

VULIT : Vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre et Miquelon face aux risques côtiers Phase 2 : caractérisation des aléas recul du trait de côte et submersion marine

BRGM/RP-63988-FR
Mai 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 13OBS0725

Ywenn DE LA TORRE, Léa DOURIS, Thomas BULTEAU,
Manuel GARCIN, Sophie LECACHEUX

Vérificateur :

Nom : E. PALVADEAU

Date : 15/05/2016

Signature :

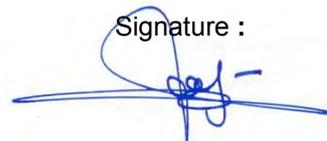


Approbateur :

Nom : JM MOMPELAT

Date : 23/05/2016

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Direction des Territoires, de
l'Alimentation et de la Mer
Saint-Pierre-et-Miquelon



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Changement climatique, Enjeux, Littoral, Risques côtiers, Saint-Pierre et Miquelon, Submersion, Trait de côte, Vulnérabilité.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

DE LA TORRE Y., DOURIS L., BULTEAU T., GARCIN M., LECACHEUX S. (2016) – VULIT - Vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre et Miquelon face aux risques côtiers. Phase 2 : caractérisation des aléas recul du trait de côte et submersion marine. Rapport final. BRGM/RP-63988-FR, 25 p.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le Nord-Ouest Atlantique, l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon est exposé aux aléas météo-marins en cumulant les impacts des dépressions subarctiques mais également des cyclones remontant la côte nord-américaine, voire de tsunamis d'origine sismique ou gravitaire.

Dans ce contexte, le littoral d'environ 200 km de l'archipel est soumis à la fois à un recul du trait de côte qui affecte les côtes rocheuses ou meubles ainsi qu'à des phénomènes de submersions marines dans les zones basses où est implantée la population (Saint-Pierre, hameau de Langlade et Miquelon).

Cofinancé par la DTAM et par la dotation pour charge de service public du BRGM, le projet « VULIT-SPM » a pour objectif de caractériser la vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre-et-Miquelon face aux risques de recul du trait de côte et de submersion marine dans un contexte de changement climatique et de tsunami.

La phase 1 du projet s'est attachée à dresser un état des lieux de la dynamique côtière et des enjeux et à définir des zones prioritaires à étudier.

Le présent rapport concerne la phase 2 de l'étude qui a permis de calculer et de cartographier les aléas actuels et futurs de recul du trait de côte et de submersions marines à l'échelle de 1/5000 sur les sites définis comme prioritaires.

L'aléa recul du trait de côte a été estimé sur la base de l'évolution historique de 1952 à 2012 à partir des photographies aériennes et images satellites disponibles. Le trait de côte à différentes dates a été digitalisé et le recul a été traité au moyen du module DSAS du SIG ArcGis, ce qui permet d'automatiser le calcul le long de transects. L'aléa actuel a été qualifié par les différentes vitesses de recul moyen et cartographié sur la position du trait de côte de 2012. La position future du trait de côte a été estimée et cartographiée en fonction d'une projection linéaire de la tendance actuelle jusqu'en 2100. La limite de la méthode tient au fait que les aménagements futurs et l'adaptation des morphologies au changement climatique n'ont pas été pris en compte.

L'aléa submersion marine a été analysé selon deux processus distincts, à savoir la submersion par débordement (liée à la surcote de tempête dans les ports et étangs) et la submersion par franchissements de paquets de mer (rôle du jet de rive) dans les zones exposées aux vagues. Une analyse statistique en valeurs extrêmes a permis de calculer les niveaux d'eau de référence ainsi que les caractéristiques de vagues au large pour une occurrence centennale. Les cotes de submersions ont été calculées pour l'aléa actuel et l'aléa futur en prenant en compte l'élévation relative du niveau de la mer en lien avec le changement climatique et la subsidence géologique de l'archipel. L'altitude atteinte par le jet de rive suite au déferlement des vagues a été estimée au moyen de formules paramétriques de run-up. Des modèles numériques d'élévation ont également été produits afin de croiser les cotes de submersions avec la topographie terrestre et cartographier les limites de submersion pour les aléas actuels et 2100. Des limitations sont constatées sur l'application des formules de run-up et la qualité des modèles numériques de terrain. Les données lidar du programme Litto3D (non disponibles actuellement) permettront à l'avenir de préciser ces limites de submersions.

La suite de l'étude consiste à caractériser et cartographier l'aléa tsunami sur la base de scénarios en champ proche (Grands Bancs) et lointain (séisme de Lisbonne notamment).

Sommaire

1. Introduction	7
2. Caractérisation et cartographie de l'aléa recul du trait de côte	9
2.1. ESTIMATION DE L'ALEA DE REcul DU TRAIT DE COTE.....	9
2.1.1. Préparation des images	9
2.1.2. Définition et numérisation des traits de côte.....	10
2.1.3. Calcul du recul du trait de côte.....	11
2.2. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA.....	13
3. Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine	15
3.1. RAPPELS ET DEFINITIONS	15
3.2. ESTIMATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE	16
3.2.1. Submersion par débordement.....	17
3.2.2. Submersion par franchissement.....	18
3.3. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA.....	19
3.3.1. Préparation du MNT.....	19
3.3.2. Cartographie de l'aléa de référence et 2100	21
4. Conclusion.....	23
5. Bibliographie	24

Liste des illustrations

Illustration 1 – Détail des images utilisées	9
Illustration 2 – Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes littoraux: a. limite de végétation ; b. limite de haut de versant ; c. limite en pied d'aménagement (BD Ortho IGN 2005)	10
Illustration 3 – Création automatique de transects perpendiculairement au trait de côte (fond IGN 2005).....	11
Illustration 4 – Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009).....	12
Illustration 5 – Extrait du tableau regroupant les valeurs de reculs actuels et futurs par secteur homogène selon le morphotype sur le secteur de Miquelon Est.....	12
Illustration 6 – Extrait de la cartographie de l'aléa recul du trait de côte sur l'île aux marins.....	14
Illustration 7 – Processus météo-marins responsables des submersions marines (source BRGM)	15

Illustration 8 – Exemples de submersion par débordement (en haut : tempête du 09/02/2016) et par franchissement de paquets de mers liés aux vagues (en bas : tempête du 22/03/2015) – source DTAM.....	16
Illustration 9 – Synthèse des niveaux marins estimés pour la cartographie de l'aléa submersion marine	17
Illustration 10 – Elévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du global (IPCC, 2013).....	18
Illustration 11 – MNT 10m à Miquelon et coupe associées.....	21
Illustration 12 – Exemple de cartographie de la limite de submersion marine par débordement (haut) et franchissement (bas) pour les aléas actuel et 2100 sur l'île aux Marins	22

Liste des annexes

Annexe 1 Cartographie au 1 : 5 000 de l'aléa recul du trait de côte
Annexe 2 Analyses statistiques en valeurs extrêmes aux alentours de Saint-Pierre-et-Miquelon (vagues et niveaux d'eau)
Annexe 3 Méthodologie pour la création d'un MNT à résolution de 10m sur les bourgs de St Pierre et de Miquelon
Annexe 4 Cartographie au 1/5000 de l'aléa submersion marine par débordement
Annexe 5 Cartographie au 1/5000 de l'aléa submersion marine par franchissement

1. Introduction

Dans le Nord-Ouest Atlantique, l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon est exposé aux aléas météo-marins en cumulant les impacts de dépressions subarctiques mais également de cyclones remontant la côte est-américaine depuis les Antilles (ex : Sandy en 2012), voire de tsunamis d'origine sismique ou gravitaire (Grands-Bancs au large de Terre-Neuve en 1929, effondrements volcaniques possibles en provenance des îles de l'Atlantique Est).

Dans ce contexte, le littoral d'environ 200 km de l'archipel est soumis à la fois à un recul du trait de côte qui affecte tout particulièrement les côtes meubles ainsi qu'à des phénomènes de submersions marines dans les zones basses où est implantée la population (bourgs de Saint-Pierre et de Miquelon essentiellement).

Cofinancé par la DTAM et par la subvention pour charge de service public du BRGM, le projet « VULIT-SPM » a pour objectif de caractériser la vulnérabilité du littoral de Saint-Pierre-et-Miquelon face aux risques de recul du trait de côte et de submersion marine dans un contexte de changement climatique et de tsunami. VULIT-SPM est organisé en 3 tâches

La tâche 1 du projet s'est attachée à dresser un état des lieux de la dynamique côtière et des enjeux et à définir des zones prioritaires à étudier. Elle a donné lieu au rapport BRGM/RP-62935-FR (De la Torre *et al.*, 2013).

Le présent rapport s'attache à la **phase 2 de l'étude**. Elle caractérise les aléas côtiers actuels et à venir du recul du trait de côte et des submersions marines (tempêtes, cyclones) sur les sites prioritaires pour produire une cartographie à l'échelle du 1/5 000. Ces sites prioritaires ont été définis dans le cadre de la tâche 1.

La tâche 3 s'attache à la caractérisation de l'aléa tsunami.

2. Caractérisation et cartographie de l'aléa recul du trait de côte

Le recul du trait de côte correspond au « déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental » (MEDDE, 2014). Il est généralement associé à une érosion marine, même si la relation entre recul du trait de côte et perte de matériel n'est pas systématique. Bien qu'opérant à des rythmes distincts, ce recul concerne aussi bien les littoraux meubles (plages, dunes, cordons de galets) que les falaises rocheuses.

Cette perte de terrain peut générer également des dommages sur les aménagements implantés sur le littoral et favoriser les submersions marines, dans le cas de brèches dans les cordons sédimentaires en particulier.

2.1. ESTIMATION DE L'ALEA DE REcul DU TRAIT DE COTE

L'estimation de l'aléa recul du trait de côte repose sur une approche historique par photo-interprétation permettant la définition d'un aléa de référence actuel et d'un aléa futur par la projection jusqu'à 2100 dans des conditions environnementales estimées comme invariantes dans le temps.

Le calcul du recul du trait de côte suit les étapes suivantes :

- préparation des images ;
- définition et numérisation du trait de côte aux différentes dates ;
- calcul du recul du trait de côte.

2.1.1. Préparation des images

Les images utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes de l'IGN et les images satellites Pléiades (Illustration 1).

Années	Source	Nature des clichés	Résolution image numérique
1952	BD HISTO IGN	Noir & Blanc	1 pixel = 0.5 m
2000	BD HISTO IGN	Couleur	1 pixel = 0.5 m
2005	BD ORTHO IGN	Couleur	1 pixel = 0.5 m
2012	PLEIADES (diffusion IGN)	Couleur	1 pixel = 0.5 m

Illustration 1 – Détail des images utilisées

Elles ont été numérisées (scan photogrammétrique pour les prises de vues argentiques), orthorectifiées (correction des déformations dues à l'optique et au relief) et géoréférencées par l'IGN. Les images de 2005 sont issues du produit « BD Ortho » disponible. Celles de 1952 ; 2000 et 2012 ont été orthorectifiées spécifiquement pour les besoins de cette étude.

2.1.2. Définition et numérisation des traits de côte

Compte-tenu du niveau marin et des conditions d'agitation changeantes d'une campagne photographique à l'autre (marée et déferlement des vagues), la position du trait de côte ne peut se définir par le contact terre-mer visible sur les photographies aériennes.

La limite haute du littoral a donc été privilégiée pour matérialiser le trait de côte, à savoir (Illustration 2) :

- la limite de végétation ou le pied des aménagements pour les côtes basses ;
- la partie sommitale du versant pour les côtes à falaise.

Le trait de côte a été numérisé sous SIG par digitalisation à l'écran à une échelle de 1/2500 en prévision d'une restitution cartographique au 1/5000. Le type de limite de trait de côte considéré est renseigné dans les données attributaires de la couche SIG ainsi créée.



*Illustration 2 – Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes littoraux:
a. limite de végétation ; b. limite de haut de versant ; c. limite en pied d'aménagement
(BD Ortho IGN 2005)*

La marge d'erreur issue de cette photo-interprétation du trait de côte dépend de la qualité des images (échelles, grain de la pellicule argentique pour les plus anciennes, résolution, orthorectification, géoréférencement) et de l'interprétation du trait de côte dans les zones délicates (ombres portées, falaises en pente douce, ...). Elle est estimée globalement entre 5 et 10m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à 10 m ont été écartés de l'étude.

2.1.3. Calcul du recul du trait de côte

L'utilisation de l'extension d'ArcGis « DSAS » (Thieler *et al.*, 2009) permet d'automatiser le calcul de l'évolution du trait de côte sur la période considérée en différents points du trait de côte intersecté par des transects.

A partir d'une ligne de base située en arrière de l'enveloppe des traits de côte, les transects sont générés à un intervalle prédéfini. Les taux d'évolution annuels (Tx) et à 2100, soit 88 ans de 2012 à 2100 (Tx88), sont calculés pour chaque transect, selon plusieurs méthodes statistiques possibles.

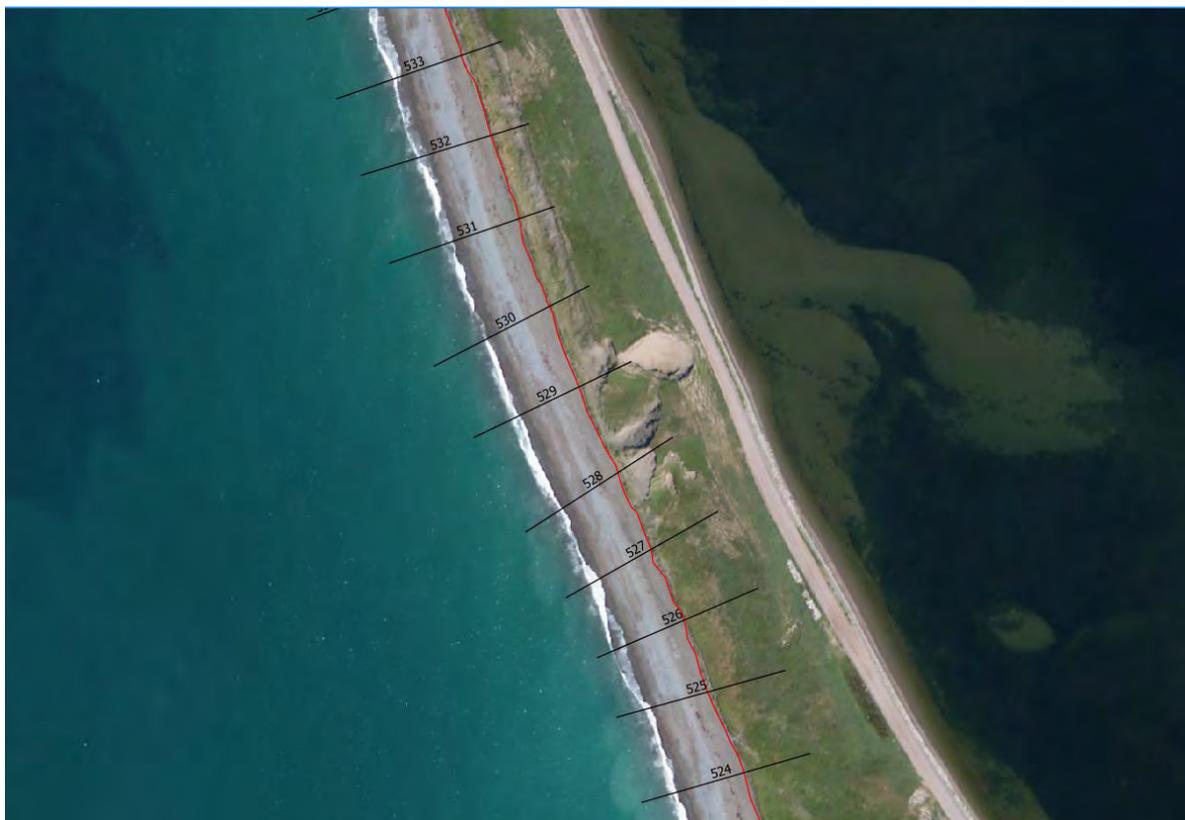


Illustration 3 – Création automatique de transects perpendiculairement au trait de côte (fond IGN 2005)

Pour cette étude, les transects sont implantés tous les 50m (Illustration 3), et le taux d'évolution est calculé à partir d'une régression linéaire pondérée (*Weight Linear Regression - WLR*) adaptée à l'échantillon de traits de côte.

La régression linéaire pondérée est une méthode d'ajustement couramment employée pour le calcul de l'évolution du trait de côte. Elle offre l'avantage d'utiliser toute la donnée disponible et donne plus de poids aux données les plus fiables afin de déterminer la meilleure droite d'ajustement (Illustration 4 - Himmelstoss, 2009).

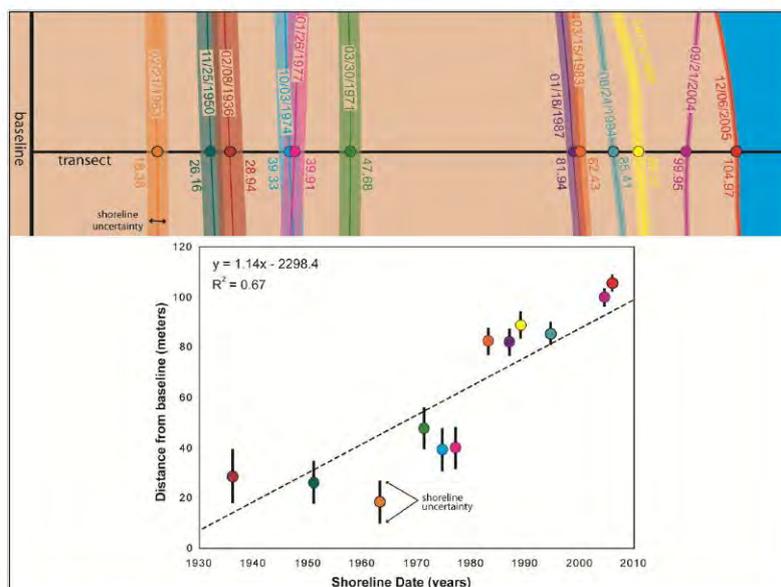


Illustration 4 – Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)

Les valeurs obtenues pour chaque transect sont ensuite filtrées sous Excel afin de ne retenir que celles exprimant un recul annuel (aléa actuel Tx) et projetées à l'horizon 2100 pour l'aléa futur Tx88.

Afin de s'affranchir des effets locaux de transects (artefacts et fortes disparités d'un profil à l'autre générant un trait de côte en « dents de scie »), il convient de regrouper et moyenner les valeurs au sein de secteurs au comportement morphodynamique homogène.

Les secteurs sont ainsi définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral. Les reculs moyens par secteurs (moyenne des Tx et Tx88 obtenus sur chacun des profils) sont regroupés sous forme de tableau de synthèse (Illustration 5). Les Tx88 sont arrondis par tranche de 5m.

Nom Secteur	Code Secteur	Transects	Morphotype	Tx moyen (m)	Tx88 moyen arrondi (m)
Miquelon Est	z1_e	1 à 11	Rocheux	-0,06	-5
		12	Artificiel	-0,10	-10
		13 à 47	Sédimentaire	-0,08	-5
		48 à 53	Artificiel	-0,41	-35
		54 à 99	Sédimentaire	-0,31	-30

Illustration 5 – Extrait du tableau regroupant les valeurs de reculs actuels et futurs par secteur homogène selon le morphotype sur le secteur de Miquelon Est

Pour rappel, conformément au cahier des charges, les effets des ouvrages de défense sont implicitement pris en compte par les positions historiques du trait de côte. La projection à 2100 ne prend pas en compte l'installation d'ouvrages récents (entre 2012 et aujourd'hui) ou à venir, ni l'accélération future de l'élévation de la mer et l'adaptation potentielle de morphologies côtières.

2.2. CARTOGRAPHIE DE L’ALEA

La limite du recul du trait de côte actuel et à venir est cartographiée sous SIG à partir des valeurs Tx et Tx88 par secteurs homogènes.

La cartographie SIG de ces valeurs est réalisée par l’utilisation de l’outil « buffer » revenant à créer une zone tampon sur le secteur considéré à partir du trait de côte de 2012.

Lorsque le passage d’un secteur à un autre ne coïncide pas avec une limite physique (cap rocheux, embouchure), une zone de transition est appliquée pour ne pas cartographier une limite « en marche d’escalier ». La distance de transition équivaut à environ 10 fois le décalage entre deux secteurs (pour un écart de 5m, la zone de transition s’étale sur 50m ; pour 10m/100m ; etc.).

Par ailleurs, lorsque le calcul du recul d’un littoral meuble atteint une formation rocheuse (plage ou cordon de galet situé en pied de falaise), la limite de recul est limitée au pied de la falaise.

Les résultats sont présentés sous la forme d’une carte au 1/5000 (Annexe 1) présentant le taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 sur la position du trait de côte 2012 et la position présumée du trait de côte en 2100 (Illustration 6).

Les couches SIG produites sont livrées au format *shapefile* lisible sous ArcGis et QGis avec une fiche de métadonnée associée.

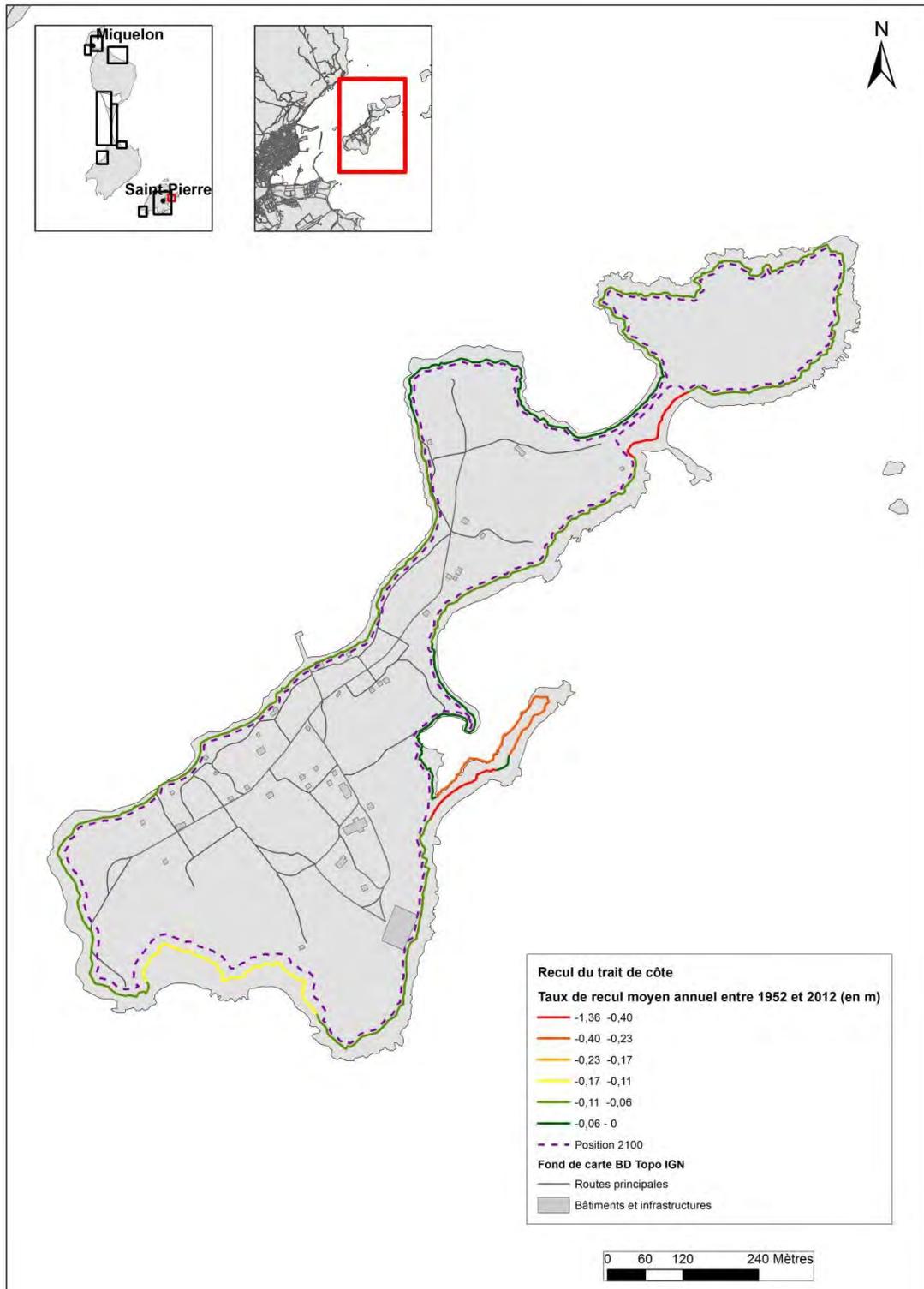


Illustration 6 – Extrait de la cartographie de l'aléa recul du trait de côte sur l'île aux marins

3. Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine

3.1. RAPPELS ET DEFINITIONS

L'aléa submersion marine correspond à une inondation temporaire de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (MEDDE, 2014). Ces submersions peuvent durer de quelques heures à quelques jours.

Les processus météo-marins responsables des submersions marines sont (Illustration 7) :

- la marée astronomique ;
- la surcote atmosphérique (liée à la baisse de la pression atmosphérique et au vent de mer), aussi appelée surcote de tempête ou onde de tempête ;
- la surcote liée aux vagues (wave set-up) ;
- le jet de rive lié au déferlement des vagues à la côte.

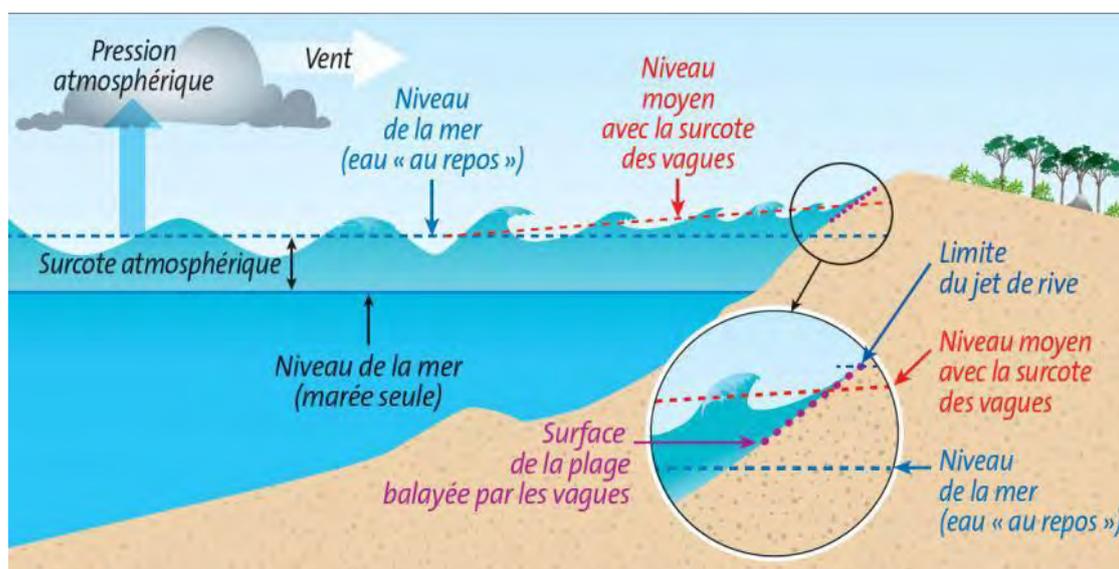


Illustration 7 – Processus météo-marins responsables des submersions marines (source BRGM)

Ces processus engendrent 3 types de submersions :

- la submersion par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel (Illustration 8 en haut) ;
- la submersion par franchissement de paquets de mer liés aux vagues, lorsqu'après déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel (Illustration 8 en bas) ;
- la submersion par rupture du système de protection (digue notamment), lorsque les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin : défaillance d'un ouvrage de protection ou formation de brèche dans un cordon naturel.

L'écoulement de l'eau et/ou le choc des vagues peuvent également engendrer d'autres aléas en occasionnant des dommages sur les infrastructures ou en renforçant l'érosion (jets de galets notamment).



Illustration 8 – Exemples de submersion par débordement (en haut : tempête du 09/02/2016) et par franchissement de paquets de mers liés aux vagues (en bas : tempête du 22/03/2015) – source DTAM

3.2. ESTIMATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE

Le préalable étant de déterminer le mode de submersion, il est considéré qu'à Saint-Pierre et Miquelon c'est le franchissement par les vagues qui impacte l'ensemble du linéaire côtier de

l'île, hormis pour les zones portuaires (bourg de Saint-Pierre en particulier) et la zone interne des étangs qui peuvent subir des débordements liés à la surcote de tempête sans action des vagues.

Le tableau suivant présente les valeurs utilisées pour la cartographie de l'aléa submersion marine :

(en m cote terrestre)	Débordement	Franchissement
Aléa actuel	3	7
Aléa 2100	3,7	7,7

Illustration 9 – Synthèse des niveaux marins estimés pour la cartographie de l'aléa submersion marine

Les calculs sont détaillés ci-après.

3.2.1. Submersion par débordement

Pour la submersion par débordement, la méthode consiste à croiser sous SIG le niveau marin de référence (NMR) avec la topographie côtière et relève des traitements cartographiques développés dans le chapitre suivant (3.3).

L'aléa actuel ou de référence

Le niveau marin de référence concerne le niveau marin extrême d'occurrence centennale ou le niveau marin supérieur d'un évènement historique connu. Pour le scénario de submersion par débordement, le NMR correspond au niveau d'eau combinant l'effet de la marée et de la surcote atmosphérique (pas de prise en compte des vagues).

Pour le calculer deux méthodes ont été appréhendées :

- le calcul statistique des niveaux d'eau d'occurrence centennale à partir des données marégraphiques disponibles ;
- une reconstitution simple des niveaux extrêmes en additionnant la marée astronomique maximale avec la surcote atmosphérique maximale.

Le calcul statistique présenté en annexe 2 fait apparaître un niveau d'eau centennial de l'ordre de 3,3 m en cote marine (CM) soit 2,04 m en cote terrestre¹ (CT) sur le marégraphe de St Lawrence (station la plus exploitable). Par défaut les valeurs de niveau d'eau sont exprimées en CT dans ce rapport. Compte-tenu de la marge d'erreur, le niveau d'eau peut être arrondi à 3m.

La reconstitution simple de niveau extrême donne par ailleurs un résultat similaire de 3m en considérant une plus haute marée astronomique de 1,4m (SHOM, 2014) ; une surcote atmosphérique de 1,3m (CETMEF, 2012 considère une onde de tempête comprise entre 1m et 1.7m) et, suivant les recommandations du guide du MEDDE (2014), une partie de l'élévation du niveau de la mer lié au changement climatique. En considérant les dernières estimations (IPCC, 2013), la moyenne du scénario le plus impactant (RCP8.5) correspond à une élévation du niveau de la mer de l'ordre de +0,7m en 2100 (Illustration 10). Il est donc convenu de rajouter +30cm à l'aléa actuel.

¹ D'après le référentiel altimétrique (SHOM, 2014), il faut rajouter 1,26m à la cote marine (référentiel SHOM) pour obtenir la cote terrestre (référentiel IGN).

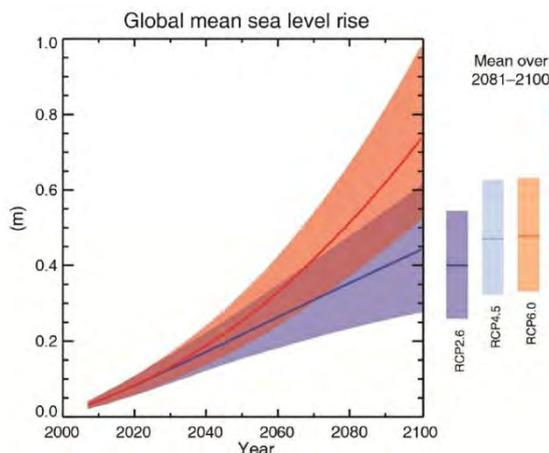


Illustration 10 – Elévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du global (IPCC, 2013)

Quelle que soit la méthode utilisée, c'est donc la valeur de **3m** qui est retenue comme NMR de l'aléa actuel.

L'aléa 2100

Le NMR pour l'aléa 2100 est calculé en prenant en compte pour la fin du siècle l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique ainsi que la subsidence lithosphérique de l'archipel.

+30 cm ayant d'ores et déjà été intégrés à l'aléa actuel, il reste +0,4 m à prendre en compte pour atteindre la valeur de +0,7 m précédemment expliquée.

Par ailleurs, Blein *et al.* (2015) font référence à une subsidence de 2 à 4mm/an de l'archipel liée à la fin de la phase de rebond post-glaciaire, soit +0,26 m en considérant une valeur moyenne de 3 mm pour les 85 ans restant d'ici 2100 ($0,003 \times 85 = 0,255$ m arrondi à 0,26 m).

Le NMR 2100 a donc été estimé à 3,66 m arrondi à **3,7 m**, en considérant le NMR actuel de 3m et une élévation relative du niveau de la mer de +0,66 m, intégrant +0,26 m lié à la subsidence.

3.2.2. Submersion par franchissement

Pour la submersion par franchissement, deux principales méthodes d'estimation sont possibles soit le recours aux calculs à partir de formules paramétriques ou de modélisation numérique. Bien qu'elle soit plus appropriée, la modélisation numérique n'a pas été mise en œuvre pour cette étude car les données requises (modèle numérique de terrain précis de type Litto3D, propagation de la houle sur les différentes façades de l'archipel) ne sont pas disponibles. Un calcul à partir d'une formule paramétrique a donc été réalisé.

L'aléa actuel

Le principe est de se baser sur le NMR et de rajouter l'effet du jet de rive suite au déferlement de vagues extrêmes pour estimer le run-up².

² Run-up ou wave run-up : altitude maximale atteinte par le jet de rive sous l'action des vagues.

La formule de run-up couramment utilisée (De la Torre et Louzé, 2008) est celle de Stockdon *et al.* (2006) qui prend en compte les caractéristiques 1/ de la houle au large et 2/ de la pente du littoral dans la zone de jet de rive (en période de tempête).

Il a donc fallu estimer au préalable les valeurs centennales des vagues pouvant atteindre l'archipel pendant les tempêtes hivernales ou le passage d'un cyclone extratropical.

Une analyse statistique en valeurs extrêmes a été réalisée sur les vagues non cycloniques sur la base de 3 points situés au Nord, à l'Ouest et au Sud de l'archipel (Annexe 2) extraits de la base de données IOWAGA³ sur une série de données de 1990 à 2012 (houlographe de St Pierre trop récent). Cette analyse fait apparaître des valeurs de hauteurs significatives (Hs) comprises entre 8 et 10 m et une période (T) de 12 à 14 s pour des vagues non cycloniques d'occurrence centennale.

Une analyse historique complémentaire des vagues cycloniques sur 58 météores (de 1990 à 2011) montre que le maximum correspond à la perturbation Bill du 24/08/2009 avec Hs = 9,47 m et T=16,7 s au point Sud.

L'impact potentiel en termes de submersion des houles cycloniques vis-à-vis des houles non cycloniques semble donc assez comparable et ce sont les valeurs des vagues non cycloniques au point sud qui ont été utilisées car elles bénéficient d'une estimation de l'occurrence centennale : Hs = 10 m ; T=14 s.

Les données de pente ont été extraites des levés topographiques réalisés par la DTAM. En fonction des différents profils de plage, la valeur moyenne de pente de 0,08% a été retenue.

Par conséquent, l'application de la formule de run-up et du NMR donne un niveau de submersion par franchissement de l'ordre de **7m** CT.

L'aléa 2100

En considérant un niveau de submersion par franchissement de 7m et l'élévation relative du niveau de la mer de +0,66 m explicitée précédemment, le NMR 2100 par franchissement est estimée à 7,66 m, arrondi à **7,7 m**.

3.3. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

La cartographie de l'aléa est réalisée par traitement SIG en croisant le modèle numérique de terrain (MNT) terrestre et la cote de submersion calculée.

3.3.1. Préparation du MNT

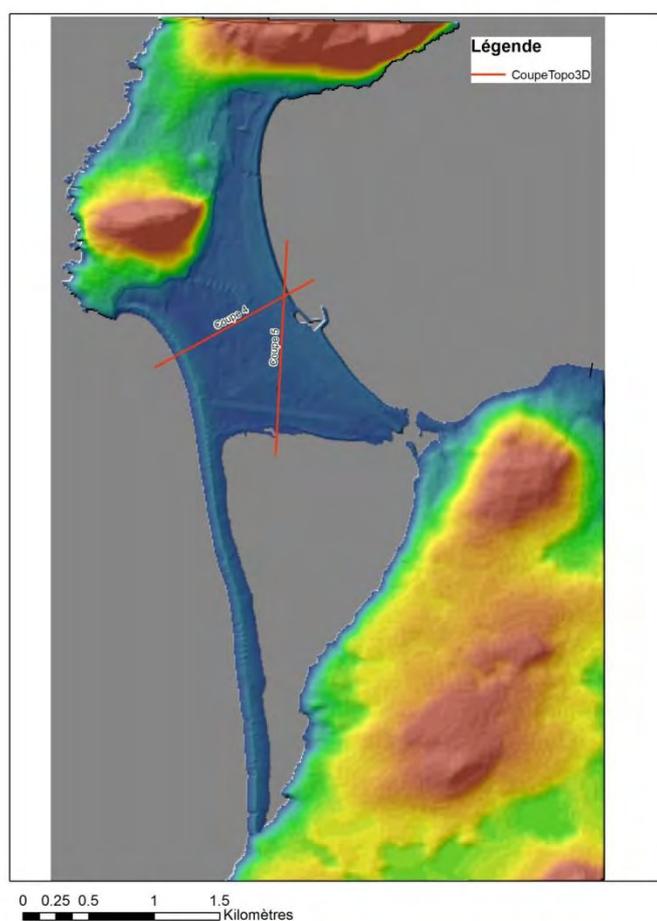
Le MNT de référence à Saint-Pierre et Miquelon étant celui de la BD Alti de l'IGN, la résolution de 25m est insuffisante pour cartographier précisément la submersion. Par ailleurs des artefacts sont connus comme à Miquelon où la pente est inversée sur ce MNT par rapport à la réalité terrain.

La première démarche a été de faire réaliser par l'IGN un modèle numérique de surface (MNS) sur l'ensemble de l'archipel par restitution photogrammétrique en 3D des images épipolaires

³ <http://wwz.ifremer.fr/iowaga/>

Pléiades de mai 2012 au moyen du logiciel MICMAC. Le produit a été livré en différentes versions de résolutions variables de 5 à 0,5m. Si ce MNS MICMAC présente l'intérêt de couvrir l'intégralité de l'archipel à une très bonne résolution, sa précision s'est avérée localement insuffisante, en particuliers sur les bourgs de Miquelon et de St Pierre où le terrain était restitué plus haut que dans la réalité et limitait la submersion réelle de ces secteurs.

Une seconde méthode a donc été appliquée en complément sur les bourgs de St Pierre et de Miquelon, consistant à rééchantillonner la grille issue de la BD Alti de l'IGN avec les points levés au GPS centimétrique par la DTAM (Annexe 3). Il en résulte une maille à une résolution de 10m plus fidèle à la réalité terrain (Illustration 11).



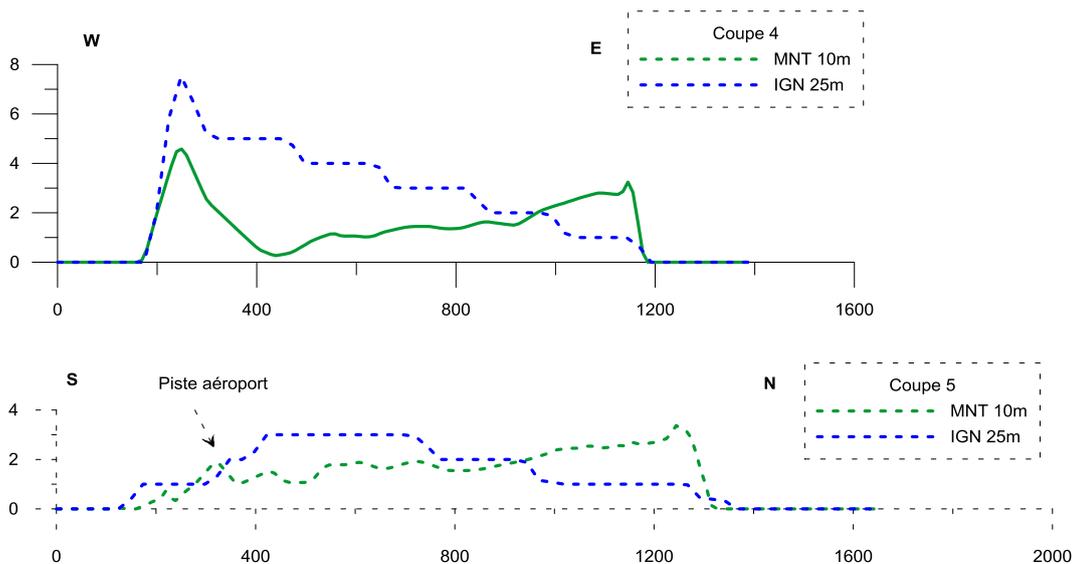


Illustration 11 – MNT 10m à Miquelon et coupe associées

C'est donc le MNT BRGM à 10m qui a été utilisé pour les bourgs de St Pierre et de Miquelon et le MNS MICMAC à 2,5m pour le reste des secteurs sensibles cartographiés.

3.3.2. Cartographie de l'aléa de référence et 2100

A partir de ces modèles numériques d'élévation, les isolignes correspondant aux niveaux d'eau ont été extraites afin de cartographier la limite de submersion par débordement et par franchissement calculé.

A noter que dans les zones de franchissement par paquets de mer si l'altitude théorique calculée n'est pas représentée sur le terrain ou alors très éloignée de la mer, une estimation à dire d'expert de la limite du jet de rive a été réalisée en considérant les caractéristiques de la houle et la configuration du site (topographie, obstacles et type d'occupation du sol).

Les résultats sont présentés sous la forme d'une carte au 1/5000 (Annexe 4 et Annexe 5) présentant la limite de submersion pour l'aléa actuel et l'aléa 2100 avec une cartographie distincte pour la submersion par débordement de celle par franchissement (Illustration 12).

Les couches SIG produites sont livrées au format *shapefile* lisible sous ArcGis et QGis avec une fiche de métadonnée associée.

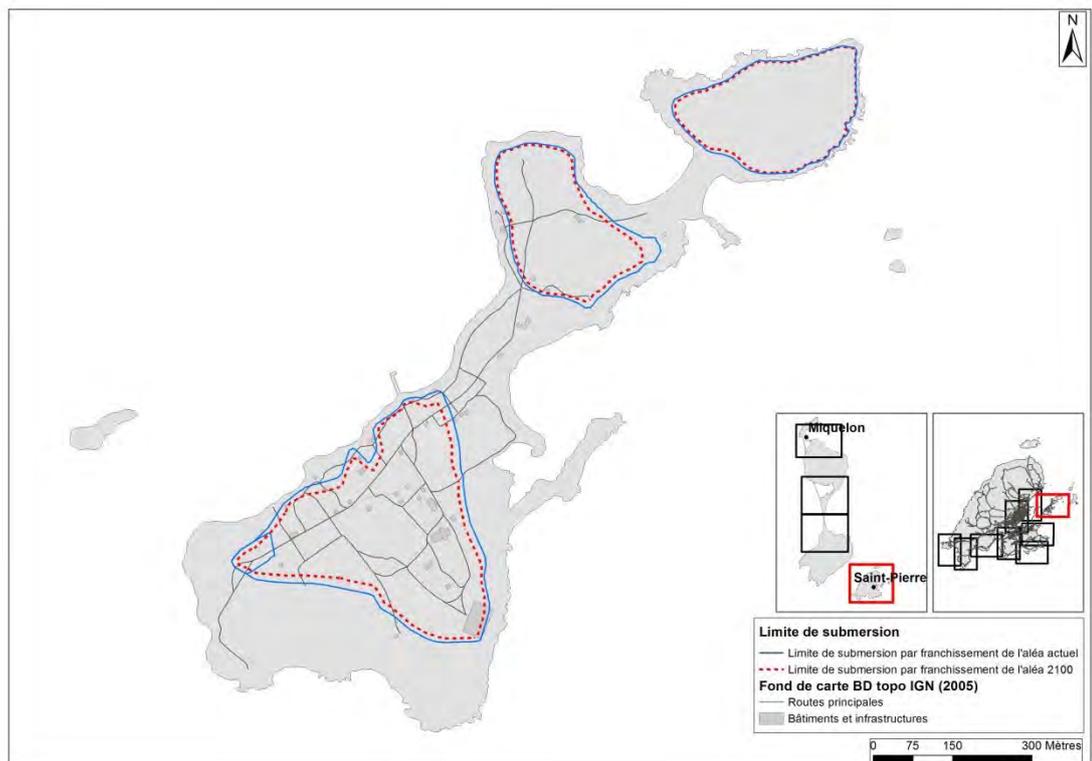
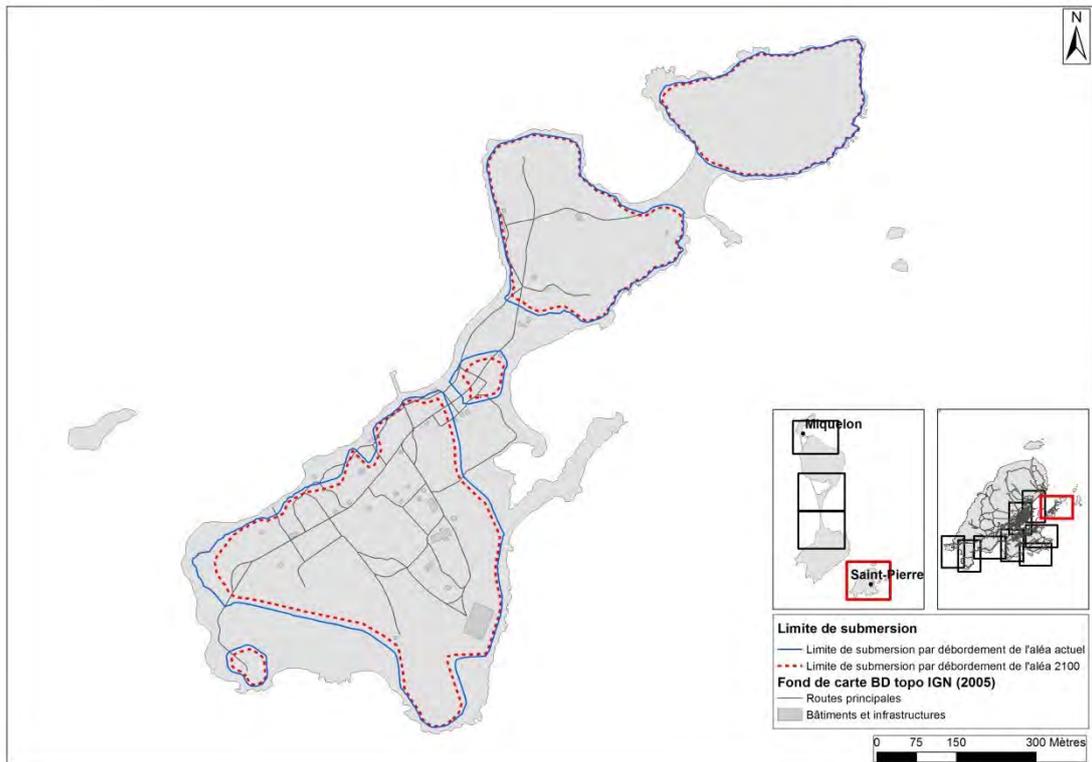


Illustration 12 – Exemple de cartographie de la limite de submersion marine par débordement (haut) et franchissement (bas) pour les aléas actuel et 2100 sur l'île aux Marins

4. Conclusion

Cette étude a donc permis de calculer et de cartographier les aléas recul du trait de côte et submersions marines à l'échelle de 1/5000 sur les sites définis comme prioritaires pour les aléas actuels et futurs.

