submersion marine, montre que sur un total de 3262,25 kilomètres de routes départementales dont 1360,11 kilomètres de routes littorales et estuariennes, seulement, 57,38

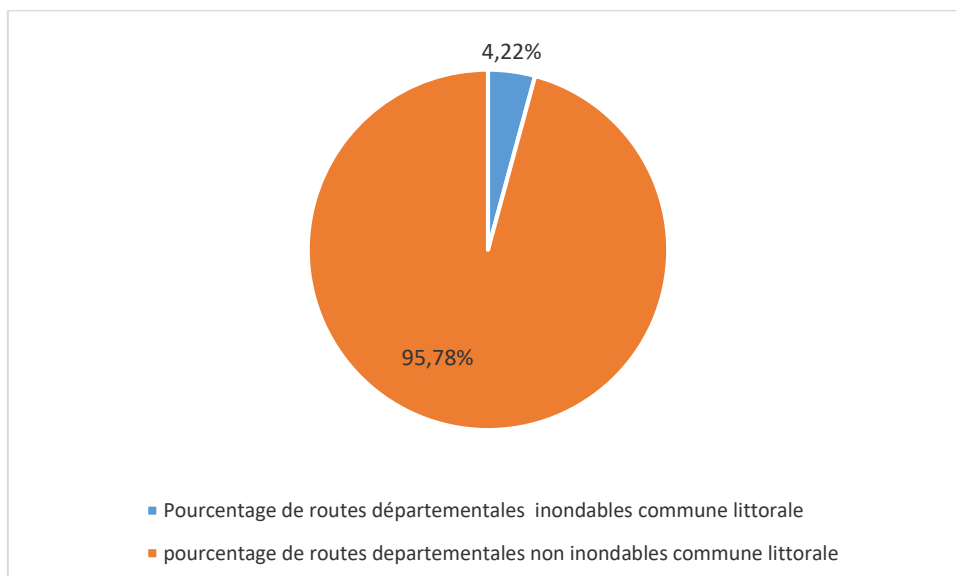
kilomètres de segments de routes départementales sont potentiellement inondables (cf. figure 10).

Figure 10 : Longueur de routes départementales du Finistère.



Certes les routes départementales du Finistère sont impactées par des inondations, cependant le pourcentage des segments de routes départementales impactées reste très faible (4,22%) par rapport à la totalité des routes départementales littorales et estuariennes (95,78%) non impactées par la submersion marine.

Figure 11 : Pourcentage de routes littorales et estuariennes potentiellement inondables.



Dans le but de mieux cerner l'exposition des routes départementales à la submersion marine, nous avons fait la sélection de quelques sites qui sont présentés ci-dessous. Ces différents sites ont été choisis à défaut d'analyser tous les segments de routes départementales potentiellement inondables du littoral finistérien. Ils feront l'objet d'une analyse détaillée.

Figure 12 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Morlaix, Tablé, ...

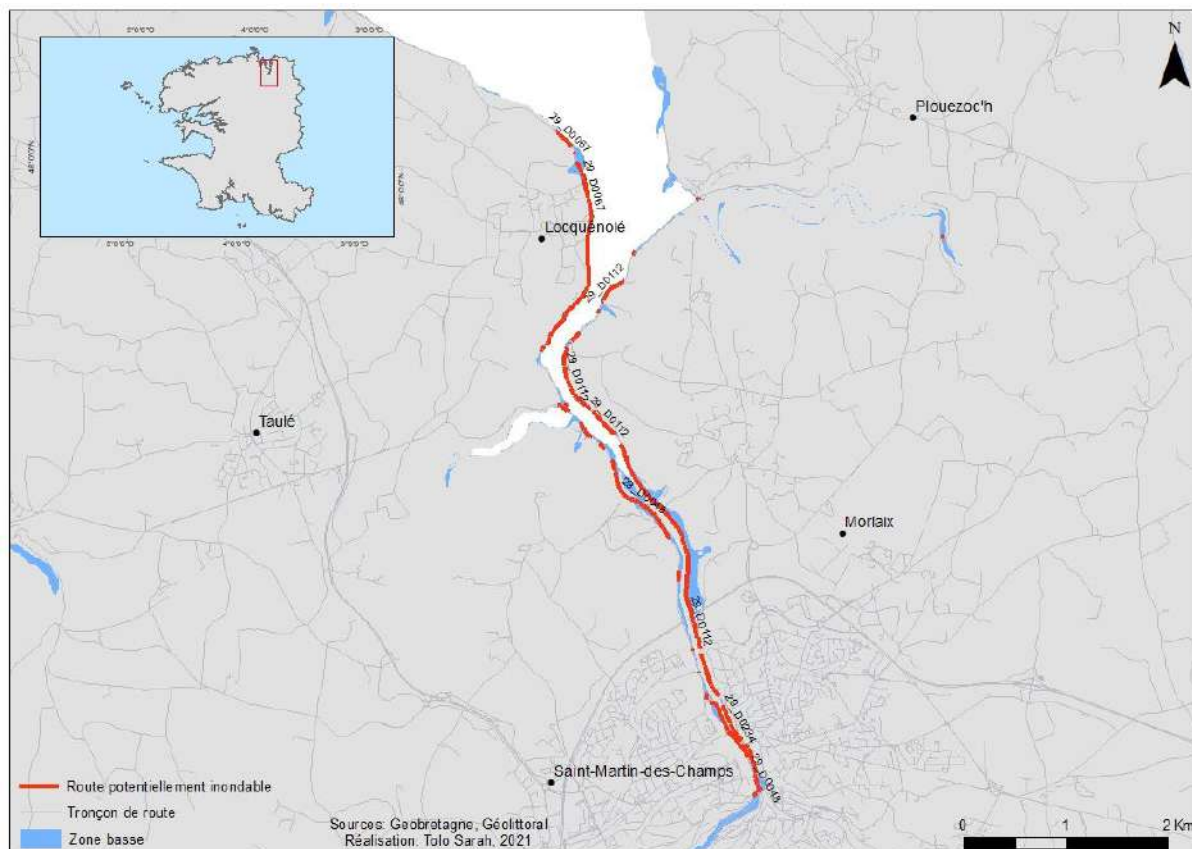


Figure 13 : Segments des route potentiellement inondables au niveau de Goulven, Tréfléz, ...

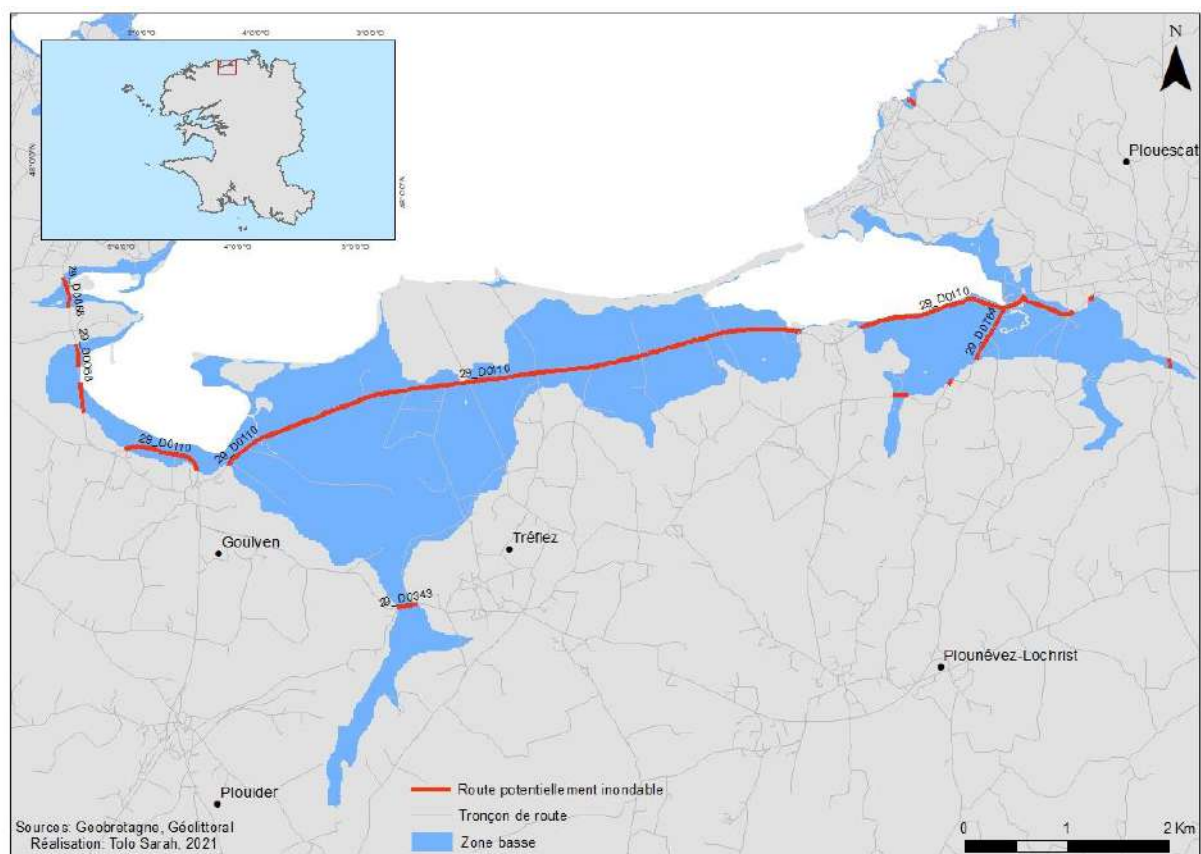


Figure 14 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Pospoder, Lanildut...