L'aléa recul du trait de côte a été estimé sur la base de l'évolution historique de 1952 à 2012 à partir des photographies aériennes et images satellites disponibles. Le trait de côte à différentes dates a été digitalisé et le recul a été traité au moyen du module DSAS du SIG ArcGis, ce qui permet d'automatiser le calcul le long de transects. L'aléa actuel a été qualifié par les différentes vitesses de recul moyen et cartographié sur la position du trait de côte de 2012. La position future du trait de côte a été estimée et cartographiée en fonction d'une projection linéaire de la tendance actuelle jusqu'en 2100. La limite de la méthode tient au fait que les aménagements futurs et l'adaptation des morphologies au changement climatique n'ont pas été pris en compte.

L'aléa submersion marine a été analysé selon deux processus distincts, à savoir la submersion par débordement (liée à la surcote de tempête dans les ports et étangs) et la submersion par franchissements de paquets de mer (rôle du jet de rive) dans les zones exposées aux vagues. Une analyse statistique en valeurs extrêmes a permis de calculer les niveaux d'eau de référence ainsi que les caractéristiques de vagues au large pour une occurrence centennale. Les cotes de submersions ont été calculées pour l'aléa actuel et l'aléa futur en prenant en compte l'élévation relative du niveau de la mer en lien avec le changement climatique et la subsidence géologique de l'archipel. L'altitude atteinte par le jet de rive suite au déferlement des vagues a été estimée au moyen de formules paramétriques de run-up. Des modèles numériques d'élévation ont également été produits afin de croiser les cotes de submersions avec la topographie terrestre et cartographier les limites de submersions pour les aléas actuels et 2100. Des limitations sont constatées sur l'application des formules de run-up et la qualité des modèles numériques de terrain. Les données lidar de type Litto3D (non disponibles actuellement) permettront à l'avenir de préciser ces limites de submersions.

La suite de l'étude consiste à caractériser et cartographier l'aléa tsunami sur la base de scénarios en champ proche (Grands Bancs) et lointain (séisme de Lisbonne notamment).

5. Bibliographie

BLEIN O., RABU D., COURBOULEIX S. et AUDRU J.-C. (2015) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Pierre et Miquelon. Orléans : BRGM, 107 p. Carte Géologique par Blein O., Rabu D., Courbouleix S. avec la collaboration d’Audru J.-C.

CETMEF – CETE Méditerranée – CETE de l’Ouest (Sept. 2012). Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux – Outre-Mer. Rapport CETMEF/DI, 160 pages.

DE LA TORRE Y., FALGUIÈRE S., LE ROY M. (2013) – VULIT SPM1 - Vulnérabilité du littoral de Saint Pierre et Miquelon face aux risques côtiers. Phase 1 : État des lieux de la dynamique côtière et des enjeux. Rapport final. BRGM/RP-62935-FR, 70p.

DE LA TORRE Y. et LOUZE J., collab. DEWEZ T. (2008) - Méthodologie pour l’évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion. Phase 2. BRGM/RP-56589-FR, 36 p + annexes.

IPCC (2013) - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G. - K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi: 10.1017/CBO9781107415324.

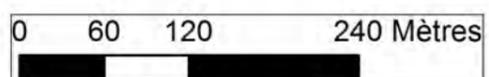
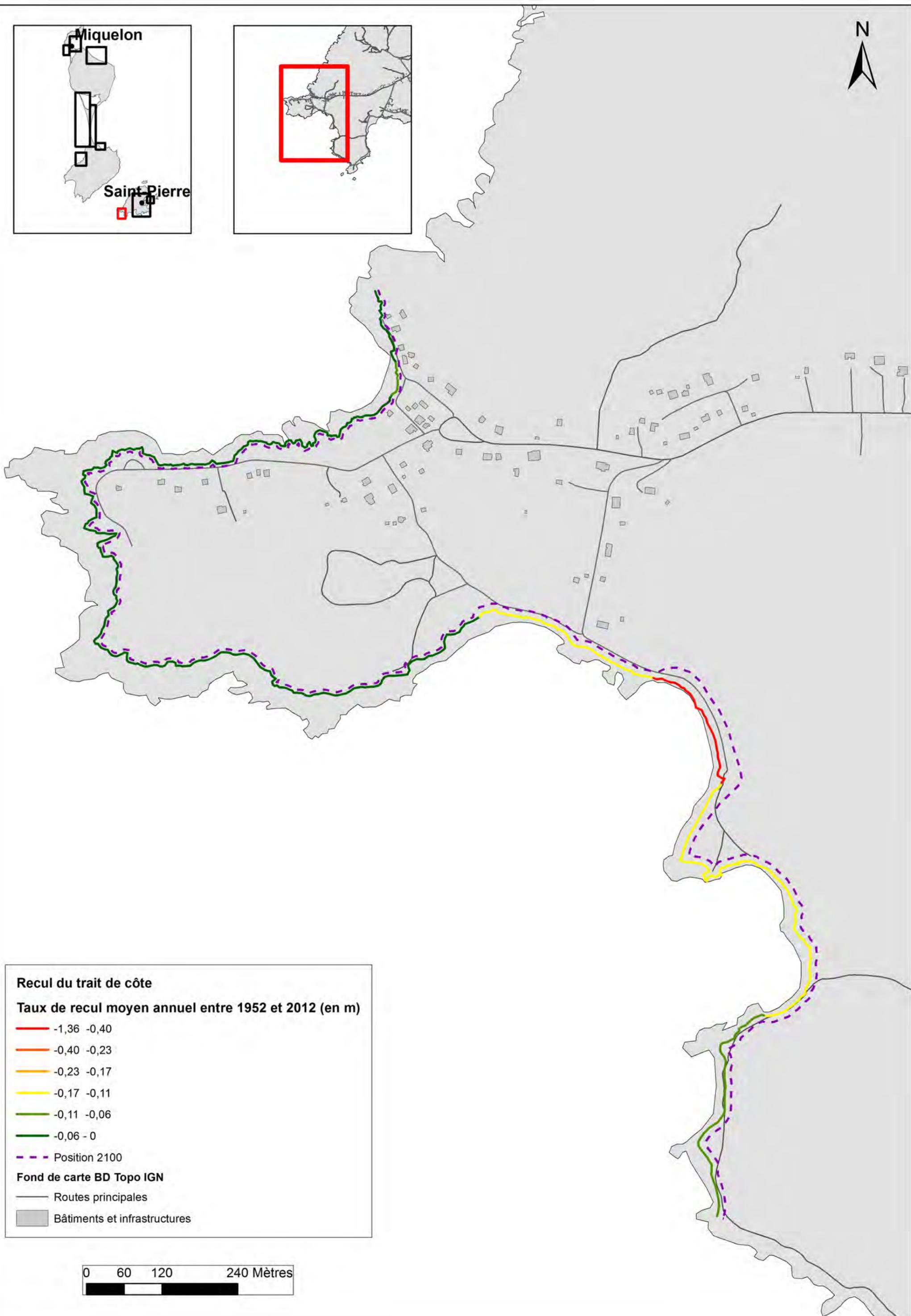
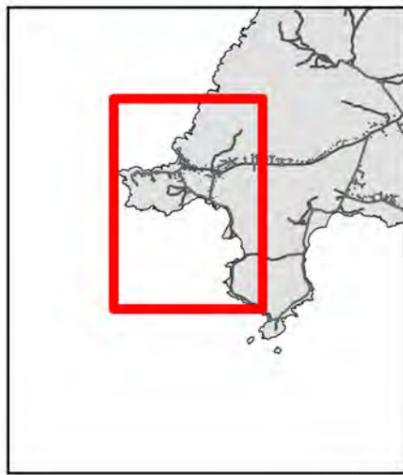
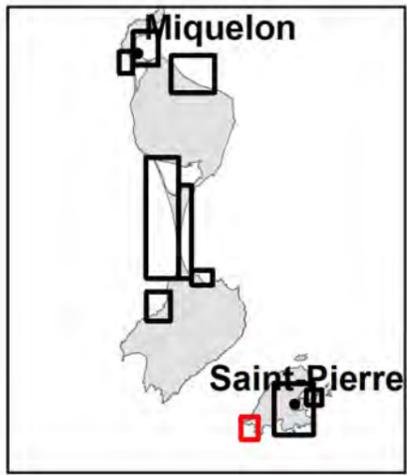
MEDDE (2014) - Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169 p.

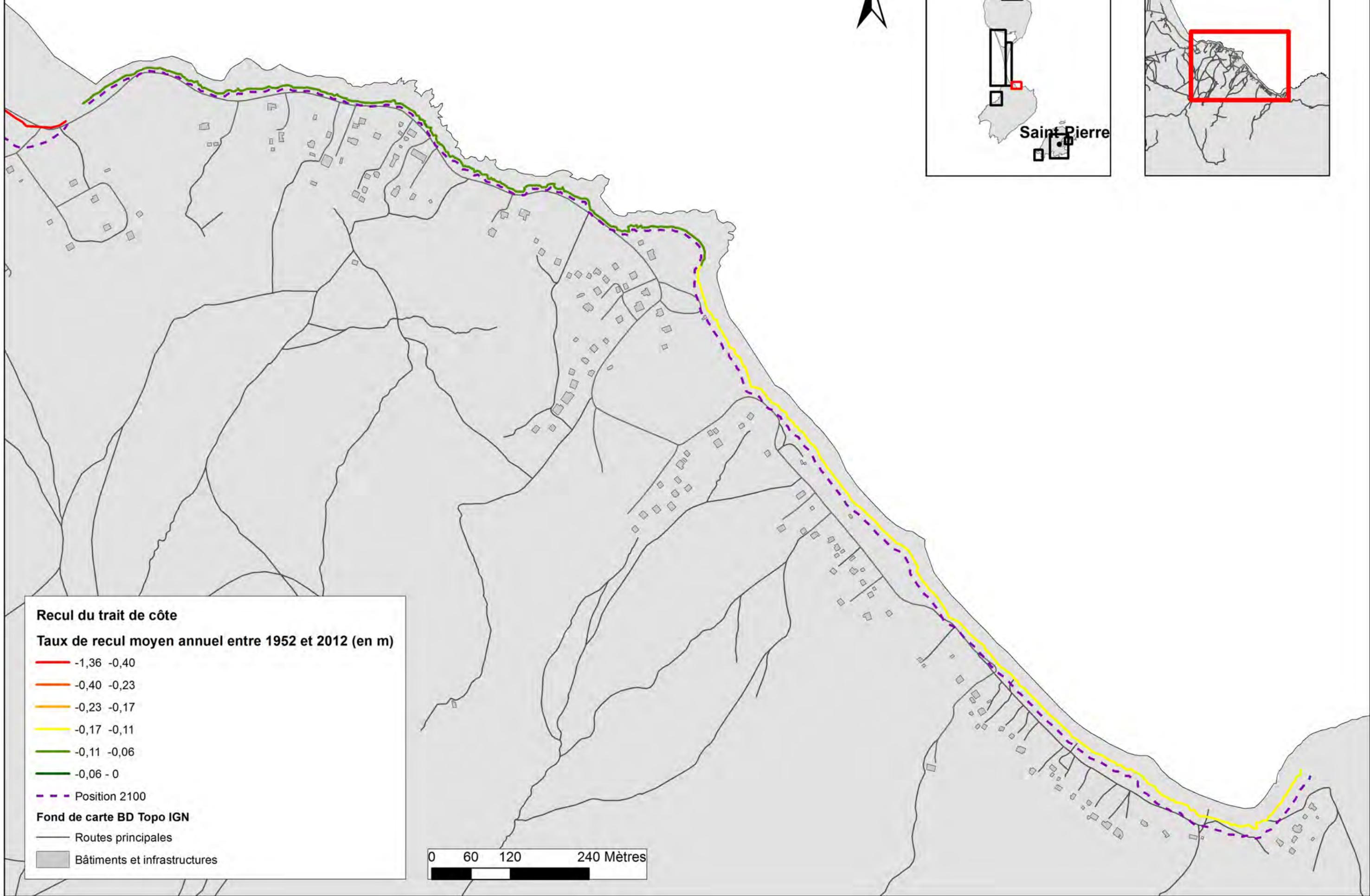
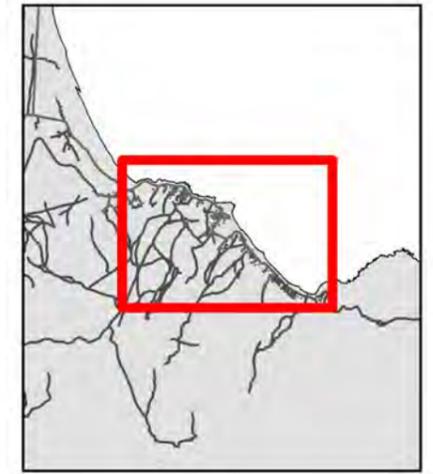
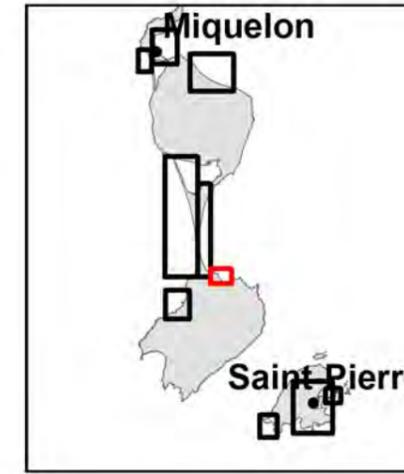
SHOM (2014) – Références altimétriques maritimes, Edition 2014.114 p.

STOCKDON H. F., HOLMAN R. A., HOW P. A., SALLENGER A. H. JR. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runup, Coastal Engineering, 53, pp. 573-588.

Annexe 1

Cartographie au 1 : 5 000 de l'aléa recul du trait de côte





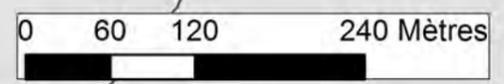
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

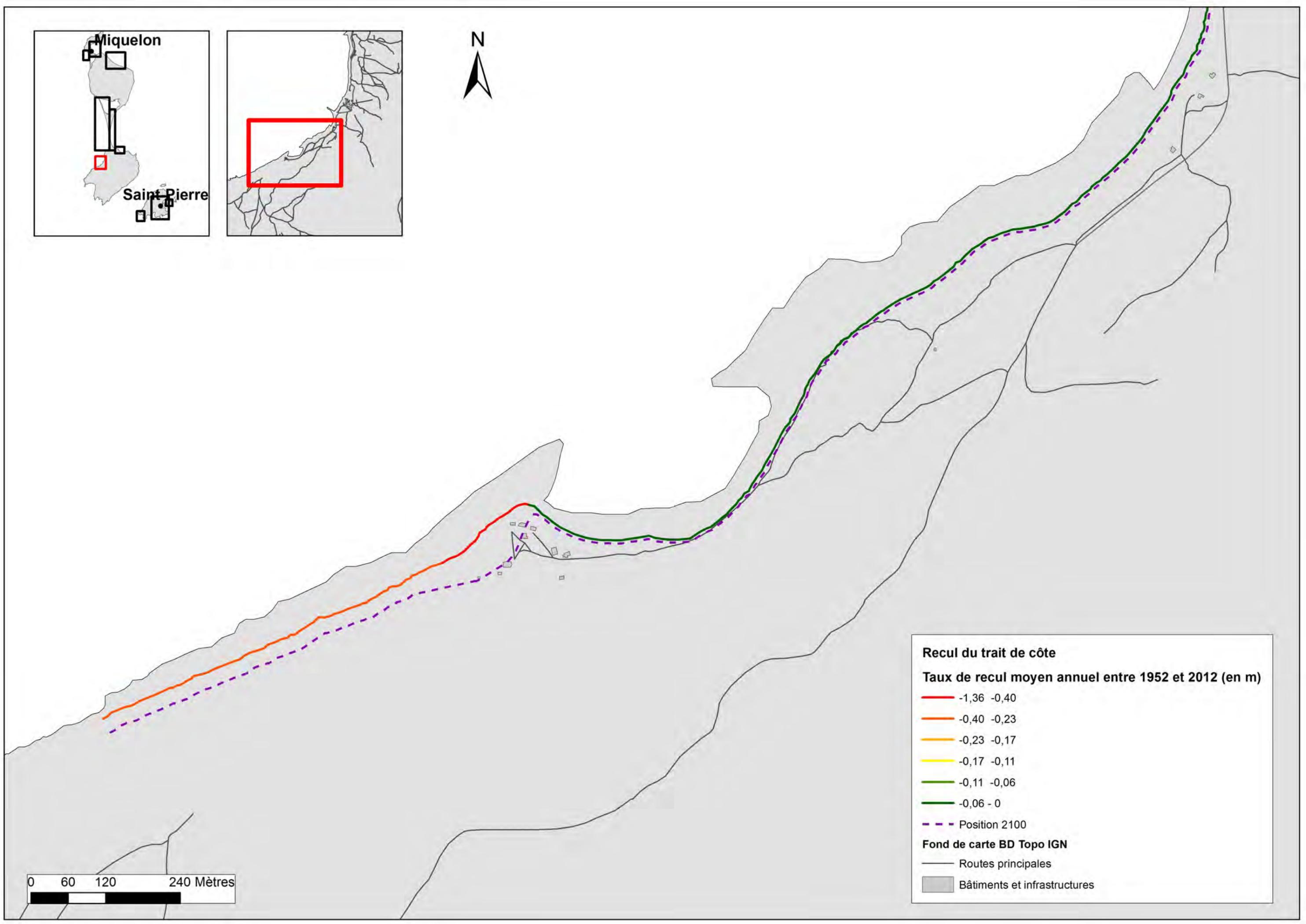
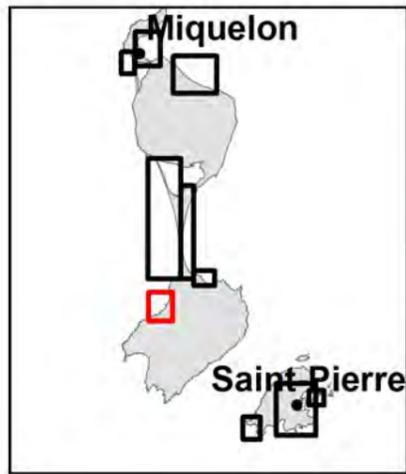
- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0

- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





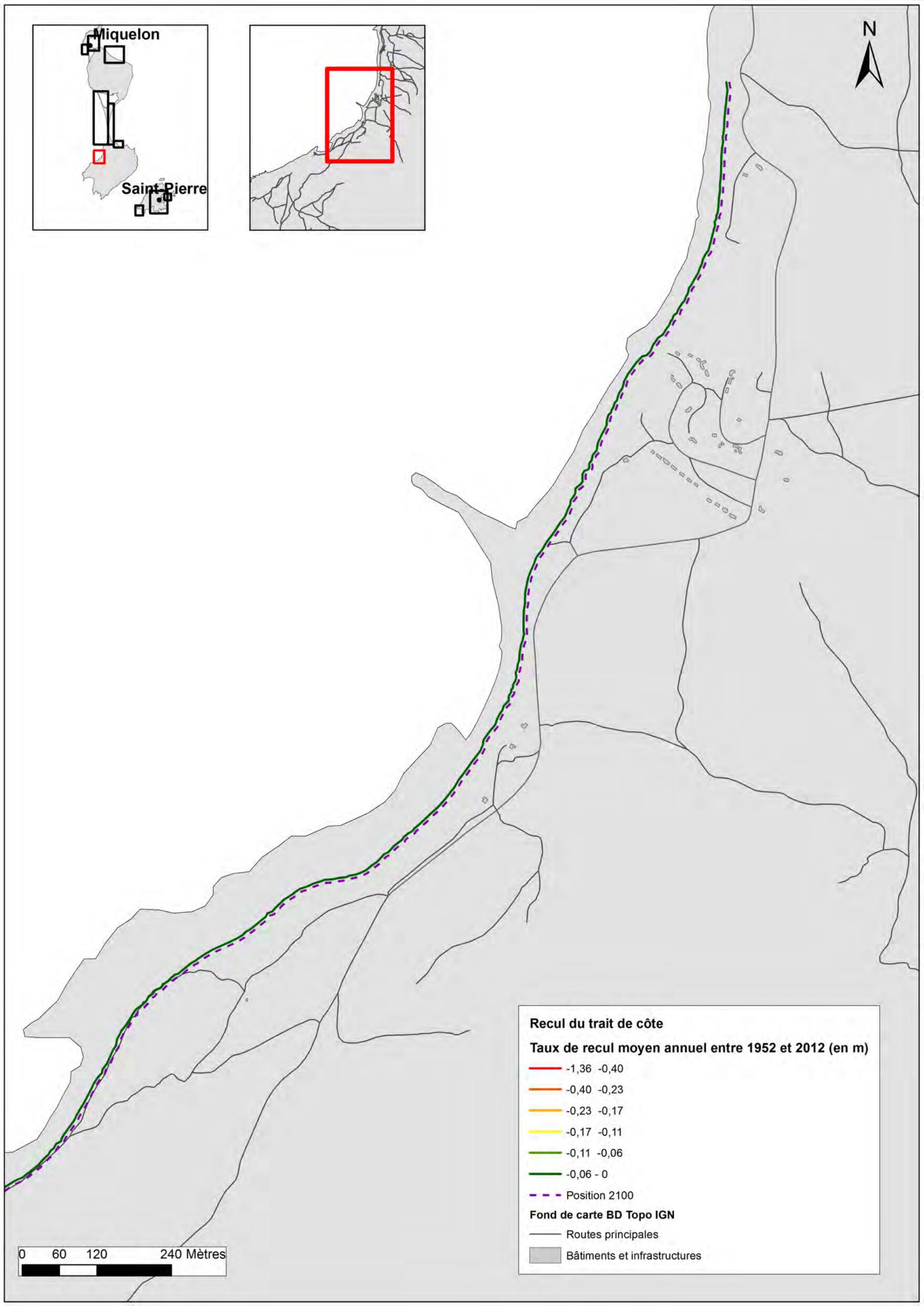
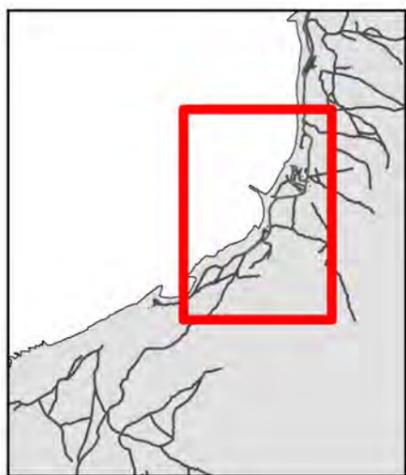
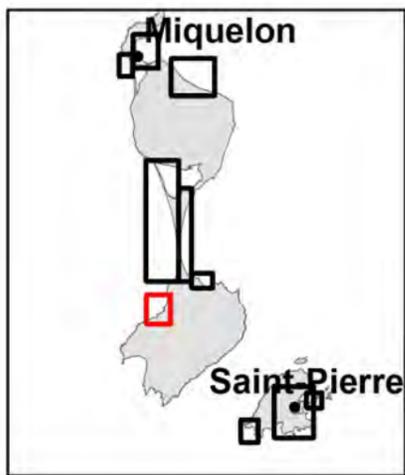
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

	-1,36 -0,40
	-0,40 -0,23
	-0,23 -0,17
	-0,17 -0,11
	-0,11 -0,06
	-0,06 - 0
	Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

	Routes principales
	Bâtiments et infrastructures





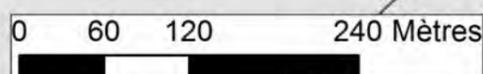
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

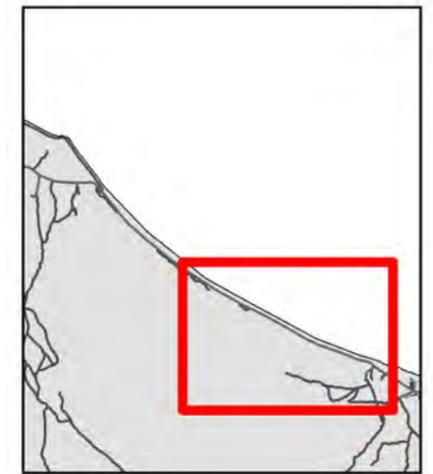
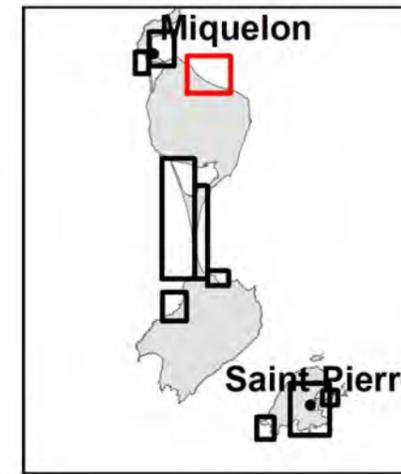
- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0

- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





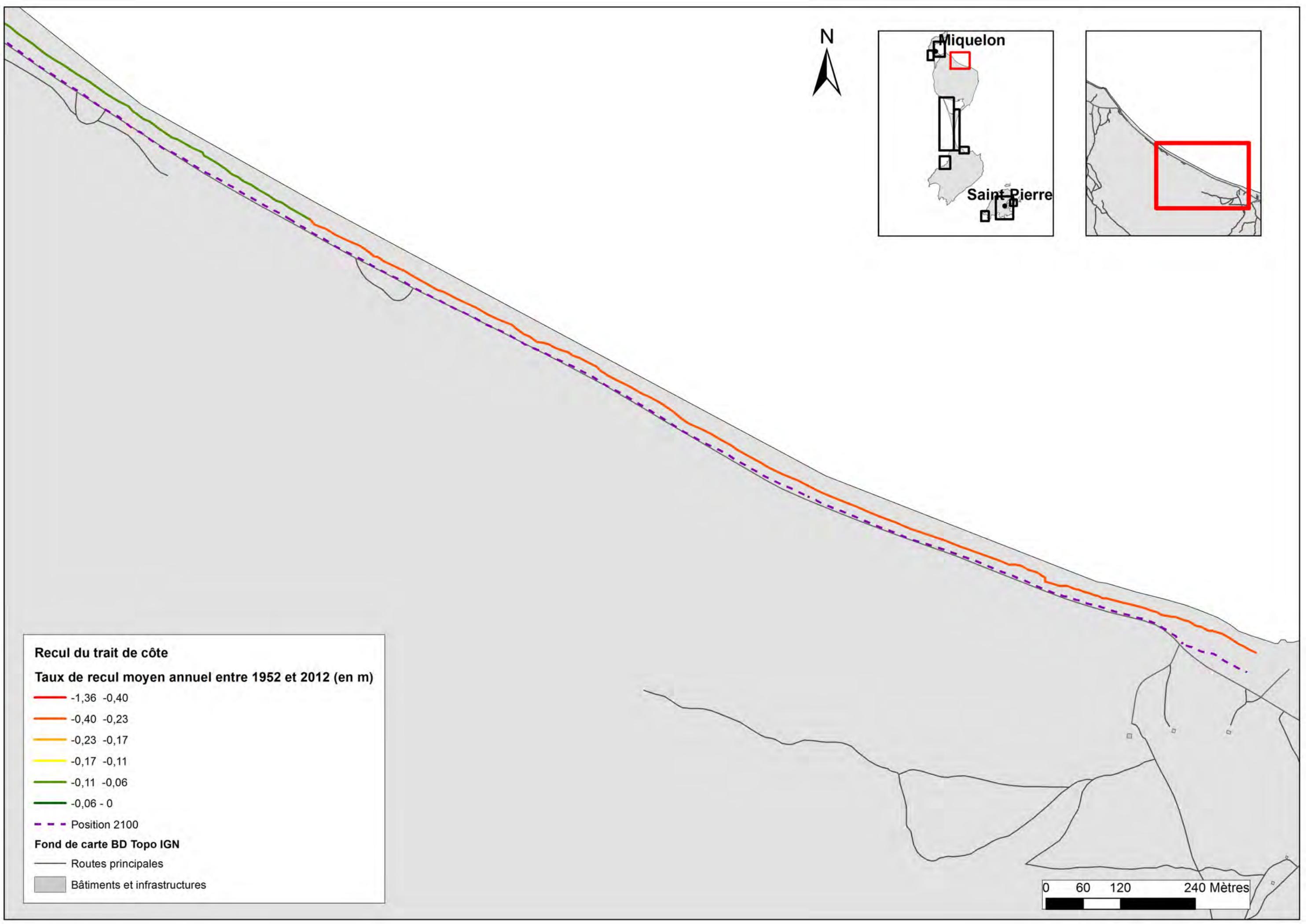
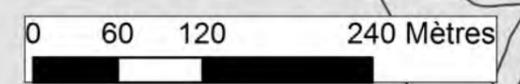
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

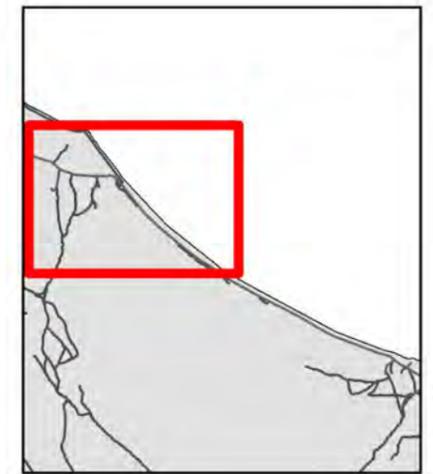
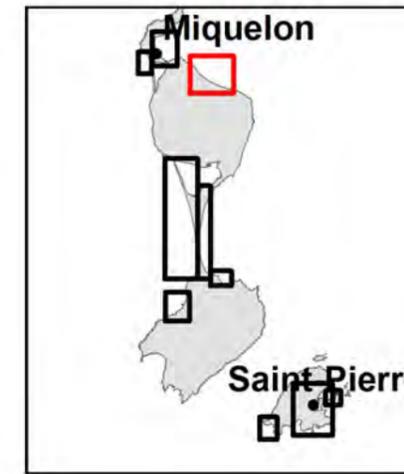
- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0

- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





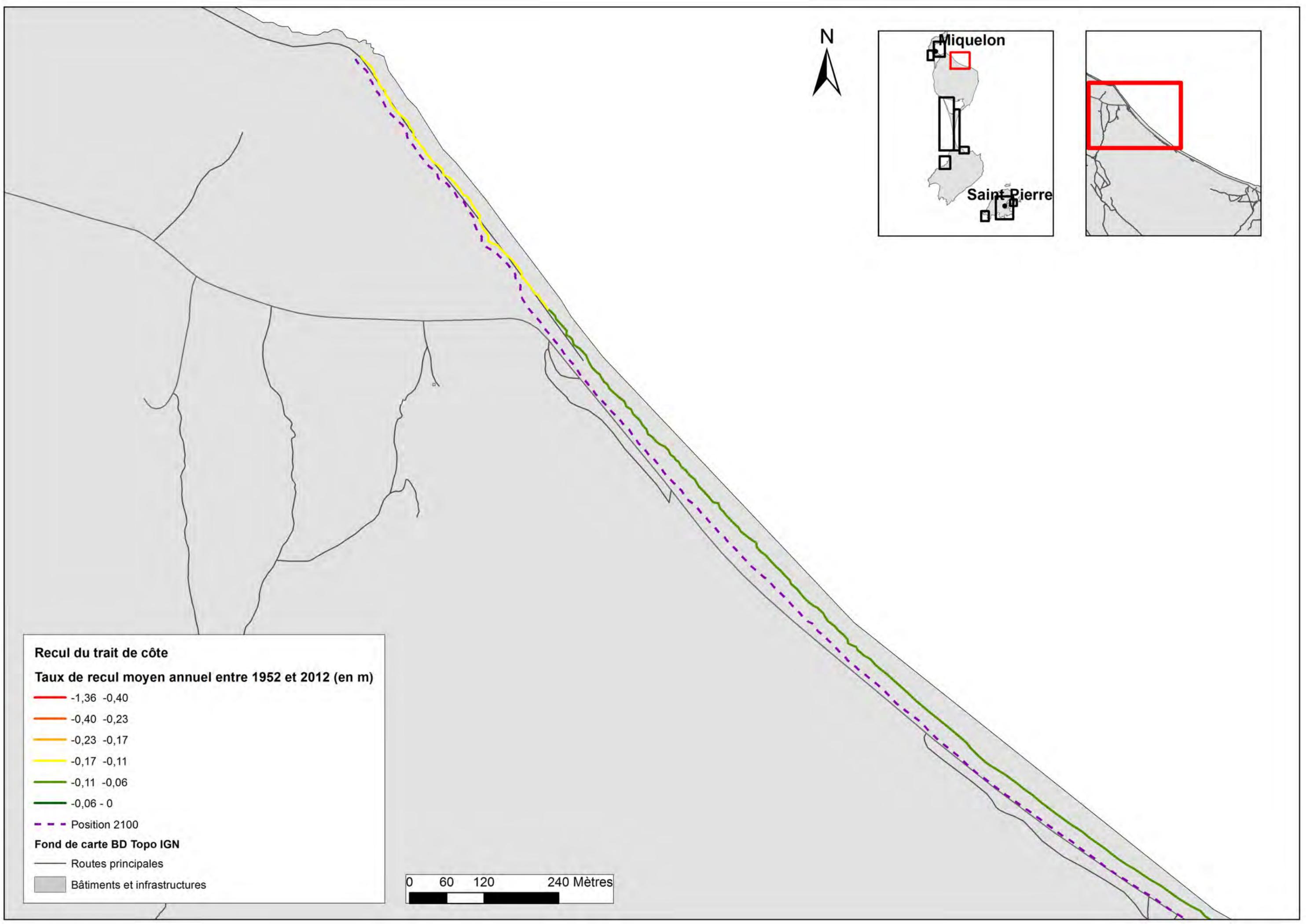
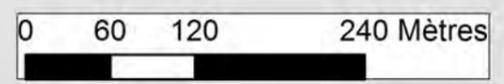
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

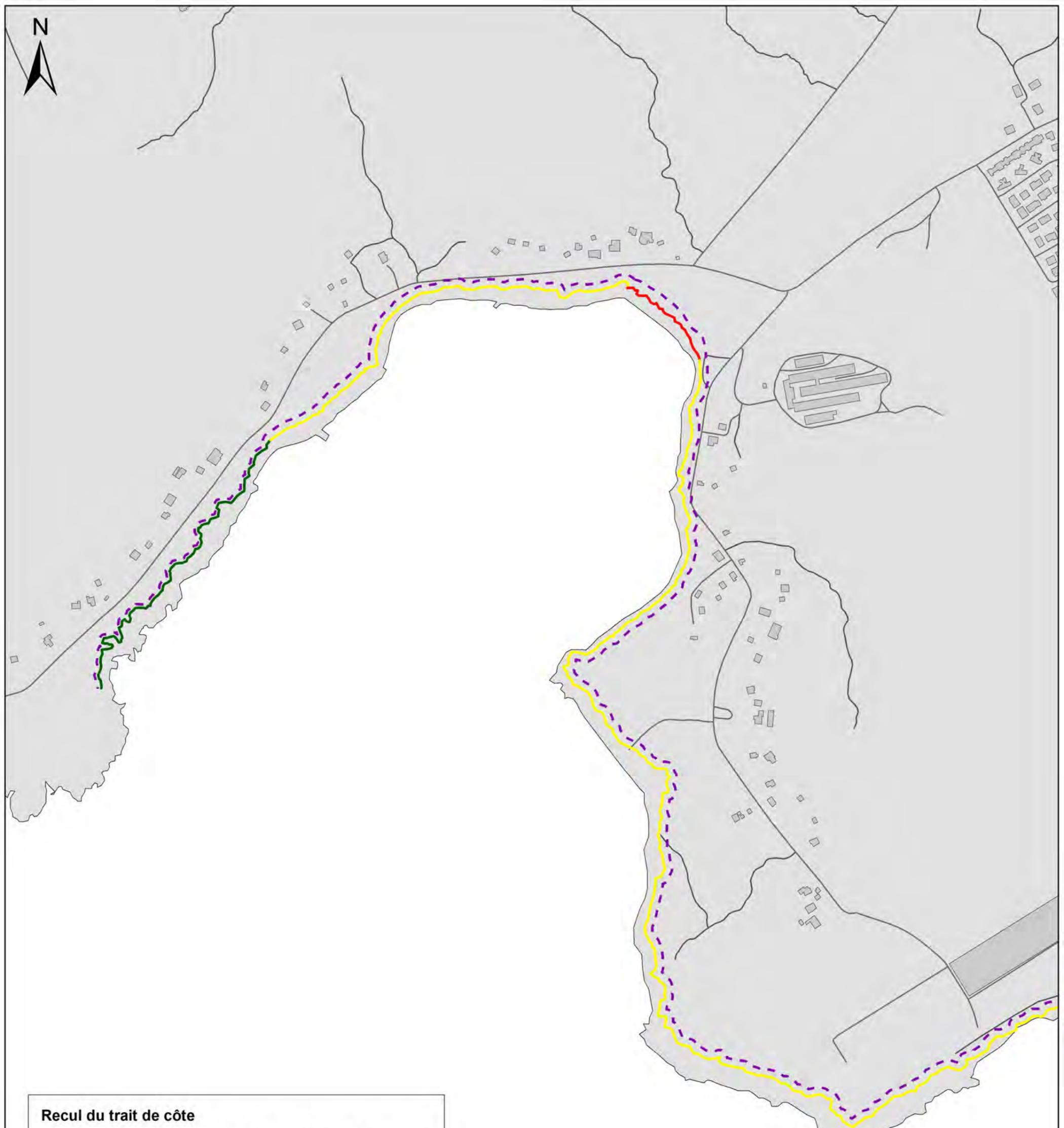
- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0

- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





Recul du trait de côte

Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

— -1,36 -0,40

— -0,40 -0,23

— -0,23 -0,17

— -0,17 -0,11

— -0,11 -0,06

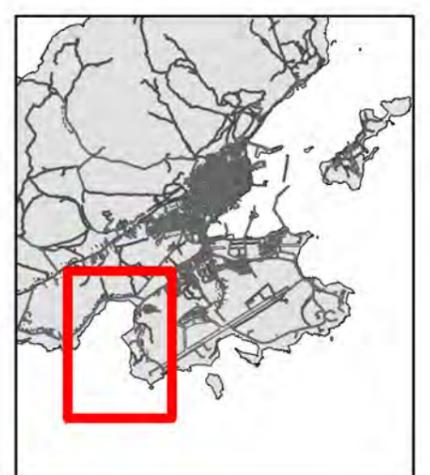
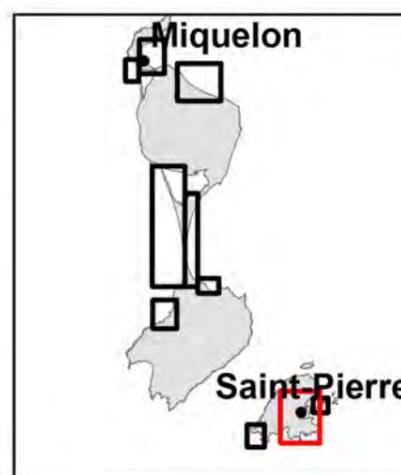
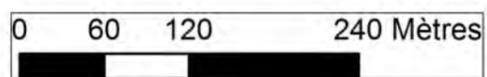
— -0,06 - 0

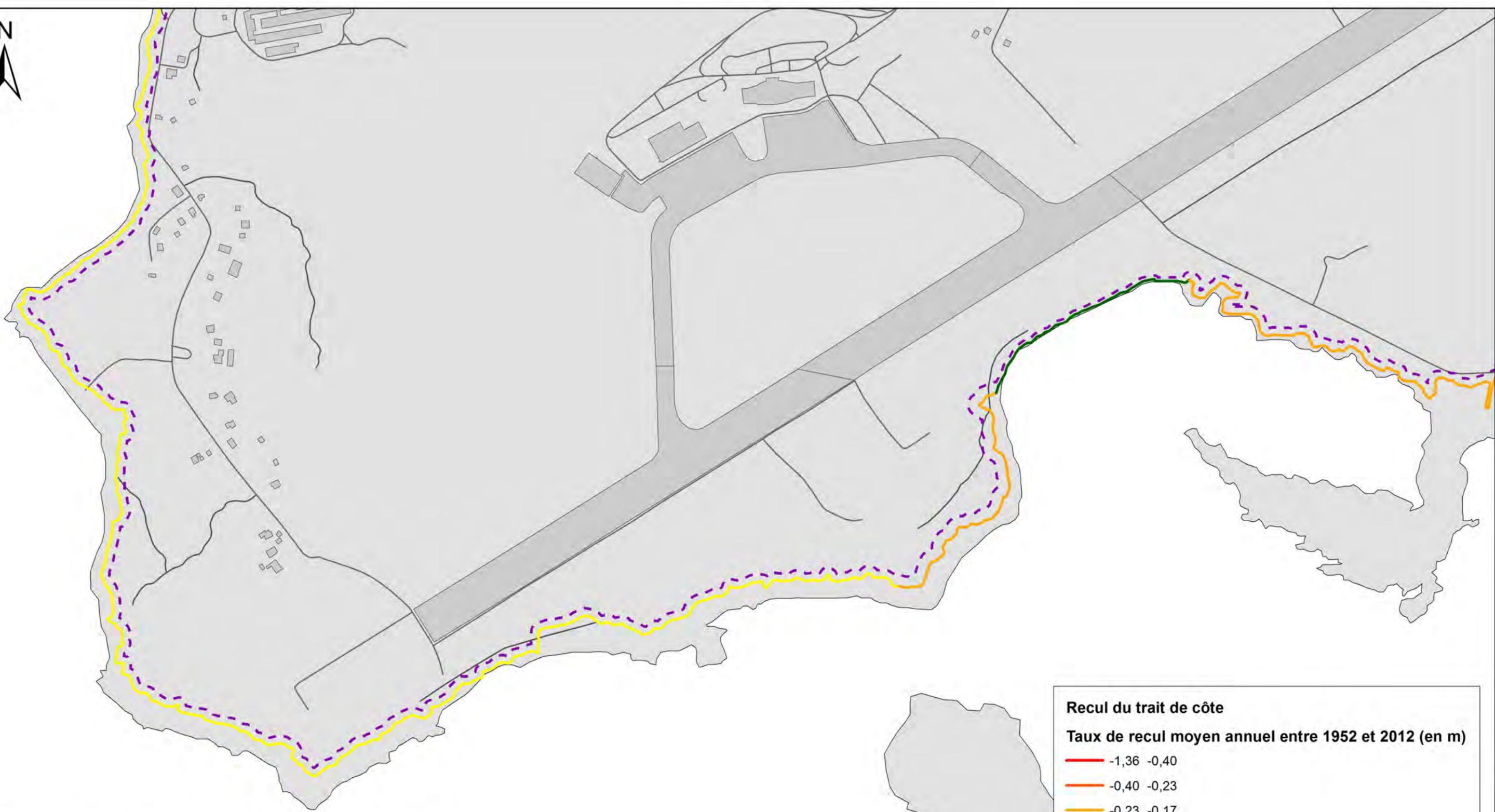
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

— Routes principales

■ Bâtiments et infrastructures





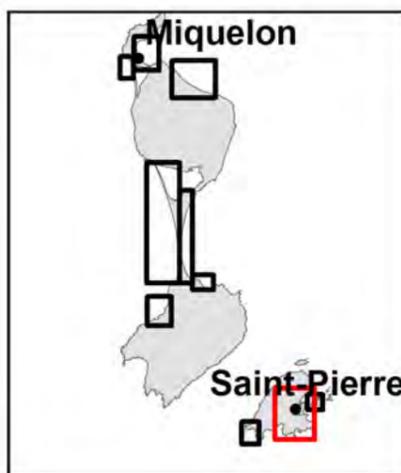
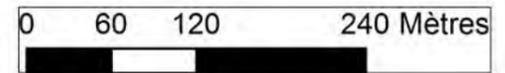
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

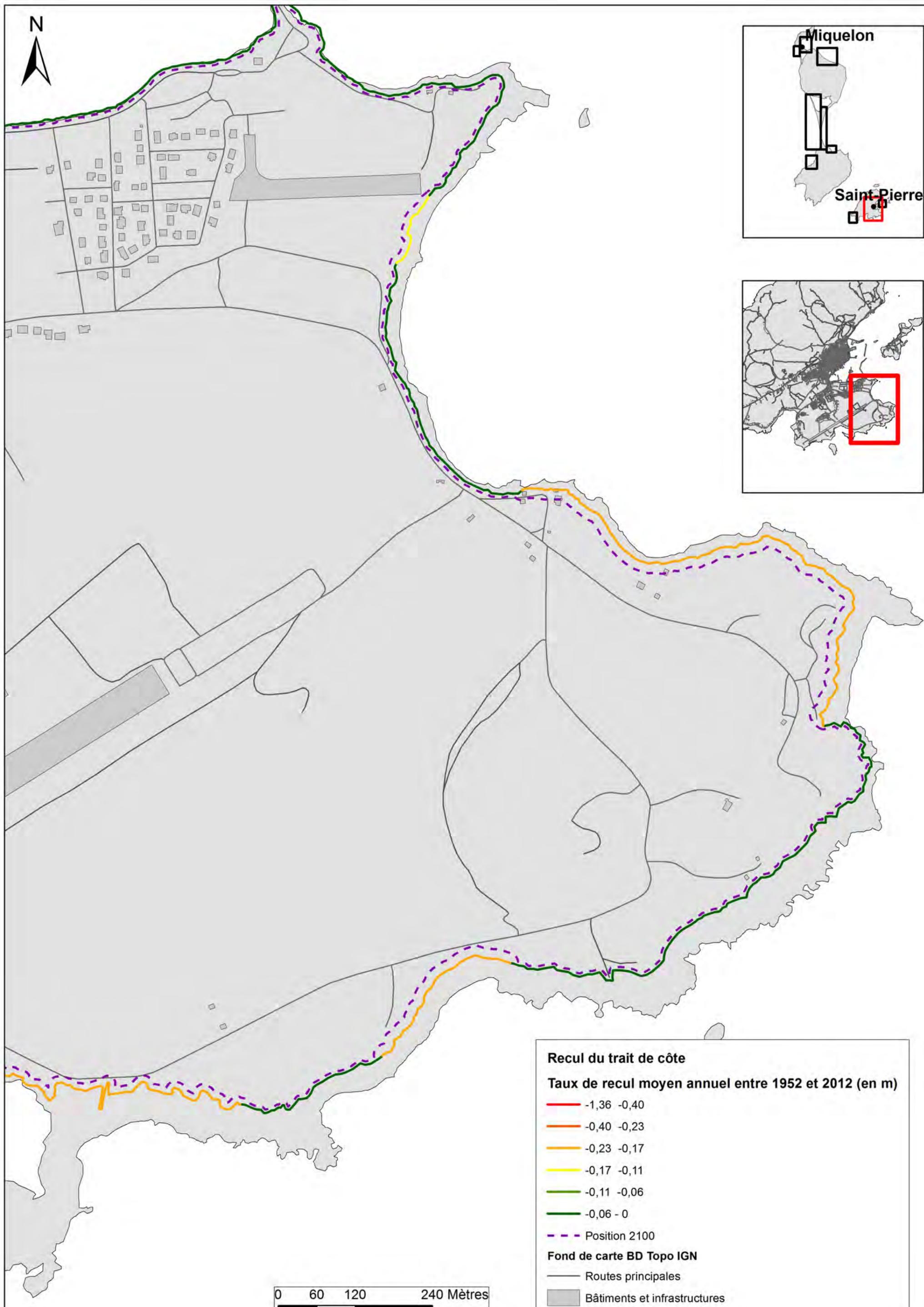
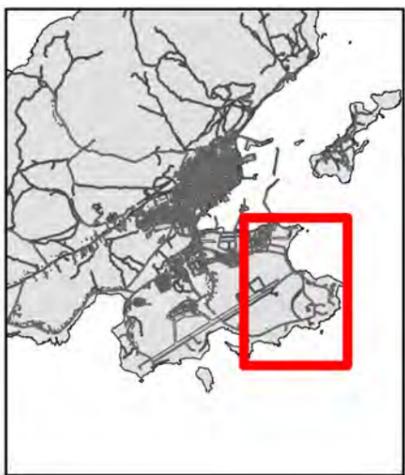
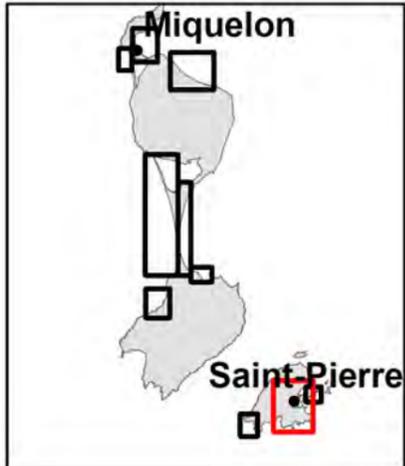
- 1,36 -0,40
- 0,40 -0,23
- 0,23 -0,17
- 0,17 -0,11
- 0,11 -0,06
- 0,06 - 0

--- Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



Recul du trait de côte

Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

— -1,36 -0,40

— -0,40 -0,23

— -0,23 -0,17

— -0,17 -0,11

— -0,11 -0,06

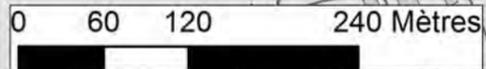
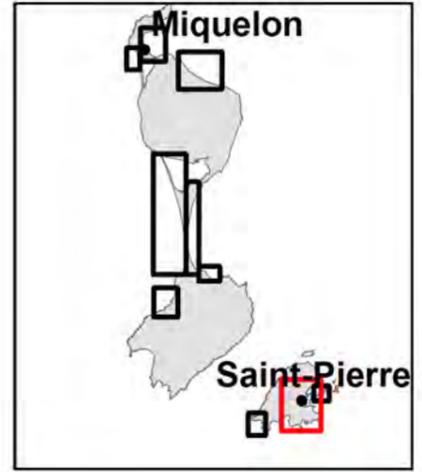
— -0,06 - 0

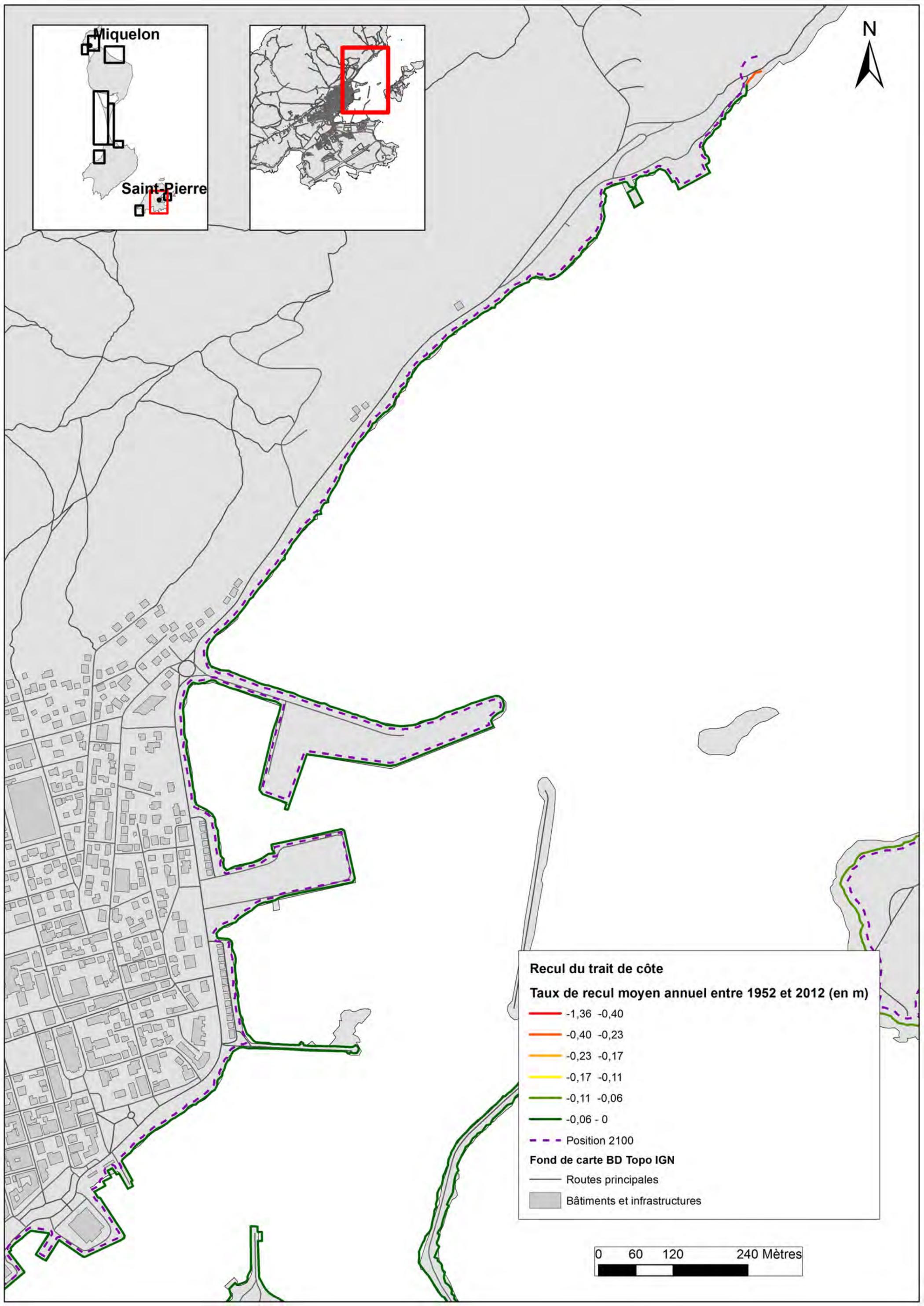
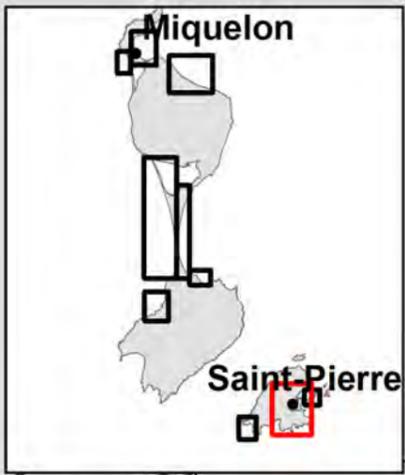
- - - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

— Routes principales

■ Bâtiments et infrastructures





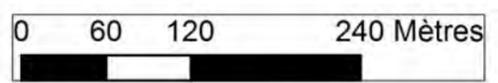
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

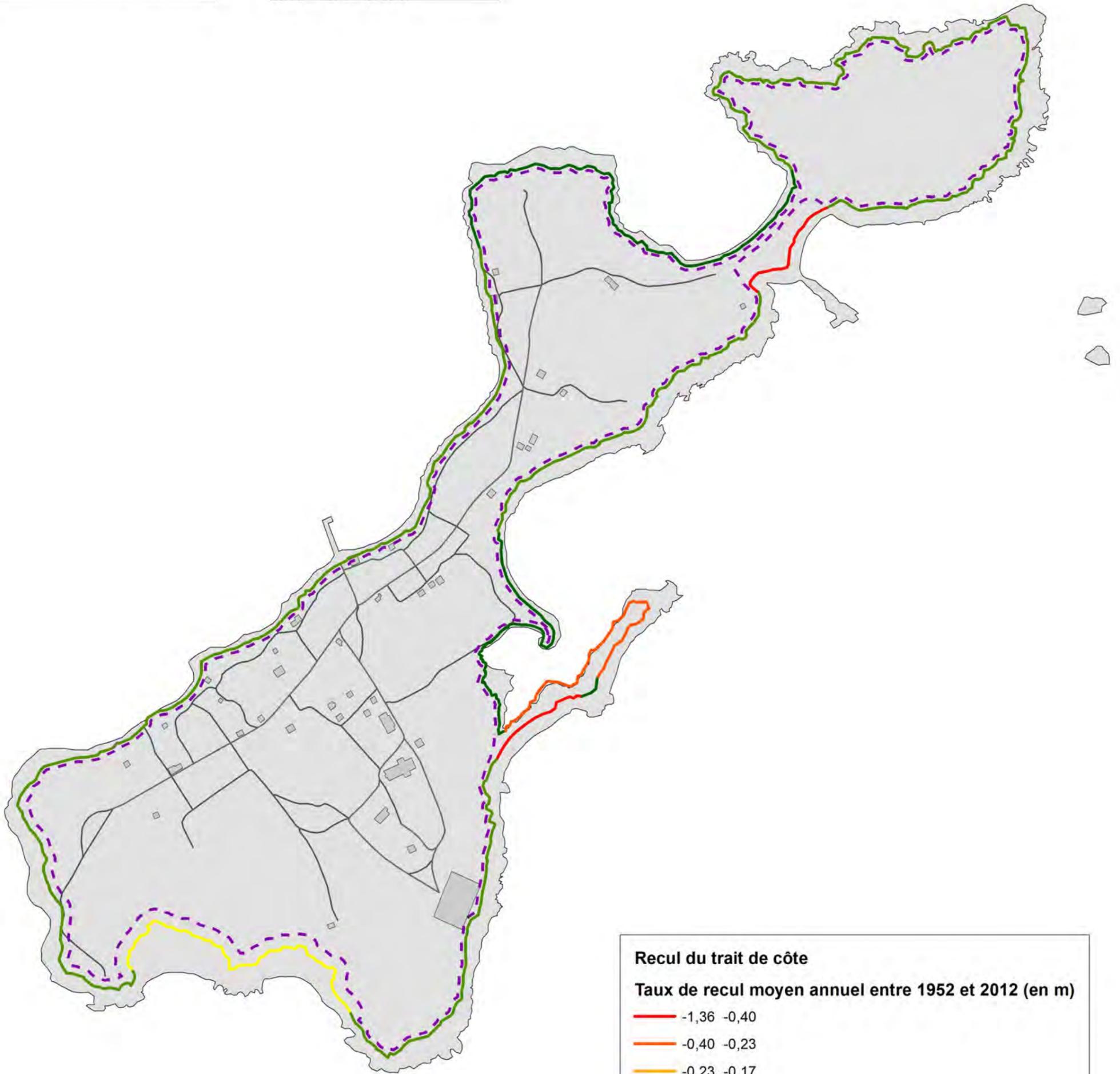
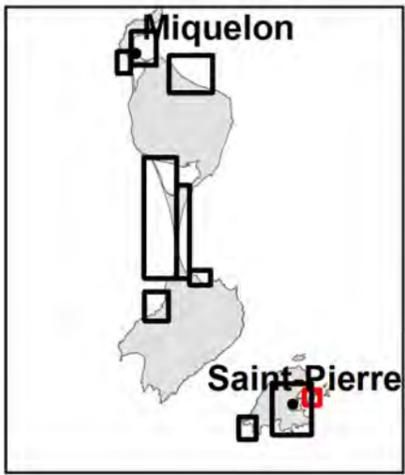
- 1,36 -0,40
- 0,40 -0,23
- 0,23 -0,17
- 0,17 -0,11
- 0,11 -0,06
- 0,06 - 0

--- Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





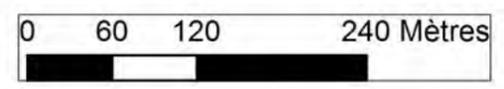
Recul du trait de côte

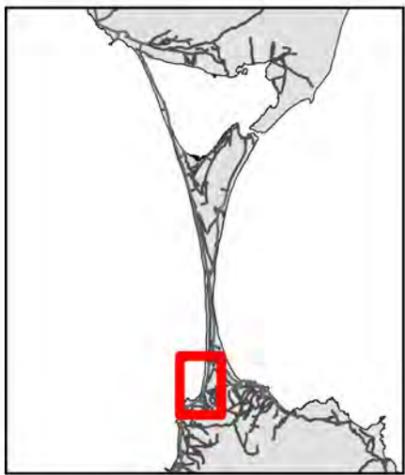
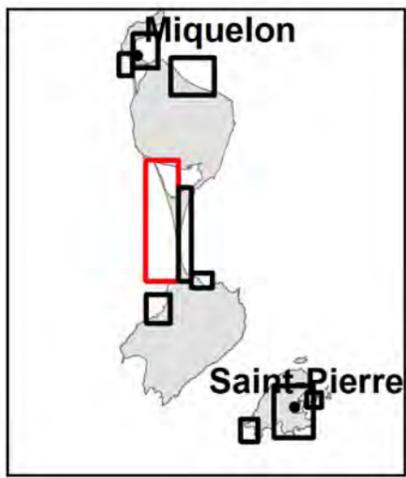
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





Recul du trait de côte

Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

— -1,36 -0,40

— -0,40 -0,23

— -0,23 -0,17

— -0,17 -0,11

— -0,11 -0,06

— -0,06 - 0

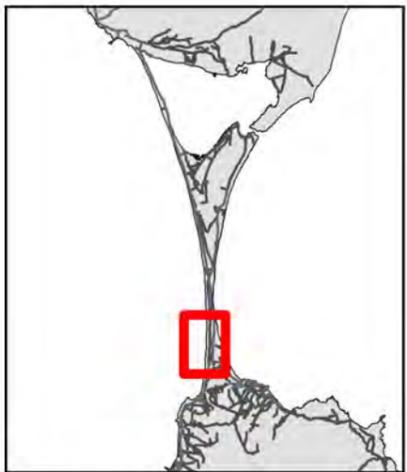
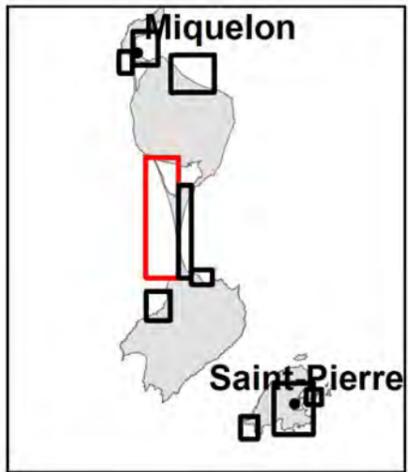
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

— Routes principales

■ Bâtiments et infrastructures

0 60 120 240 Mètres



Recul du trait de côte

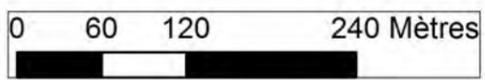
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

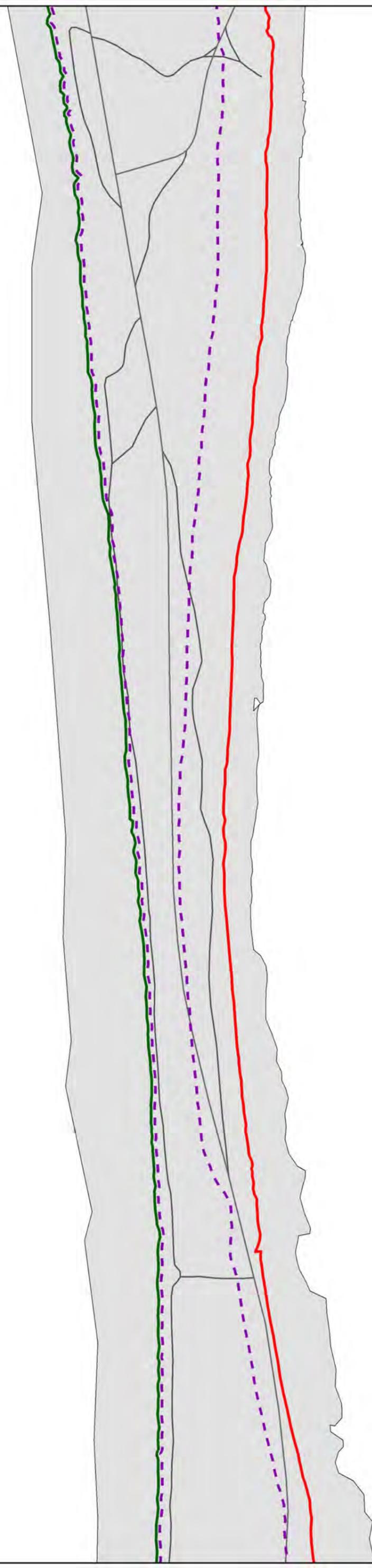
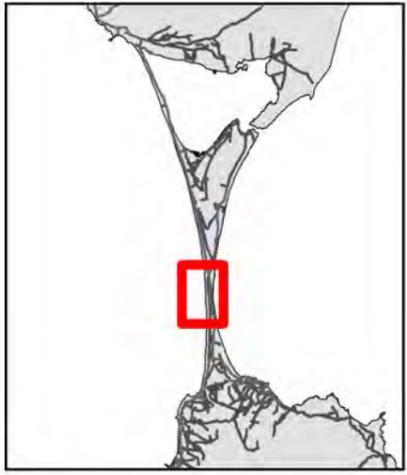
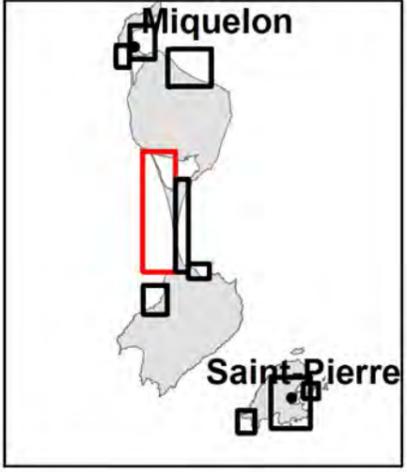


--- Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



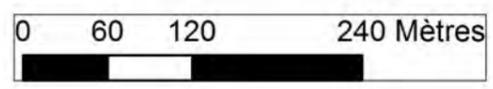


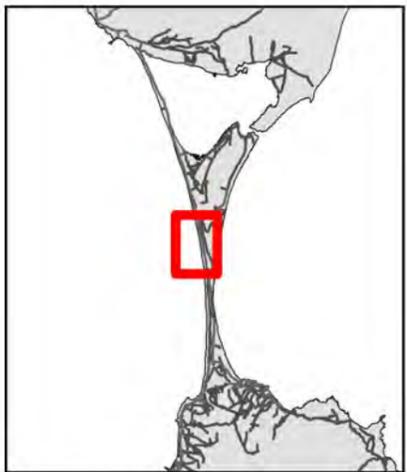
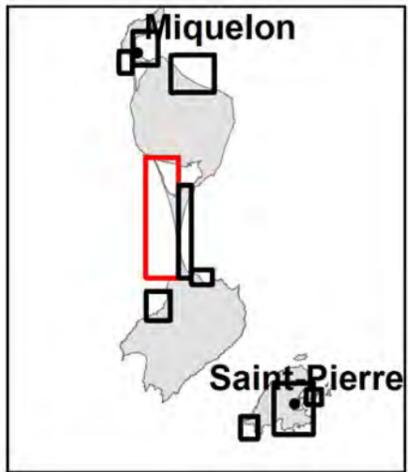
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

Red line	-1,36 -0,40
Orange line	-0,40 -0,23
Yellow line	-0,23 -0,17
Light green line	-0,17 -0,11
Green line	-0,11 -0,06
Dark green line	-0,06 - 0
Purple dashed line	Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

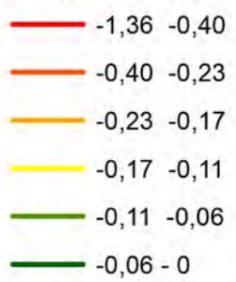
Grey line	Routes principales
Grey shaded area	Bâtiments et infrastructures





Recul du trait de côte

Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

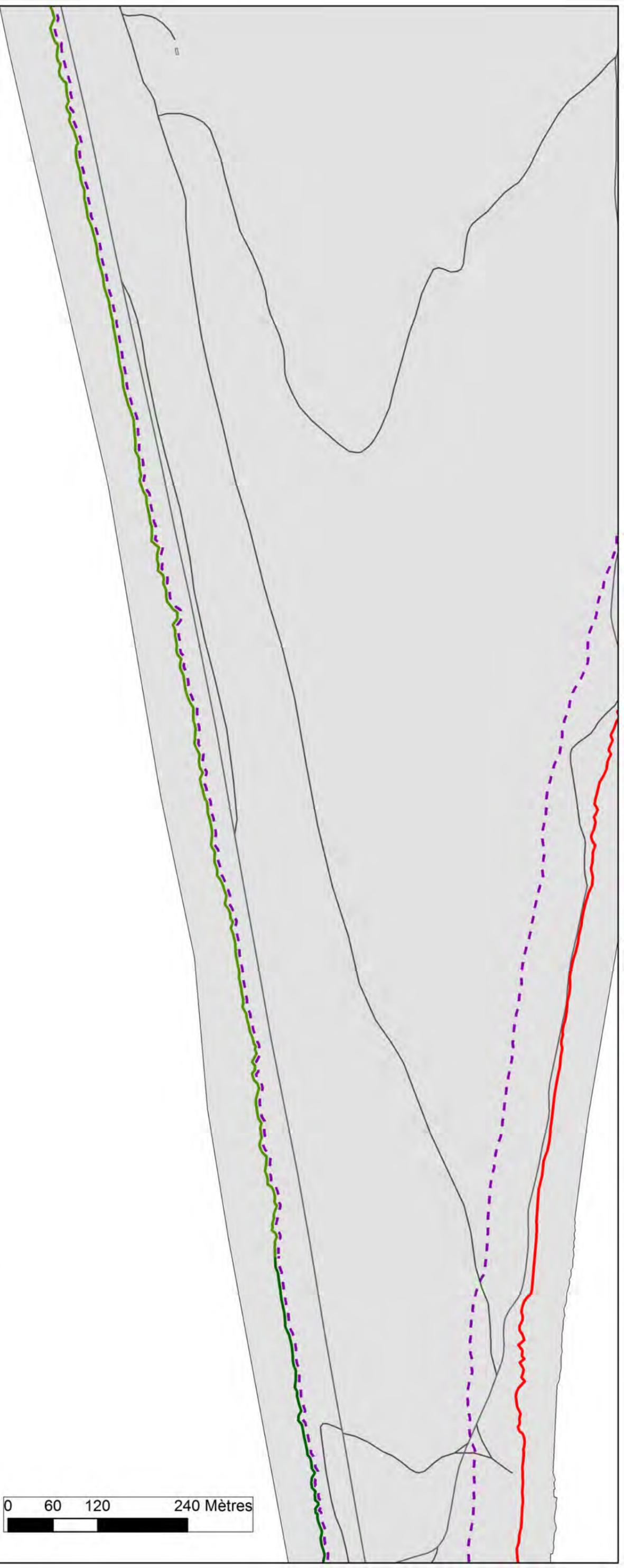
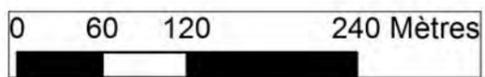


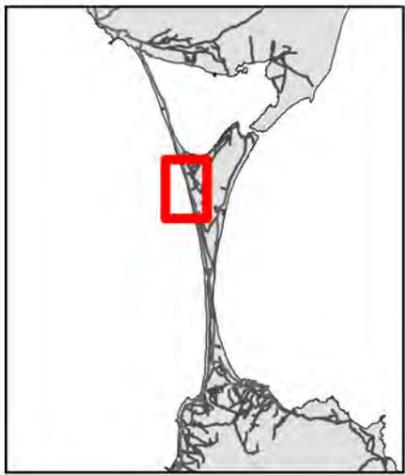
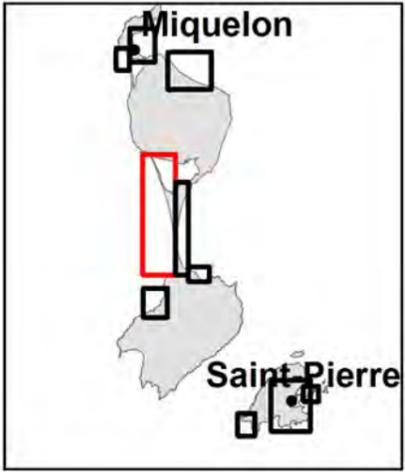
--- Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

— Routes principales

■ Bâtiments et infrastructures





Recul du trait de côte

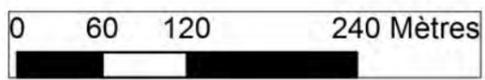
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

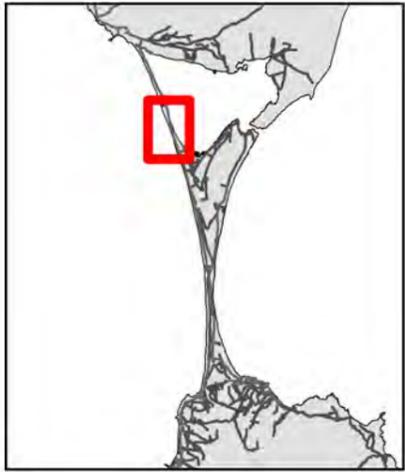
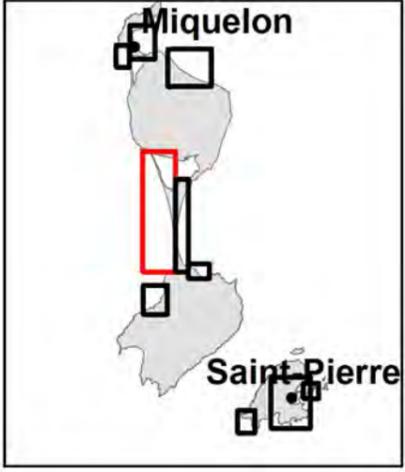
-  -1,36 -0,40
-  -0,40 -0,23
-  -0,23 -0,17
-  -0,17 -0,11
-  -0,11 -0,06
-  -0,06 - 0

 Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

-  Routes principales
-  Bâtiments et infrastructures





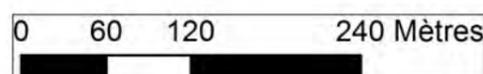
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

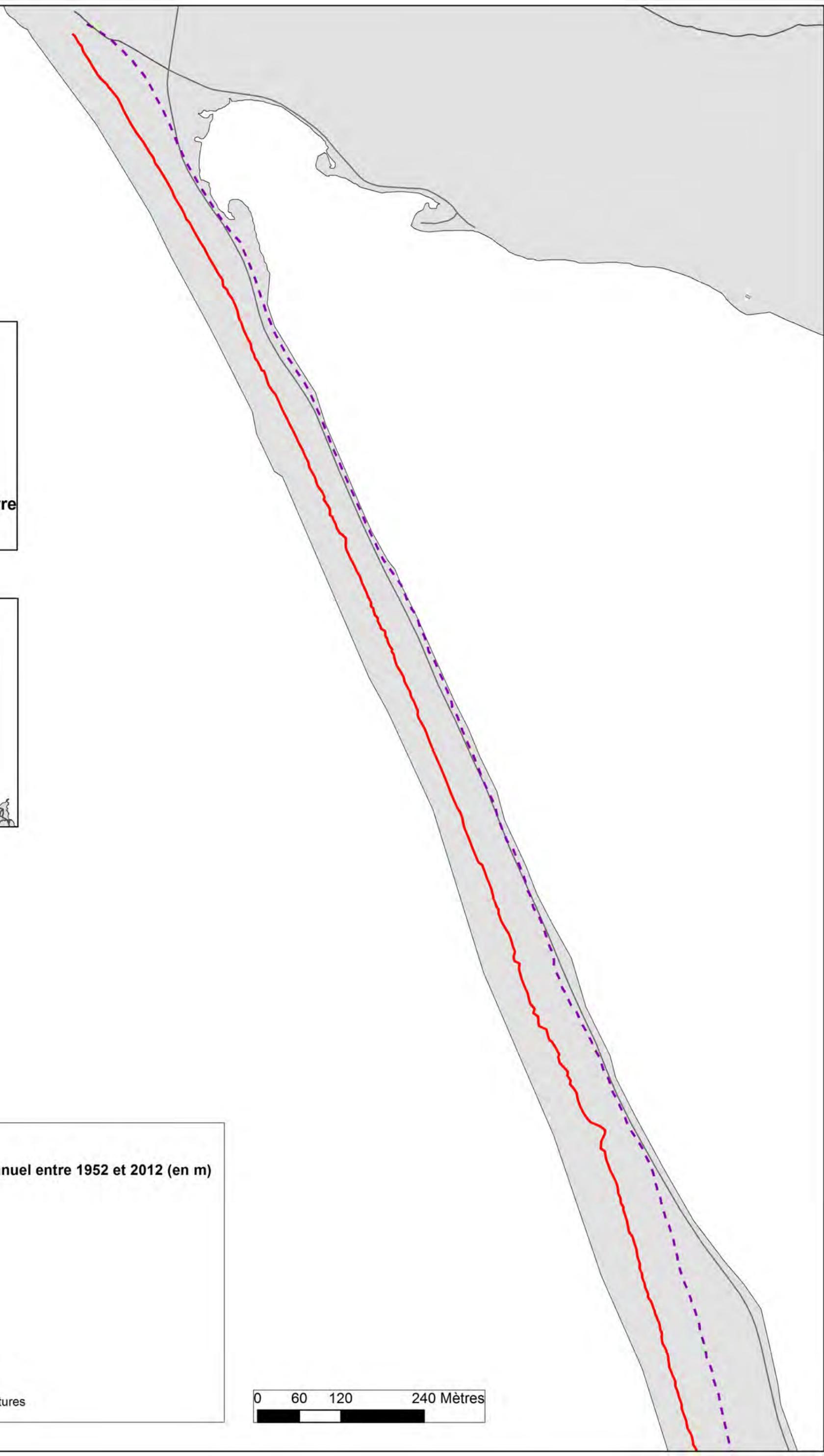
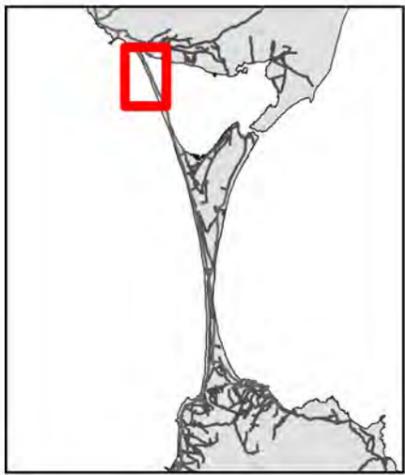
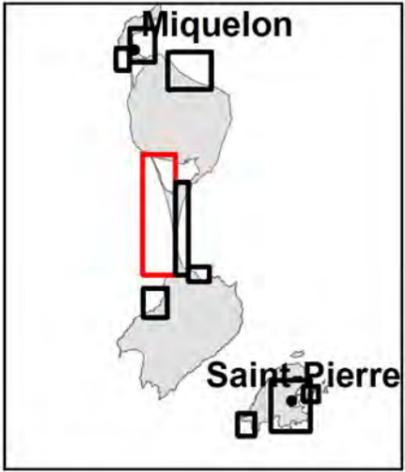
- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0

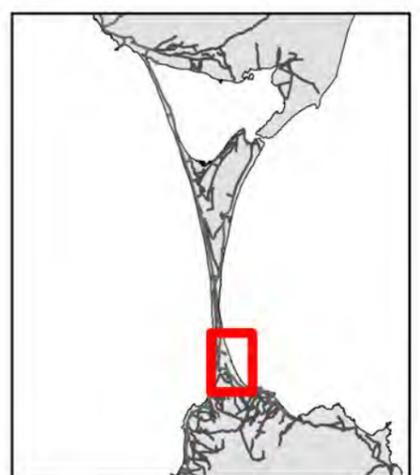
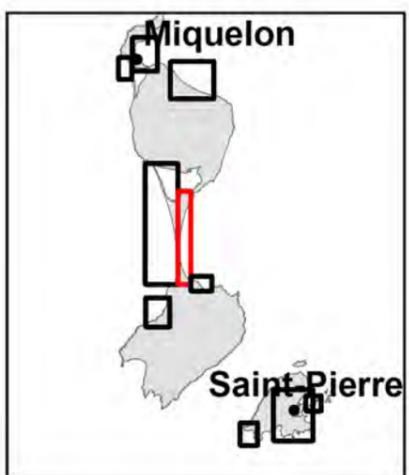
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





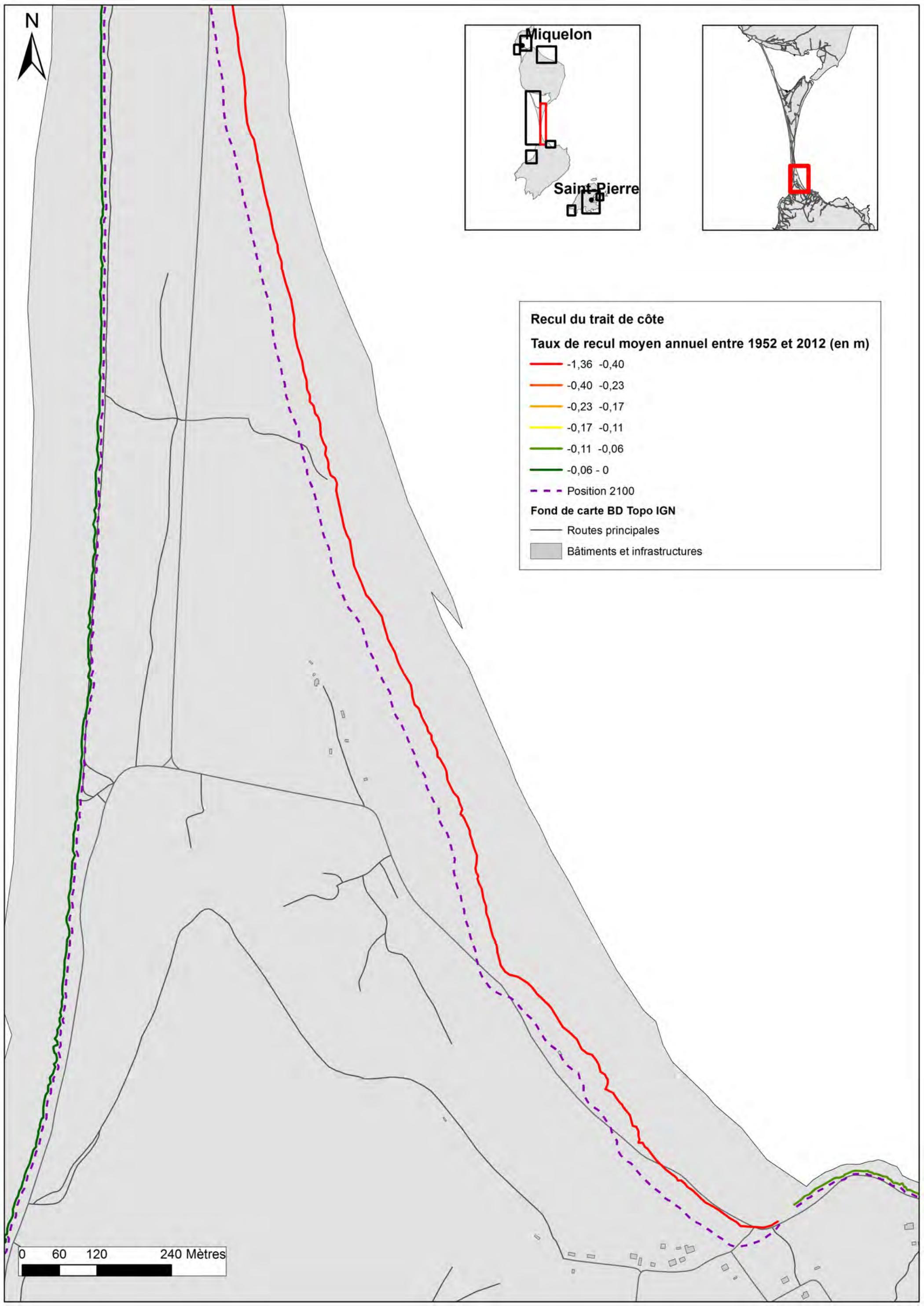
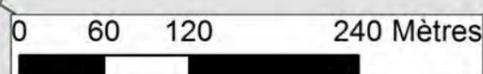


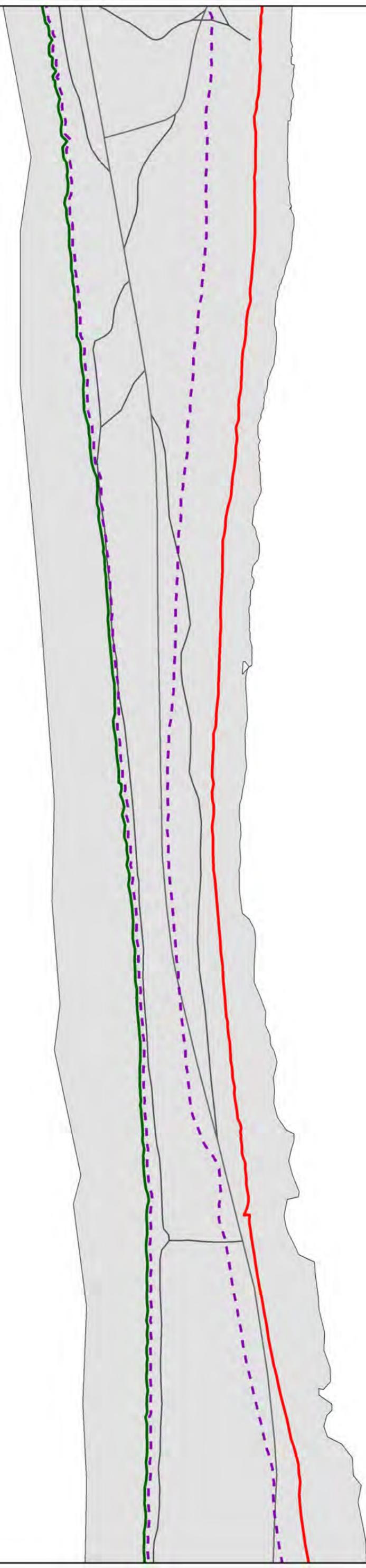
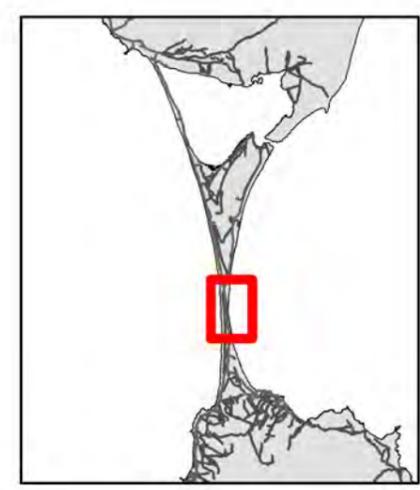
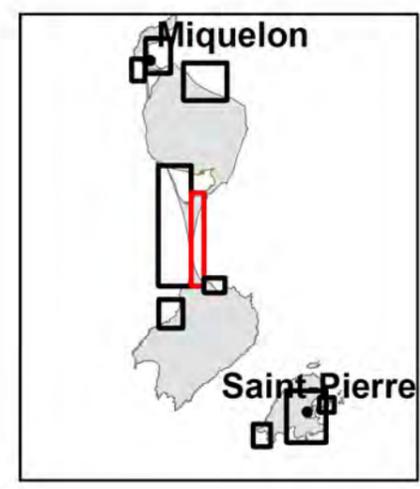
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

Red line	-1,36 -0,40
Orange line	-0,40 -0,23
Yellow line	-0,23 -0,17
Light green line	-0,17 -0,11
Green line	-0,11 -0,06
Dark green line	-0,06 - 0
Purple dashed line	Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