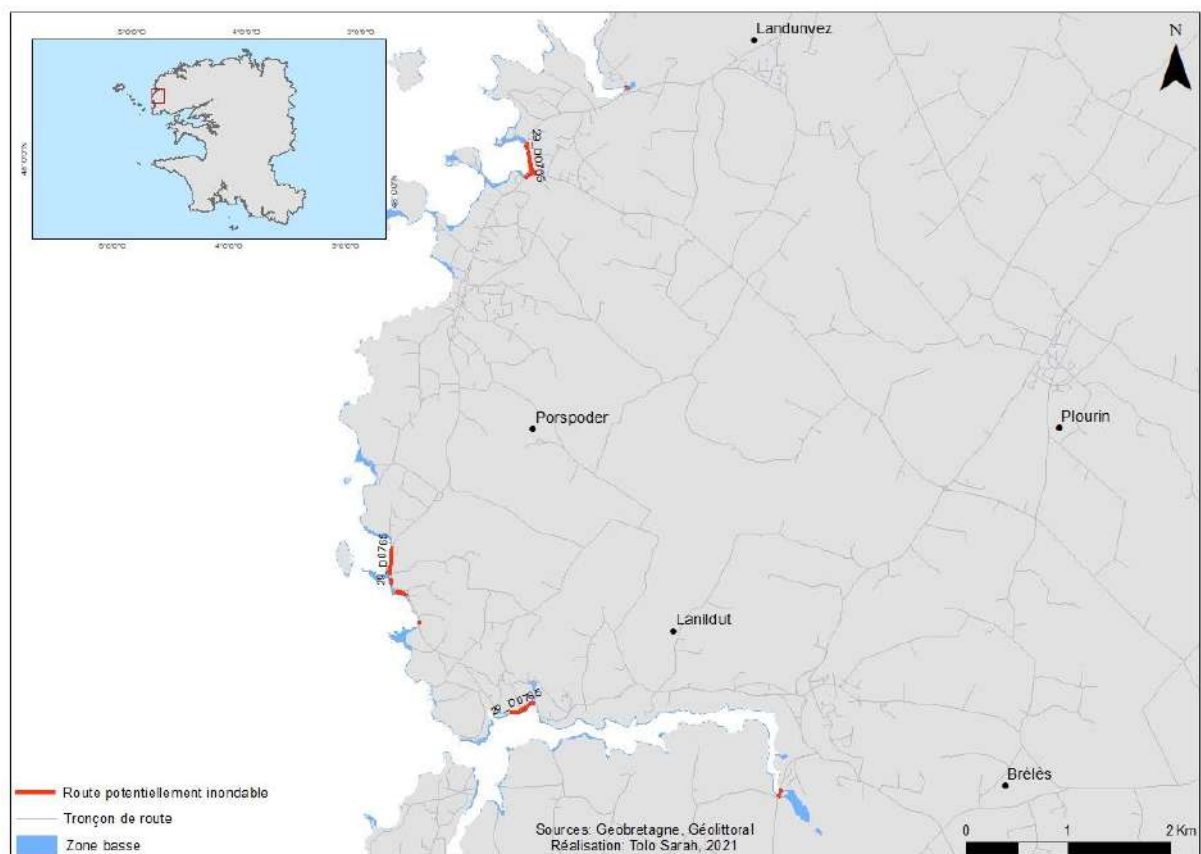


Figure 15 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau du Conquet et Trébabu.

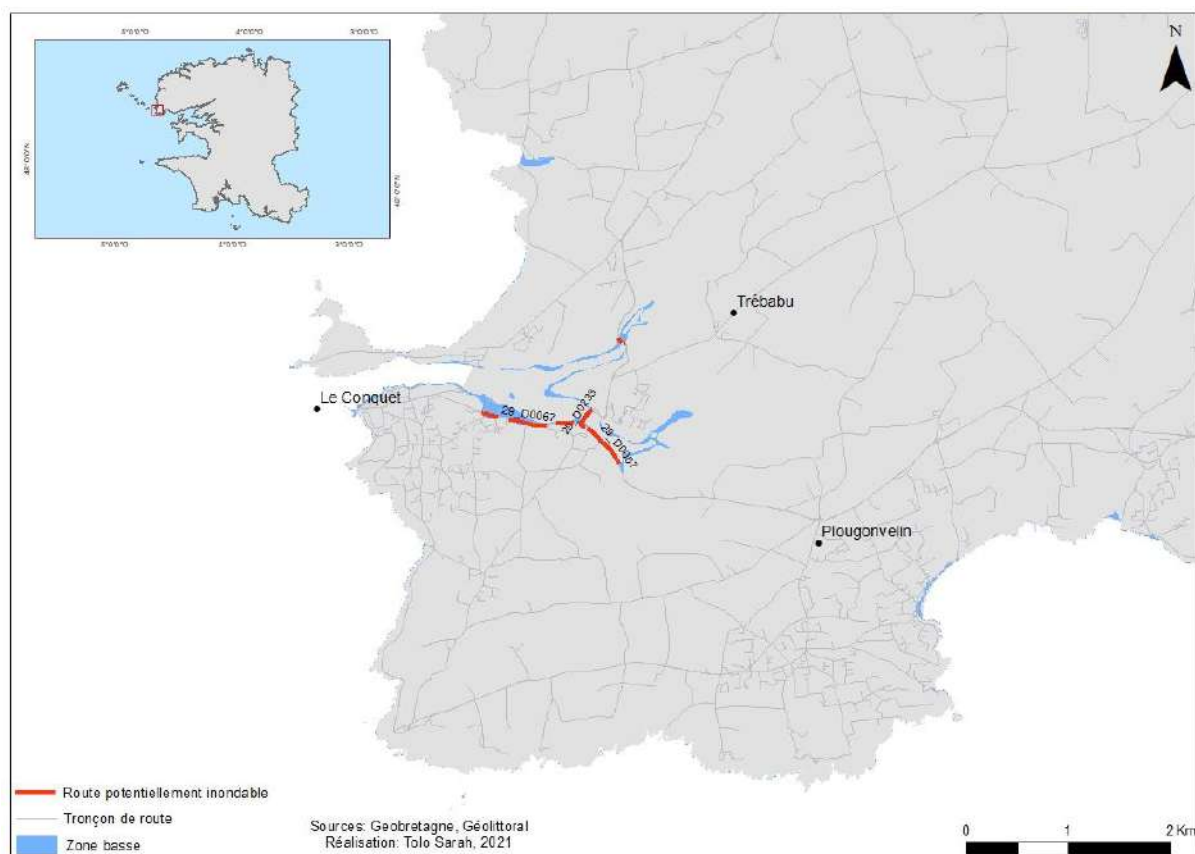


Figure 16 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de landerneau.