Black line	Routes principales
Grey area	Bâtiments et infrastructures



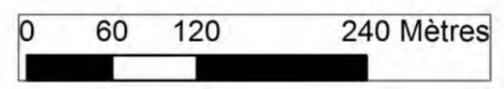


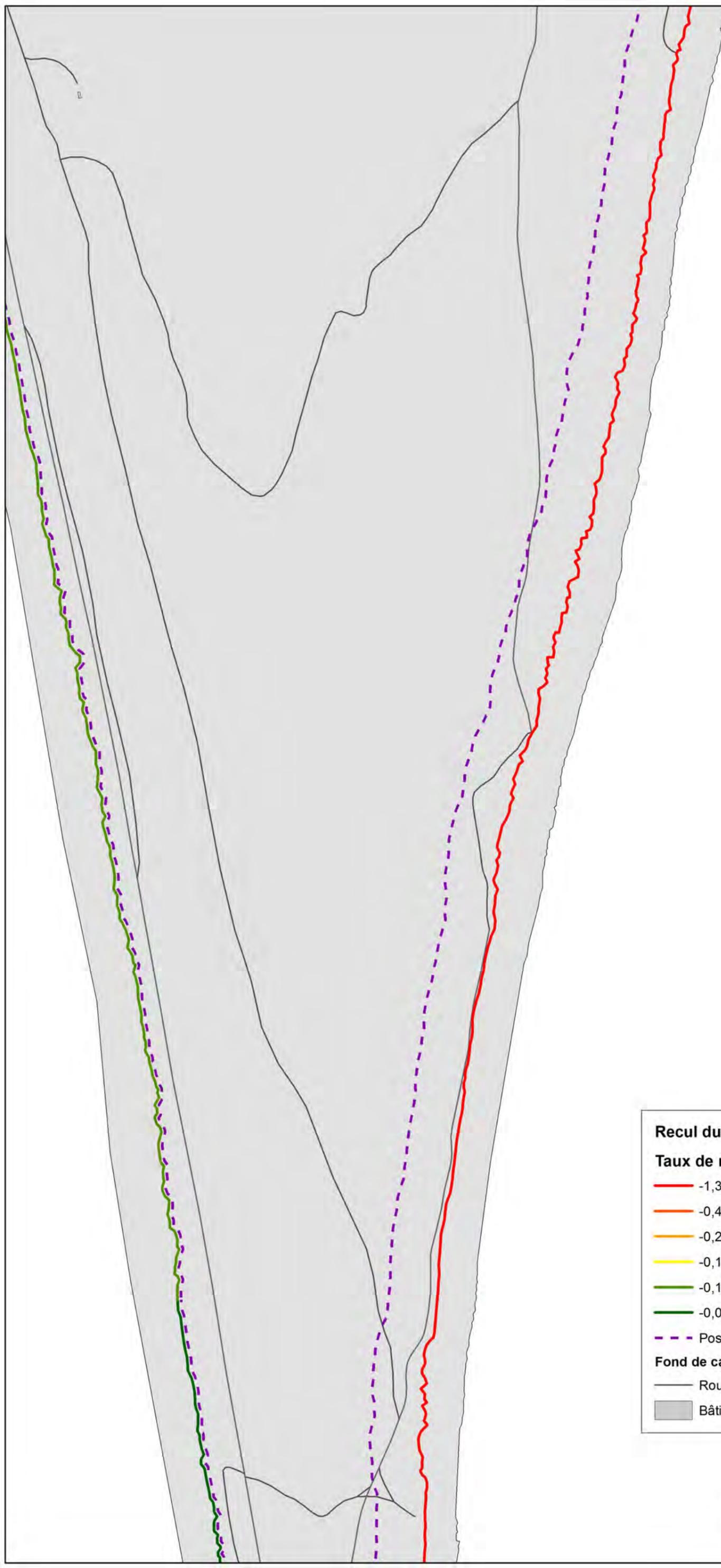
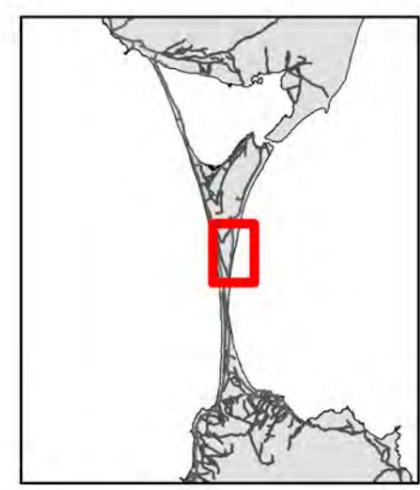
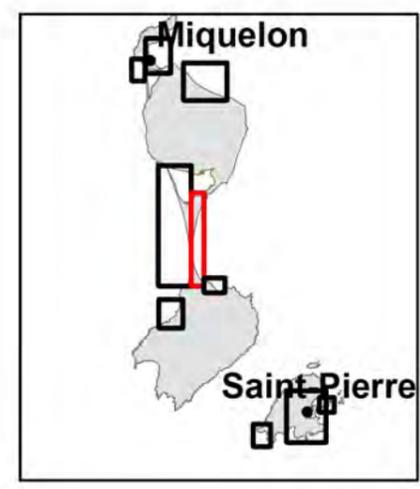
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



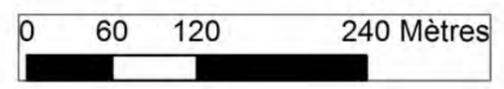


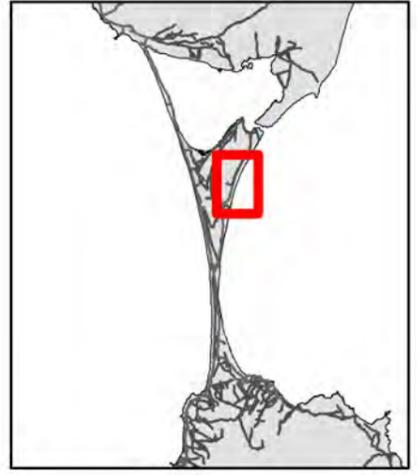
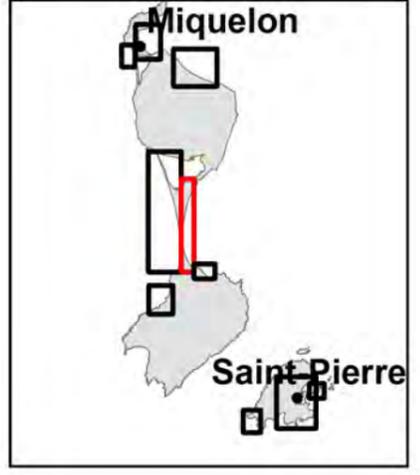
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



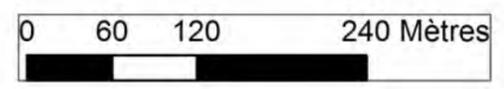


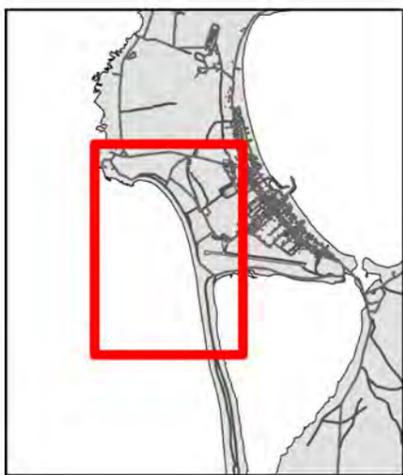
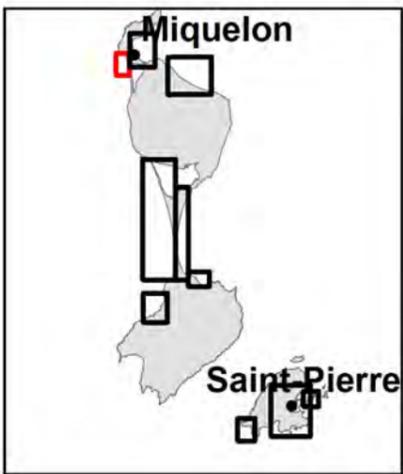
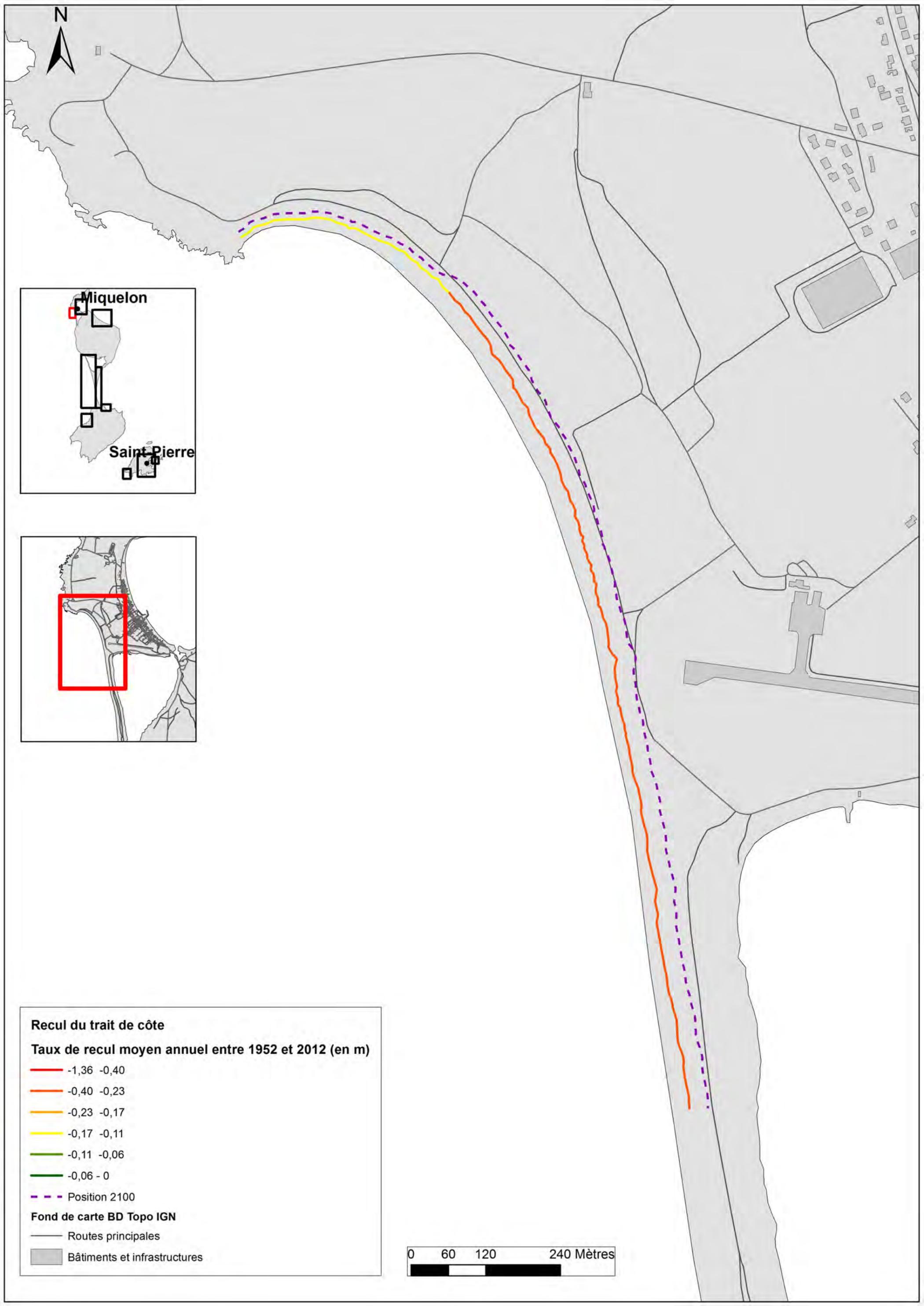
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

- -1,36 -0,40
- -0,40 -0,23
- -0,23 -0,17
- -0,17 -0,11
- -0,11 -0,06
- -0,06 - 0
- - - Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





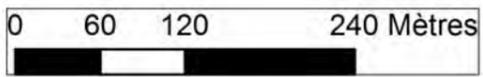
Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

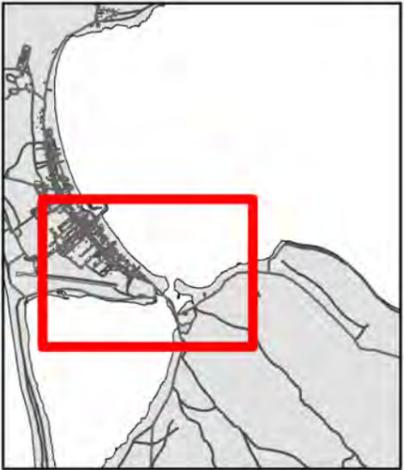
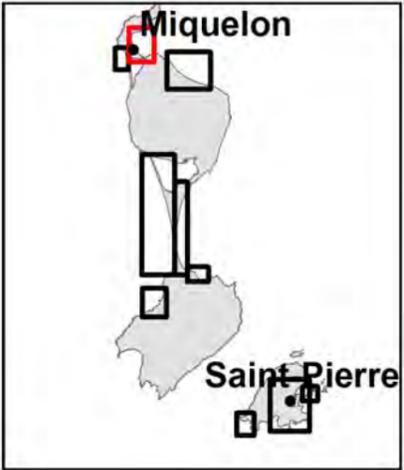
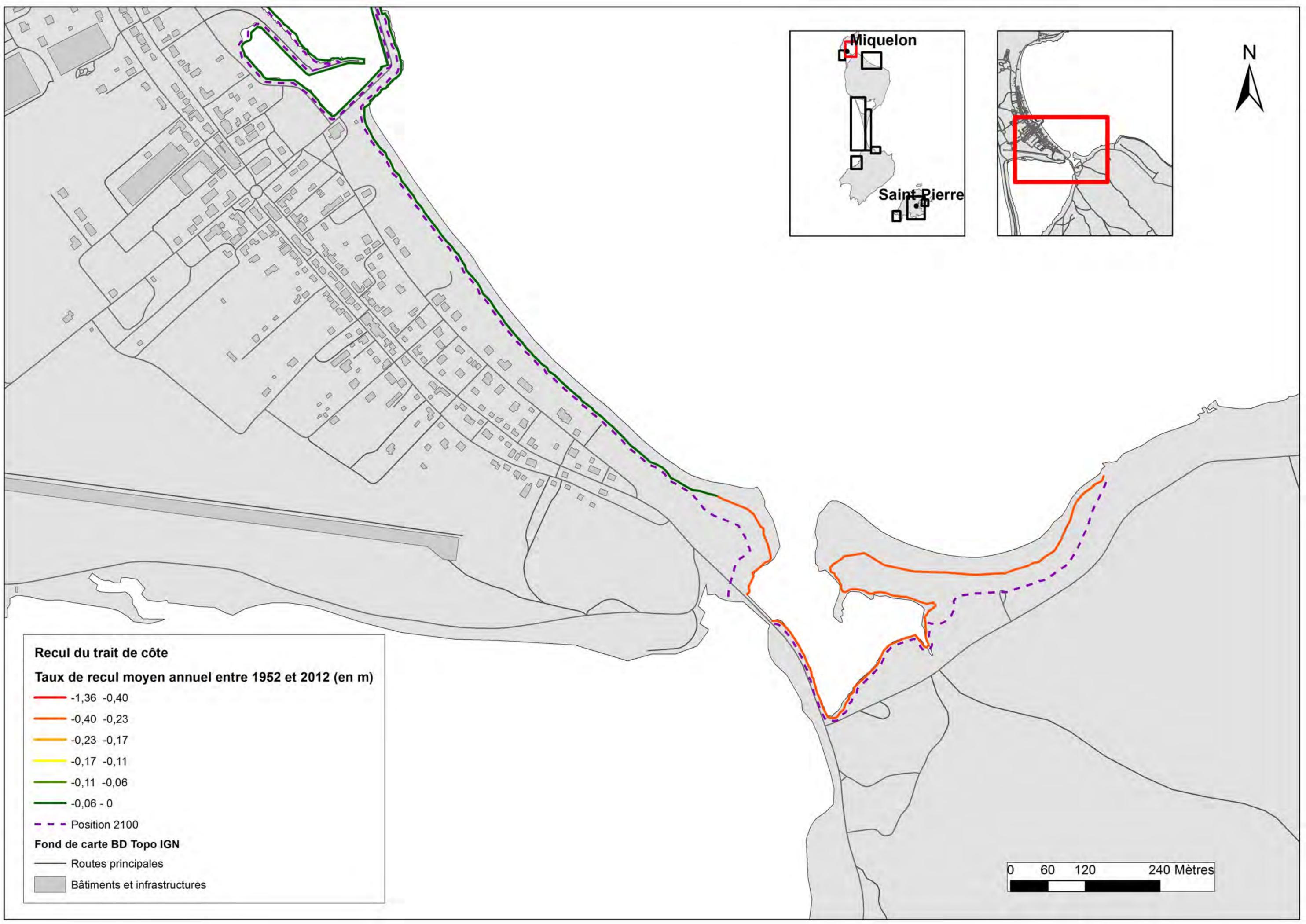
Red line	-1,36 -0,40
Orange line	-0,40 -0,23
Yellow line	-0,23 -0,17
Light green line	-0,17 -0,11
Green line	-0,11 -0,06
Dark green line	-0,06 - 0

--- Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

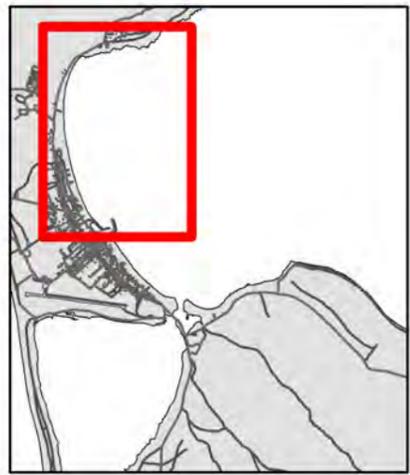
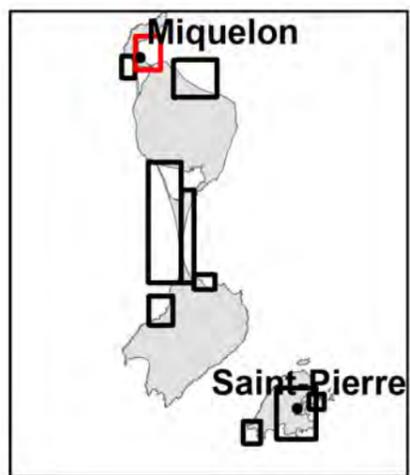
- 1,36 -0,40
- 0,40 -0,23
- 0,23 -0,17
- 0,17 -0,11
- 0,11 -0,06
- 0,06 - 0

--- Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



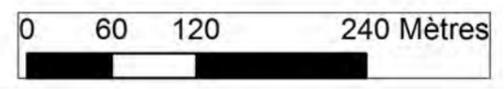


Recul du trait de côte
Taux de recul moyen annuel entre 1952 et 2012 (en m)

Red line	-1,36 -0,40
Orange line	-0,40 -0,23
Yellow line	-0,23 -0,17
Light green line	-0,17 -0,11
Green line	-0,11 -0,06
Dark green line	-0,06 - 0
Dashed purple line	Position 2100

Fond de carte BD Topo IGN

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



Annexe 2

Analyses statistiques en valeurs extrêmes aux alentours de Saint-Pierre-et-Miquelon (vagues et niveaux d'eau)

Analyse statistique en valeurs extrêmes

Contenu

1	Introduction.....	1
2	Niveaux d'eau.....	2
2.1	Port-aux-Basques.....	2
2.1.1	Description de la série temporelle.....	2
2.1.2	Analyse en valeurs extrêmes.....	3
2.2	St-Lawrence.....	5
2.2.1	Description de la série temporelle.....	5
2.2.2	Analyse en valeurs extrêmes.....	6
2.3	Discussion.....	7
3	Vagues.....	8
3.1	Vagues non cycloniques.....	8
3.1.1	Point Nord.....	10
3.1.2	Point Ouest.....	12
3.1.3	Point Sud.....	14
3.1.4	Discussion.....	16
3.2	Vagues cycloniques.....	18
3.2.1	Point Nord.....	18
3.2.2	Point Ouest.....	20
3.2.3	Point Sud.....	21
4	Bibliographie.....	24

1 Introduction

Dans le cadre d'une première analyse des risques côtiers à Saint-Pierre et Miquelon, il nous a été demandé d'effectuer une analyse en valeurs extrêmes des forçages marins (vagues et niveaux d'eau) à proximité des îles d'intérêt. Les données de niveaux d'eau utilisées sont des données de marégraphes canadiens tandis que les données de vague sont des sorties de modèle (base de données IOWAGA). La localisation trop éloignée des différents points d'analyse (vagues vs niveaux

d'eau) n'a pas permis une analyse en probabilités conjointes par le logiciel JoinSea. Seules des analyses mono-variables ont donc été effectuées.

2 Niveaux d'eau

Il existe un marégraphe français sur l'île de St Pierre mais les enregistrements continus datent de 2012. La série temporelle, trop courte, n'est donc pas exploitable. Deux marégraphes canadiens voisins possèdent des données exploitables, il s'agit des stations St-Lawrence et Port-aux-Basques (Figure 1). Les données sont téléchargeables gratuitement sur le site <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/maps-cartes/inventory-inventaire-eng.asp>.

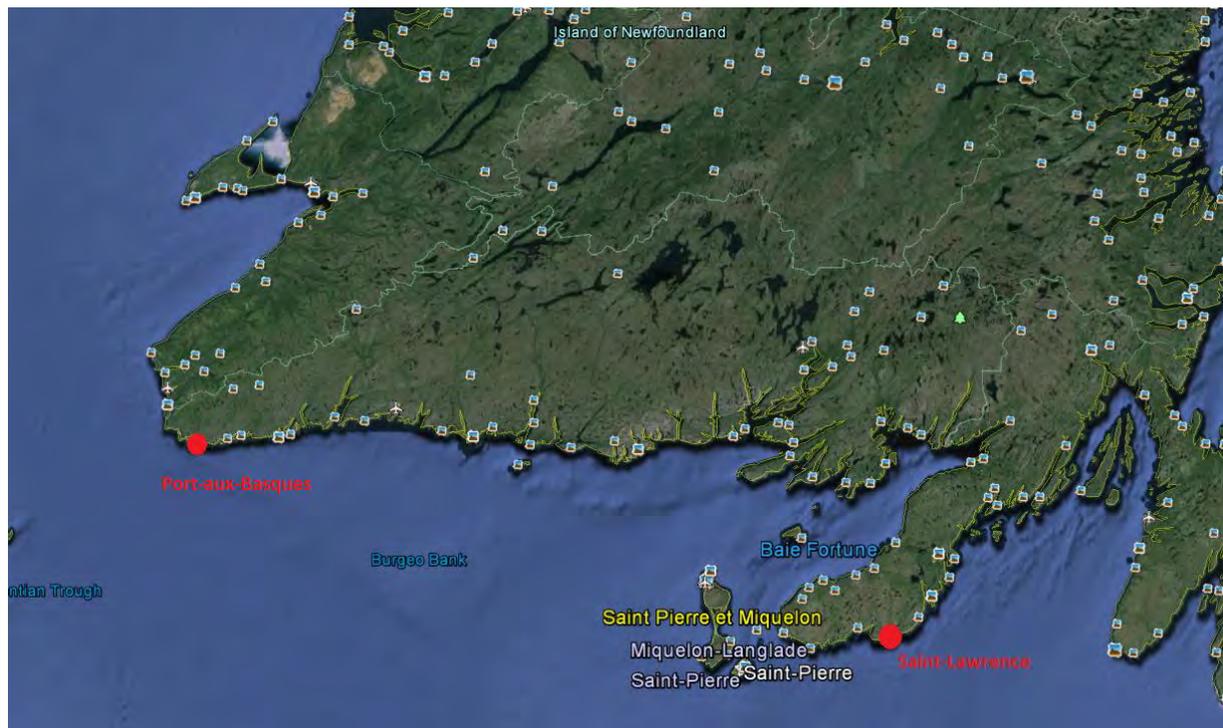


Figure 1: Localisation des marégraphes canadiens à proximité du site d'étude

2.1 Port-aux-Basques

2.1.1 Description de la série temporelle

La série temporelle est constituée de données marégraphiques horaires. Elle débute en 1935 et se termine le 10 octobre 2014 (Figure 2). Cependant pratiquement aucune donnée n'existe entre 1937 et 1959. Il n'est donc pas garanti que les données soient toutes comparables entre elles. L'absence de mesure pendant 22 ans ne permet pas de savoir si le matériel a été changé, si la localisation du marégraphe a été modifiée, etc. Afin d'assurer l'homogénéité des données d'entrée, il a donc été décidé de tronquer la série et de ne conserver que les mesures postérieures à 1959. Au total, les données représentent un peu plus de 49 années effectives.

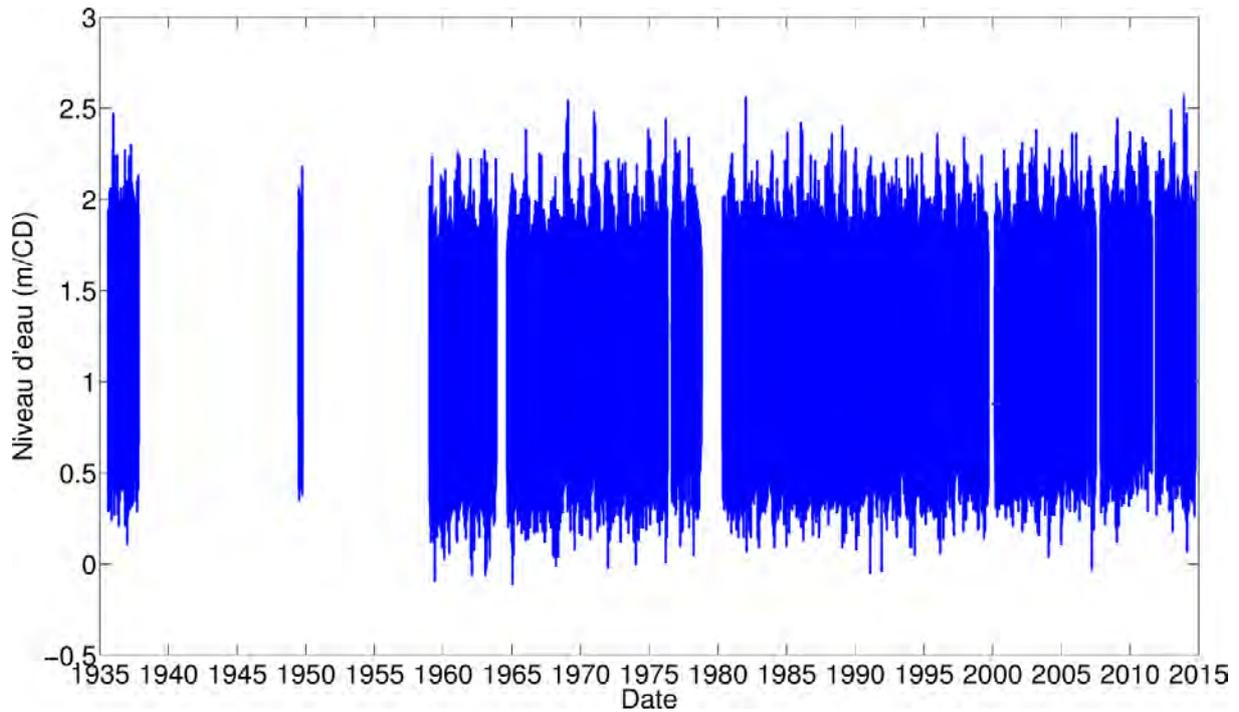


Figure 2: Série temporelle marégraphique à Port-aux-Basques. Le niveau d'eau est mesuré par rapport au 0 des cartes (CD=Chart Datum)

2.1.2 Analyse en valeurs extrêmes

Il existe deux grandes familles de méthodes d'analyse en valeurs extrêmes de niveaux d'eau, les méthodes dites directes – on traite directement le signal de niveau d'eau, et les méthodes dites indirectes – on retire la partie déterministe (marée) du signal de niveau d'eau, on traite le signal de surcote résultant puis on procède à une convolution marée-surcote pour obtenir la loi statistique finale de niveau d'eau. De manière générale, il est préférable d'utiliser une méthode indirecte lorsque c'est possible, en particulier lorsque l'on peut considérer que les surcotes de pleine mer et les pics de marée sont indépendants, car cela permet de prendre en compte dans l'analyse des combinaisons (surcotes de pleine mer-pics de marée) qui n'ont pas forcément été observées dans les données.

L'analyse en composantes harmoniques du signal de niveau d'eau avec la toolbox Matlab t-tide fournit des résultats très étranges. En effet, le signal de niveau d'eau ne correspond quasiment jamais au signal de marée reconstituée par t-tide, ce qui signifierait qu'un résidu (surcote ou autre) viendrait en permanence perturber le signal de marée. Une comparaison avec SHOMAR sur quelques jours montre un désaccord entre l'analyse t-tide et SHOMAR (offset d'environ 20cm et variations différentes) sans pour autant résoudre le problème du résidu permanent. Si le marégraphe est situé dans une zone d'influence multiple (par exemple proche d'une embouchure de fleuve), alors cela peut expliquer ce comportement assez erratique du signal.

Parce qu'il n'a pas été possible d'identifier un signal de marée clair au sein de la série temporelle de niveaux d'eau, il a été décidé de procéder à une méthode directe d'analyse en valeurs extrêmes du signal. Pour cela, la série a tout d'abord été modifiée pour prendre en compte l'élévation du niveau moyen de la mer. La tendance linéaire a été retirée des données puis la série a été calée sur le niveau moyen de la dernière année hydrologique (01/08/2013-31/07/2014), soit 1,23 m/CD. Les résultats sont donc valides pour cette année de référence uniquement.

La loi statistique paramétrique utilisée pour représenter les événements rares au marégraphe est la loi GPD (Generalised Pareto Distribution). Le choix du seuil, au-delà duquel les observations de niveaux d'eau sont utilisées pour ajuster la loi GPD, est toujours délicat car les résultats y sont souvent très sensibles. Le seuil doit être suffisamment élevé pour s'assurer d'être dans le domaine de comportement asymptotique de la loi GPD et ainsi limiter le biais dans les estimations, mais il ne doit pas être trop élevé pour limiter la variance (incertitude dans les estimations). Deux outils visuels sont couramment utilisés pour aider à la détermination du meilleur seuil : *mean residual life plot* et *modified scale and shape parameters plot*. Pour ces deux outils visuels, on recherche le plus petit seuil au-delà duquel la courbe devient respectivement linéaire ou constante. Une fois le seuil déterminé, la méthode d'estimation des paramètres de la loi est choisie parmi trois méthodes classiques : maximum de vraisemblance, méthode des moments, méthode des moments pondérés. Des tests statistiques (χ^2 et Kolmogorov-Smirnov) et visuels (graphes Probabilité-Probabilité et Quantile-Quantile) ont permis de valider les lois ajustées et de choisir la méthode d'estimation la plus appropriée.

Les intervalles de confiance sont calculés par une méthode *bootstrap* paramétrique telle que décrite dans Mazas & Hamm (2011).

La loi GPD est recommandée en général pour des échantillons de type POT (*Peaks-Over-Threshold*), indépendants et identiquement distribués. Pour un échantillon de pics de pleine mer, l'indépendance n'est pas assurée. Si une tempête couvre plusieurs cycles de marée par exemple, les valeurs de pleine mer successives lors de la tempête sont dépendantes. Afin de ne pas surestimer les niveaux d'eau pour des périodes de retour données, un indice extrême α est calculé. Pour un niveau d'eau donné x , l'indice extrême est l'inverse de la taille moyenne des blocs de niveaux d'eau successifs dépassant x . La fonction utilisée ici est la même que dans le travail de Batstone et al. (2013) : $\alpha(x) = 1/(1 + ae^{-bx})$, avec $a > 0$ et b , deux constantes. Les périodes de retour sont alors corrigées selon la formule : $T_{new} = T_{old}/\alpha(x)$.

La Figure 3 et le Tableau 1 présentent les résultats pour le seuil 2,13 m/CD et les paramètres de loi estimés par la méthode des moments. Les valeurs de retour ne devraient pas être considérées au-delà de la période de retour 200 ans (~4 fois la durée des données, Pugh, 2004).

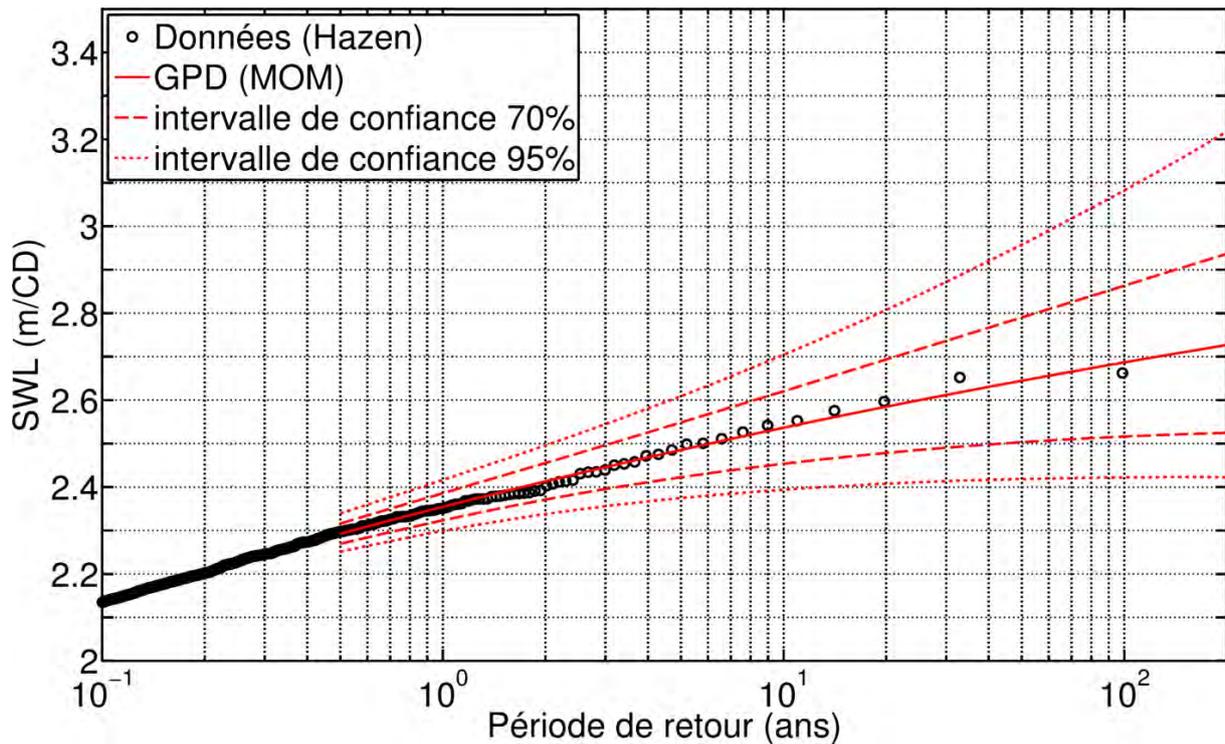


Figure 3: Valeurs de retour de niveau d'eau à Port-aux-Basques

Tableau 1 : Valeurs de retour du niveau d'eau (SWL) à Port-aux-Basques et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour. En italiques, valeurs données à titre d'information, mais qui ne devraient pas être considérées.

Période de retour (ans)	SWL (m/CD)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	2.41	2.37	2.46	2.34	2.50
5	2.49	2.42	2.55	2.37	2.61
10	2.54	2.45	2.62	2.39	2.70
20	2.58	2.48	2.69	2.41	2.81
50	2.64	2.50	2.79	2.42	2.96
100	2.69	2.52	2.86	2.42	3.08
200	2.73	2.52	2.94	2.42	3.22
<i>500</i>	<i>2.78</i>	<i>2.53</i>	<i>3.03</i>	<i>2.42</i>	<i>3.41</i>
<i>1000</i>	<i>2.81</i>	<i>2.53</i>	<i>3.11</i>	<i>2.41</i>	<i>3.57</i>

2.2 St-Lawrence

2.2.1 Description de la série temporelle

La série temporelle est constituée de données marégraphiques horaires. Elle débute le 23/10/2005 et se termine le 17 octobre 2014 (Figure 4). Au total, les données représentent un peu moins de 8 années effectives.

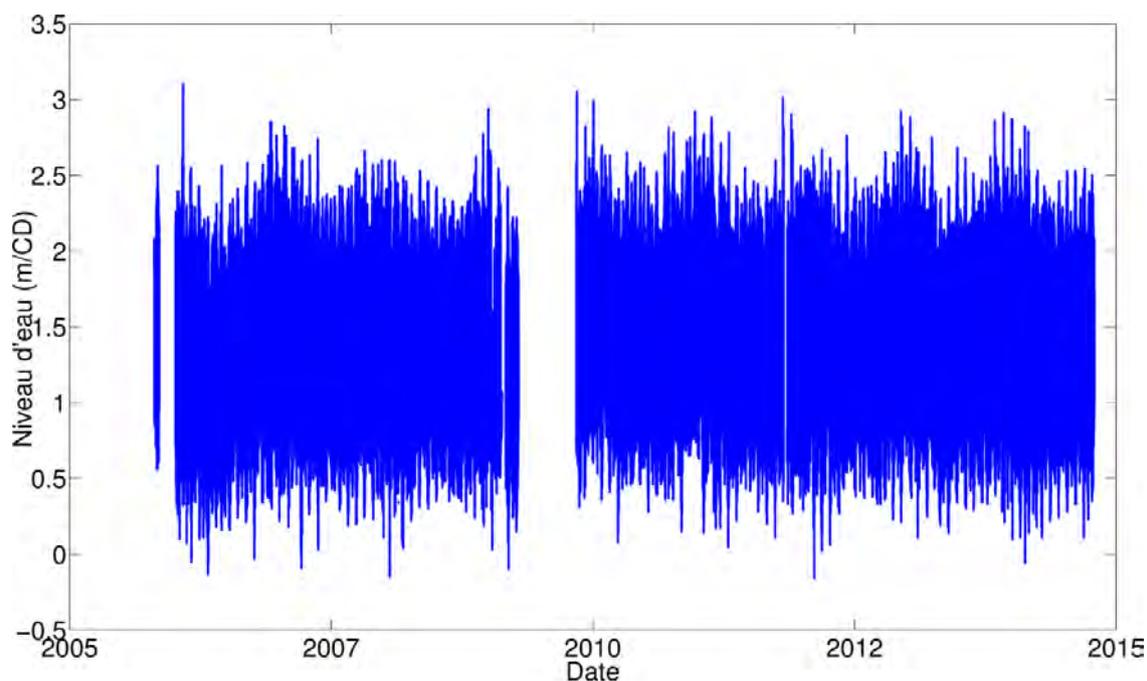


Figure 4: Série temporelle marégraphique à St-Lawrence. Le niveau d'eau est mesuré par rapport au 0 des cartes (CD=Chart Datum)

2.2.2 Analyse en valeurs extrêmes

De la même manière que pour Port-aux-Basques, il n'a pas été possible d'identifier un signal de marée clair au sein de la série temporelle de niveaux d'eau. Il a donc été décidé de procéder à une méthode directe d'analyse en valeurs extrêmes du signal. Pour cela, la série a tout d'abord été modifiée pour prendre en compte l'élévation du niveau moyen de la mer. La tendance linéaire a été retirée des données puis la série a été calée sur le niveau moyen de la dernière année hydrologique (01/08/2013-31/07/2014), soit 1,38 m/CD. Les résultats sont donc valides pour cette année de référence uniquement.

L'analyse a été menée de la même manière que pour Port-aux-Basques.

La Figure 5 et la Tableau 2 présentent les résultats pour le seuil 2,41 m/CD et les paramètres de loi estimés par la méthode des moments. Les valeurs de retour ne devraient pas être considérées au-delà de la période de retour 30 ans (~4 fois la durée des données).

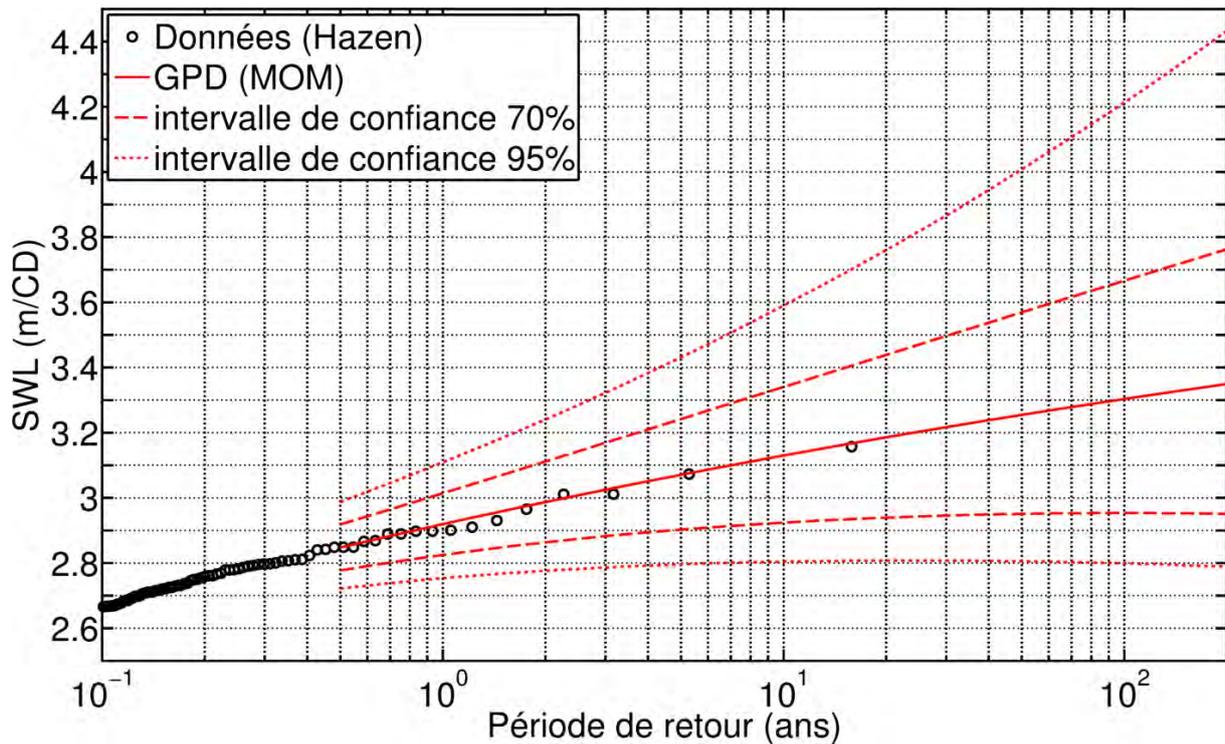


Figure 5: Valeurs de retour de niveau d'eau à St-Lawrence

Tableau 2 : Valeurs de retour du niveau d'eau (SWL) à Saint-Lawrence et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour. En italiques, valeurs données à titre d'information, mais qui ne devraient pas être considérées.

Période de retour (ans)	SWL (m/CD)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	2.99	2.86	3.11	2.78	3.24
5	3.07	2.90	3.24	2.80	3.43
10	3.13	2.92	3.34	2.80	3.59
20	3.19	2.94	3.44	2.81	3.76
50	3.25	2.95	3.57	2.81	4.01
100	3.30	2.95	3.67	2.80	4.21
200	3.35	2.95	3.76	2.79	4.43
500	3.41	2.94	3.89	2.77	4.76
1000	3.45	2.93	3.98	2.75	5.02

2.3 Discussion

La comparaison entre les deux points d'étude (Port-aux-Basques et St-Lawrence) indique que les valeurs de retour à St-Lawrence sont systématiquement plus élevées qu'à Port-aux-Basques (offset d'environ 60 cm). Ces différences peuvent s'expliquer par la localisation des marégraphes. Afin de déterminer quel marégraphe est le plus similaire à celui de Saint-Pierre et Miquelon, nous avons comparé les pics de pleine mer observés au marégraphe de St-Pierre et ceux observés à St-Lawrence ou Port-aux-Basques. L'analyse est effectuée sur les 2 ans de données communes entre les

marégraphes (2012-2014). On calcule le coefficient de corrélation ajusté R^2 , le biais (marégraphe d'étude par rapport au marégraphe de St-Pierre), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la RMSE normalisée par la différence entre le minimum et le maximum des pics de pleine mer observés au marégraphe de St-Pierre (NRMSE). Ces trois quantités statistiques sont rapportées dans la Figure 6 ci-dessous représentant les graphes bivariés entre les pics de pleine mer observés à St-Pierre et ceux observés à Port-aux-Basques ou St-Lawrence.

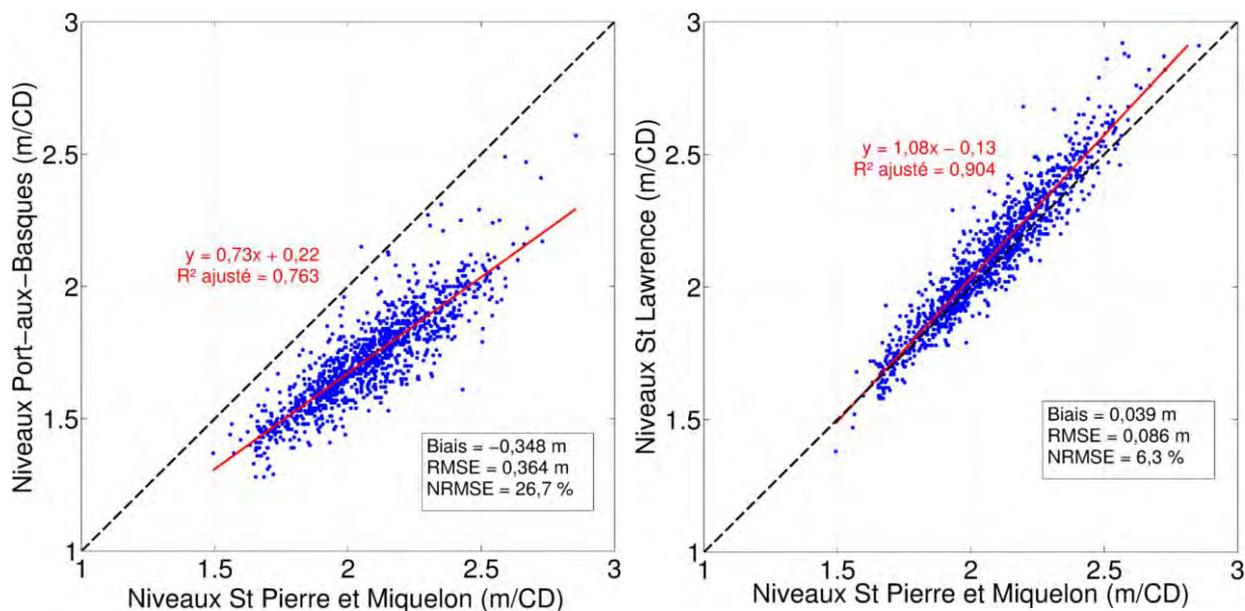


Figure 6: Graphes bivariés des pics de pleine mer observés au marégraphe de St-Pierre vs ceux observés à St-Lawrence ou Port-aux-Basques. On suppose que la référence altimétrique du marégraphe de St-Pierre est la même qu'aux autres marégraphes.