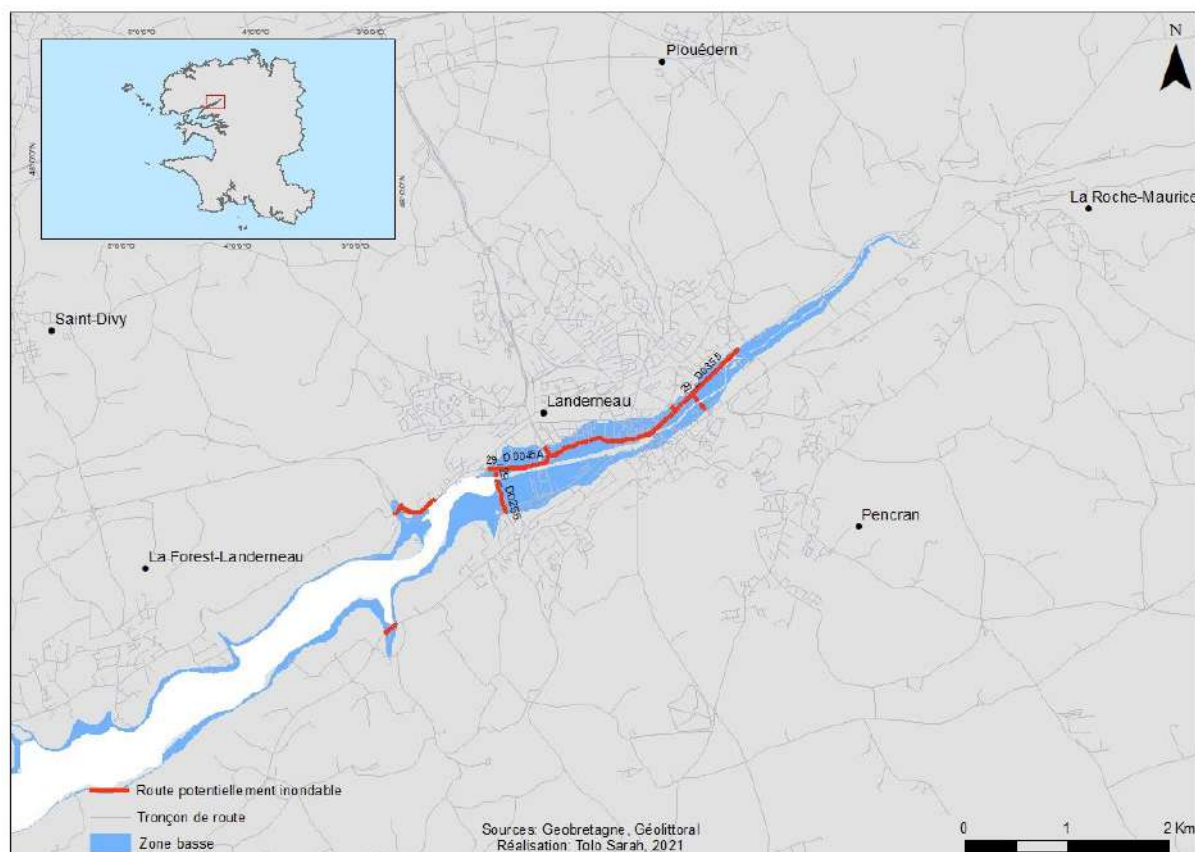


Figure 17 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Camaret-sur-mer et Crozon.

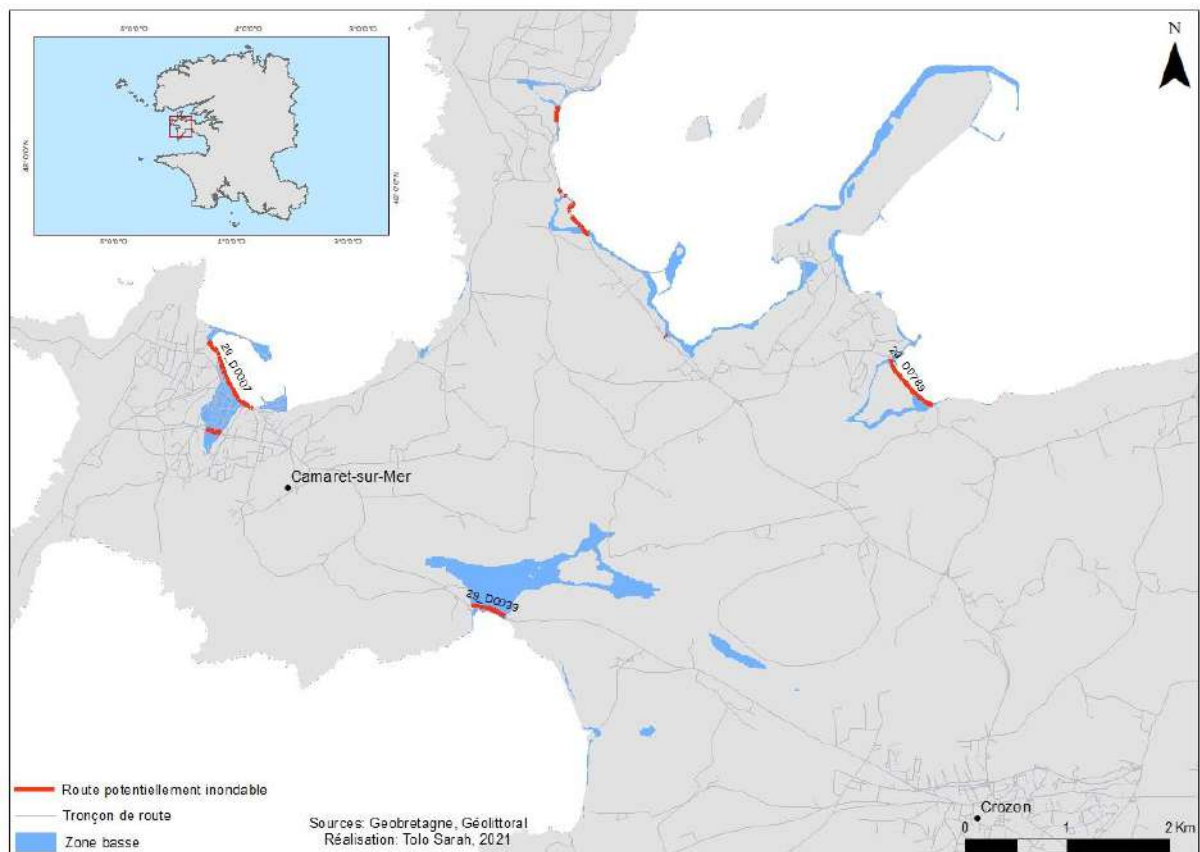


Figure 18 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau d'Audierne, Pont-croix, Plouhinec.

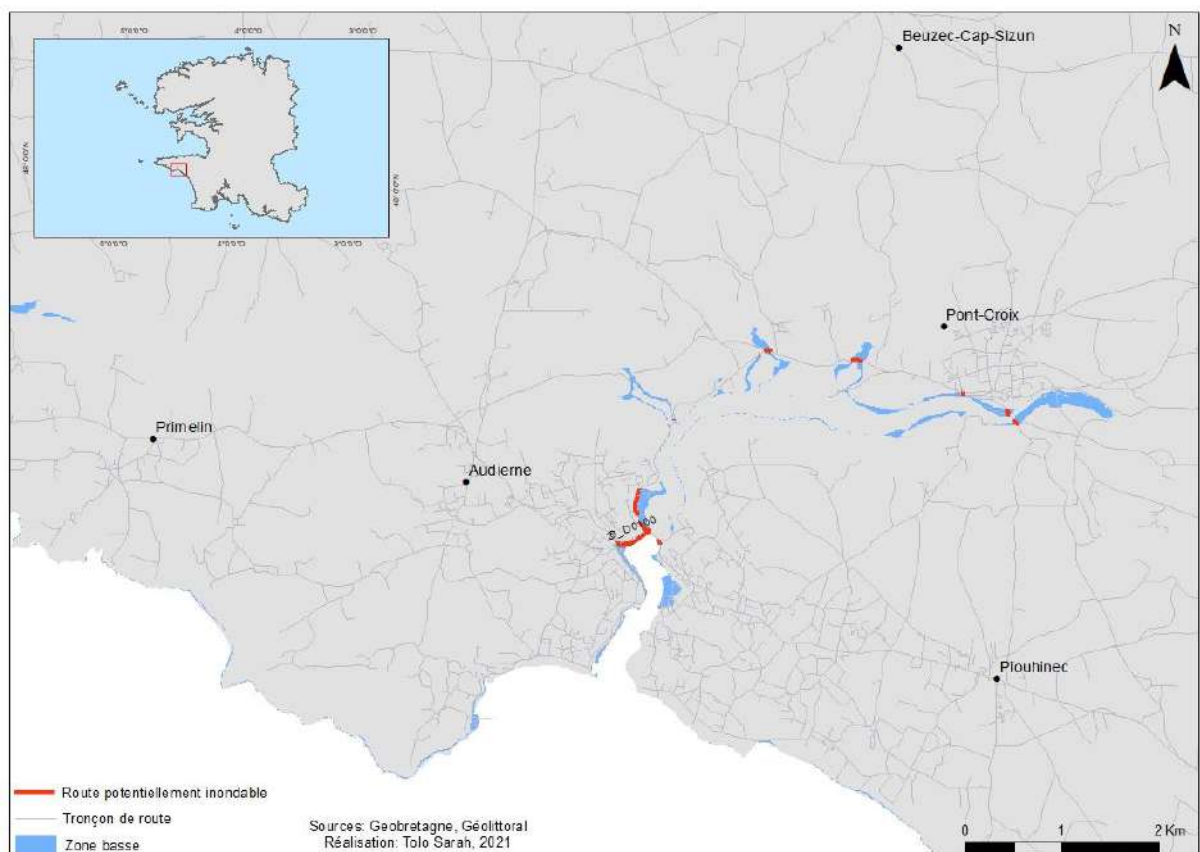


Figure 19 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Penmarch le Guilvinec et Treffiagat.