On remarque ainsi que les niveaux à Saint-Pierre ressemblent davantage à ceux de Saint-Lawrence qu'à ceux de Port-aux-Basques. La faible NRMSE et le faible biais calculés pour le marégraphe de Saint-Lawrence justifient en première approche l'utilisation des résultats statistiques présentés dans cette note pour Saint-Pierre et Miquelon.

3 Vagues

3.1 Vagues non cycloniques

Les données de vague sont issues de la base de données IOWAGA (grille ATNW). La résolution spatiale est de $10'$, la résolution temporelle de 3h. La série couvre 23 années de données (1990-2012), mais l'année 1992 étant incomplète (il manque les trois derniers mois), elle a été retirée ce qui donne 22 années de données effectives.

Trois points d'intérêt ont été sélectionnés autour de l'île, au Nord, à l'Ouest et au Sud (Figure 7). La résolution spatiale ne permet pas de considérer des points à l'Est de l'île.

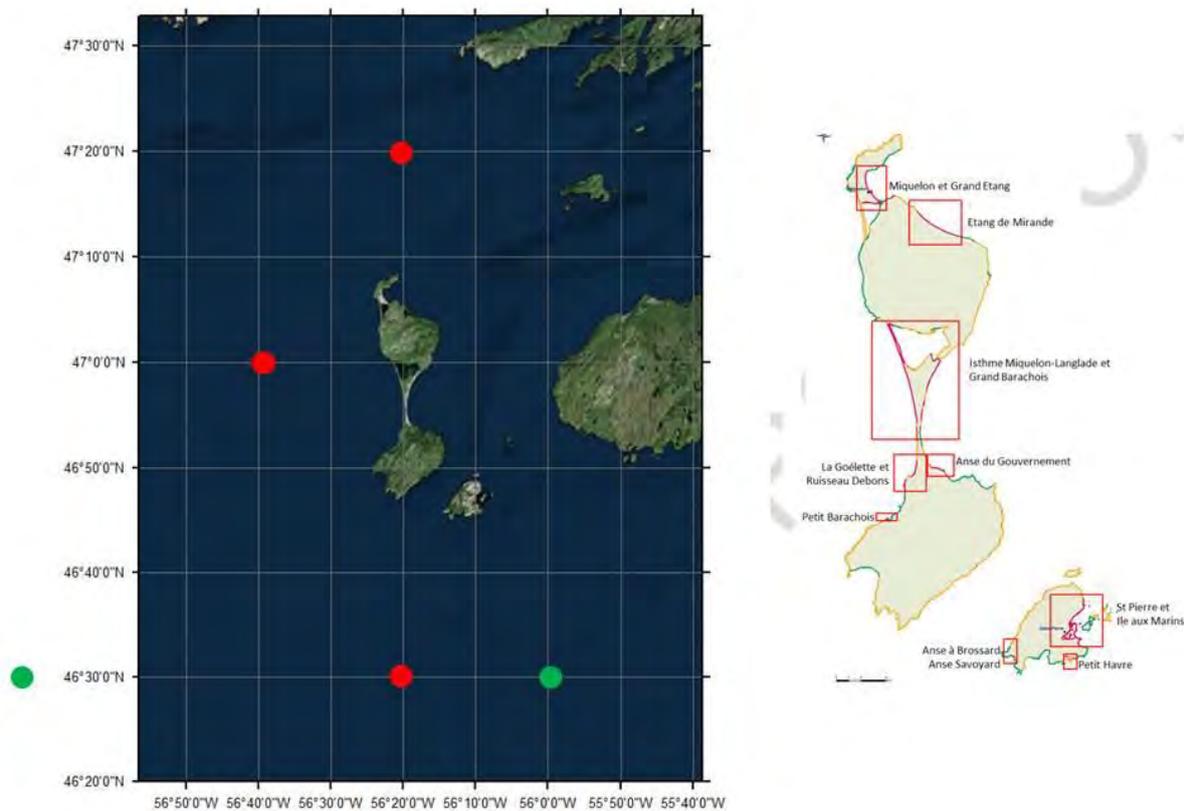


Figure 7: Localisation des points d'extraction des données de vague (points rouges)

Avant de procéder à l'analyse en valeurs extrêmes des vagues, il est nécessaire de d'éliminer des séries temporelles les vagues cycloniques (qui doivent être traitées à part car les phénomènes générateurs de cyclones ne sont pas les mêmes que ceux générant les houles saisonnières). La base de données IBTrACS a été utilisée pour identifier les cyclones qui sont passés à proximité de Saint-Pierre et Miquelon afin d'éliminer de la série temporelle originelle toutes les périodes dont les vagues sont susceptibles d'avoir été générées par ces cyclones. Une zone de $\pm 5^\circ$ en latitude et longitude centrée sur Miquelon a été considérée : 58 cyclones sont passés dans cette zone depuis 1990 (début de la série temporelle de vague), voir Figure 8.

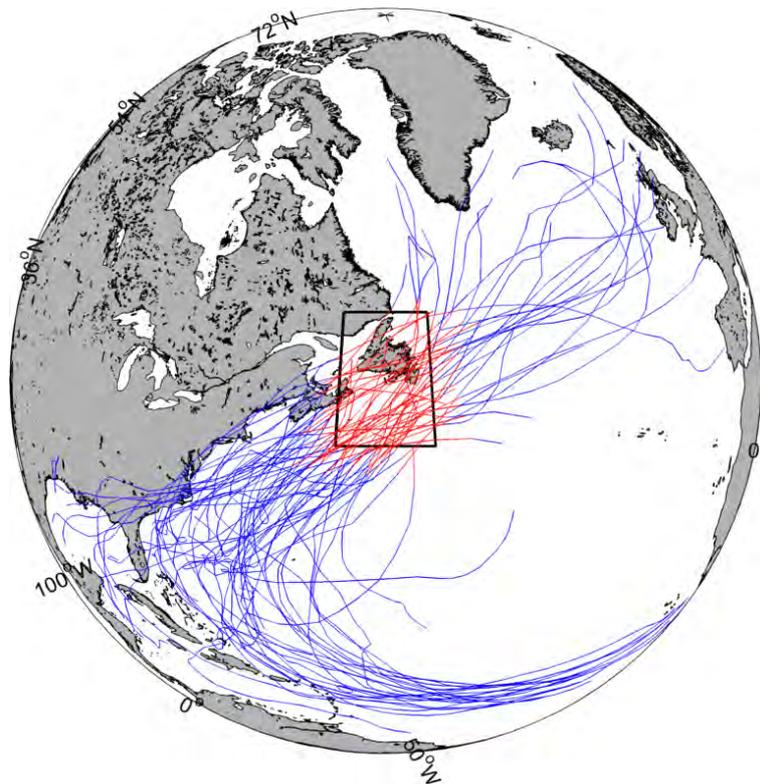


Figure 8: En bleu, trajectoires des cyclones qui sont passés à travers la zone délimitée en noir, centrée sur Saint-Pierre et Miquelon. En rouge, parties des trajectoires considérées comme ayant pu influencer les vagues à St-Pierre et Miquelon.

3.1.1 Point Nord

L'analyse des données brutes (après élimination des périodes cycloniques) indique que les vagues proviennent le plus souvent du sud-ouest (Figure 9), ce qui est assez logique de par la localisation du point d'étude. De plus, il s'agit également du secteur générant les hauteurs de vague significatives les plus élevées. La Figure 10 illustre la relation hétéroscédastique entre H_s et T_p : plus les H_s sont élevées, moins la dispersion des périodes pics est grande. Ainsi, pour les vagues les plus élevées, les périodes pics se situent entre 10 et 14 s.

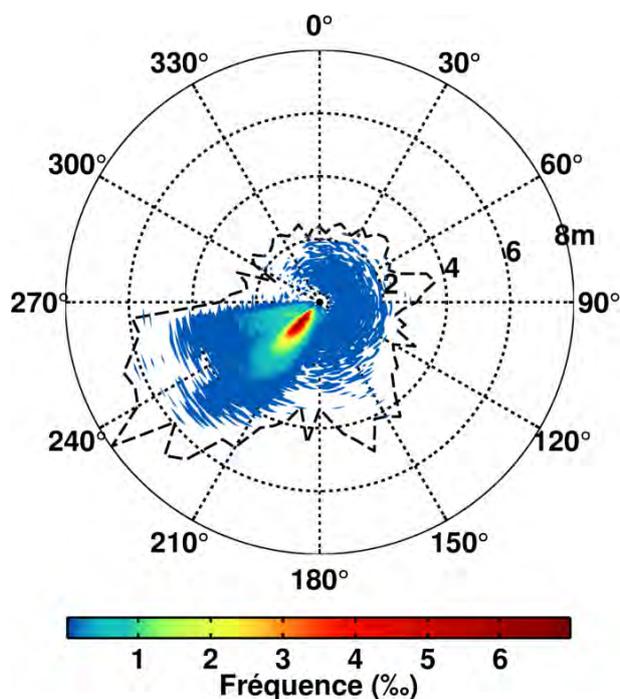


Figure 9: Rose des vagues. La valeur de H_s se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (H_s, D_p) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02%) avec une discrétisation de 5° pour D_p et 5 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues).

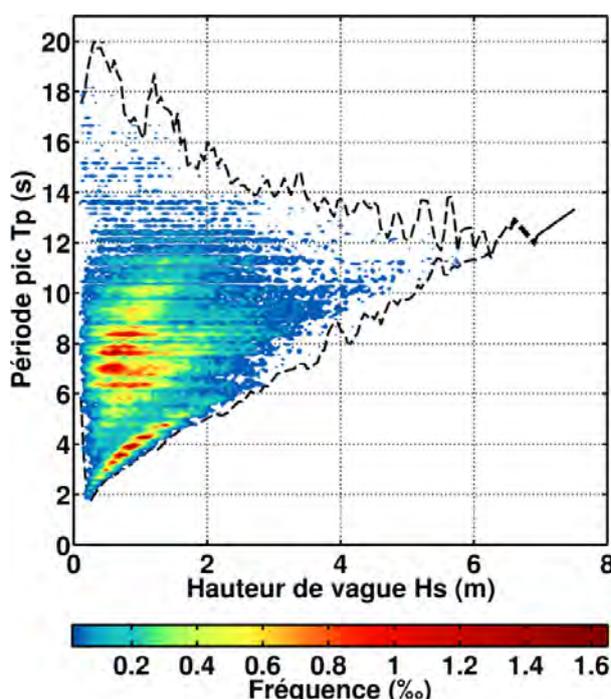


Figure 10: Diagramme bivarié (T_p, H_s) . Même symbologie que la Figure 7. Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discrétisée toutes les 0,25 s et H_s tous les 5 cm.

La méthode utilisée pour l'ajustement statistique est celle détaillée dans Bernardara et al., 2014 et dans le rapport BRGM Bulteau et al., 2013. Il s'agit d'ajuster une loi GPD par une méthode double-seuil. Un seuil physique est tout d'abord choisi au-delà duquel on ne conserve que les pics de H_s . Ce seuil physique doit être choisi de manière à sélectionner un nombre moyen de pics par an du même ordre de grandeur que le nombre annuel de tempêtes sur le site d'étude. Ce seuil doit permettre de sélectionner à la fois des tempêtes extrêmes et modérées. Pour ce point d'étude, le seuil a été choisi à 3,52 m et correspond à un nombre moyen d'évènements par an d'environ 10. Un critère temporel de 72h minimum entre chaque pic a été imposé afin d'assurer l'indépendance des pics.

Dans un deuxième temps, un seuil statistique est déterminé au-delà duquel la loi GPD va être ajustée aux données. La détermination du seuil statistique est effectuée à l'aide de divers tests statistiques (Kolmogorov-Smirnov, χ^2) et visuels (voir section 2.1.2). Une description de la méthodologie permettant de choisir un seuil optimal tout en réduisant la subjectivité de l'opérateur est décrite dans le rapport Bulteau et al., 2013.

L'ajustement est ensuite effectué selon trois méthodes (maximum de vraisemblance, moments, moments pondérés). Le meilleur ajustement est apprécié de la même manière que pour le niveau d'eau (voir section 2.1.2). Enfin, les intervalles de confiance sont calculés par la méthode du *bootstrap* paramétrique.

La Figure 11 montre l'ajustement statistique retenu pour le point Nord (seuil statistique retenu 4,4 m, correspondant à $\sim 4,5$ évts/an). Le Tableau 3 donne quelques valeurs pour différentes périodes de

retour. Les valeurs de retour ne devraient pas être considérées au-delà de la période de retour 90 ans (~4 fois la durée des données).

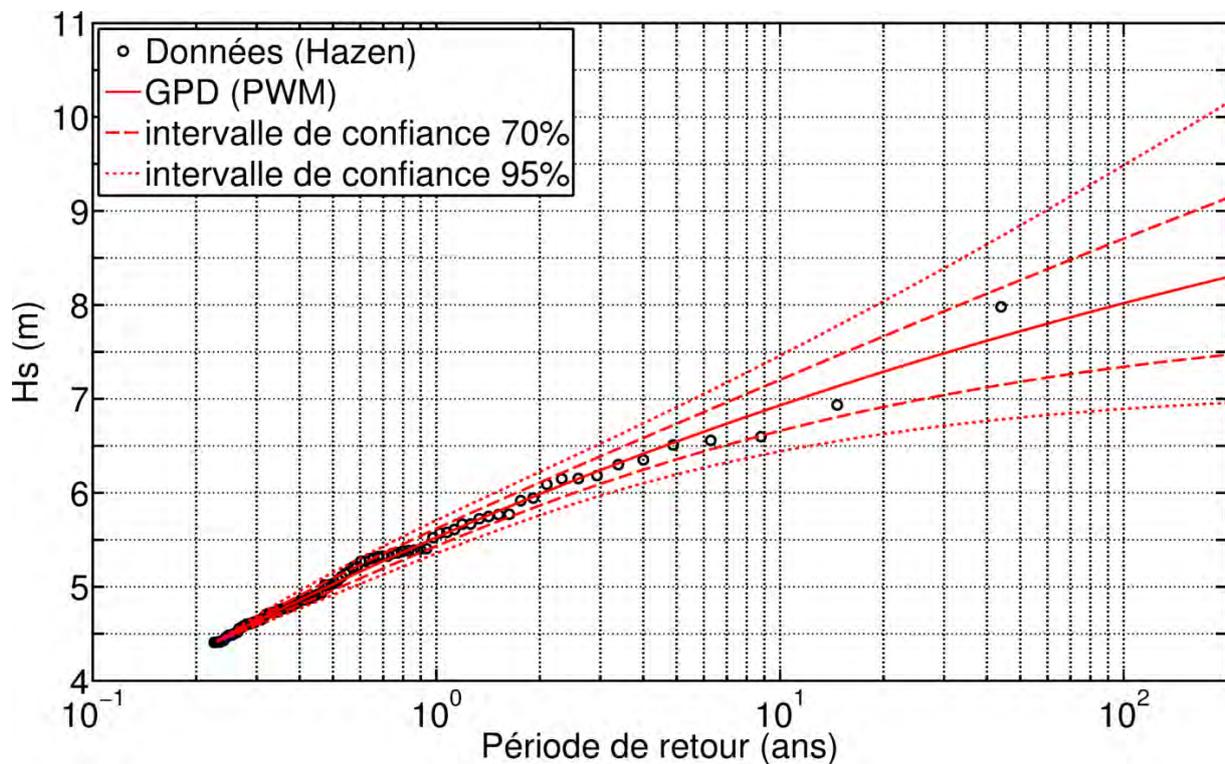


Figure 11: Valeurs de retour de Hs pour le point Nord. Seuil statistique = 4,4m. Méthode d'ajustement: moments pondérés (PWM).

Tableau 3: Valeurs de retour de Hs et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour - point Nord. En italiques, valeurs données à titre d'information, mais qui ne devraient pas être considérées.

Période de retour (ans)	Hs (m)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	5.99	5.87	6.11	5.76	6.22
5	6.55	6.36	6.74	6.20	6.91
10	6.93	6.66	7.20	6.44	7.46
20	7.29	6.91	7.67	6.63	8.04
50	7.72	7.18	8.26	6.80	8.85
<i>100</i>	<i>8.02</i>	<i>7.34</i>	<i>8.71</i>	<i>6.89</i>	<i>9.49</i>
<i>200</i>	<i>8.29</i>	<i>7.47</i>	<i>9.14</i>	<i>6.96</i>	<i>10.15</i>
<i>500</i>	<i>8.63</i>	<i>7.59</i>	<i>9.69</i>	<i>7.00</i>	<i>11.07</i>
<i>1000</i>	<i>8.86</i>	<i>7.66</i>	<i>10.09</i>	<i>7.01</i>	<i>11.79</i>

3.1.2 Point Ouest

L'analyse des données brutes (après élimination des périodes cycloniques) indique que les vagues proviennent le plus souvent du sud-ouest et de l'ouest (Figure 12). Il s'agit également des secteurs générant les hauteurs de vague significatives les plus élevées. La Figure 13 illustre la relation

hétéroscédastique entre H_s et T_p : plus les H_s sont élevées, moins la dispersion des périodes pics est grande. Ainsi, pour les vagues les plus élevées, les périodes pics se situent entre 10 et 14 s.

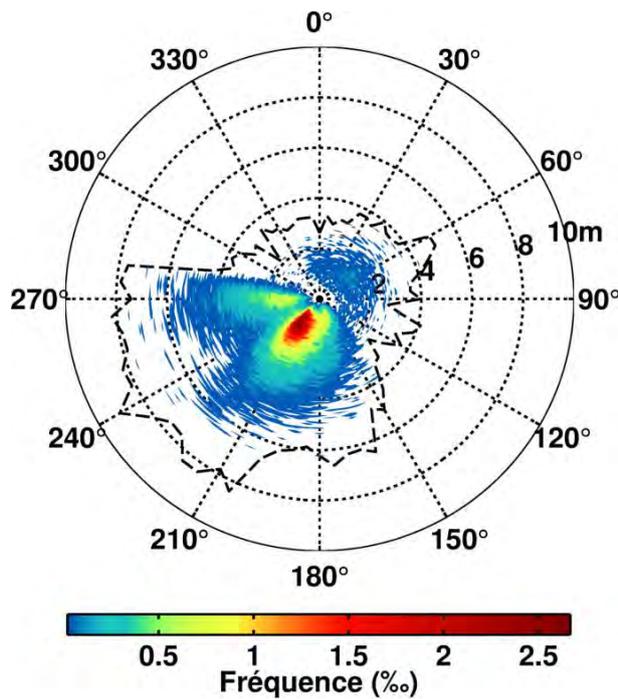


Figure 12: Rose des vagues. La valeur de H_s se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (H_s, D_p) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02‰) avec une discrétisation de 5° pour D_p et 5 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues).

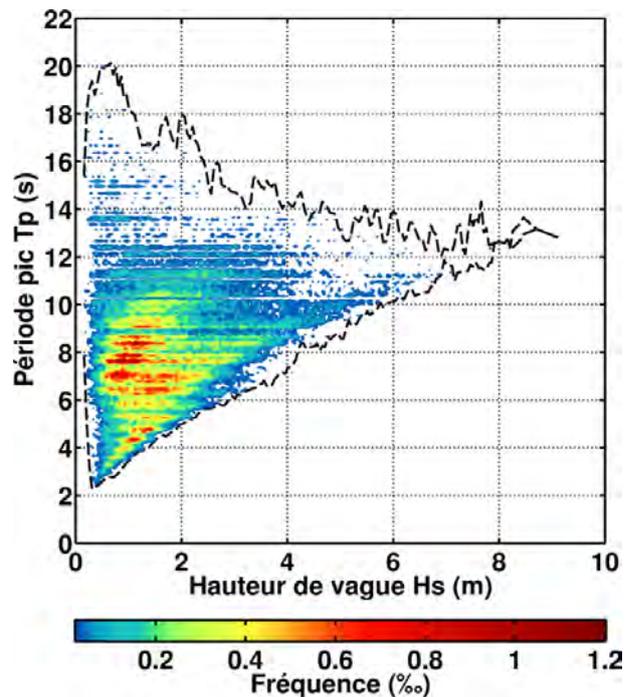


Figure 13: Diagramme bivarié (T_p, H_s) . Même symbologie que la Figure 7. Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discrétisée toutes les 0,25 s et H_s tous les 5 cm.

La méthode utilisée est la même que celle décrite à la section 3.1. Le seuil physique a été choisi pour sélectionner en moyenne 10 évènements par an. Puis le seuil statistique a été déterminé à 6 m ($\sim 3,6$ évts/an) et les paramètres de la loi GPD ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (Figure 14 et Tableau 4).

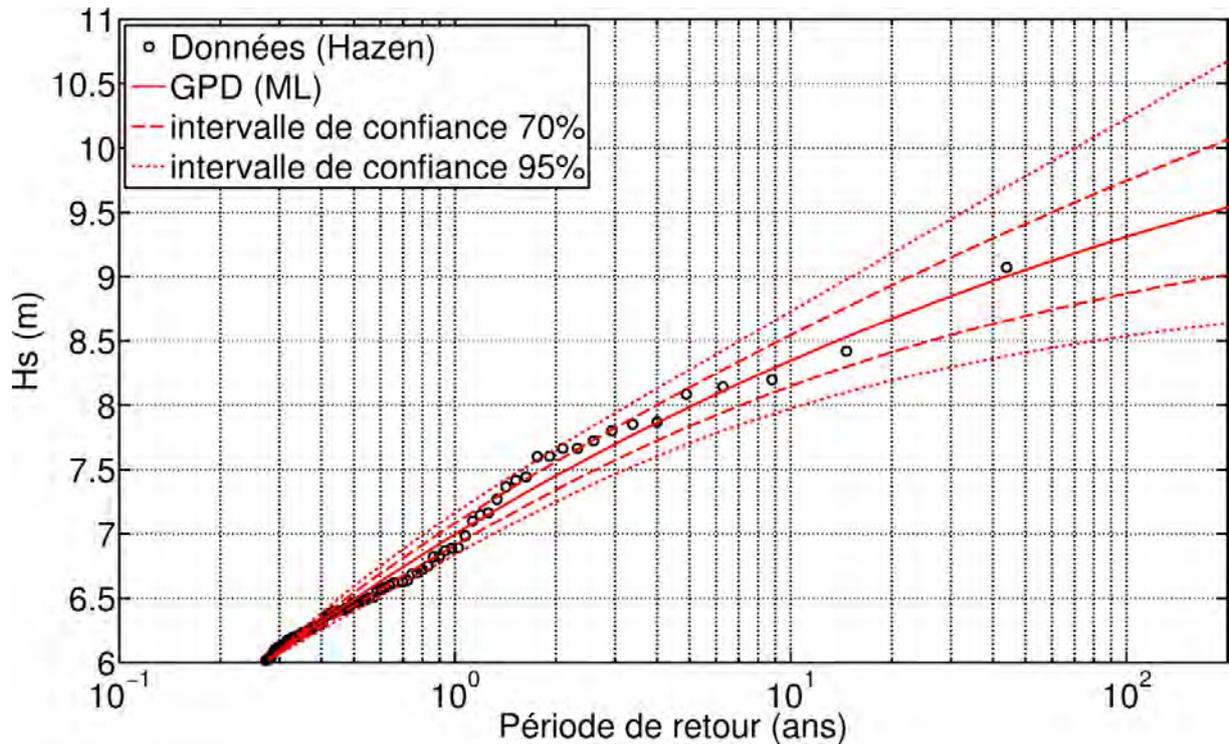


Figure 14: Valeurs de retour de Hs pour le point Ouest. Seuil statistique = 6m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML).

Tableau 4: Valeurs de retour de Hs et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour - point Ouest. En italiques, valeurs données à titre d'information, mais qui ne devraient pas être considérées.

Période de retour (ans)	Hs (m)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	7.45	7.34	7.56	7.25	7.67
5	7.99	7.84	8.14	7.70	8.28
10	8.35	8.15	8.55	7.98	8.73
20	8.67	8.41	8.93	8.19	9.18
50	9.05	8.69	9.41	8.41	9.78
<i>100</i>	<i>9.31</i>	<i>8.87</i>	<i>9.75</i>	<i>8.54</i>	<i>10.23</i>
<i>200</i>	<i>9.54</i>	<i>9.01</i>	<i>10.06</i>	<i>8.64</i>	<i>10.68</i>
<i>500</i>	<i>9.81</i>	<i>9.17</i>	<i>10.45</i>	<i>8.74</i>	<i>11.25</i>
<i>1000</i>	<i>9.99</i>	<i>9.26</i>	<i>10.73</i>	<i>8.79</i>	<i>11.68</i>

3.1.3 Point Sud

L'analyse des données brutes (après élimination des périodes cycloniques) indique que les vagues proviennent le plus souvent du sud-ouest et de l'ouest (Figure 15). On note aussi une plus grande gamme de direction de provenance des vagues en comparaison avec les deux autres points traités. Cela s'explique par la position du point d'étude, ouvert sur l'océan. Le secteur ouest-sud-ouest reste le secteur générant les hauteurs de vague significatives les plus élevées. La Figure 16 illustre la

relation hétéroscédastique entre H_s et T_p : plus les H_s sont élevées, moins la dispersion des périodes pics est grande. Ainsi, pour les vagues les plus élevées, les périodes pics se situent entre 10 et 14 s.

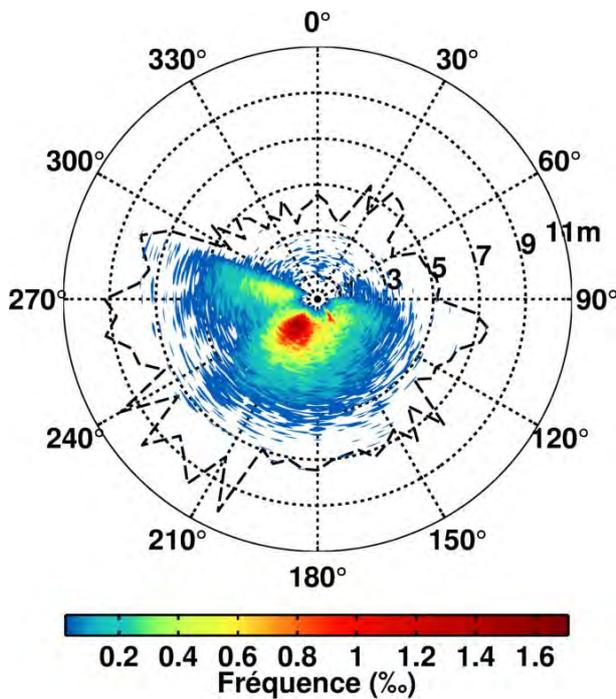


Figure 15: Rose des vagues. La valeur de H_s se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (H_s, D_p) est représentée par l'échelle de couleur (min=0,02%) avec une discrétisation de 5° pour D_p et 5 cm pour H_s . D_p est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues).

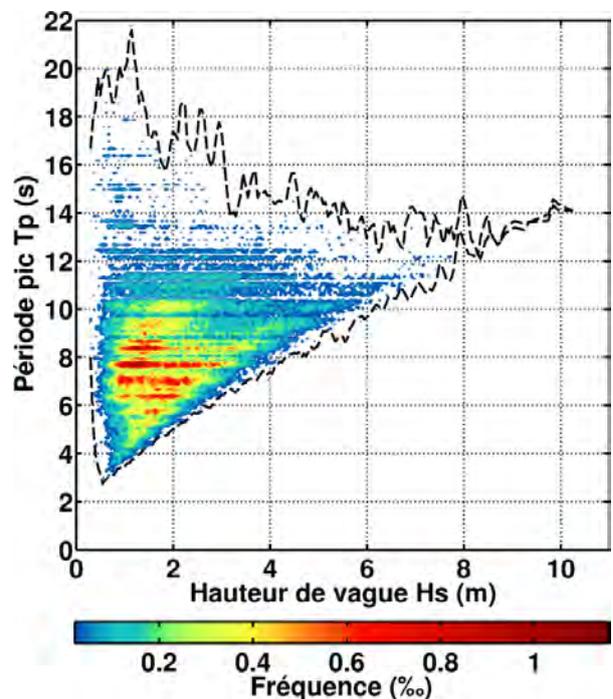


Figure 16: Diagramme bivarié (T_p, H_s) . Même symbologie que la Figure 7. Pour la fréquence d'occurrence, T_p est discrétisée toutes les 0,25 s et H_s tous les 5 cm.

La méthode utilisée est la même que celle décrite à la section 3.1. Le seuil physique a été choisi pour sélectionner en moyenne 10 évènements par an. Puis le seuil statistique a été déterminé à 6,72 m ($\sim 3,4$ évts/an) et les paramètres de la loi GPD ont été estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (Figure 17 et Tableau 5).

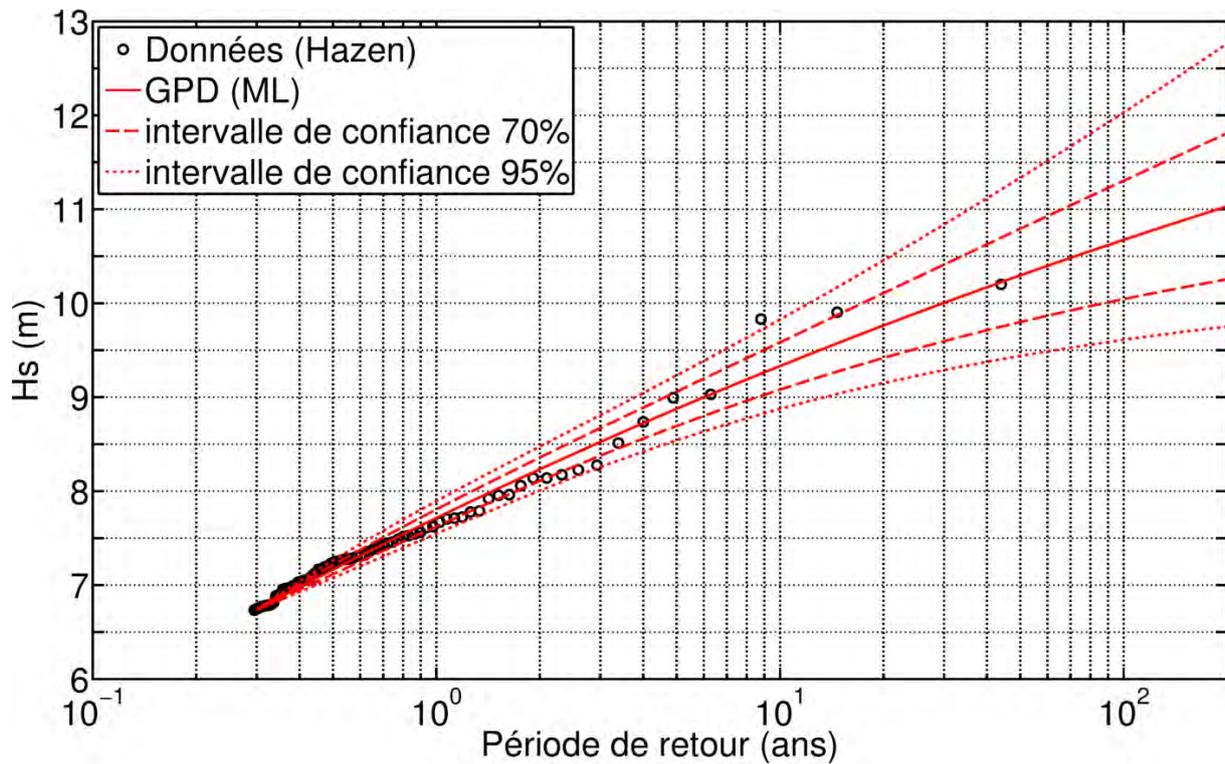


Figure 17: Valeurs de retour de Hs pour le point Sud. Seuil statistique = 6,72m. Méthode d'ajustement: maximum de vraisemblance (ML).

Tableau 5: Valeurs de retour de Hs et intervalles de confiance associés à plusieurs périodes de retour - point Sud. En italiques, valeurs données à titre d'information, mais qui ne devraient pas être considérées.

Période de retour (ans)	Hs (m)	Borne inf. int. conf. 70% (m)	Borne sup. int. conf. 70% (m)	Borne inf. int. conf. 95% (m)	Borne sup. int. conf. 95% (m)
2	8.23	8.11	8.36	8.01	8.48
5	8.88	8.69	9.06	8.54	9.23
10	9.33	9.08	9.58	8.88	9.83
20	9.76	9.42	10.11	9.15	10.46
50	10.30	9.80	10.79	9.44	11.33
<i>100</i>	<i>10.67</i>	<i>10.04</i>	<i>11.30</i>	<i>9.61</i>	<i>12.03</i>
<i>200</i>	<i>11.03</i>	<i>10.25</i>	<i>11.81</i>	<i>9.75</i>	<i>12.76</i>
<i>500</i>	<i>11.47</i>	<i>10.49</i>	<i>12.46</i>	<i>9.89</i>	<i>13.78</i>
<i>1000</i>	<i>11.79</i>	<i>10.63</i>	<i>12.94</i>	<i>9.97</i>	<i>14.58</i>

3.1.4 Discussion

La faible résolution spatiale du modèle utilisé pour générer les séries temporelles de vague (base de données IOWAGA) devra être considérée lorsque les résultats statistiques présentés dans cette note seront utilisés. En effet, l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon est trop petit pour être représenté par le modèle, la propagation des vagues se limite donc à la morphologie des côtes et des fonds de

Terre-Neuve. Les Figure 18 et 19 présentent des snapshots de l'environnement de St-Pierre et Miquelon tel que représenté dans le modèle.

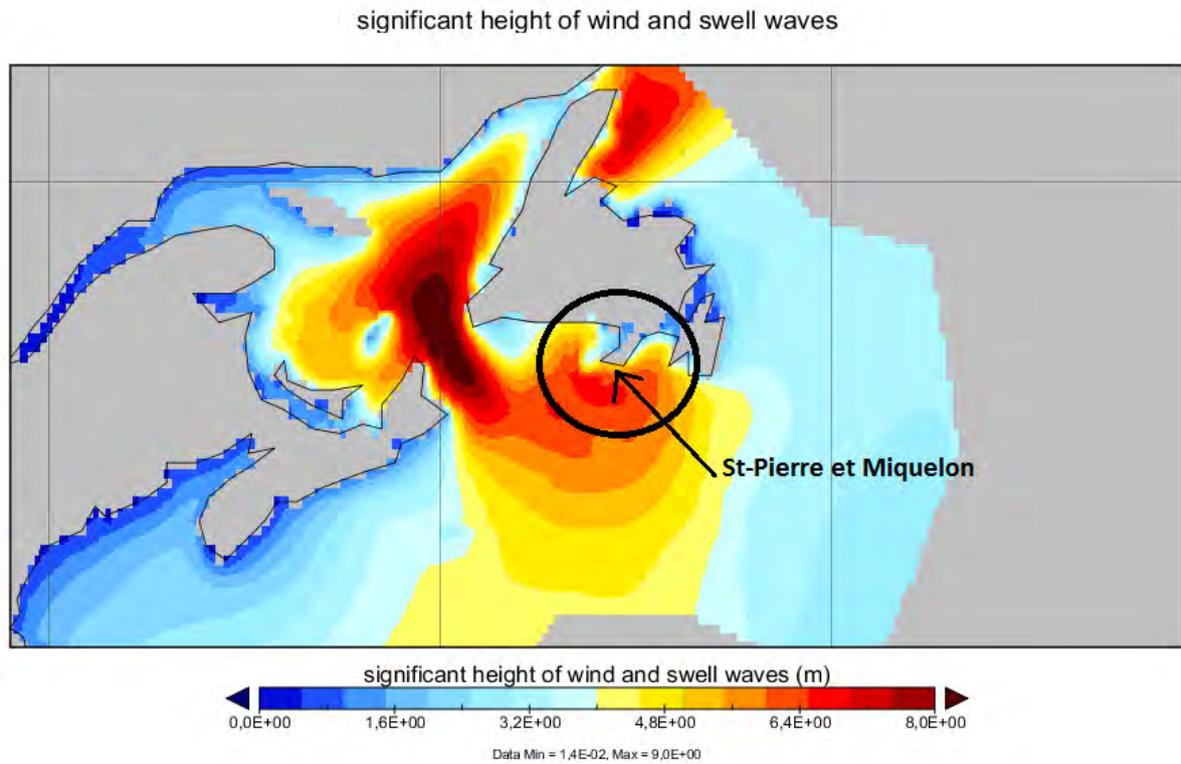


Figure 18: Snapshot d'un instant donné d'un fichier netcdf de la base de données IOWAGA. Dans le modèle, Saint-Pierre et Miquelon n'est qu'un prolongement de Terre-neuve.

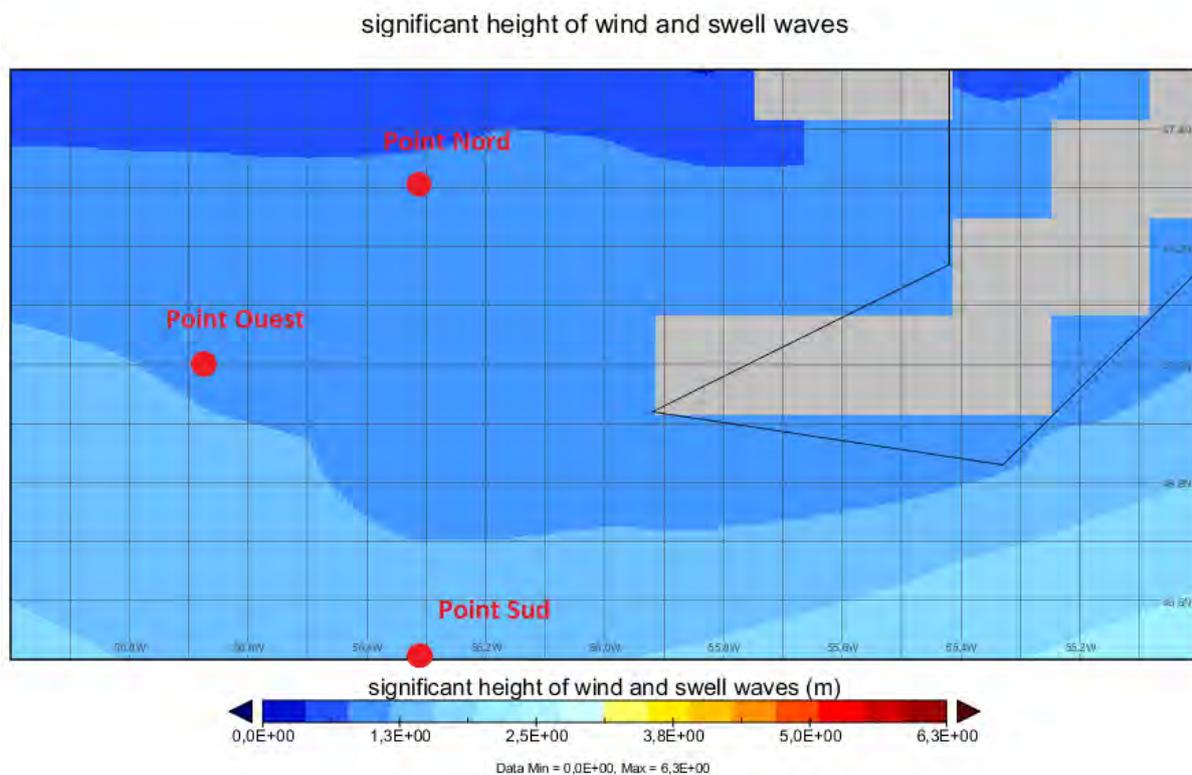


Figure 19 : Snapshot zoomé sur St-Pierre et Miquelon. L'archipel n'est pas représenté dans le modèle.

3.2 Vagues cycloniques

3.2.1 Point Nord

L'analyse sur le point Nord des 58 météores révèle des vagues cycloniques d'amplitude modérée et de période pouvant avoisiner les 18s (Figure 1). Les directions pics associées sont relativement groupées autour de 200°-250° (Figure 2).

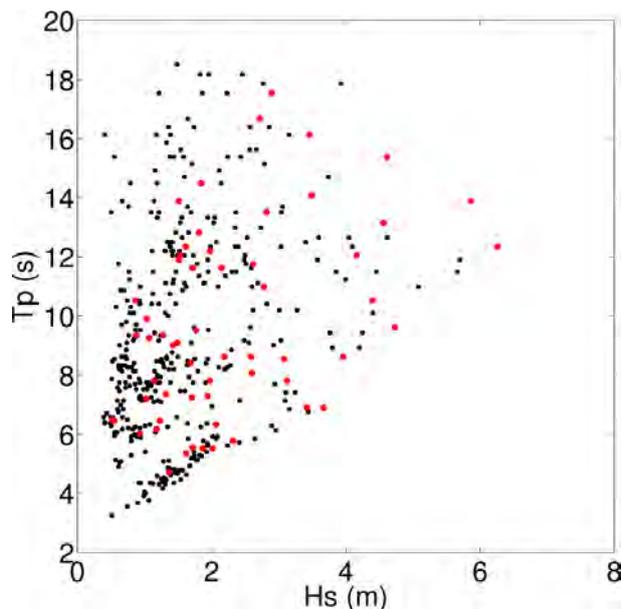


Figure 19: Graphe bivarié représentant les périodes pics et les hauteurs significatives pendant les 58 météores. Les points rouges correspondent au maximum de Hs pour chacun des 58 événements.

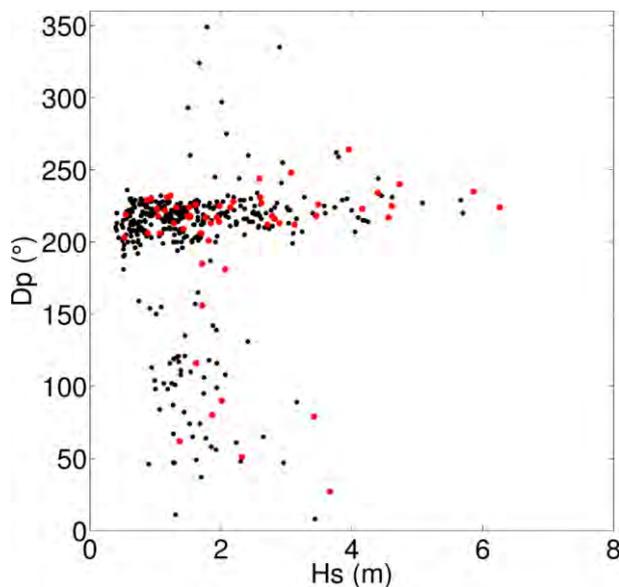


Figure 2: Graphe bivarié représentant les directions pics et les hauteurs significatives pendant les 58 météores. Les points rouges correspondent au maximum de Hs pour chacun des 58 événements.

Tableau 6: Caractéristiques des 58 points rouges des figures précédentes – Point Nord

Date	Nom du météore	Hs(m)	Tp(s)	Dp(°)
02/08/1990 12:00	BERTHA	4.56	13.2	217
15/10/1990 12:00	LILI	1.43	9.0	209
21/08/1991 09:00	BOB	2.59	8.6	244
29/10/1991 09:00	NOT_NAMED	2.32	5.8	51
09/09/1993 18:00	FLOYD	0.55	6.5	219
23/08/1994 06:00	CHRIS	1.14	7.8	222
09/06/1995 03:00	ALLISON	2.78	11.0	218
10/07/1995 06:00	BARRY	2.07	6.3	181
20/07/1995 06:00	CHANTAL	1.69	8.4	206
22/08/1995 03:00	FELIX	1.53	12.0	218
11/09/1995 12:00	LUIS	3.46	16.1	218
14/07/1996 18:00	BERTHA	3.13	7.8	212
03/09/1996 21:00	EDOUARD	1.61	12.3	226
15/09/1996 18:00	HORTENSE	3.49	14.1	226
10/10/1996 15:00	JOSEPHINE	4.16	12.0	223
13/07/1997 00:00	BILL	1.32	7.4	224

27/07/1997 12:00	DANNY	0.86	10.5	229
30/08/1998 18:00	BONNIE	1.51	13.9	224
04/09/1998 00:00	DANIELLE	1.84	14.5	213
06/09/1998 15:00	EARL	3.07	8.5	248
19/09/1999 00:00	FLOYD	2.62	11.8	227
23/09/1999 09:00	GERT	2.71	16.7	212
19/10/1999 03:00	IRENE	1.87	5.5	80
17/09/2000 06:00	FLORENCE	1.72	5.6	156
25/09/2000 06:00	HELENE	2.19	8.6	228
08/10/2000 00:00	LESLIE	1.97	7.8	214
20/10/2000 09:00	MICHAEL	4.73	9.6	240
29/10/2000 12:00	NOT_NAMED	3.42	6.9	79
19/06/2001 00:00	ALLISON	0.93	6.0	230
27/08/2001 18:00	DEAN	1.23	6.5	232
15/09/2001 06:00	ERIN	1.71	11.6	185
19/09/2001 15:00	GABRIELLE	1.81	12.8	201
27/09/2001 09:00	HUMBERTO	0.88	9.3	206
18/07/2002 06:00	ARTHUR	1.28	9.3	213
12/09/2002 18:00	GUSTAV	6.26	12.3	224
06/08/2004 00:00	ALEX	1.07	9.3	206
01/09/2004 06:00	GASTON	2.60	8.1	231
30/07/2005 18:00	FRANKLIN	1.04	9.9	218
19/09/2005 00:00	OPHELIA	2.15	11.6	224
26/10/2005 15:00	WILMA	2.01	5.5	90
16/06/2006 15:00	ALBERTO	2.82	13.5	216
19/07/2006 06:00	NOT_NAMED	1.49	9.1	218
22/07/2006 12:00	BERYL	1.94	7.3	217
13/09/2006 15:00	FLORENCE	3.67	6.9	27
02/10/2006 15:00	ISAAC	1.62	5.3	116
31/07/2007 18:00	CHANTAL	1.18	6.2	231
22/07/2008 18:00	CRISTOBAL	1.02	7.2	223
08/09/2008 09:00	HANNA	1.77	9.5	217
30/09/2008 00:00	KYLE	1.98	12.2	225
24/08/2009 06:00	BILL	4.61	15.4	225
05/09/2010 06:00	EARL	5.86	13.9	235
21/09/2010 21:00	IGOR	3.96	8.6	264
10/11/2010 18:00	TOMAS	1.37	4.7	62
03/09/2011 15:00	KATIA	0.52	6.5	203
10/09/2011 00:00	NOT_NAMED	1.51	11.9	217
16/09/2011 15:00	MARIA	1.70	7.2	206
03/10/2011 12:00	OPHELIA	2.90	17.5	213
12/11/2011 18:00	SEAN	4.40	10.5	234

Le maximum des Hs cycloniques vaut 6,26 m. Cette valeur se situe entre les valeurs de retour 2 ans et 5 ans des Hs saisonnières (cf document Résultats_analyse_stat.docx).

3.2.2 Point Ouest

L'analyse sur le point Ouest des 58 météores révèle des vagues cycloniques d'amplitude modérée et de période pouvant avoisiner les 18s (Figure 3). Les directions pics associées sont relativement groupées autour de 200° (Figure 4).

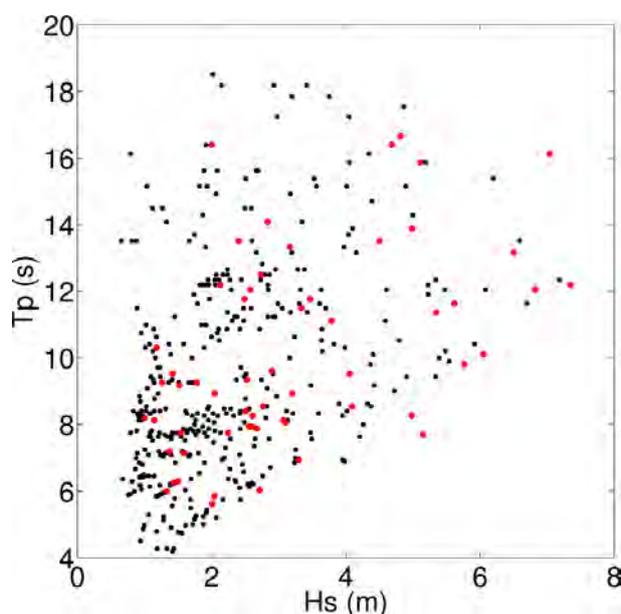


Figure 3: Graphe bivarié représentant les périodes pics et les hauteurs significatives pendant les 58 météores. Les points rouges correspondent au maximum de Hs pour chacun des 58 évènements.

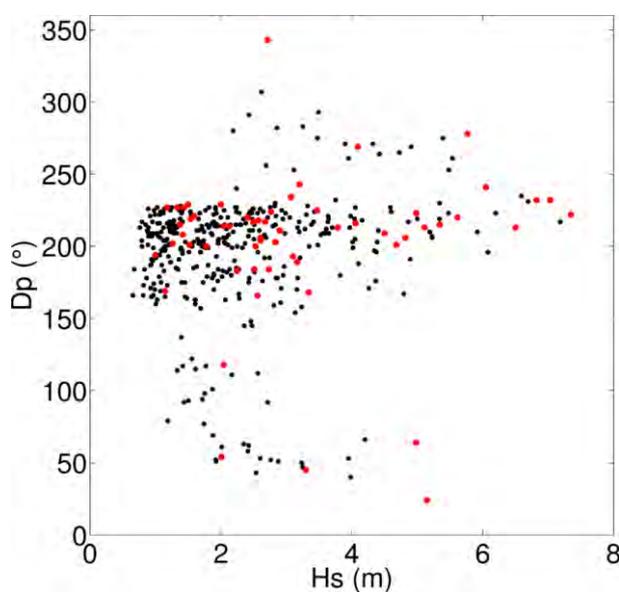


Figure 4: Graphe bivarié représentant les directions pics et les hauteurs significatives pendant les 58 météores. Les points rouges correspondent au maximum de Hs pour chacun des 58 évènements.

Tableau 7: Caractéristiques des 58 points rouges des figures précédentes – Point Ouest

Date	Nom du météore	Hs(m)	Tp(s)	Dp(°)
02/08/1990 12:00	BERTHA	6.50	13.2	213
15/10/1990 12:00	LILI	2.53	9.3	200
21/08/1991 06:00	BOB	3.20	8.9	243
29/10/1991 09:00	NOT_NAMED	3.30	6.9	45
10/09/1993 06:00	FLOYD	1.00	8.2	194
23/08/1994 06:00	CHRIS	1.54	7.8	219
09/06/1995 03:00	ALLISON	3.79	11.1	213
10/07/1995 06:00	BARRY	3.10	8.1	193
20/07/1995 06:00	CHANTAL	2.51	8.4	184
22/08/1995 03:00	FELIX	2.13	12.2	214
11/09/1995 12:00	LUIS	5.11	15.9	213
14/07/1996 21:00	BERTHA	4.06	9.5	216
04/09/1996 00:00	EDOUARD	2.49	11.8	217
15/09/1996 18:00	HORTENSE	4.99	13.9	223
10/10/1996 12:00	JOSEPHINE	5.62	11.6	220
13/07/1997 00:00	BILL	1.59	7.1	221
27/07/1997 12:00	DANNY	1.18	10.3	227
30/08/1998 18:00	BONNIE	2.40	13.5	220
04/09/1998 00:00	DANIELLE	2.83	14.1	203

06/09/1998 15:00	EARL	4.09	8.5	269
19/09/1999 00:00	FLOYD	3.47	11.8	225
23/09/1999 09:00	GERT	4.68	16.4	201
19/10/1999 09:00	IRENE	2.72	6.0	343
17/09/2000 06:00	FLORENCE	2.56	7.9	166
25/09/2000 06:00	HELENE	2.77	8.5	224
08/10/2000 00:00	LESLIE	2.60	7.9	204
20/10/2000 09:00	MICHAEL	6.05	10.1	241
29/10/2000 12:00	NOT_NAMED	4.98	8.3	64
19/06/2001 00:00	ALLISON	1.33	6.0	227
27/08/2001 18:00	DEAN	1.50	6.3	229
14/09/2001 21:00	ERIN	3.16	13.3	189
19/09/2001 15:00	GABRIELLE	2.73	12.5	184
27/09/2001 09:00	HUMBERTO	1.26	9.3	202
18/07/2002 03:00	ARTHUR	1.78	9.3	200
12/09/2002 18:00	GUSTAV	7.35	12.2	222
06/08/2004 00:00	ALEX	1.52	9.2	201
01/09/2004 06:00	GASTON	3.07	8.1	234
30/07/2005 18:00	FRANKLIN	1.42	9.5	208
18/09/2005 21:00	OPHELIA	2.90	9.6	211
26/10/2005 15:00	WILMA	3.34	11.5	168
16/06/2006 12:00	ALBERTO	4.50	13.5	209
19/07/2006 06:00	NOT_NAMED	2.05	8.9	214
22/07/2006 12:00	BERYL	2.68	7.9	217
13/09/2006 15:00	FLORENCE	5.15	7.7	24
02/10/2006 15:00	ISAAC	2.04	5.8	118
31/07/2007 18:00	CHANTAL	1.43	6.3	227
22/07/2008 18:00	CRISTOBAL	1.37	7.2	215
08/09/2008 03:00	HANNA	2.61	8.3	206
30/09/2008 00:00	KYLE	2.57	12.0	218
24/08/2009 03:00	BILL	7.04	16.1	232
05/09/2010 03:00	EARL	6.82	12.0	232
21/09/2010 21:00	IGOR	5.77	9.8	278
10/11/2010 18:00	TOMAS	2.01	5.6	54
03/09/2011 18:00	KATIA	1.15	8.1	169
10/09/2011 12:00	NOT_NAMED	2.00	16.4	229
16/09/2011 18:00	MARIA	2.25	7.8	183
03/10/2011 12:00	OPHELIA	4.82	16.7	206
12/11/2011 18:00	SEAN	5.35	11.4	215

Le maximum des Hs cycloniques vaut 7,35 m. Cette valeur se situe entre les valeurs de retour 1 an et 2 ans des Hs saisonnières (cf document Résultats_analyse_stat.docx).

3.2.3 Point Sud

L'analyse sur le point Sud des 58 météores révèle des vagues cycloniques d'amplitude globalement modérée et de période pouvant avoisiner les 18s (Figure 5). Les directions pics associées sont assez hétérogènes (Figure 6).

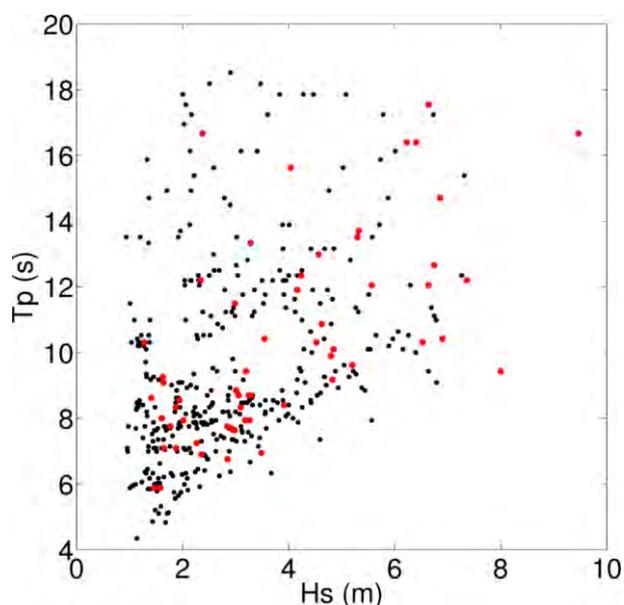


Figure 5: Graphe bivarié représentant les périodes pics et les hauteurs significatives pendant les 58 météores. Les points rouges correspondent au maximum de Hs pour chacun des 58 évènements.

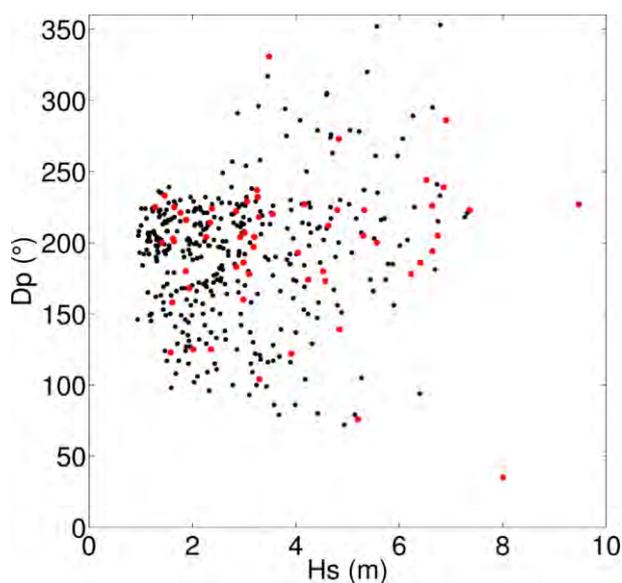


Figure 6: Graphe bivarié représentant les directions pics et les hauteurs significatives pendant les 58 météores. Les points rouges correspondent au maximum de Hs pour chacun des 58 évènements.

Tableau 8: Caractéristiques des 58 points rouges des figures précédentes – Point Sud

Date	Nom du météore	Hs(m)	Tp(s)	Dp(°)
02/08/1990 12:00	BERTHA	6.74	12.7	205
15/10/1990 12:00	LILI	3.20	9.4	204
21/08/1991 00:00	BOB	3.25	8.7	237
29/10/1991 12:00	NOT_NAMED	5.20	9.6	76
09/09/1993 18:00	FLOYD	1.58	5.9	123
23/08/1994 06:00	CHRIS	1.77	7.8	221
09/06/1995 03:00	ALLISON	4.62	10.9	212
10/07/1995 06:00	BARRY	3.18	7.9	197
20/07/1995 06:00	CHANTAL	3.10	8.3	178
22/08/1995 06:00	FELIX	2.34	12.2	214
11/09/1995 09:00	LUIS	6.64	17.5	194
14/07/1996 21:00	BERTHA	4.80	9.9	223
04/09/1996 00:00	EDOUARD	3.91	8.4	122
15/09/1996 18:00	HORTENSE	5.32	13.7	223
10/10/1996 12:00	JOSEPHINE	6.64	12.0	226
13/07/1997 00:00	BILL	1.65	7.1	225
27/07/1997 12:00	DANNY	1.28	10.3	225
30/08/1998 18:00	BONNIE	3.28	13.3	218
03/09/1998 21:00	DANIELLE	4.04	15.6	193
06/09/1998 15:00	EARL	4.83	9.2	273
19/09/1999 00:00	FLOYD	4.16	11.9	227
23/09/1999 09:00	GERT	6.23	16.4	178
19/10/1999 09:00	IRENE	3.48	6.9	331
17/09/2000 06:00	FLORENCE	2.98	7.6	160

25/09/2000 06:00	HELENE	3.06	8.7	229
08/10/2000 00:00	LESLIE	2.92	7.7	204
20/10/2000 09:00	MICHAEL	6.53	10.3	244
29/10/2000 12:00	NOT_NAMED	4.53	10.3	180
19/06/2001 00:00	ALLISON	1.46	5.9	233
28/08/2001 18:00	DEAN	1.94	8.5	168
14/09/2001 21:00	ERIN	4.57	13.0	173
19/09/2001 12:00	GABRIELLE	4.24	12.3	174
27/09/2001 12:00	HUMBERTO	1.41	8.6	200
17/07/2002 06:00	ARTHUR	2.01	7.9	125
12/09/2002 18:00	GUSTAV	7.36	12.2	223
06/08/2004 00:00	ALEX	1.64	9.1	201
01/09/2004 06:00	GASTON	3.26	7.9	232
30/07/2005 18:00	FRANKLIN	1.63	9.3	203
18/09/2005 21:00	OPHELIA	3.55	10.4	220
26/10/2005 12:00	WILMA	4.84	10.1	139
16/06/2006 12:00	ALBERTO	5.30	13.5	205
19/07/2006 00:00	NOT_NAMED	2.26	7.2	204
22/07/2006 12:00	BERYL	2.84	7.8	222
13/09/2006 15:00	FLORENCE	8.00	9.4	35
02/10/2006 15:00	ISAAC	2.36	6.9	125
01/08/2007 18:00	CHANTAL	1.87	8.3	180
22/07/2008 18:00	CRISTOBAL	1.88	7.1	216
08/09/2008 06:00	HANNA	3.01	8.8	207
30/09/2008 00:00	KYLE	2.99	11.5	186
24/08/2009 03:00	BILL	9.47	16.7	227
05/09/2010 06:00	EARL	6.86	14.7	239
21/09/2010 21:00	IGOR	6.90	10.4	286
10/11/2010 18:00	TOMAS	3.29	8.7	104
03/09/2011 18:00	KATIA	1.61	8.0	158
10/09/2011 12:00	NOT_NAMED	2.38	16.7	224
16/09/2011 09:00	MARIA	2.85	6.8	183
03/10/2011 12:00	OPHELIA	6.41	16.4	186
12/11/2011 12:00	SEAN	5.57	12.0	200

Le maximum des Hs cycloniques vaut 9,47 m. Cette valeur se situe entre les valeurs de retour 10 ans et 20 ans des Hs non cycloniques. Au regard de la période pic proche de 17s, ce couple (Hs,Tp) mériterait d'être comparé aux autres couples saisonniers sélectionnés pour l'étude de la submersion.

4 Bibliographie

Batstone, C., Lawless, M., Tawn, J., Horsburgh, K., Blackman, D., McMillan, A., Worth, D., Laeger, S., and Hunt, T.: A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines, *Ocean Eng.*, 71, 28-39, doi:10.1016/j.oceaneng.2013.02.003, 2013.

Bernardara, P., Mazas, F., Kergadallan, X., and Hamm, L.: A two-step framework for over-threshold modelling of environmental extremes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 635-647, 2014.

Bulteau, T., Nicolae Lerma, A., and Lecacheux, S.: *Projet Climats de Houle – Phase 2 : Analyse des valeurs extrêmes de vagues le long de la côte Atlantique et en Manche. Rapport final.* BRGM/RP-62730-FR, 49p., 26fig., 3 ann., Orléans, 2013.

Mazas, F., and Hamm, L.: A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights, *Coast. Eng.*, 58, 385-394, 2011.

Pugh, C.: *Changing Sea Levels - Effects of Tides, Weather and Climate*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

Annexe 3

Méthodologie pour la création d'un MNT à résolution de 10m sur les bourgs de St Pierre et de Miquelon

MNT Saint-Pierre et Miquelon

Liste des figures	1
Analyse des écarts entre le MNS MICMAC à 2,5m de résolution et les points DGPS de la DTAM	2
MNT générés	5
Saint-Pierre	5
Miquelon	9
Miquelon Nord	9

Liste des figures

Figure 1 : Histogramme des écarts d'altitude entre les mesures DGPS et le MNS MICMAC à 2,5m	2
Figure 2 : Carte des écarts d'altitude entre les mesures DGPS et le MNS Micmac à 2,5m	3
Figure 3 : Coupe topographique réalisé au centre de la piste de l'aéroport de Saint-Pierre (MNS MICMAC)	4
Figure 4 : Saint-Pierre, points d'altitude utilisés pour générer le MNT 10m.	5
Figure 5 : Saint-Pierre, MNT à 10m et localisation des coupes	6
Figure 6 : Image satellite plaquée sur le MNT 10m	8
Figure 7 : Miquelon Nord: points d'altitude utilisés pour générer le MNT 10m.	9
Figure 8 : Miquelon Nord, MNT à 10m et localisation des coupes.	10
Figure 9 : Comparaison des coupes topographiques réalisées sur le MNT Ign 25m et sur le MNT 10m créé – A noter sur la coupe 4 une inversion des pentes entre le MNT IGN et celui généré (à Checker)	11
Figure 10: Miquelon centre: points d'altitude utilisés pour générer le MNT 10m.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11: Miquelon centre: MNT 10m et localisation des coupes.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12 : Comparaison des profils topographiques des coupes 1,2,3 (Figure 5) entre MNT Ign 25m et le MNT 10m	Erreur ! Signet non défini.

Analyse des écarts entre le MNS MICMAC à 2,5m de résolution et les points DGPS de la DTAM

Afin de mieux cerner la qualité du MNS MICMAC nous avons comparé ses altitudes avec celles fournis par les mesures topographiques réalisées par la DTAM au DGPS et dont la fiabilité et la précision nous permet de les considérer comme des références.

L'analyse de la différence entre les altitudes mesurées au DGPS et celles des du MNS situées en dessous montre des écarts importants dont l'histogramme est présenté dans la Figure 1. La moyenne de l'erreur est de -1,66m (le MNS MICMAC donne des altitudes généralement supérieures à celles des mesures) avec un écart type de 0,9m. La valeur de l'écart négatif maximum atteint -8,13m et le positif 3,24m. Les valeurs d'erreur sont donc très variables et ne semblent pas correspondre à un simple décalage homogène en z.

La répartition spatiale des erreurs (Figure 2) n'est pas homogène ni progressive et varie fortement d'un point à un autre. Le secteur sud-ouest de Saint-Pierre (anses à Brossard et Savoyard) est affecté par des erreurs plus importantes que l'aéroport et ses alentours par exemple. Il ne s'agit donc pas d'un simple écart homogène sur toute la zone qui aurait put facilement être corrigé.

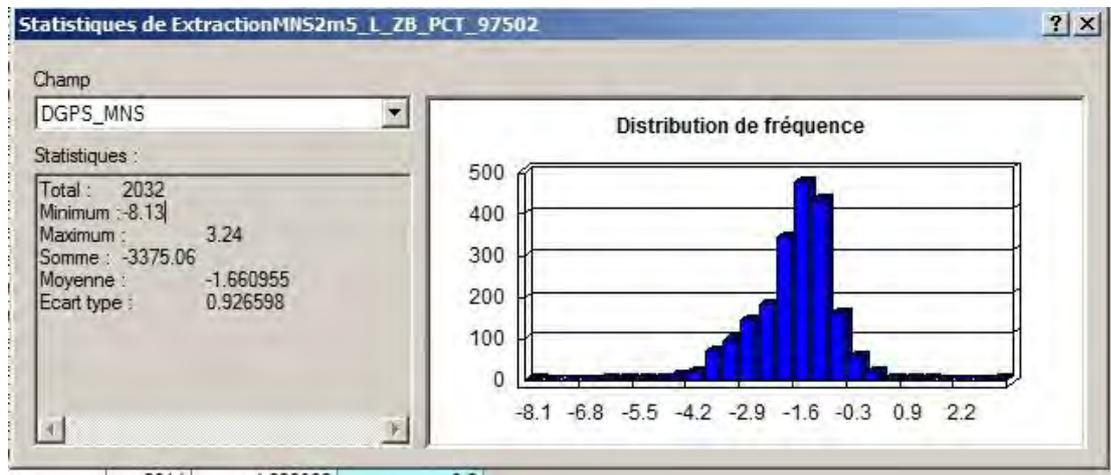


Figure 1 : Histogramme des écarts d'altitude entre les mesures DGPS et le MNS MICMAC à 2,5m

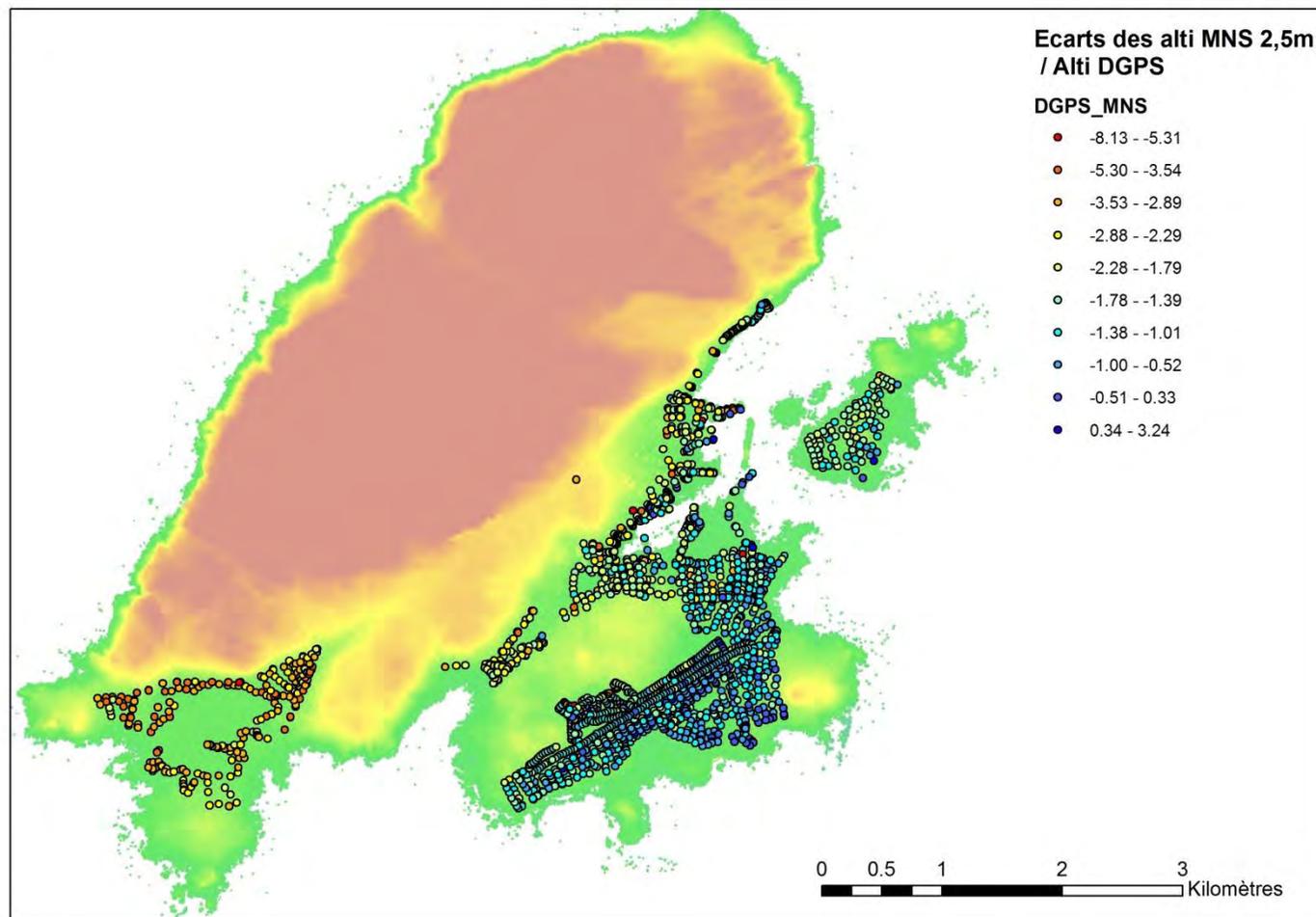


Figure 2 : Carte des écarts d'altitude entre les mesures DGPS et le MNS Micmac à 2,5m

Des coupes topographiques réalisées sur le MNS (Figure 3) montrent que, sur des zones qui devraient être plate et lisse (piste de l'aéroport, rues etc..), la topographie est très bruitée avec des sauts d'altitudes pouvant atteindre le mètre par exemple.

L'hypothèse envisagée était de corriger les altitudes du MNS de MICMAC en lui appliquant une grille de correction basée sur les erreurs entre l'altitude du MNS et les altitudes mesurées au DGPS. Le fait que le MNS soit très bruité et que les écarts dus à ce bruit peuvent être très importants (plusieurs décimètres à plusieurs mètres, Figure 1), cette approche ne peut être appliquée avec succès.

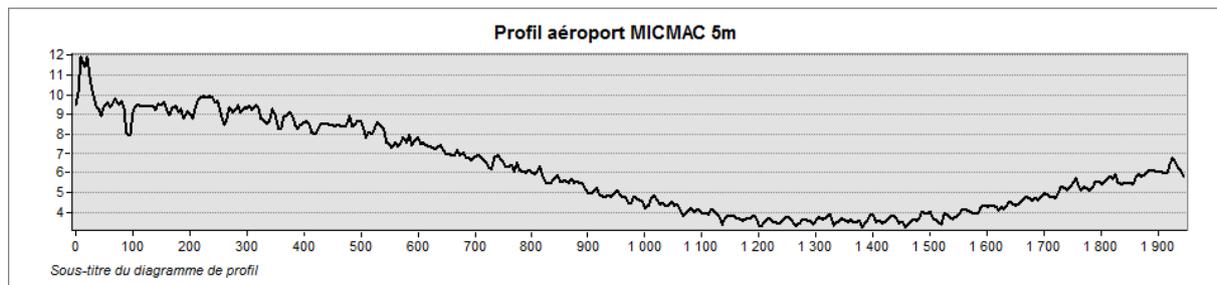


Figure 3 : Coupe topographique réalisé au centre de la piste de l'aéroport de Saint-Pierre (MNS MICMAC)

Ainsi, il nous paraît plus raisonnable de recréer des MNT à plus faible résolution mais basés sur les mesures réalisées au DGPS sur les zones basses, les suivis du trait de côtes et les profils de plage. Ces mesures ne couvrant pas totalement les territoires concernés et afin de faire le raccord avec les zones en relief et le trait de côte, elles ont été complétées par des points extraits du MNT IGN 25m pour les points plus élevés et par des points fictifs à 0m générés tous les 50m à partir des limites du trait de cote et des îles. Ces nuages de points ont ensuite été utilisés pour réaliser des MNT à résolution de 10m sur les zones concernées. Compte tenu d'une part du très grand nombre de points utilisés et d'autre par de la volonté de restituer un MNT au plus proche des mesures, la méthode de triangulation et d'interpolation linéaire a été mise en œuvre (logiciel surfer).

Pour chaque secteur, sont présentés ci-dessous les points d'altitude utilisés, les MNT générés ainsi que quelques coupes permettant de visualiser et de comparer les topographies issus des MNT IGN 25m, MICMAC 2,5m et du MNT à 10m réalisés dans ce projet.

MNT générés

Saint-Pierre

Le MNT a été réalisé à partir de 25 042 points d'altitude composite multi source) intégrant les mesures DGPS du trait de côte, des zones basses et des profils. Afin de contraindre le MNT généré, des points virtuels à 0m d'altitude ont été générés le long du trait de côte ; de même afin de faire le raccord entre les mesures sur les zones basses et les reliefs, une extraction des valeurs altimétriques du MNT 25m a permis de compléter les données avant interpolation. L'interpolation a été réalisée par triangulation (voisins naturels) avec interpolation linéaire sous surfer à une résolution de 10m.

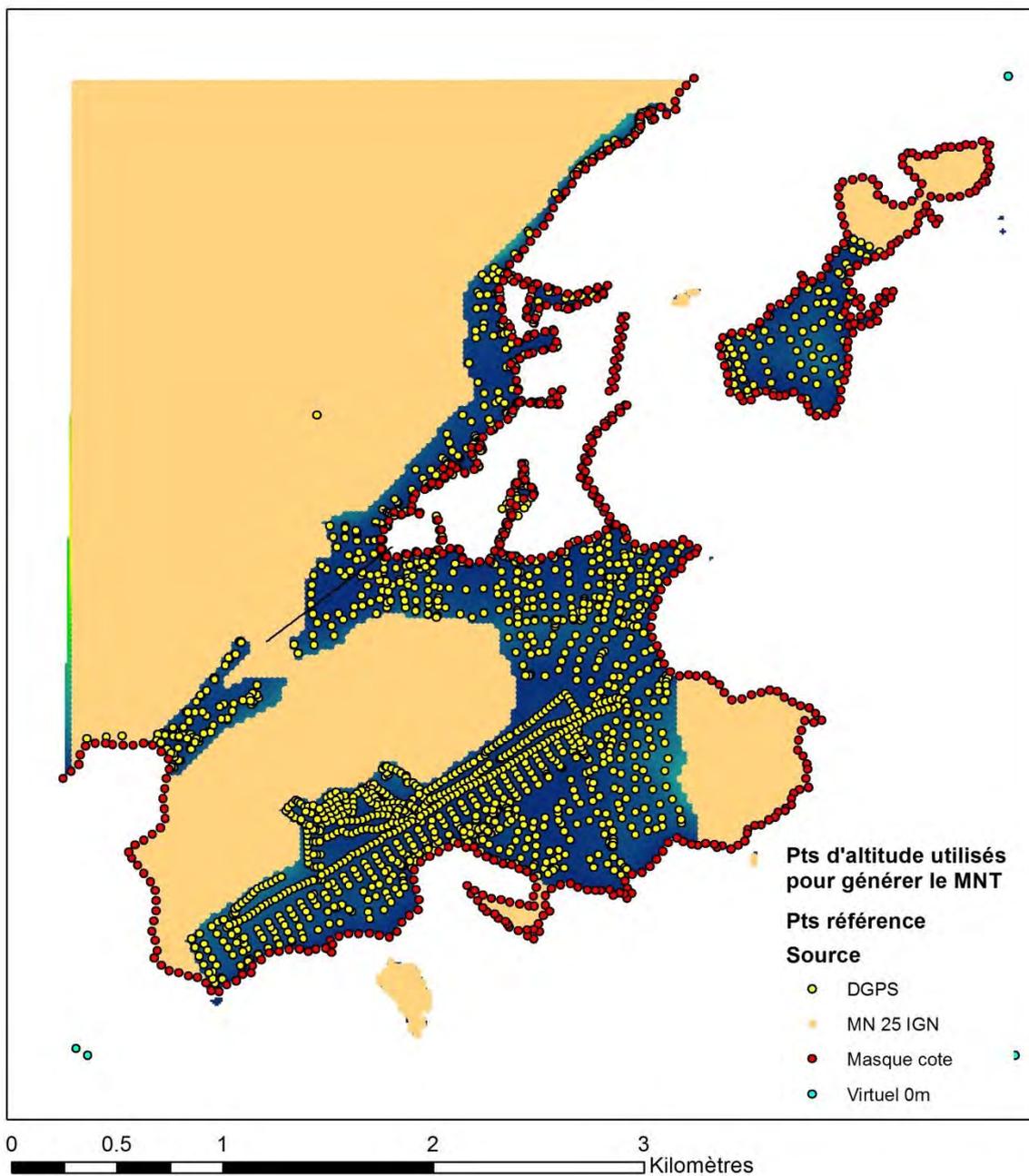


Figure 4 : Saint-Pierre, points d'altitude utilisés pour générer le MNT 10m.

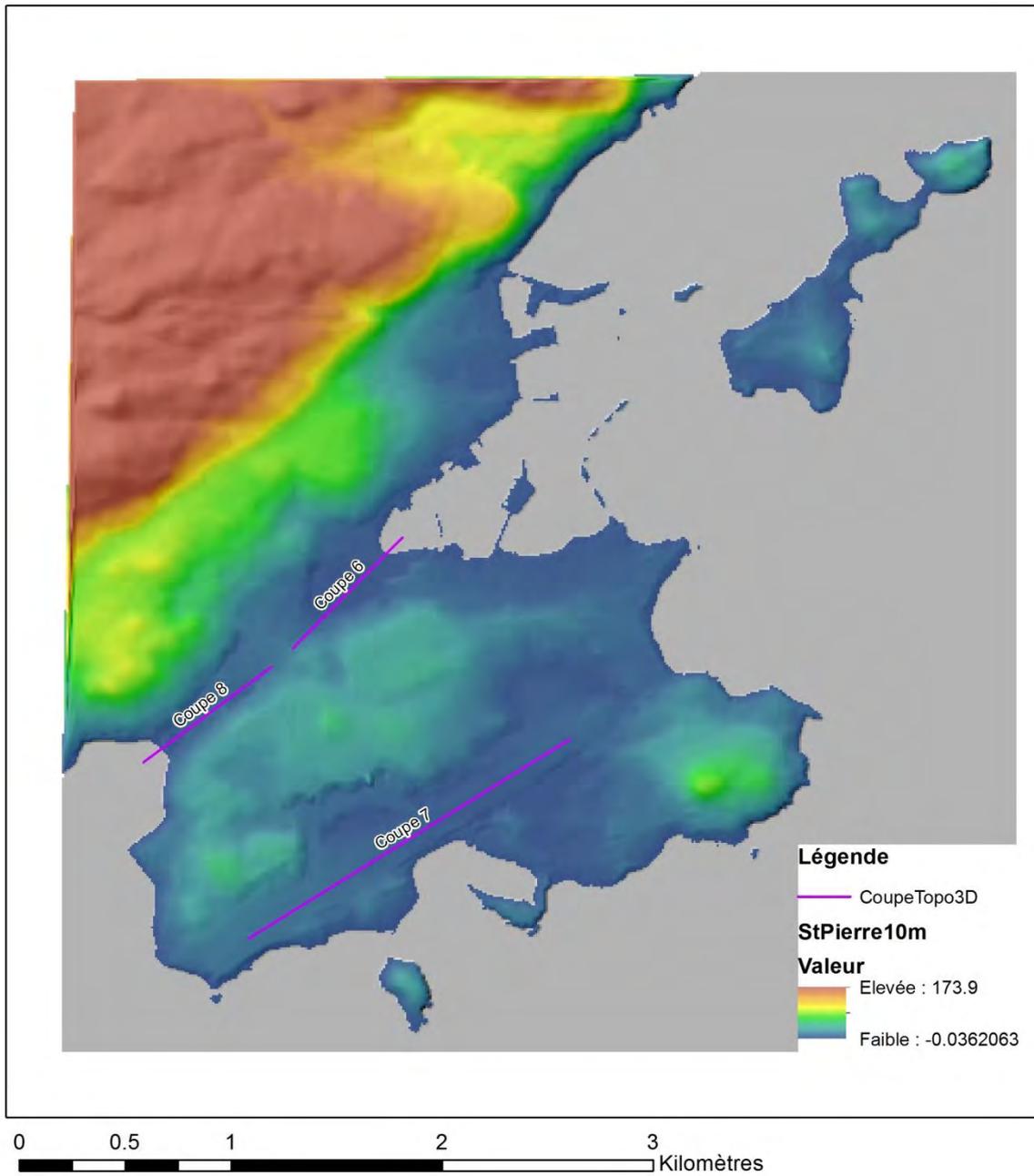


Figure 5 : Saint-Pierre, MNT à 10m et localisation des coupes

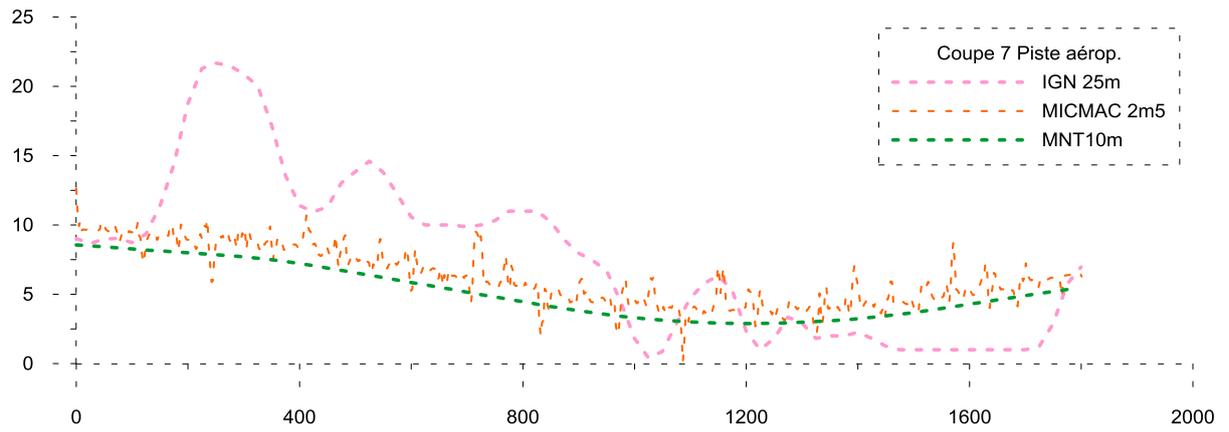
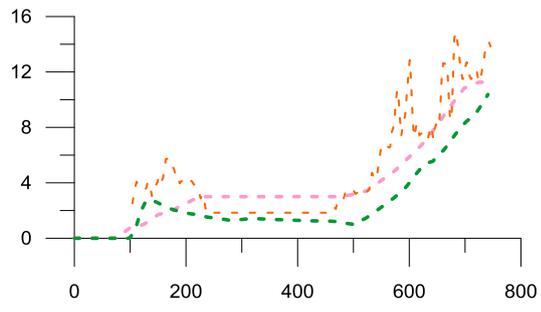




Figure 6 : Image satellite plaquée sur le MNT 10m

Miquelon

Miquelon Nord

Le MNT a été réalisé à partir de 25 278 points d'altitude composite (multi source) intégrant les mesures DGPS du trait de côte, des zones basses et des profils. Afin de contraindre le MNT généré, des points virtuels à 0m d'altitude ont été générés le long du trait de côte ; de même afin de faire le raccord entre les mesures sur les zones basses et les reliefs, une extraction des valeurs altimétriques du MNT 25m a permis de compléter les données avant interpolation. L'interpolation a été réalisée par triangulation avec interpolation linéaire sous surfer à une résolution de 10m.

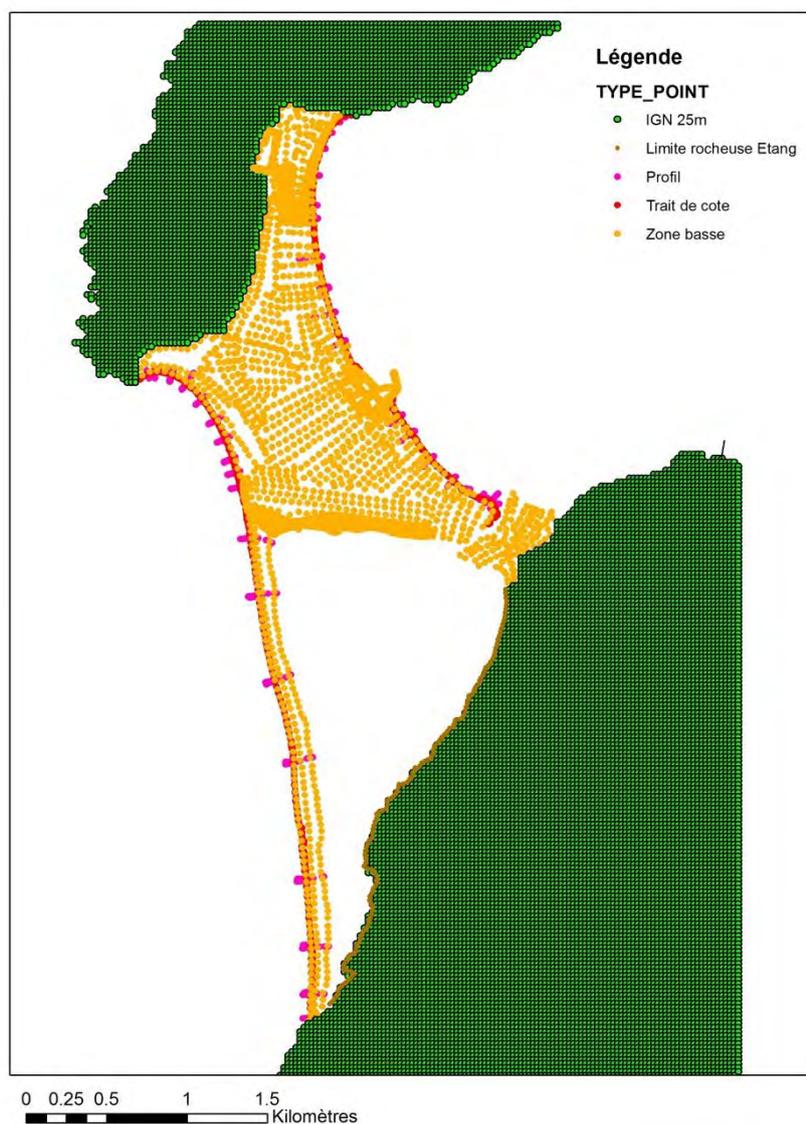


Figure 7: Miquelon Nord: points d'altitude utilisés pour générer le MNT 10m.

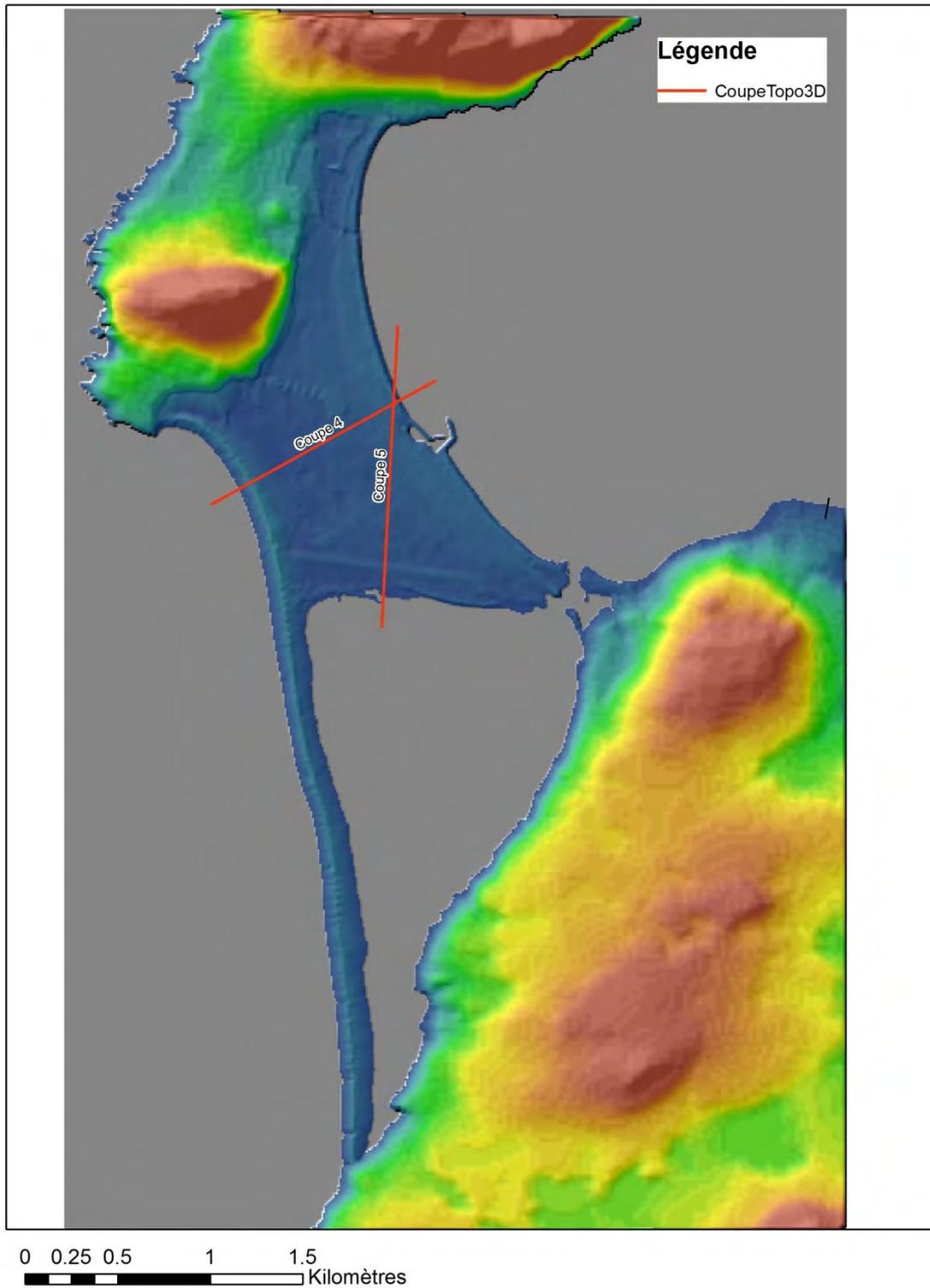


Figure 8 : Miquelon Nord, MNT à 10m et localisation des coupes.