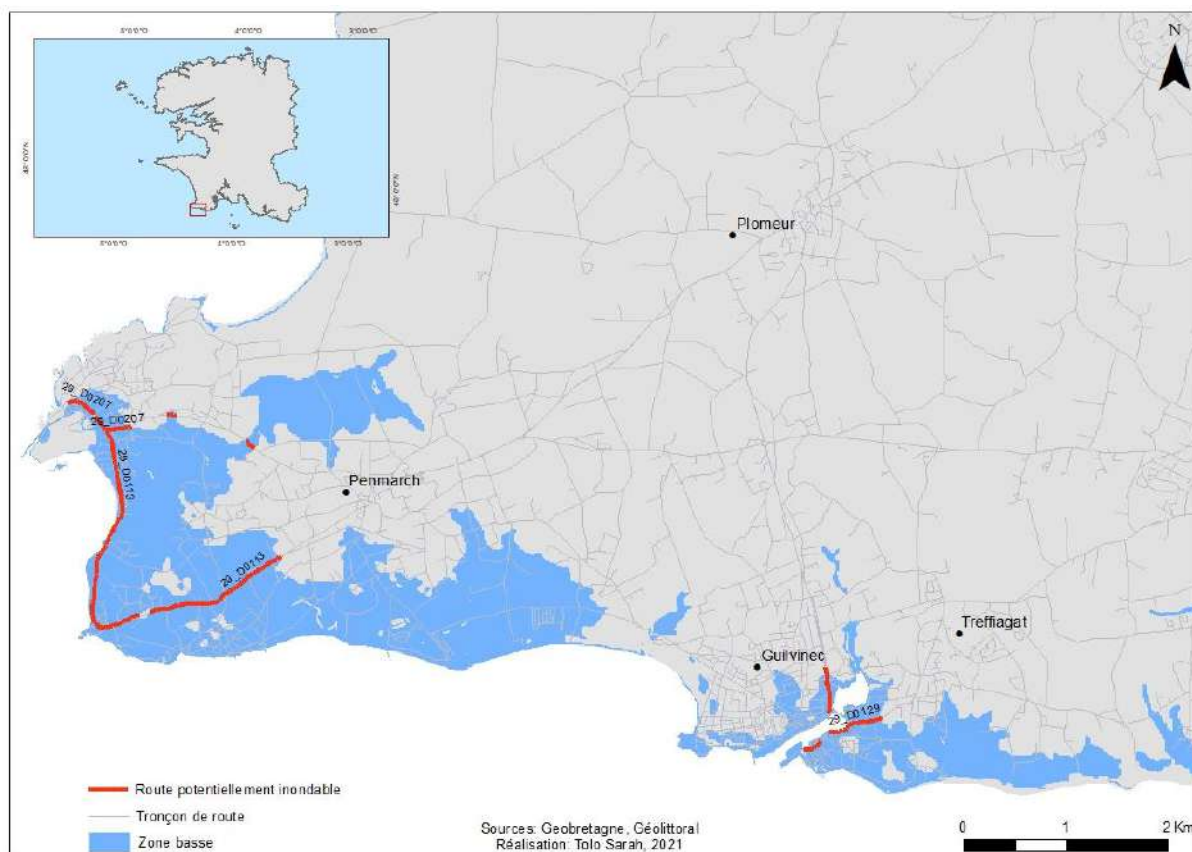


Figure 20 : Segments de route potentiellement inondables au niveau de l'île-Tudy, Combrit, Bénodet, Fouesnant.

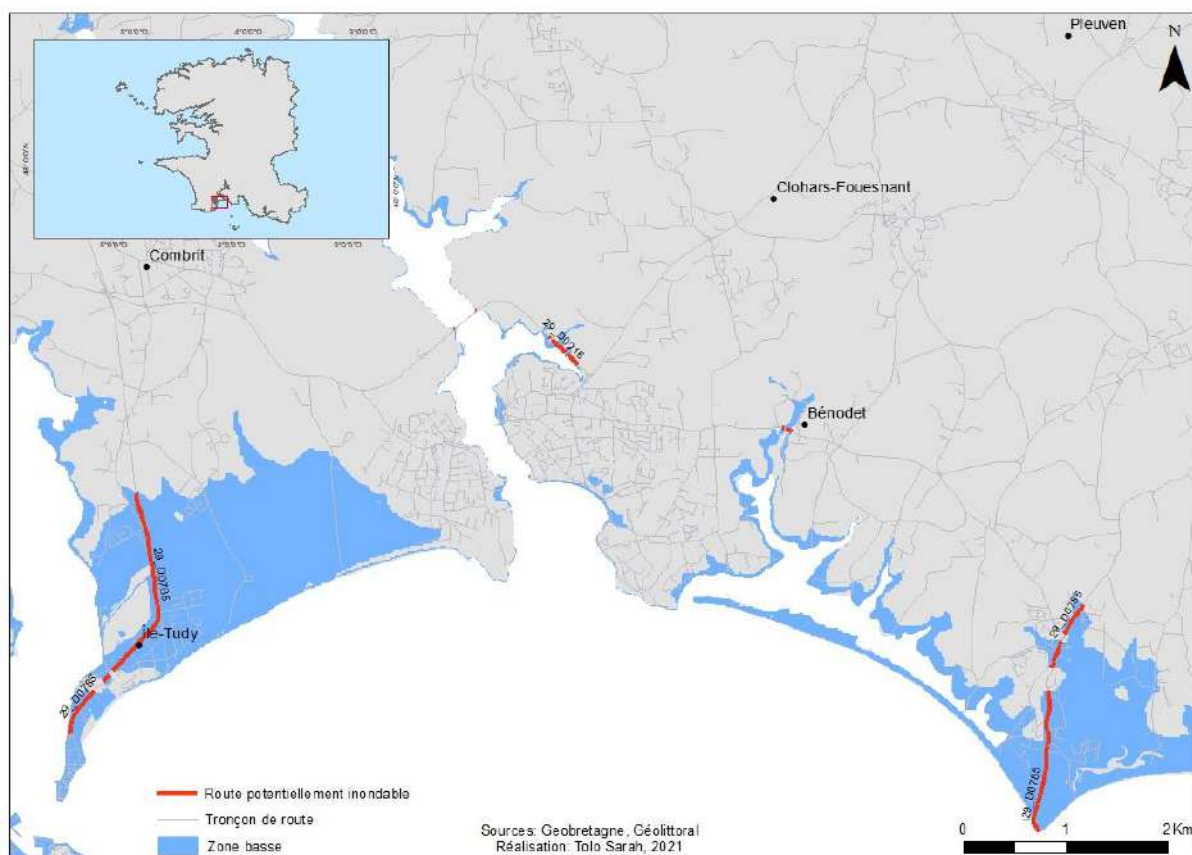
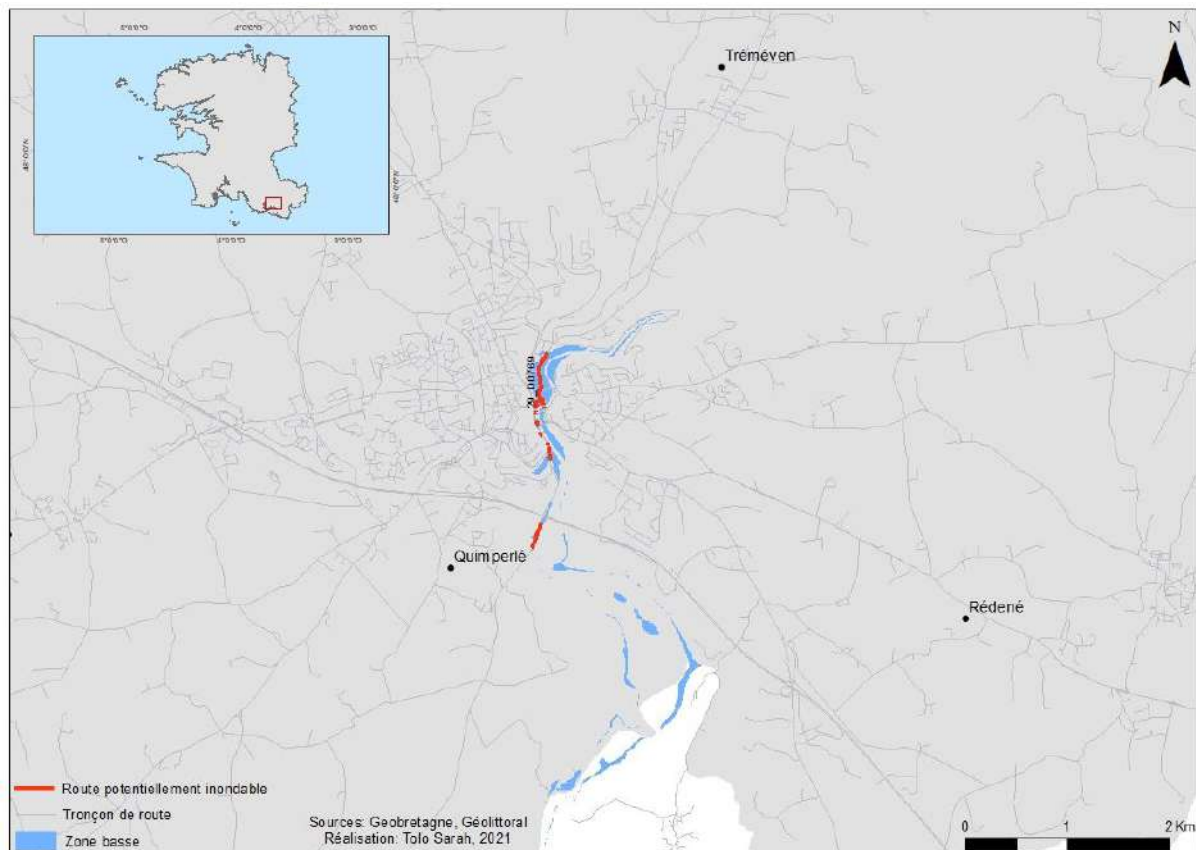


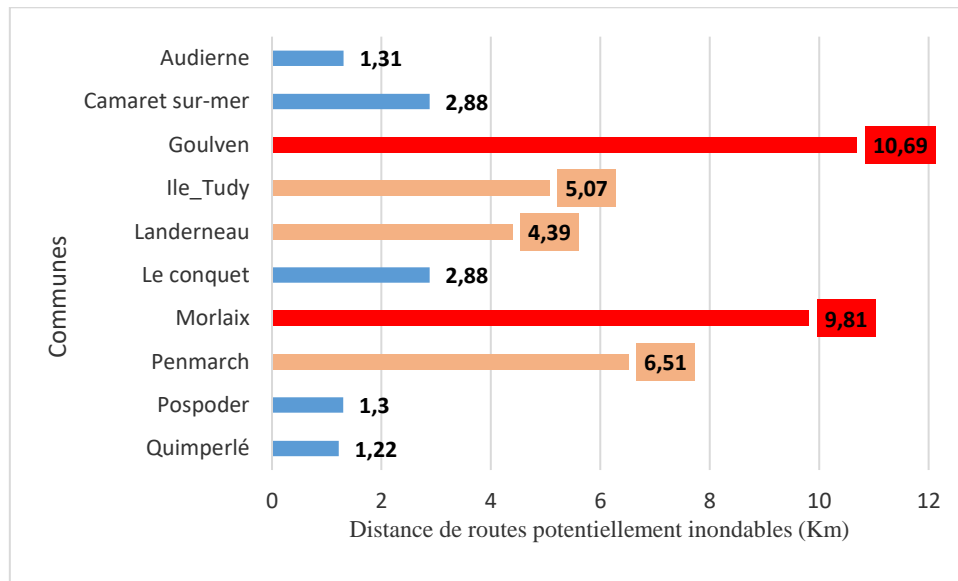
Figure 21 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Quimperlé et environs.



Les figures ci-dessus, sont les représentations actuelles des différents segments de routes départementales potentiellement inondables de l'ensemble des sites sélectionnés. L'objectif est de comparer le niveau d'exposition des segments de routes de ces différents sites.

L'analyse statistique présente la distance en kilomètres des segments de routes potentiellement inondables pour chaque site (cf figure 21). Ainsi, au niveau de Goulven et Morlaix, les routes potentiellement inondables ont une distance estimée à 10 km total. De plus, les sites de Penmarch, Landerneau et Île-Tudy couvrent une distance de 5 km de segments de routes potentiellement inondables. Enfin, on estime une distance de plus de 1,5 km les segments de routes au niveau des secteurs d'Audierne, Pospoder, Quimperlé, Le Conquet et Camaret sur-mer.

Figure 22 : Longueurs des routes potentiellement inondables dans les différents secteurs (cf. Figures 13 à 21) pour la localisation (cf figure 10).



Selon les données des zones basses littorales, les segments de routes potentiellement inondables sont majoritairement au seuil du niveau marin centennal inférieur à 1 m, de par leurs représentations cartographiques discrétisées en trois catégories de valeurs : la zone située sous le niveau marin centennal -1 m donc niveau Fort, la zone sous le niveau marin centennal donc niveau Moyen et la zone située sous le niveau marin centennal de +1m équivaut à Faible.

Ainsi, pour les zones de Morlaix et Goulven, sur un total de 436 segments (de 100 m) de routes potentiellement inondables, 244 correspondent à des zones sous le niveau marin centennal de -1 m donc ayant un niveau Fort qui les rend ainsi les plus exposés donc très vulnérables. De plus, le niveau Moyen regroupe pour les deux zones un ensemble 100 segments de routes moyennement exposés et les 92 restants, pour le niveau Faible donc très faiblement exposés.

En outre, pour ce qui sont des zones de Penmarch, Landerneau et Île-Tudy pour un total de 306 segments de routes potentiellement inondables, 147 correspondent à des zones sous le niveau marin centennal -1 m donc ayant pour ce fait un niveau Fort ce qui les rend plus exposés alors vulnérables. Aussi, le niveau Moyen pour ces sites rassemble 63 segments de routes en moyenne qui sont exposés et 96 segments de routes pour un niveau Faible alors légèrement exposés. Enfin, pour les zones d'Audierne, Pospoder, Quimperlé, Conquet et Camaret sur-mer. Sur un total de 283 segments de routes potentiellement inondables, 114 segments correspondent à des zones sous le niveau marin centennal -1 m donc ayant un niveau Fort alors les plus exposés. De plus, 78 segments de routes regroupent le niveau Moyen alors moyennement exposé et 91 segments de routes pour un niveau Faible donc faiblement exposés.

❖ Submersion marine à l'horizon 2100

En ce qui concerne les routes qui pourront être potentiellement inondables à l'horizon 2100, les données MNT Litto3D étant très lourdes donc difficiles à télécharger pour le traitement nous sommes donc consacrés à la présentation de la méthode de modélisation qui permet d'avoir le niveau d'eau à l'horizon 2100. Ainsi, nous avons appliqué cette méthode a quelques endroits du littoral finistérien, ce qui ne nous permet pas de faire une comparaison avec les routes potentiellement inondables des sites présentés plus haut. De ce fait, la figure 22 présente les segments de routes potentiellement inondables à l'horizon 2100.

Figure 23 : Segments de routes potentiellement inondables à l'horizon 2100.



Ce résultat, s'il était présenté sur tout le littoral finistérien, permettrait de faire une comparaison au niveau des statistiques des segments de routes actuels potentiellement inondables et ceux inondables en 2100. Par ailleurs, l'objectif premier de cette étude est la mise en place de méthodologie de traitement. Ainsi, les scores de l'exposition des routes à la submersion marine à différentes dates utilisent les mêmes critères.

3-2-2 Caractéristiques du segment de route

Concernant ce critère, les variables de caractérisation de la sensibilité des segments de routes potentiellement inondables pris en compte dans cette étude sont la quantité de véhicule et les personnes directement affectées.

3-2-2-1 Quantité de véhicules

Les résultats des scores du nombre de véhicules qui transitent chaque jour sur les segments de routes sont présentés par le tableau 6. Ainsi, la vulnérabilité du segment de routes potentiellement inondables de cette variable est fonction de la moyenne journalière de véhicules qui transitent sur les segments. De ce fait, plus la moyenne journalière est grande plus le segment de route est vulnérable. De plus, lorsque la quantité de véhicules qui transitent est faible alors la vulnérabilité du segment devient faible.

Tableau 7: Détails des classes du flux routier moyen journalier annuel.

Moyenne journalière annuelle (score MJA)	
Définition	Score
Moins de 1786	1
1786 à 2801	2
2801 à 4519	3
4519 à 5708	4
Plus de 5708	5

3-2-2-2 Population directement affectée

En ce qui concerne la variable de personnes directement affectées, le résultat obtenu par le tableau provient de l'analyse spatiale effectuée manuellement avec les données carroyées de l'INSEE. Les données actuelles à notre disposition selon la méthode adoptée ne permettent pas d'avoir avec exactitude le nombre moyen de personnes par ménage. Les résultats du tableau sont des nombres approximatifs des personnes directement touchées sur le site de Penmarch.