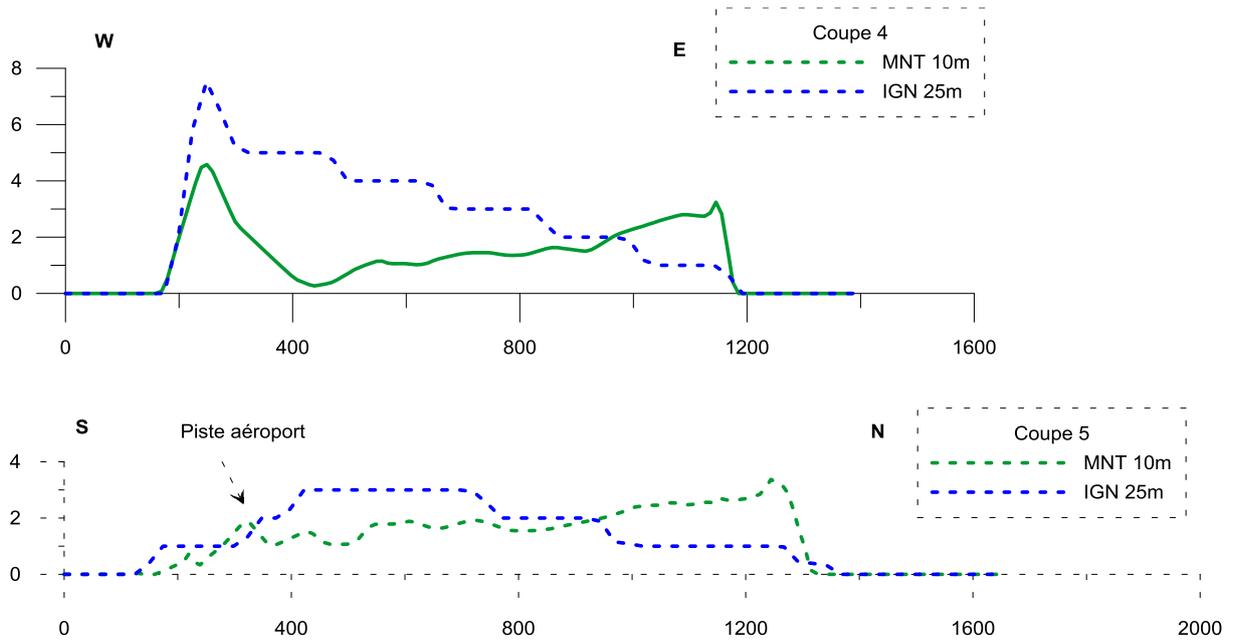
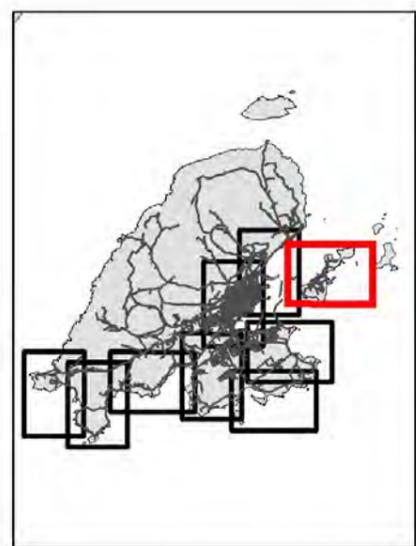
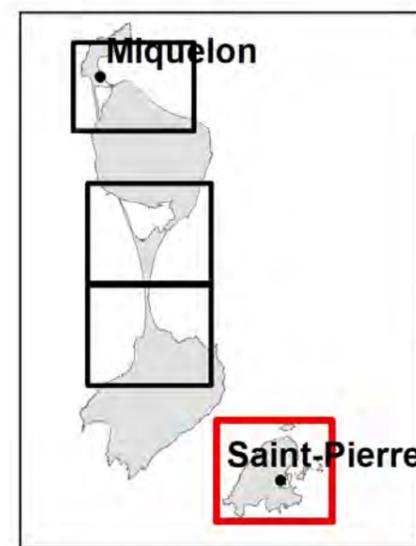
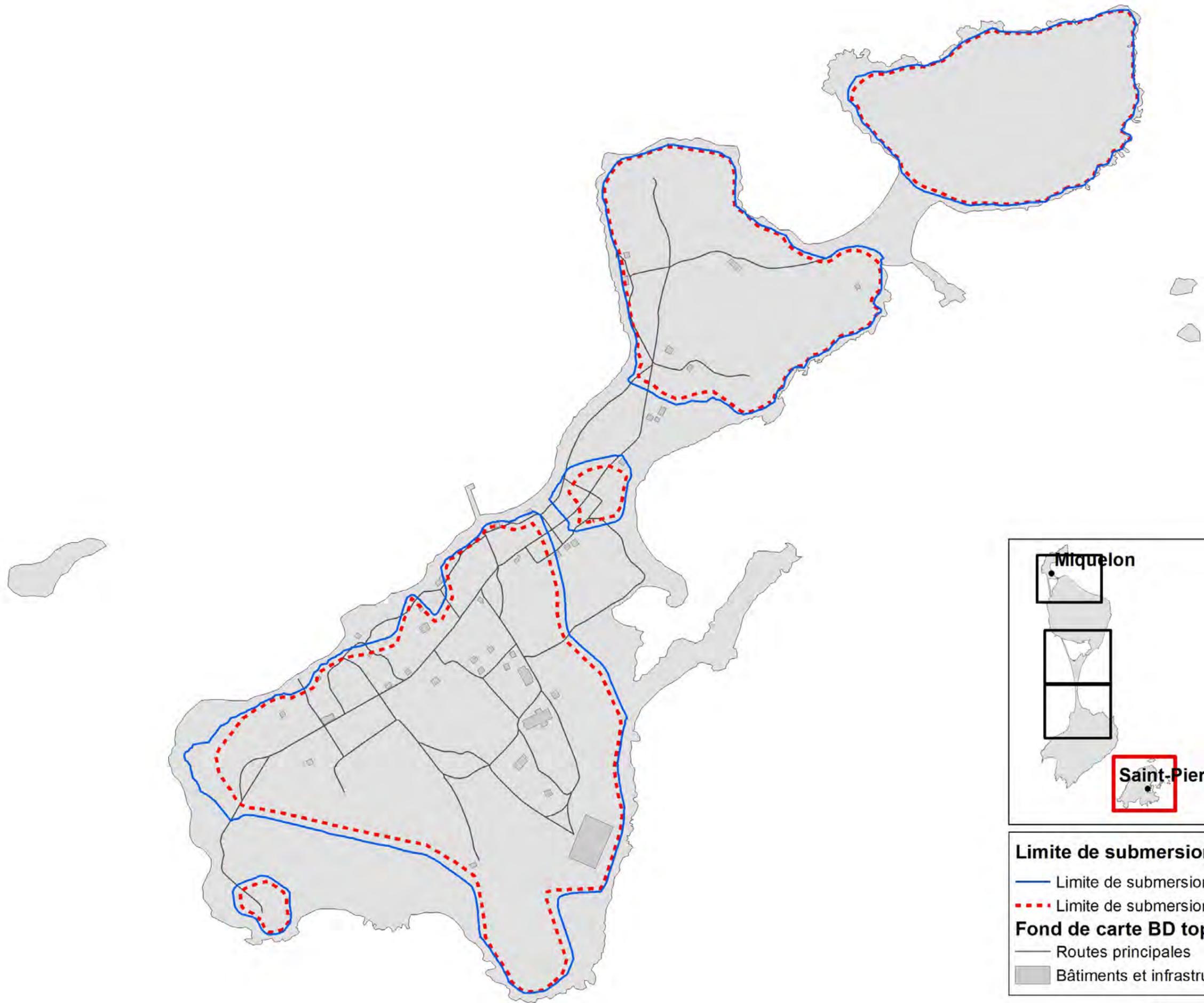


Figure 9 : Comparaison des coupes topographiques réalisées sur le MNT Ign 25m et sur le MNT 10m créé – A noter sur la coupe 4 une inversion des pentes entre le MNT IGN et celui généré

Annexe 4

Cartographie au 1/5000 de l'aléa submersion marine par débordement

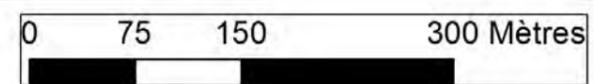


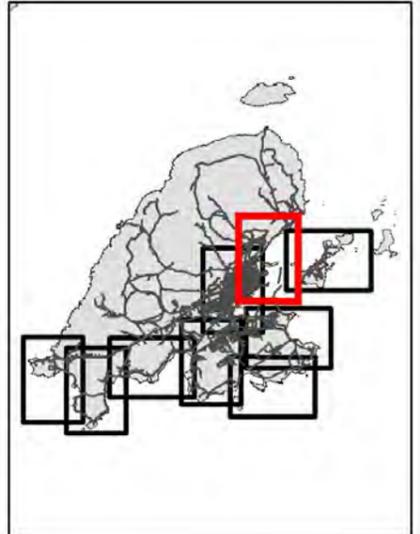
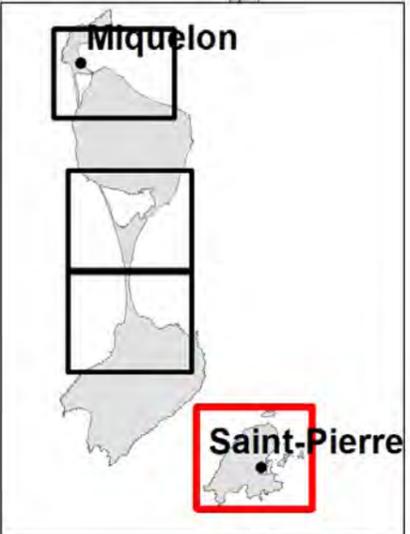
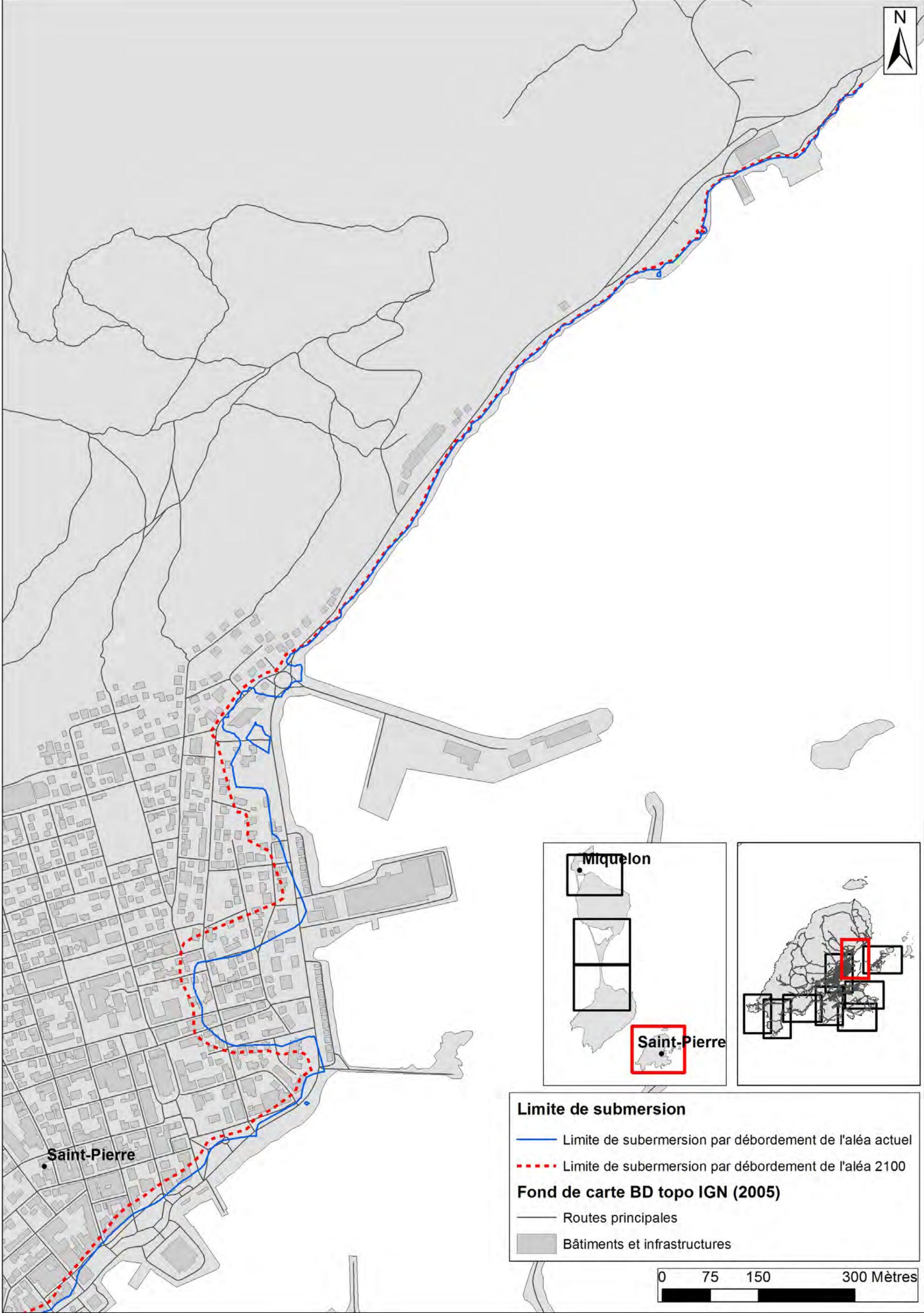
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



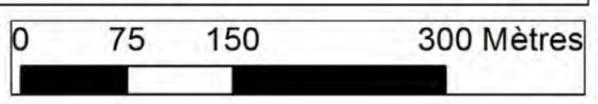


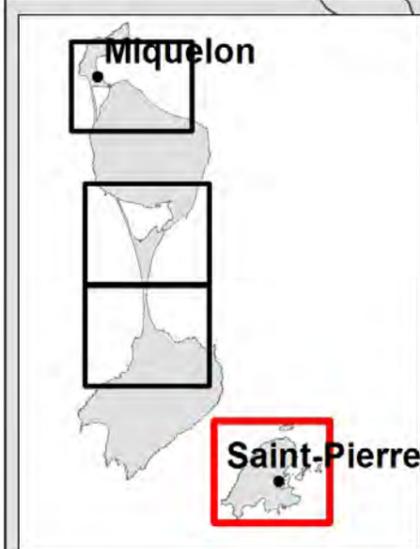
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



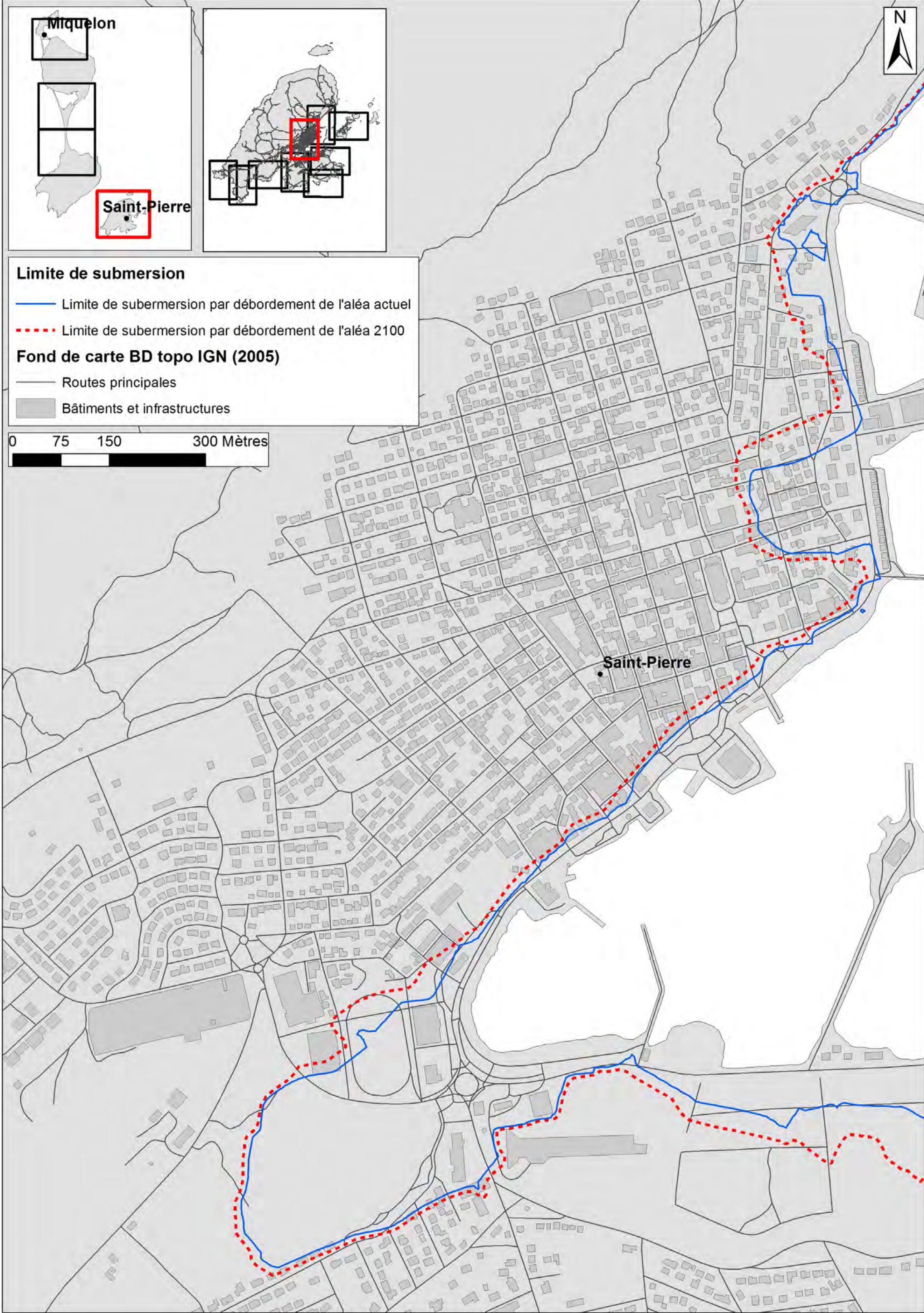
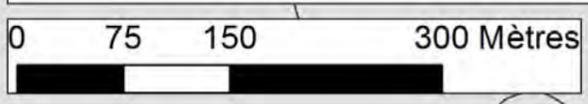


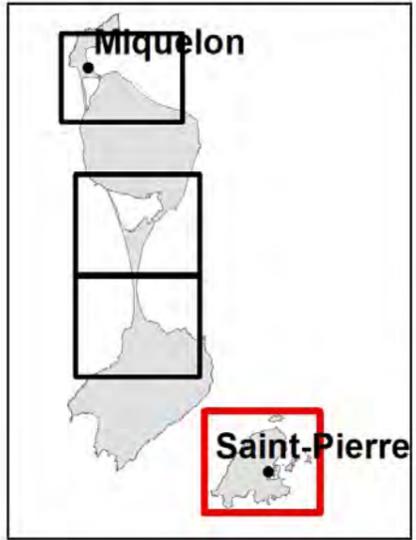
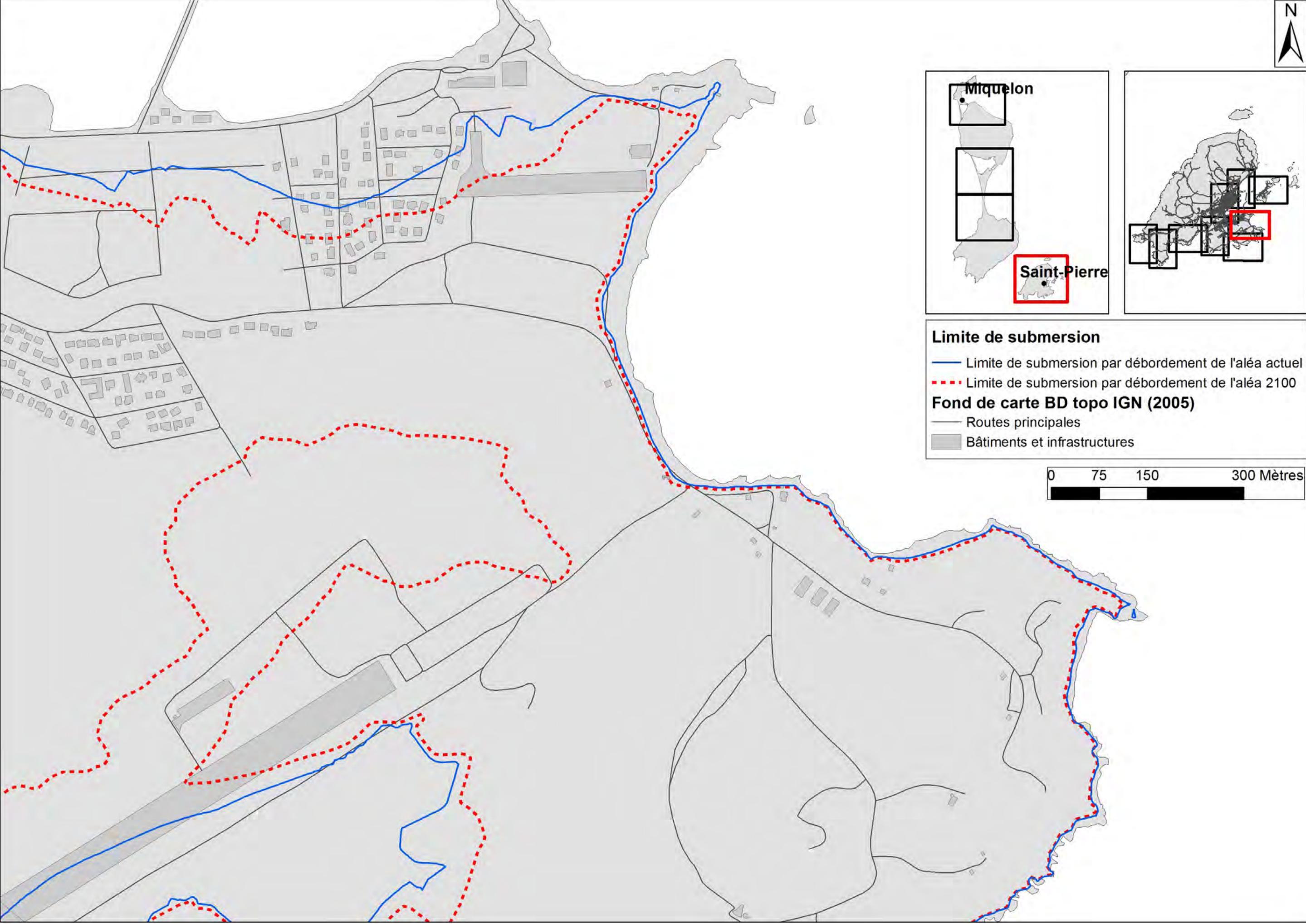
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



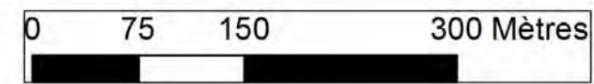


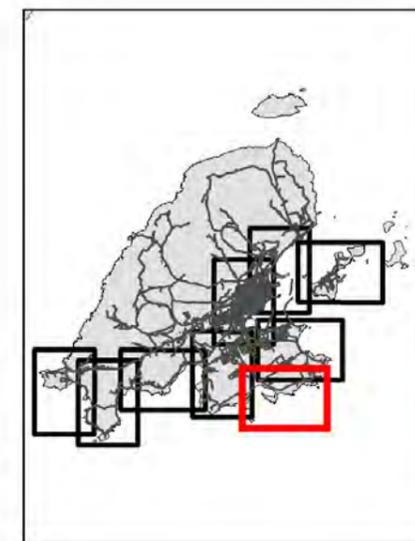
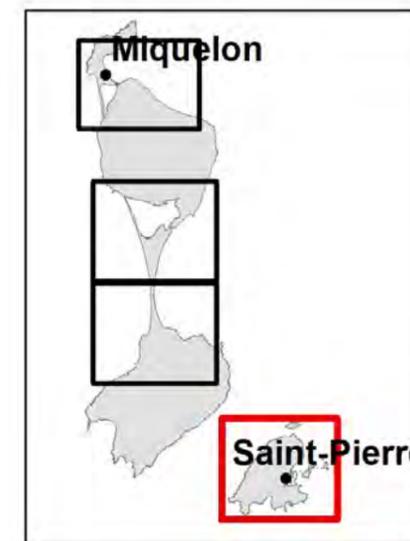
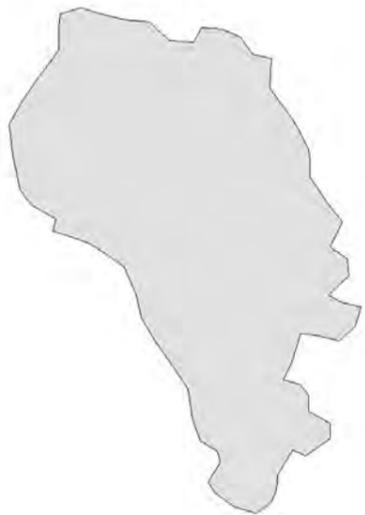
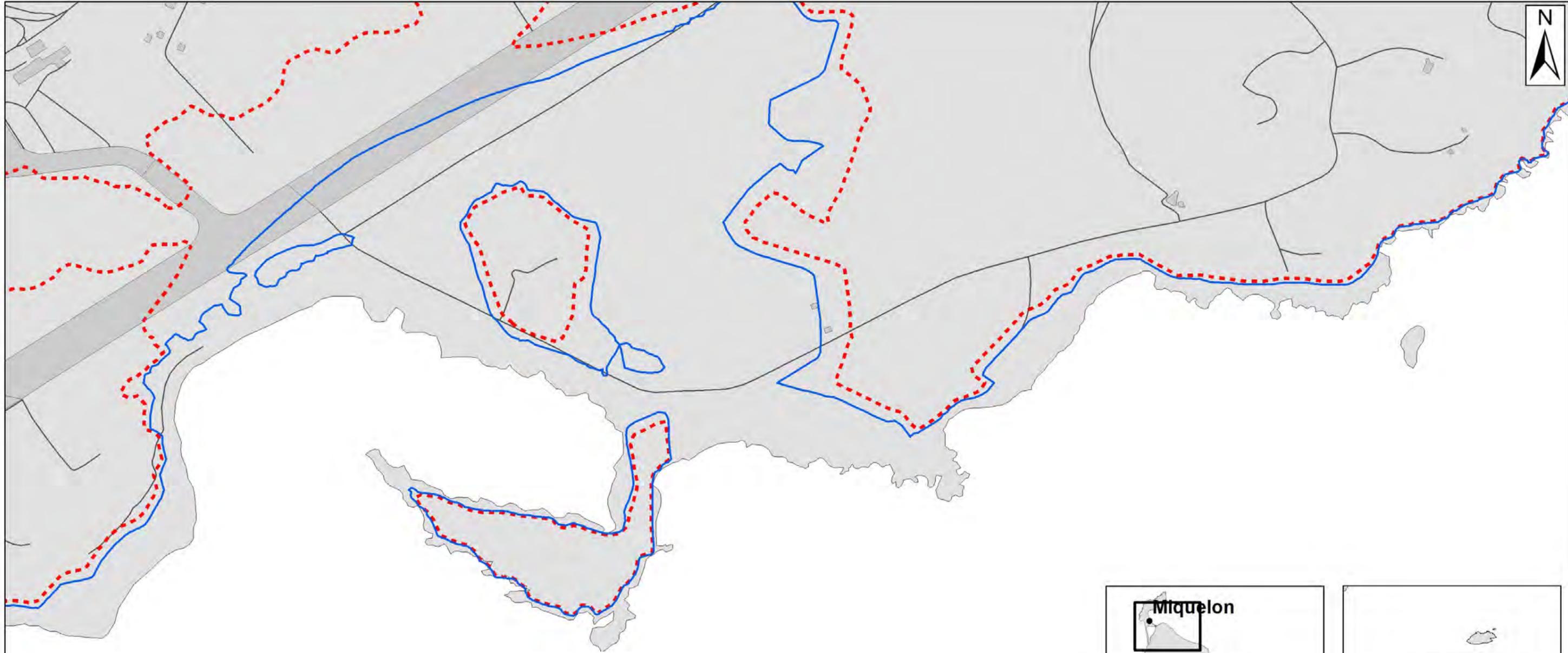
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



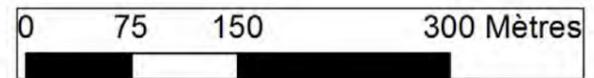


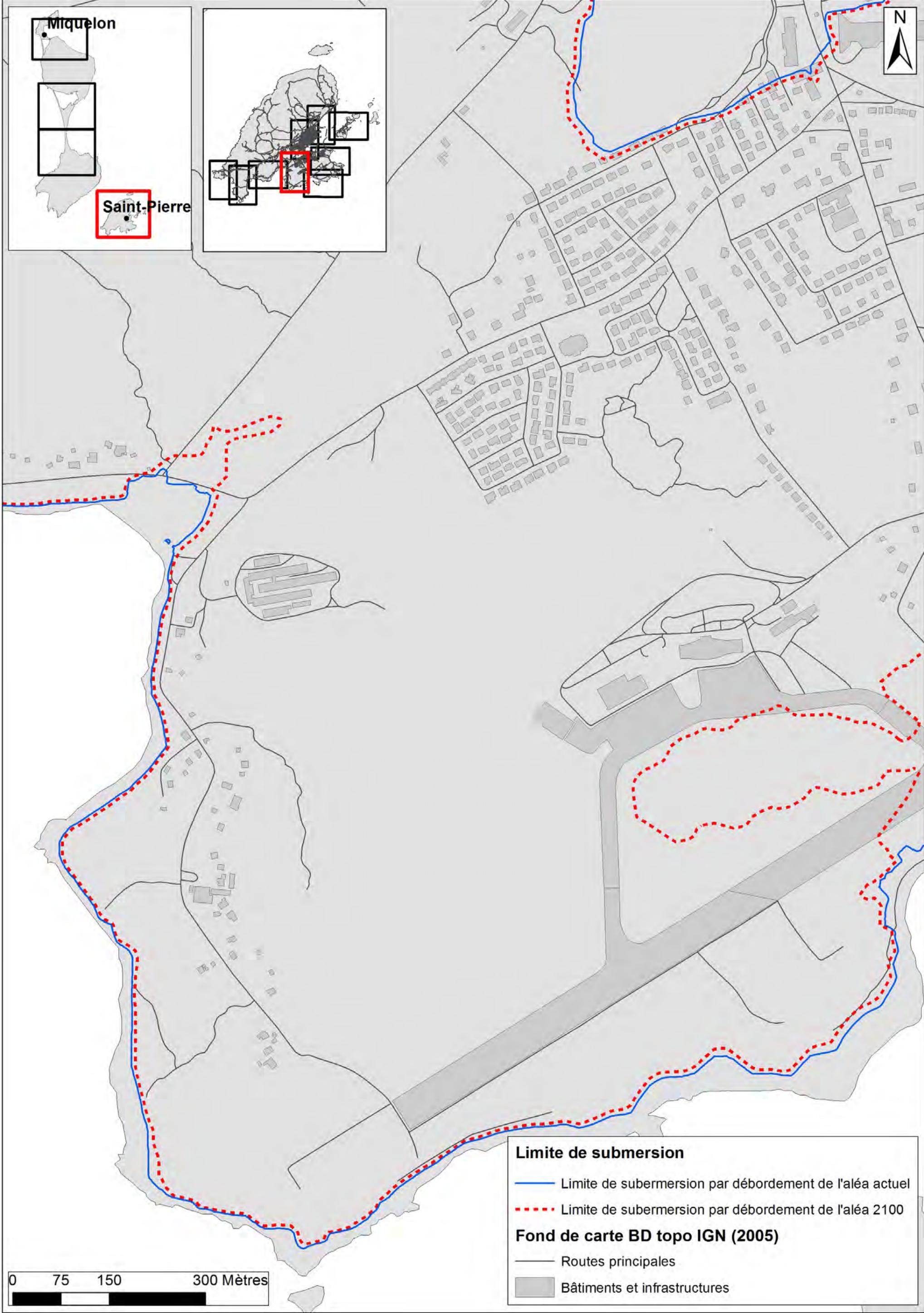
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





Miquelon

Saint-Pierre



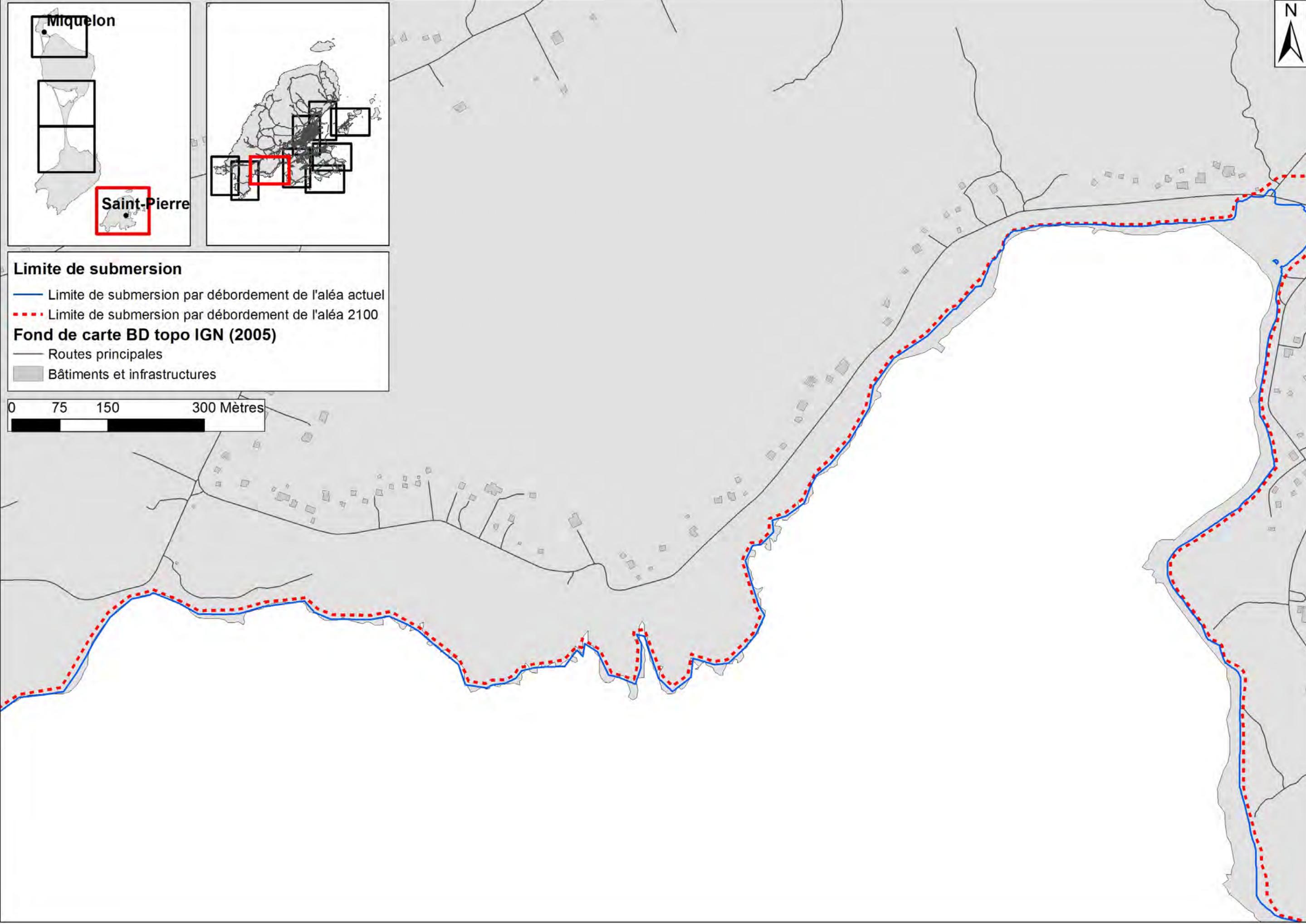
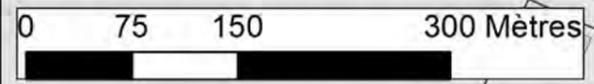
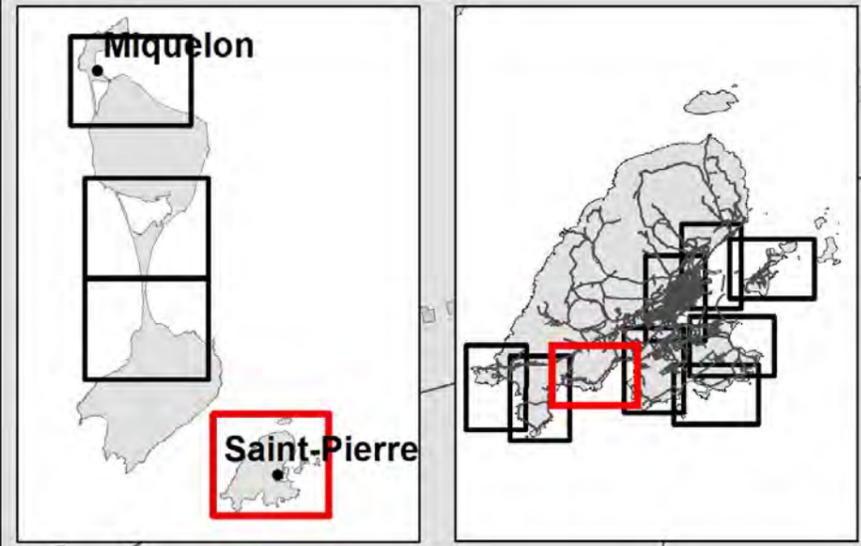
Limite de submersion

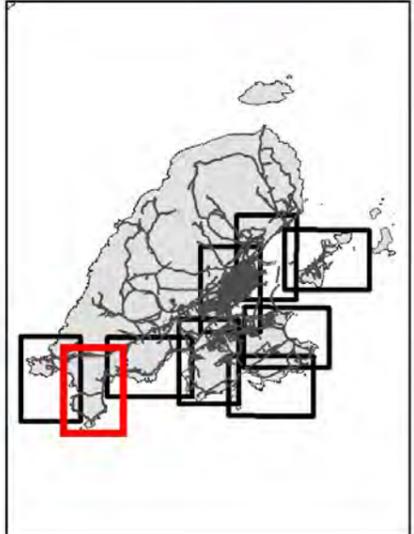
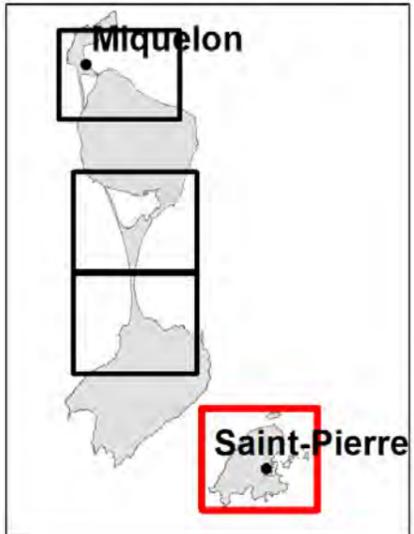
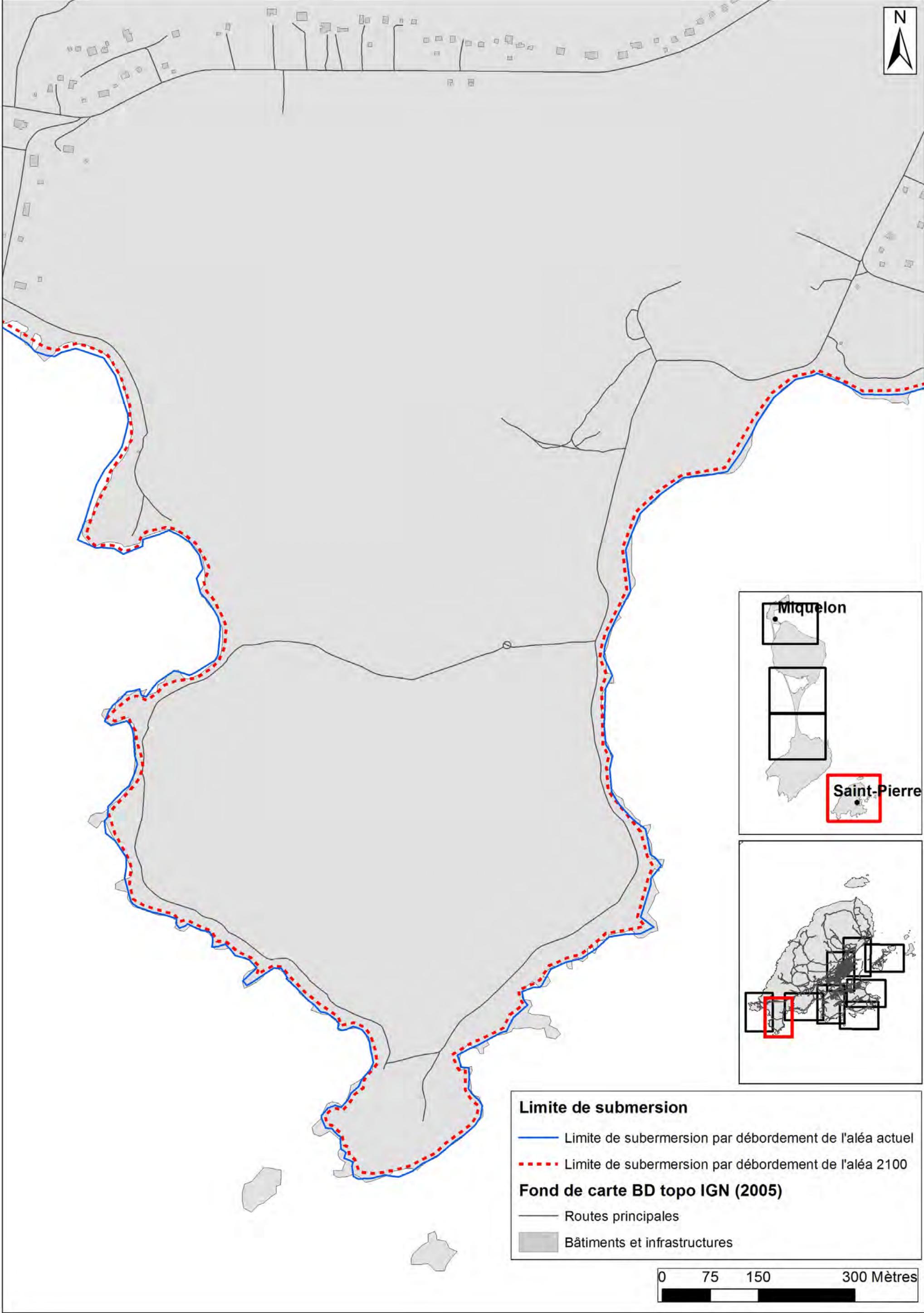
- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