Tableau 8: Détails des classes du nombre moyen de personnes directement touchées

Population immédiatement affectée (score population)	
Définition	Score
Moins de 8	1
8 à 17	2
17 à 24	3
24 à 35	4
Plus de 35	5

Cependant, pour obtenir des résultats exacts sur le nombre moyen de personnes par ménage, il serait nécessaire d'avoir des données de bâtiments affectés du nombre d'individu par bâtiment. Enfin la méthode adoptée pour déterminer les personnes affectées présente une limite.

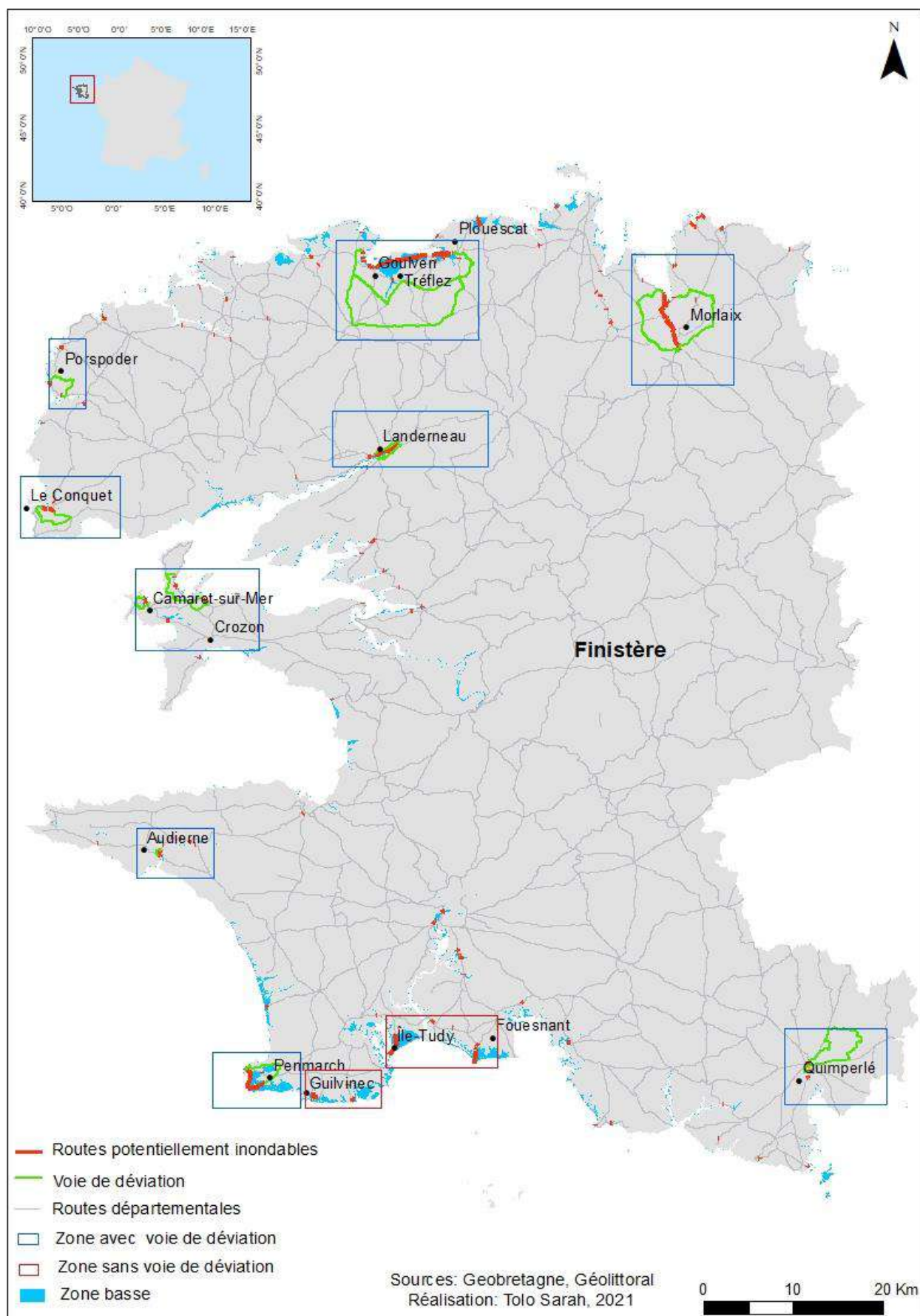
3-2-3 Caractéristiques du segment de route au sein du réseau

Ce critère présente les résultats des deux paramètres pris en compte à cet effet.

3-2-3-1 Voie de contournement

La figure 24 ci-dessous présente les tronçons des différentes voies de déviation des segments de routes potentiellement inondables. Les sites avec un cadre bleu présentent des voies de déviations par contre les sites avec le cadre rouge ne présentent pas de voie de déviation.

Figure 24 : Voies de déviations des segments de routes potentiellement inondables.



De ce fait, les sites qui ne présentent pas de voie de contournement sont plus vulnérables.

De plus, la distance de déviation étant un paramètre nécessaire dans de la caractérisation de la sensibilité des segments de routes potentiellement inondable, le tableau ci-dessous présente le niveau de vulnérabilité en fonction de la distance de parcours.

Cependant, ce paramètre serait complet si l'on prenait en compte le temps de parcours. Les données à notre disposition ne nous permettent pas d'avoir le temps de parcours en fonction de la distance en kilomètres. Les voies de déviation ayant été numérisées manuellement il est difficile de définir un temps de parcours. Néanmoins on peut tenir compte de la limitation de la vitesse qui est de 80km/h sur les routes du Finistère pour avoir une estimation du temps.

<https://www.finistere.gouv.fr/Actualites/Limitation-de-la-vitesse-a-80-km-h-sur-les-routes>

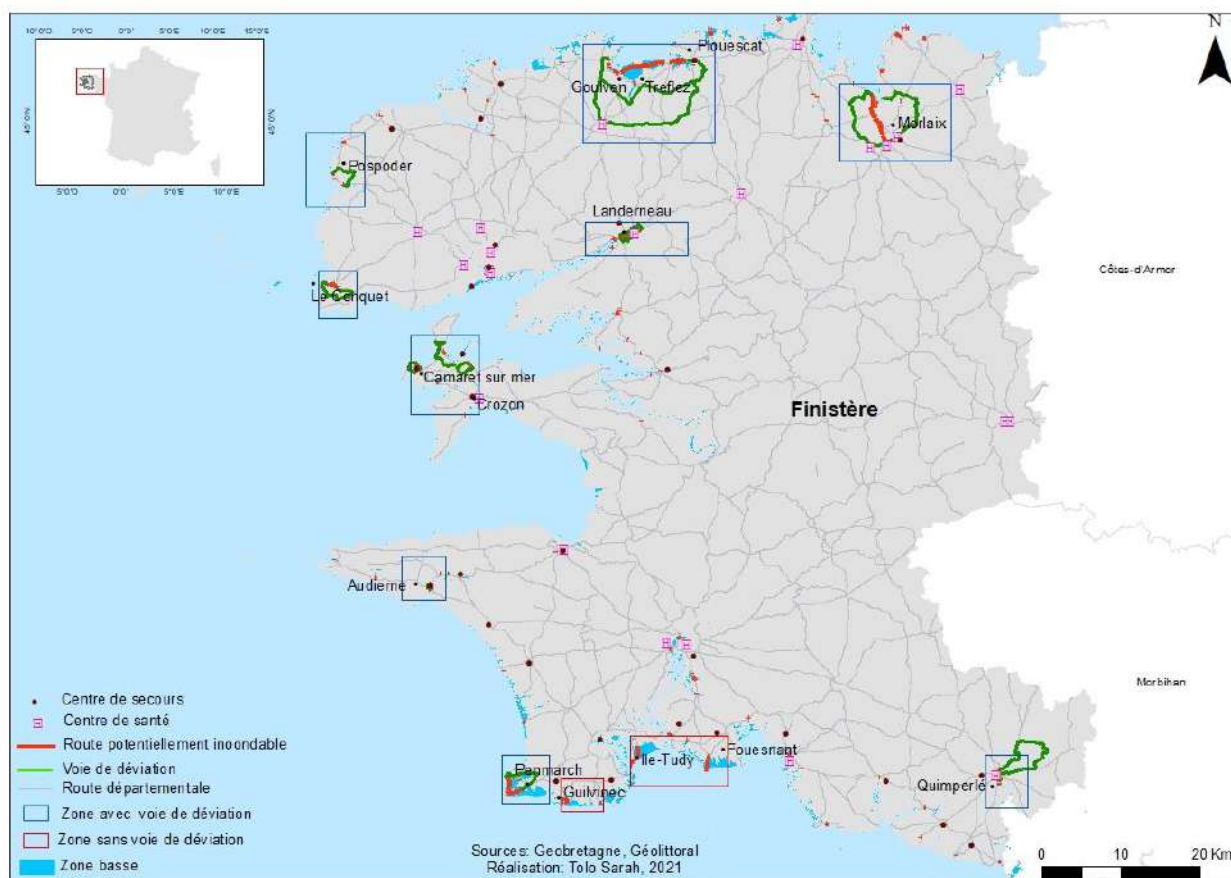
Tableau 9: Détails des classes de voies de déviations.

Voie de contournement (score contournement)	
Longueur en km	Score
< 4,09	1
4,09 à 4,97	1,5
4,97 à 9,60	2
9,60 à 17,89	3
>17,89	4
Pas de voie de contournement	5

3-2-3-2 Accès aux services de secours

La figure 26 ci-dessous présente la répartition spatiale des différents centres de secours. Les centres sont majoritairement localisés en dehors des segments de routes potentiellement inondables.

Figure 25 : Centres de secours (Pompiers et hôpitaux).



En tenant compte de l’emplacement des différents centres de secours, lors d’une rupture de trafic sur le segment de routes potentiellement inondables, il est plus ou moins nécessaire de prendre en compte la distance en kilomètres de déviation mais aussi le nombre de personnes les plus vulnérables. De ce fait, le tableau 9 présente les différents scores de cette variable.

Tableau 10: Détails des classes accès aux centres de secours

Accès aux hôpitaux/ pompiers						
Nombres de personnes touchées	Longueur de déviation en km					
	<4,09	4,09 à 4,97	4,97 à 9,60	9,60 à 17,89	> 17,89	Aucun
Moins de 8	1	2	3	4	5	5
8 à 17	1	2	3	4	5	5
17 à 24	2	3	3	4	5	5
24 à 35	2	3	4	4	5	5
Plus de 35	2	4	5	5	5	5

CONCLUSION

Cette étude de la vulnérabilité des routes côtières départementales aux aléas côtiers, a pour objectif principal de caractériser la vulnérabilité des portions de routes face aux risques d'érosion et de submersion marines, par les outils mis en place par le Québec.

La recherche bibliographique au niveau national et international des outils de diagnostic et de suivi de la vulnérabilité et la sensibilité des réseaux viaires aux risques d'érosion et de submersion marine a permis de faire une synthèse de revue bibliographique. Cette synthèse montre qu'au niveau national, présentement aucun outil n'a été développé pour évaluer la vulnérabilité des routes aux aléas côtiers. Au niveau international, la majorité des études se base sur l'exposition des routes aux aléas côtiers. Le Québec est le pays qui a mis en place à ce jour, un outil qui permet d'évaluer la vulnérabilité des routes aux risques d'érosion et de submersion marines.

La méthode développée par le Québec est utilisée pour caractériser la vulnérabilité des routes départementales côtières du Finistère face aux risques d'érosion et de submersion marines. Cette méthode (IVRAC) intègre 14 paramètres pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des routes aux aléas côtiers pour le territoire du Québec. Ainsi, dans cette étude 9 paramètres sont retenus pour la caractérisation de la vulnérabilité des routes départementales aux aléas côtiers. Cette caractérisation est basée sur trois éléments principaux : l'exposition de la route, les caractéristiques du segment de route et les caractéristiques du réseau routier. Cette méthode a permis de déterminer les segments de routes exposées aux aléas. Ainsi, en fonction des données à notre disposition, aucune route départementale n'est potentiellement érodable actuellement. De plus, pour un total de 3262,25 kilomètres de routes départementales dont 1360,11 kilomètres de routes littorales et estuariennes, 57,38 kilomètres de segments de routes départementales sont potentiellement inondables dans plusieurs communes du département du Finistère. Au niveau, des caractéristiques du segment de route deux variables sont considérées. Il s'agit, d'évaluer la vulnérabilité au travers de la quantité de véhicules qui transite sur le segment de route potentiellement inondable, ainsi que les personnes les plus affectées. Enfin, en ce qui concerne les caractéristiques du réseau routier, cela a permis de déterminer la longueur des voies de déviation ainsi que l'accès aux différents centres de secours.

Les objectifs visés par cette étude n'ont pas été totalement atteints. Cela réside dans le fait que nous avons rencontré plusieurs difficultés au cours de nos travaux, telles que :

- La connaissance limitée du territoire,
- Les données disponibles avec une résolution qui ne permet d'aller dans la grille du Québec,
- Une méthodologie pas totalement adaptable à une grande échelle,
- Les différences au niveau des dispositions spatiales du Québec et le Finistère.

En raison des difficultés mentionnées ce travail reste alors exploratoire avec beaucoup d'interrogations avant de se lancer dans la partie technique du travail. Ainsi avec plus temps Dans le cadre du stage avoir la possibilité de rétester la méthode à une petite échelle. Cette étude ouvre des perspectives de recherche à plusieurs échelles.

BIBLIOGRAPHIE

ADGER W. N., 2006. Vulnerability, *Global Environmental Change*, vol. 16 pp. 268-281

BOYER-VILLEMAIRE, U., MARIE, G., BERNATCHEZ, P., 2014. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Analyse des stratégies internationales et recommandations en matière de réduction de la vulnérabilité des infrastructures de transport face aux risques naturels côtiers, Rapport final, Volume II, Projet X008.1.

Cutter, S.L., 1996. Vulnérabilité aux dangers environnementaux', pp. 529–539.

D'ERCOLE, R. et PIGEON, P. (1999). L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique. *Annales de géographie*, n°608, pp. 339- 357.

DREJZA, S., FRIESINGER, S., P. BERNATCHEZ., G. MARIE., 2019. Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index. P11

DREJZA, S., FRIESINGER, S., P. BERNATCHE, G. MARIE., 2015. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins. Volume III. Projet X008.1.

DREJZA, S., FRIESINGER, S. et BERNATCHEZ, P., 2014. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I, Projet X008.1.

FUSSEL, H.-M., KLEIN, R.J.T., 2006. Climate change vulnerability assessments : an evolution of conceptual thinking', p. 29.

GABOR T., GRIFFITH T K., 1980. L'évaluation de la vulnérabilité de la collectivité aux incidents graves liés aux matières dangereuses', pp. 323–333.

GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007) Climate change 2007 : The physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, 996p.

GIEC., 2013. Contribution du groupe de travail au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, p. 34.

Johnston A., Slovinsky P, Yates K.L., 2014. Assessing the vulnerability of coastal infrastructure to sea level rise using multi-criteria analysis in Scarborough, Maine (USA), p. 13.

Lambert, M.-L., 2013. GIZC et élévation du niveau marin : vers une gestion innovante des littoraux vulnérables', *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* doi:[10.4000/vertigo.14331](https://doi.org/10.4000/vertigo.14331).

McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (Eds.), 2001. Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge

Medde, 2012. *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens*, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Paris, 20 p.

Meur-Ferec et al. 2020. Une méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines', p. 24. *Une méthode de suivi de la vulnérabilité systémique à l'érosion et la submersion marines*

MEUR-FÉREC C., DEBOUDT Ph., MOREL V., 2008. Coastal Risks in France: An Integrated Method For Evaluating Vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 24: 178-189.

Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., Woodroffe, C. D., 2016. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean and Coastal Management*, 123 18-43

Overton Margery and Fisher John, 2005. NC Coastal Highway Vulnerability, p. 88.

Paul, S.K., 2013. Vulnerability concepts and its application in various fields: a review on geographical perspective. *J. Life Earth Sci.* 8, 63–81.

SADIO M., SECK A., NOBLET M., CAMARA I., 2019. Evaluation de la vulnérabilité du secteur de la zone côtière à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin 114p

Sasi Mary P., R, Mohammedali N, Surya P T et Radhakrishnan V., 2019. Mapping and analysis of the physical vulnerability of coastal Tamil Nadu, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 19p

Smit Barry et Wandel Johanna., 2006. Adaptation, capacité d'adaptation et vulnérabilité
Changement environnemental mondial vol. 16, pp. 282–292

Thieler, E.R. and Hammer-Klose, E.S., 1999. National Assessment of Coastal Vulnerability
to Sea-Level Rise : Preliminary Results for the US Atlantic Coast. Woods Hole, MA: United
States Geological Survey (USGS), Open File Report, 99-593

Vinet F., Defossez S., Rey T., Boissier L., 2012. « Le processus de production du risque
"submersion marine" en zone littorale : l'exemple des territoires "Xynthia" », *Norois*, n° 222,
p. 11-26

Webographie

20 minutes.fr, « Xynthia : des routes inondées dans l'ouest » , publié le 01/03/2010
<https://www.20minutes.fr/france/387852-20100301-xynthia-routes-inondees-ouest>.

Le télégramme, A Goulven, la flèche déborde sur la départementale D10 publié le 06/01/2021
<https://www.letelegramme.fr/finistere/goulven/a-goulven-la-fleche-deborde-sur-la-departementale-10-06-01-2021-12684386.php>.

Site OSIRISC [Aperçu - Osirisc - POPS \(univ-brest.fr\)](http://www.univ-brest.fr/~osirisc/)

Docpaler.fr, Conférence ESRI 2011, Travailler avec l'extension Network Analyst
<https://docplayer.fr/amp/16729881-Arcgis-network-analyst.html>

Presqu'île de crozon.com, publié en 2021 <https://www.presqu-ile-de-crozon.com/geologie/erosion-route-001.php>

Liste des figures, des tableaux et des annexes

Figure 1 : Caractéristiques physiques du littoral Finistère	18
Figure 2 : Schéma conceptuel de l'identification de routes potentiellement érodables	23
Figure 3 : Schéma conceptuel de l'identification de routes potentiellement submersibles actuellement	24
Figure 4 : Schéma conceptuel de l'identification de routes potentiellement submersibles à l'horizon 2100.	25
Figure 5 : Les étapes de la méthode de construction des indicateurs (Meur-Férec et al. 2020).	31
Figure 6 : Zone érodable sur le littoral finistérien en 2015.	34
Figure 7 : Routes communales potentiellement érodables à l'horizon 2100.	36
Figure 8 : Portion de route potentiellement érodable.	37
Figure 9 : Routes départementales potentiellement inondables actuellement.	38
Figure 10 : Longueur de routes départementales du Finistère.	39
Figure 11 : Pourcentage de routes littorales et estuariennes potentiellement inondables.	39
Figure 12 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Morlaix, Tablé, ...	40
Figure 13 : Segments des route potentiellement inondables au niveau de Goulven, Tréfleze,	41
Figure 14 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Pospoder, Lanildut...	41
Figure 15 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau du Conquet et Trébabu.	42
Figure 16 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de landerneau.	42
Figure 17 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Camaret-sur-mer et Crozon.	43
Figure 18 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau d'Audierne, Pont-croix, Plouhinec.	43
Figure 19 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Penmarch le Guilvinec et Treffiagat.	44
Figure 20 : Segments de route potentiellement inondables au niveau de l'île-Tudy, Combrit, Bénodet, Fouesnant.	44
Figure 21 : Segments de routes potentiellement inondables au niveau de Quimperlé et environs.	45

Figure 22 : Longueurs des routes potentiellement inondables dans les différents secteurs (cf. Figures 13 à 21) pour la localisation (cf figure 10).....	46
Figure 23 : Segments de routes potentiellement inondables à l'horizon 2100.	47
Figure 24 : Voies de déviations des segments de routes potentiellement inondables.....	50
Figure 25 : Centres de secours (Pompiers et hôpitaux).....	52
Tableau 1: Paramètres du territoire québécois	16
Tableau 2: Paramètres retenu pour le calcul d'indice de vulnérabilité des routes en Finistère	17
Tableau 3: Exemples de mots-clés utilisés dans web of sciences pour la recherche documentaire.	20
Tableau 4: Inventaire des données disponibles collectées	21
Tableau 5: Détails des classes exposition des routes à la submersion marine (niveau d'eau).	25
Tableau 6: Détails des classes de la distance entre la côte et les segments de routes partiellement inondables.....	26
Tableau 7: Détails des classes du flux routier moyen journalier annuel.....	48
Tableau 8: Détails des classes du nombre moyen de personnes directement touchées	49
Tableau 9: Détails des classes de voies de déviations.....	51
Tableau 10: Détails des classes accès aux centres de secours.....	52
Annexe 1 : Tableau des paramètres de calcul de l'IVRAC	62
Annexe 2 : Exemple 1 pour déterminer la population.....	63
Annexe 3 : Exemple 2 pour déterminer la population.....	63

Table des matières

Remerciements	2
Sommaire	3
Sigles et abréviations.....	4
Résumé	6
Abstract	7
INTRODUCTION.....	8
Partie 1 : contexte du stage et présentation de la zone d'étude	11
1-1 Projets de gestions des risques côtiers	11
1-1-1 OSIRICS.....	11
1-1-2 Litto 'Risques	12
1-1-3 ARICO	13
1-2 Missions du stage.....	13
1-2-1 Recherche documentaire.....	14
1-2-2 Caractérisation de la sensibilité des routes départementales face aux aléas (érosion et submersion marine) dans le Finistère par la méthode mise en place par le Québec. ...	14
1-2 Présentation de la zone d'étude	17
Partie 2 : Méthodologie	19
2-1 Recherche bibliographique	19
2-2 Caractérisation de la vulnérabilité des portions de routes départementales face à l'érosion et la submersion marines dans le Finistère	20
2-2-1 Données disponibles utilisées	20
2-2-2 Exposition des infrastructures routières aux aléas côtiers	21
2-2-2-1 Exposition à l'érosion	22
2-2-2-2 Exposition à la submersion marine	23
❖ Distance entre la route et la côte	26
2-2-3 Caractéristiques du segment de route.....	26

2-2-3-1	Nombres de véhicules	27
2-2-3-2	Population affectée.....	27
2-2-4	Caractéristiques du segment de route au sein du réseau.....	28
2-2-4-1	Voie de déviation	28
2-2-4-2	Accès aux services de secours	29
2-3	Calcul de l'indice de vulnérabilité « IVRAC »	29
Partie 3	Résultats et discussions.....	30
3-1	Recherche bibliographique	30
3-1-1	Au niveau national.....	30
3-1-2	Au niveau international	32
3-2	Caractérisation de la vulnérabilité des portions de routes départementales face à l'érosion et la submersion marine dans le Finistère	33
3-2-1	Expositions des routes aux aléas	33
3-2-1-1	Exposition à l'érosion.....	33
3-2-1-2	Exposition des routes à la submersion marine	38
3-2-2	Caractéristiques du segment de route	48
3-2-2-1	Quantité de véhicules	48
3-2-2-2	Population directement affectée.....	48
3-2-3	Caractéristiques du segment de route au sein du réseau.....	49
3-2-3-1	Voie de contournement	49
3-2-3-2	Accès aux services de secours.....	51
CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE	55
Webographie	57
Liste des figures, des tableaux et des annexes.....		58
Table des matières		60
ANNEXES		62

ANNEXES

Annexe 1 : Tableau des paramètres de calcul de l'IVRAC

	Paramètre	Sous-indice érosion	Sous-indice submersion
Exposition aux aléas	Date d'exposition de la route à l'érosion Nécessite les éléments suivants : <ul style="list-style-type: none"> - Distance entre la route et la côte (en m) - Recul événementiel - Taux de migration probable (en m/an) - Présence (ou non) de structures de protection du MTO 	X	
	Épaisseur potentielle d'eau sur la route Nécessite les éléments suivants : <ul style="list-style-type: none"> - Altitude de la route - Hauteur de submersion possible au-dessus de la pleine mer supérieure de grande marée selon les données terrain disponibles - Impact local des structures de protection sur la hauteur de submersion - Hausse du niveau marin (pour 2080 et 2100) - Variation isostatique (pour 2080 et 2100) 		X
	Largeur de la plage		X
	Distance entre la route et la côte (en termes d'atténuation de la nappe d'eau et des vagues)		X
Caractéristiques du segment de route	Quantité de véhicules circulant par jour	X	X
	Population résidant directement sur le segment de route	X	X
	Propension à réparer la route aisément	X	
	Rang côtier (nombre de rangées d'infrastructures présentes entre la route et la côte)	X	X
	Présence d'infrastructures connexes (aqueduc, égout, électricité...)	X	
	Sécurité des usagers vis-à-vis de l'érosion	X	
	Sécurité des usagers vis-à-vis de la submersion (déferlement violent)		X
Caractéristiques du réseau	Présence d'une voie de contournement (et si oui de quelle longueur)	X	X
	Accès aux pompiers (ou détour et si oui de quelle longueur)	X	X
	Accès à l'hôpital (ou détour et si oui de quelle longueur)	X	X

Annexe 2 : Exemple 1 pour déterminer la population.



Annexe 3 : Exemple 2 pour déterminer la population.



La procédure adaptée pour déterminer le nombre de personnes les plus affectées par les aléas. Les segments de routes départementales potentiellement inondables sont en couleur rouge et les segments de routes communales potentiellement inondables sont en couleur marron.