0 75 150 300 Mètres



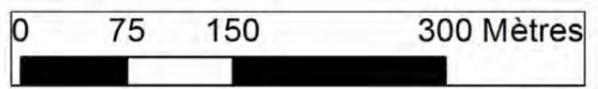


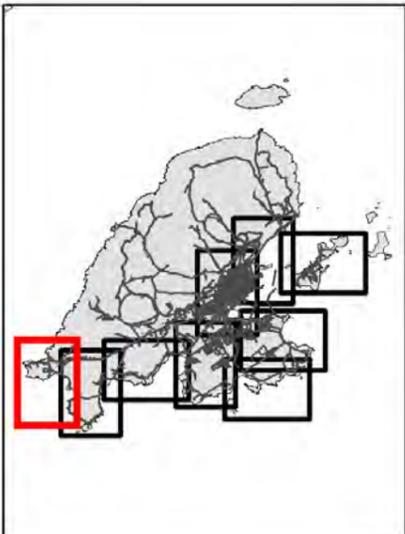
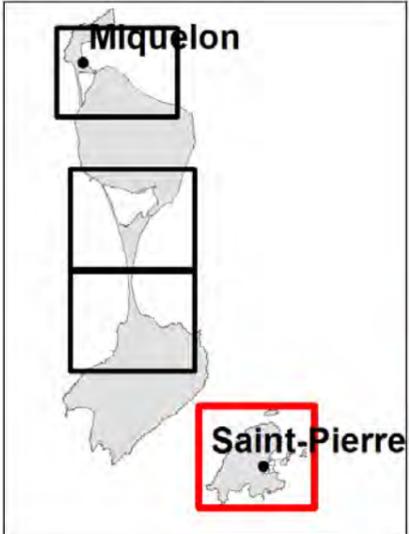
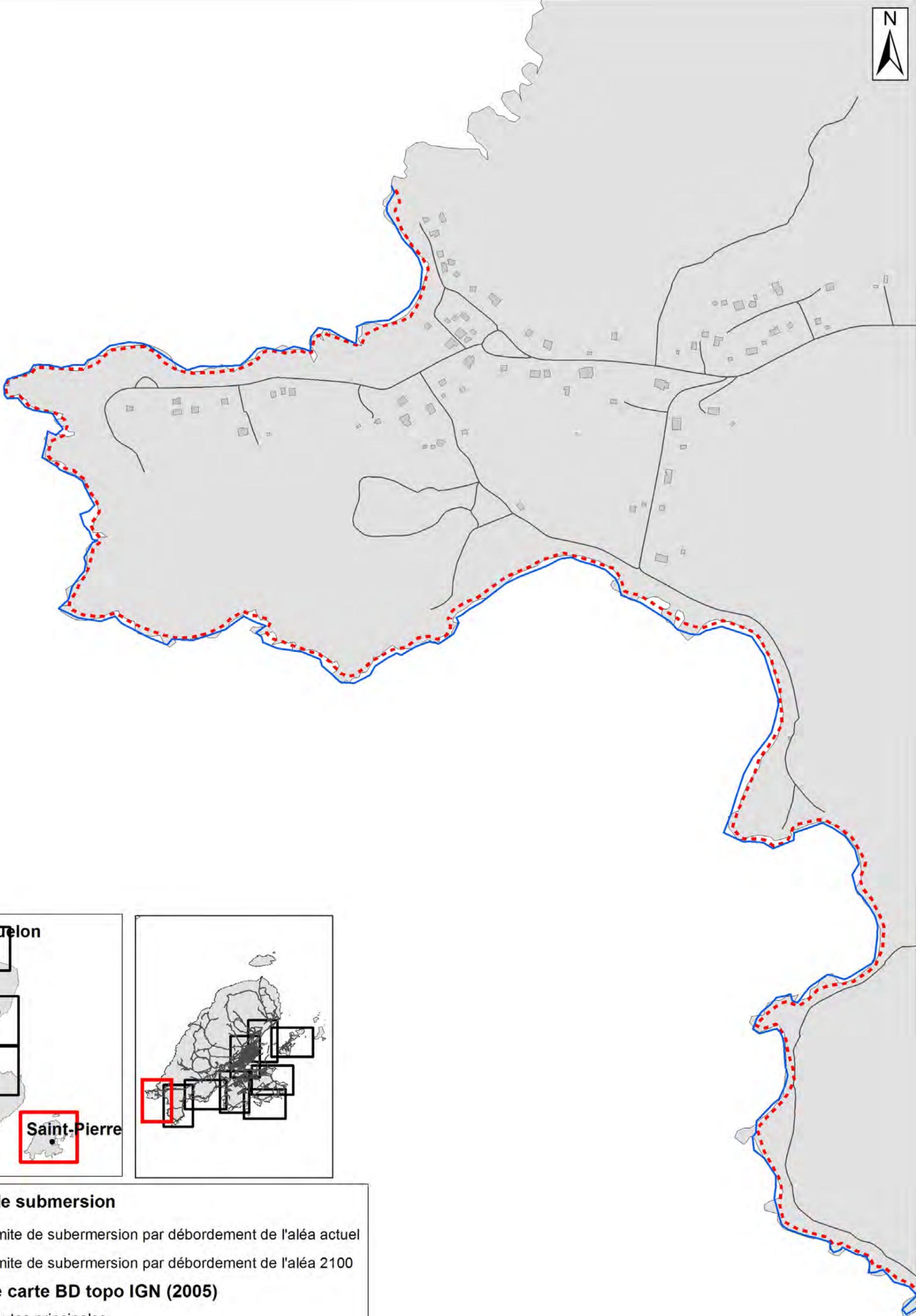
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





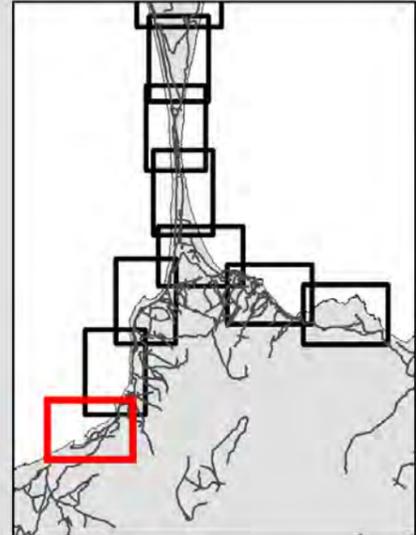
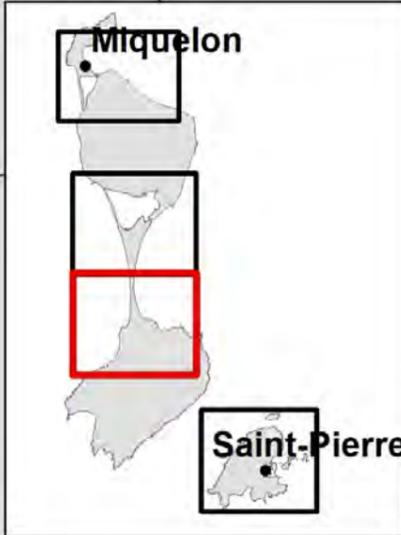
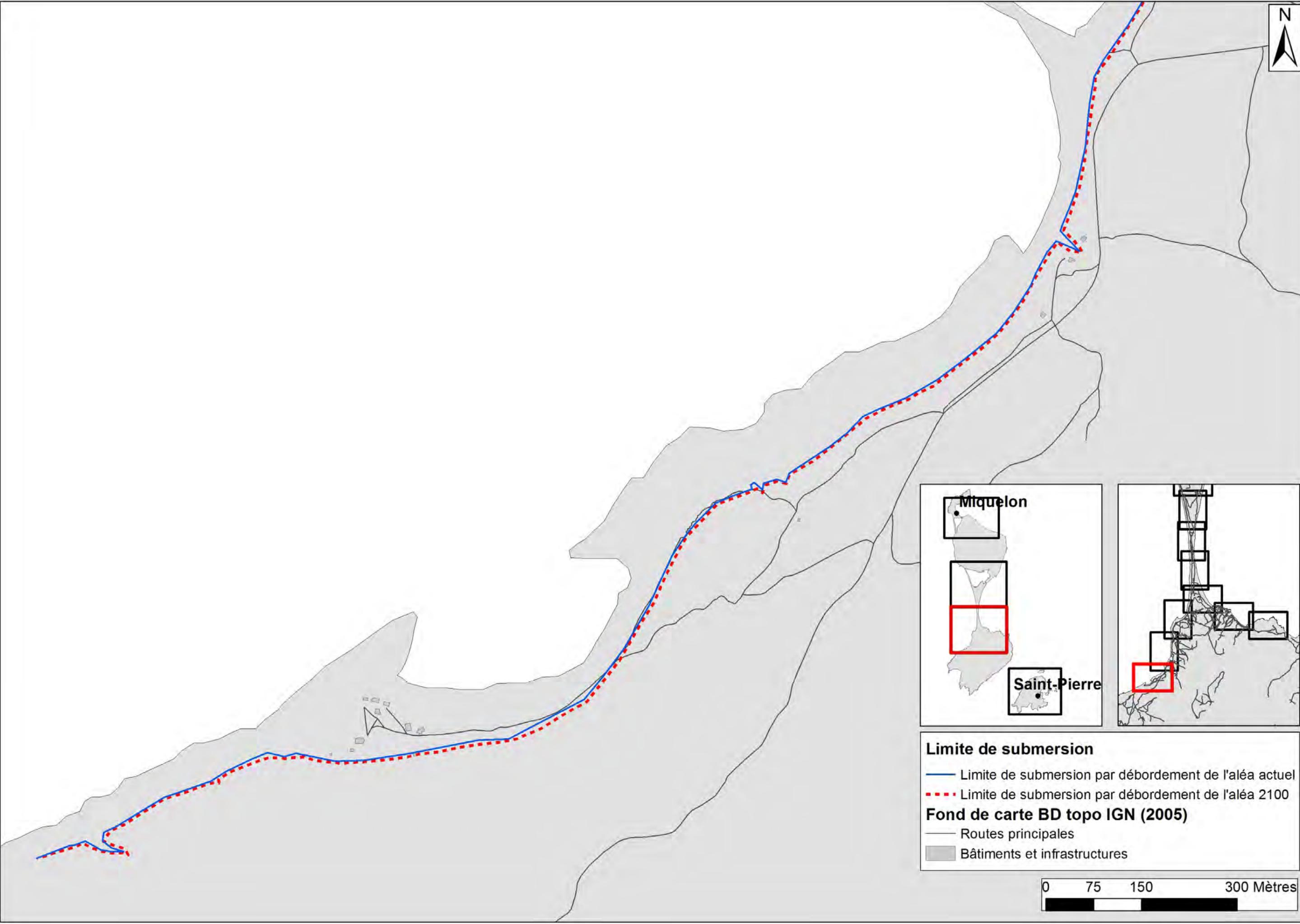
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



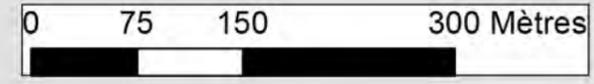


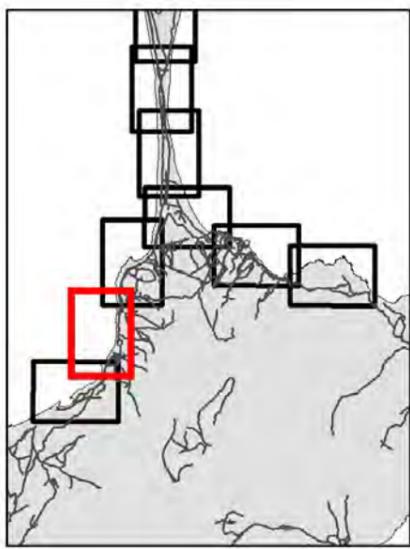
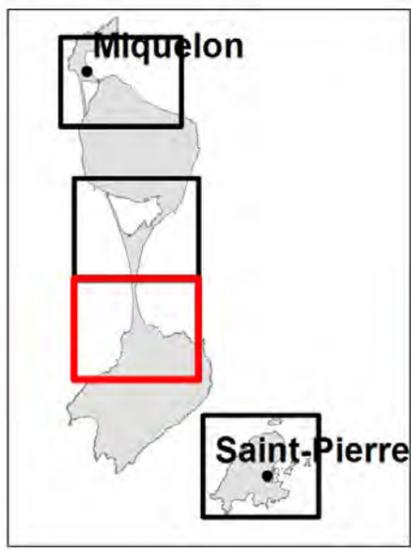
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



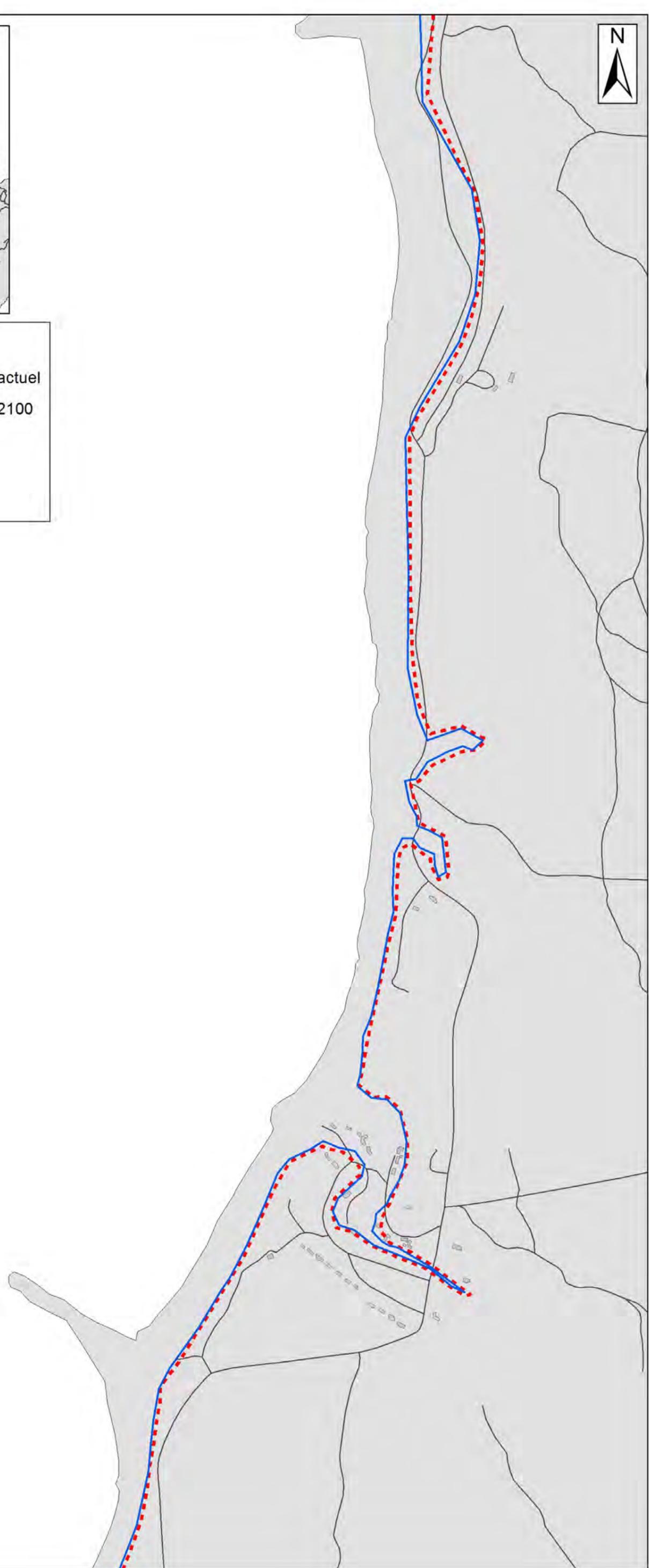
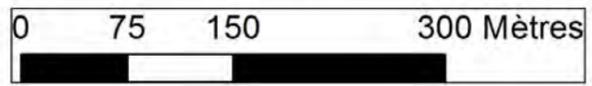


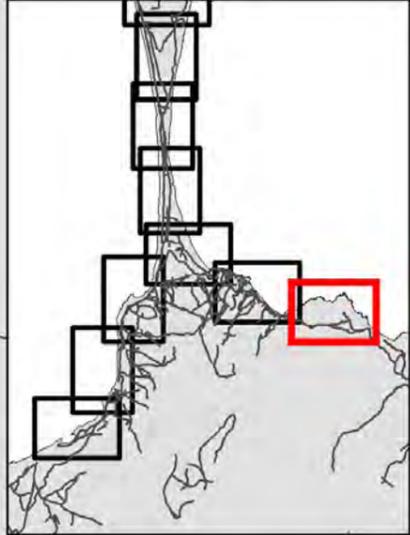
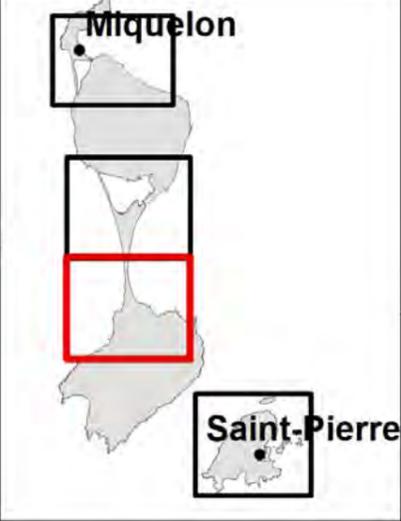
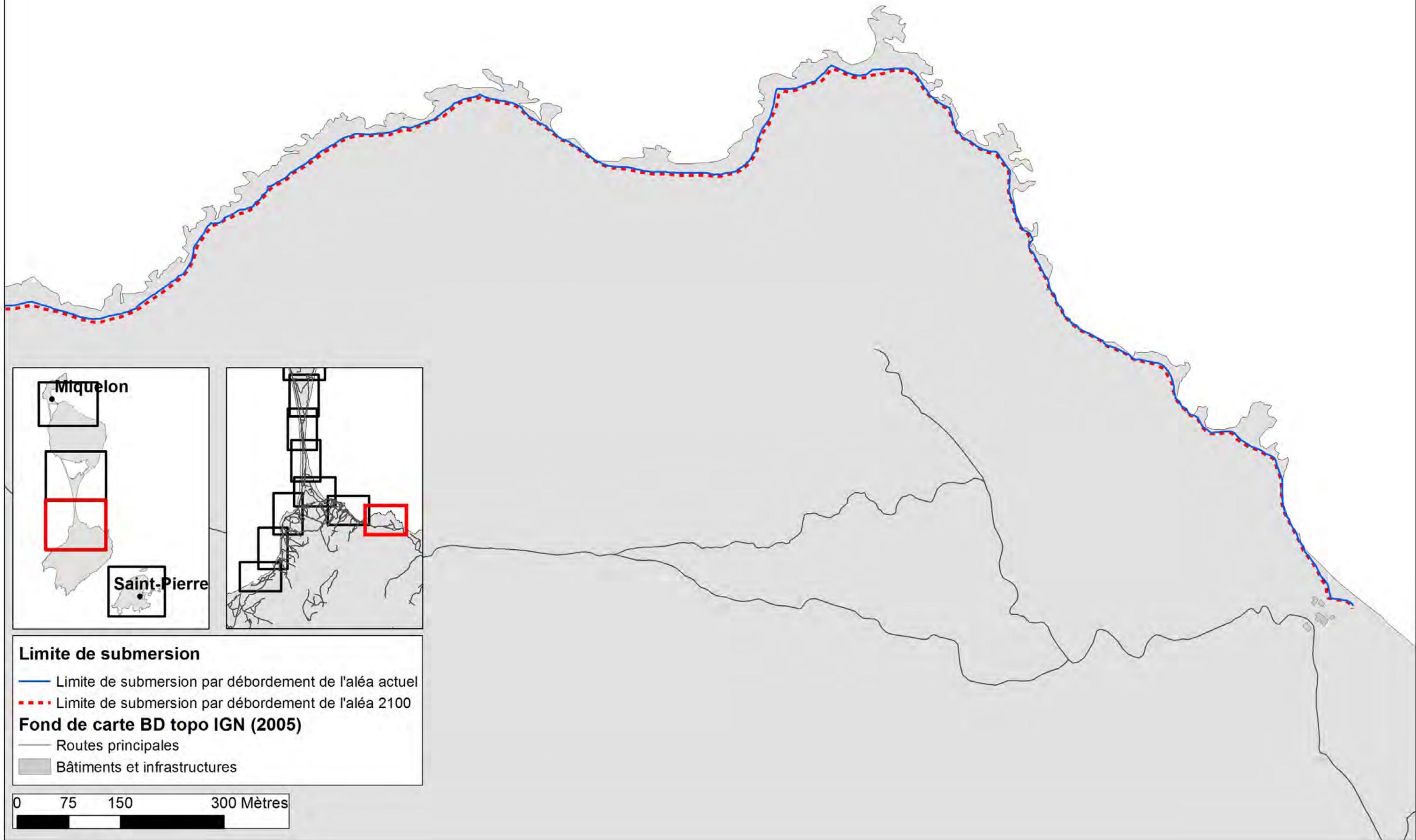
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

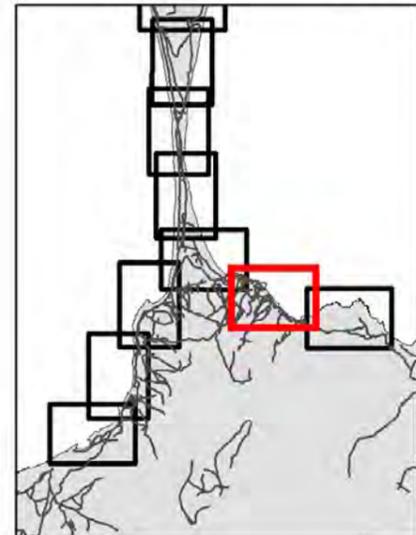
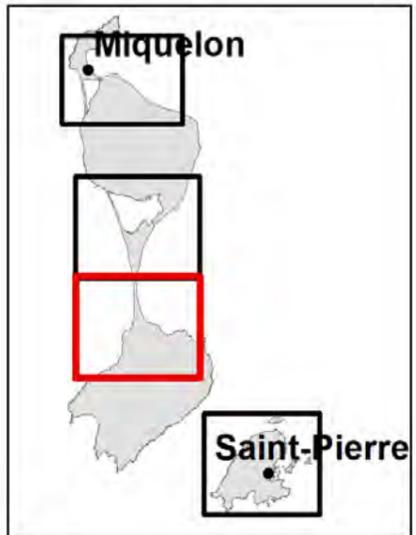
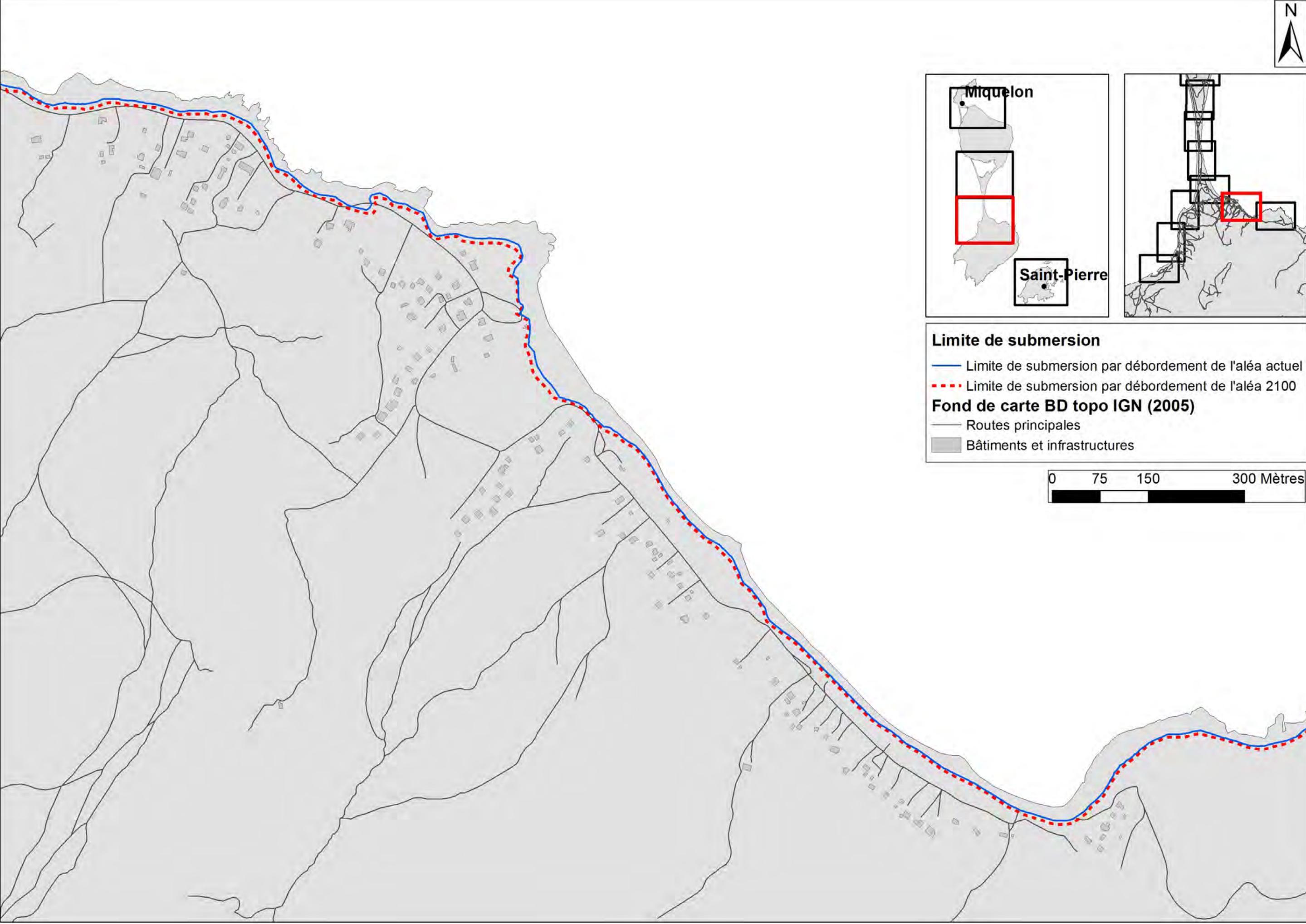




Limite de submersion
— Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)
— Routes principales
■ Bâtiments et infrastructures



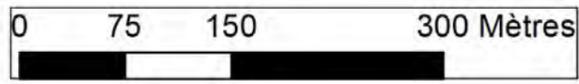


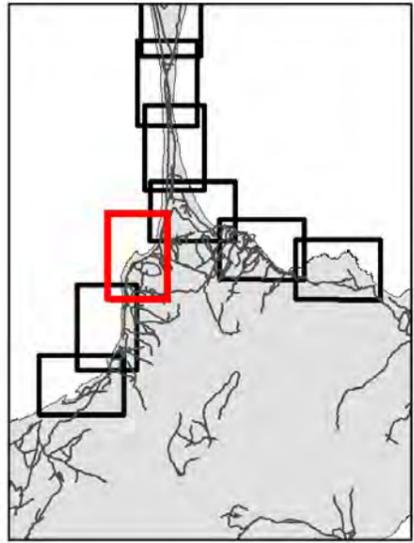
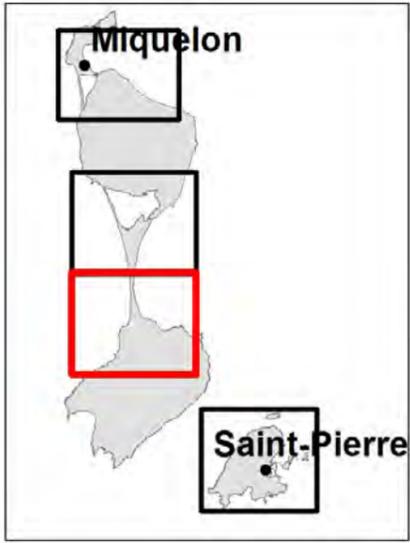
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



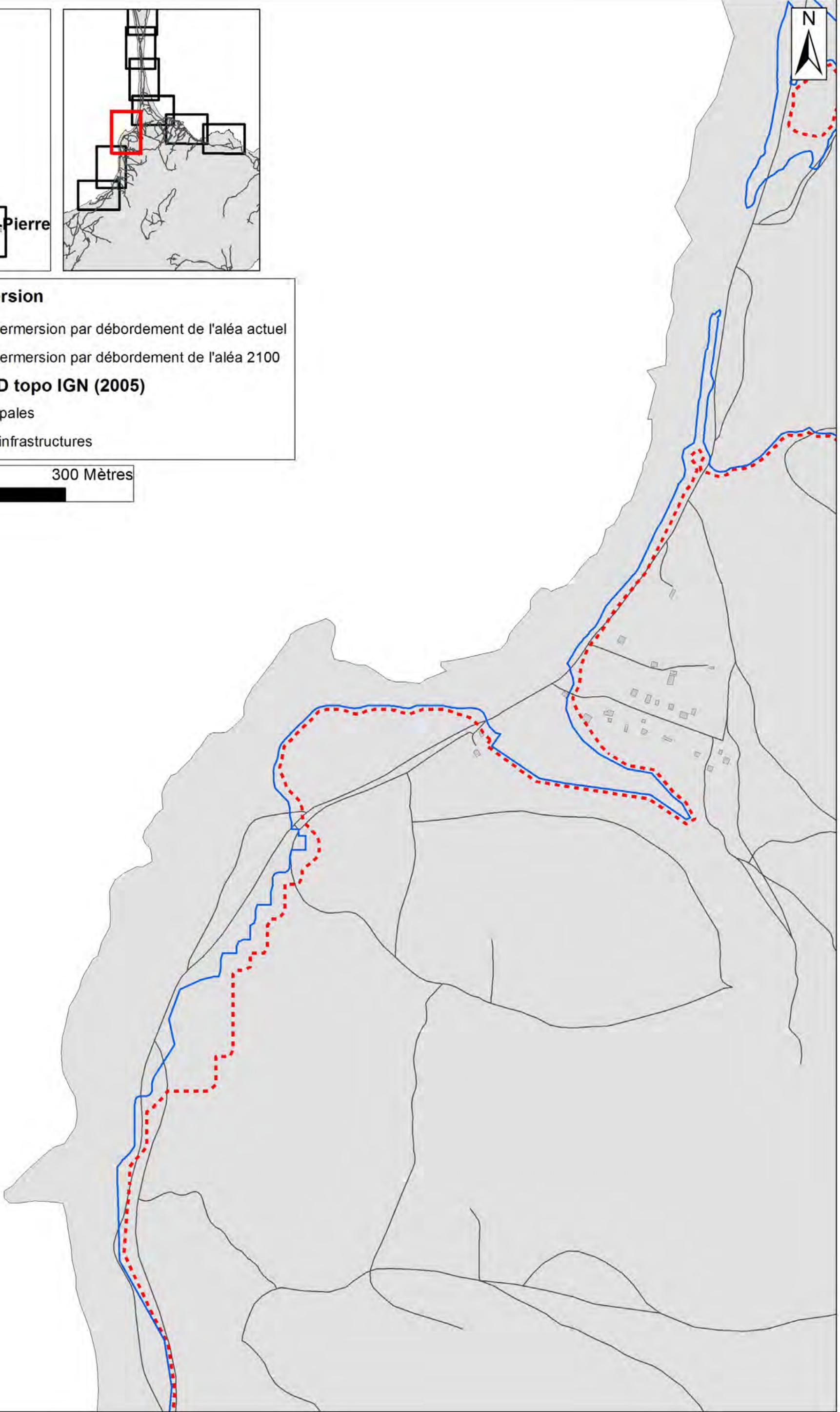


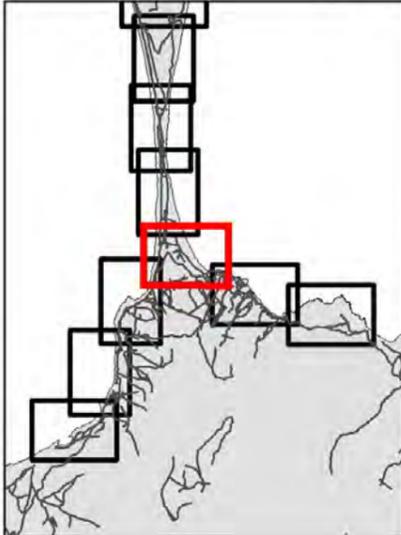
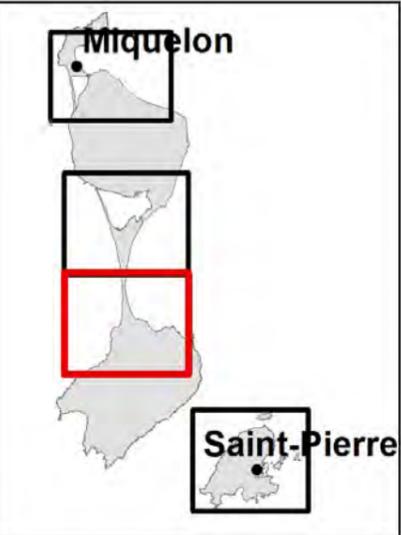
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



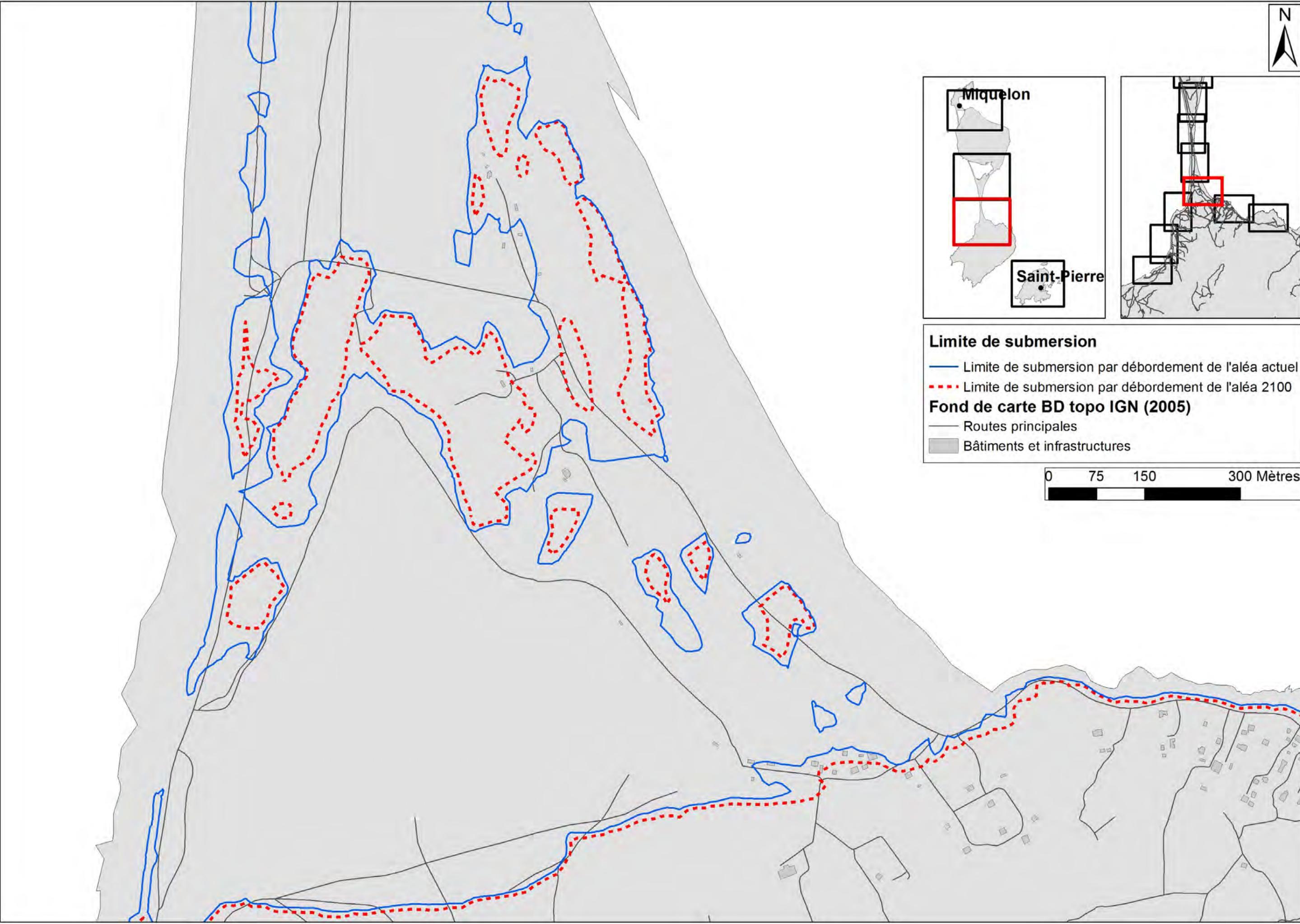
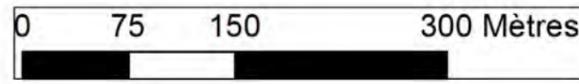


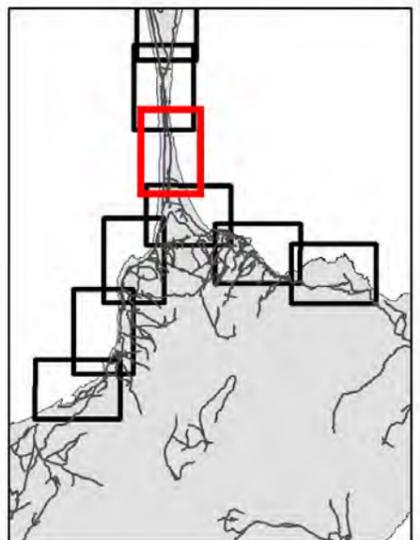
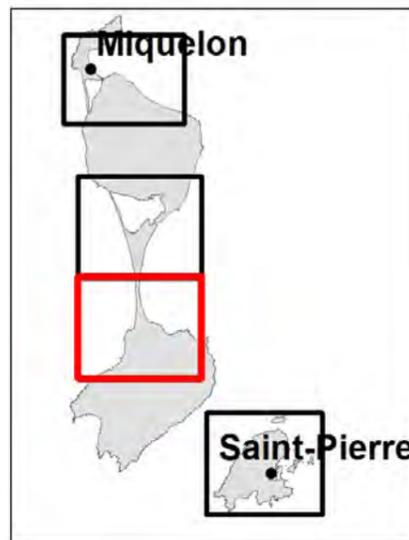
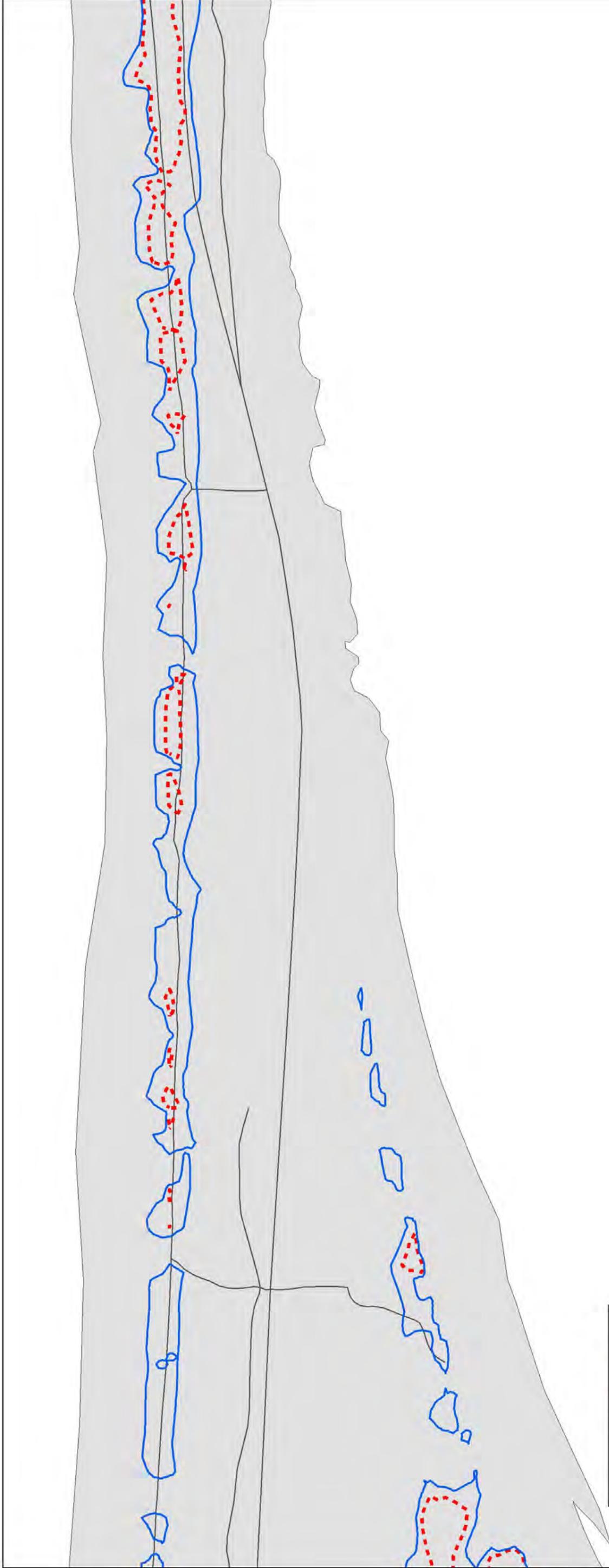
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



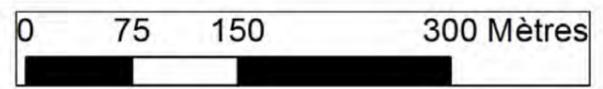


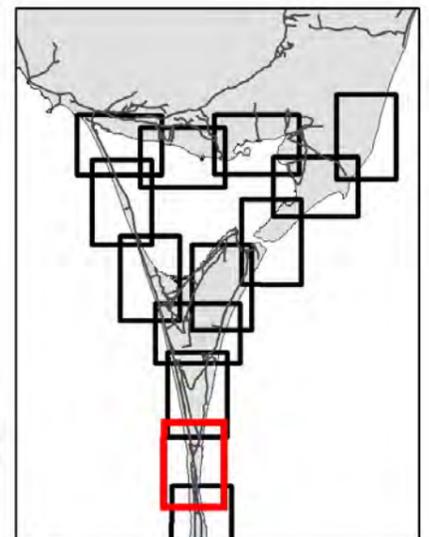
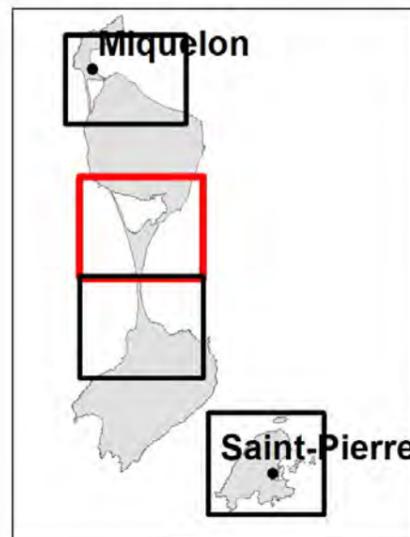
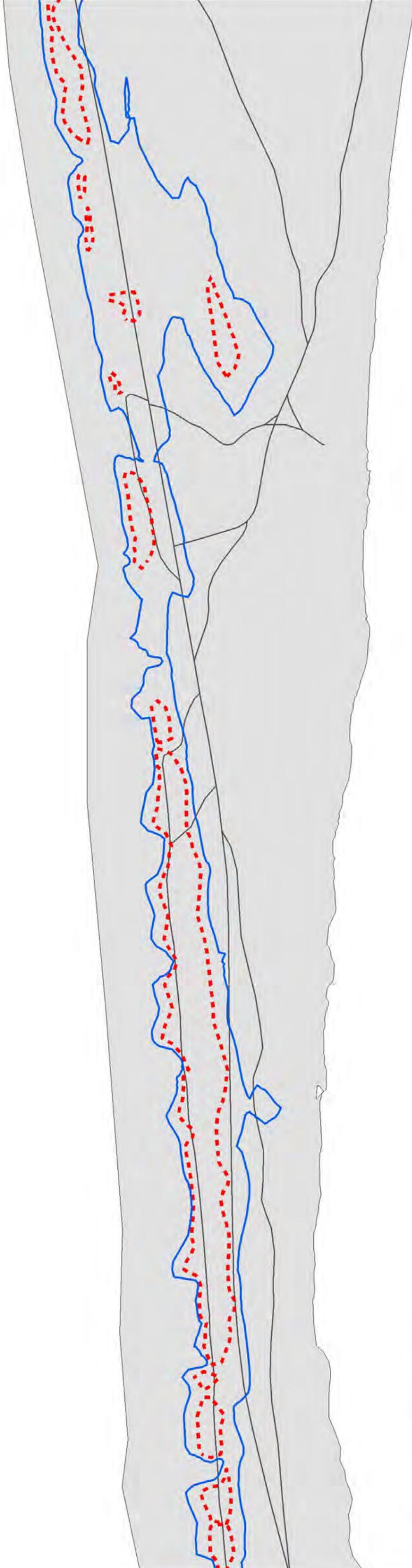
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



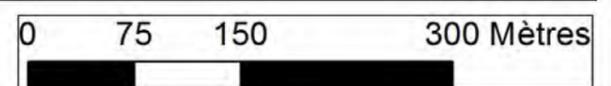


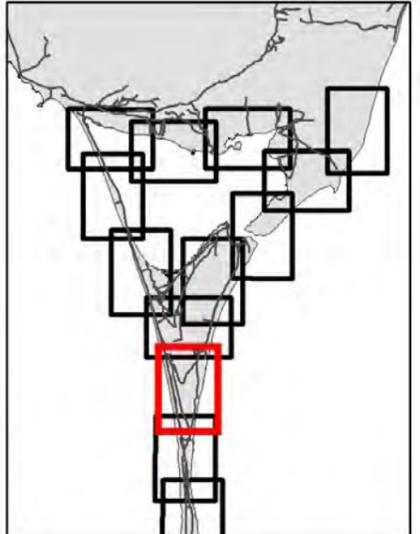
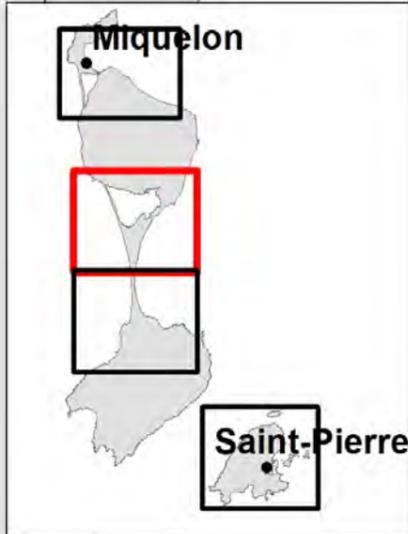
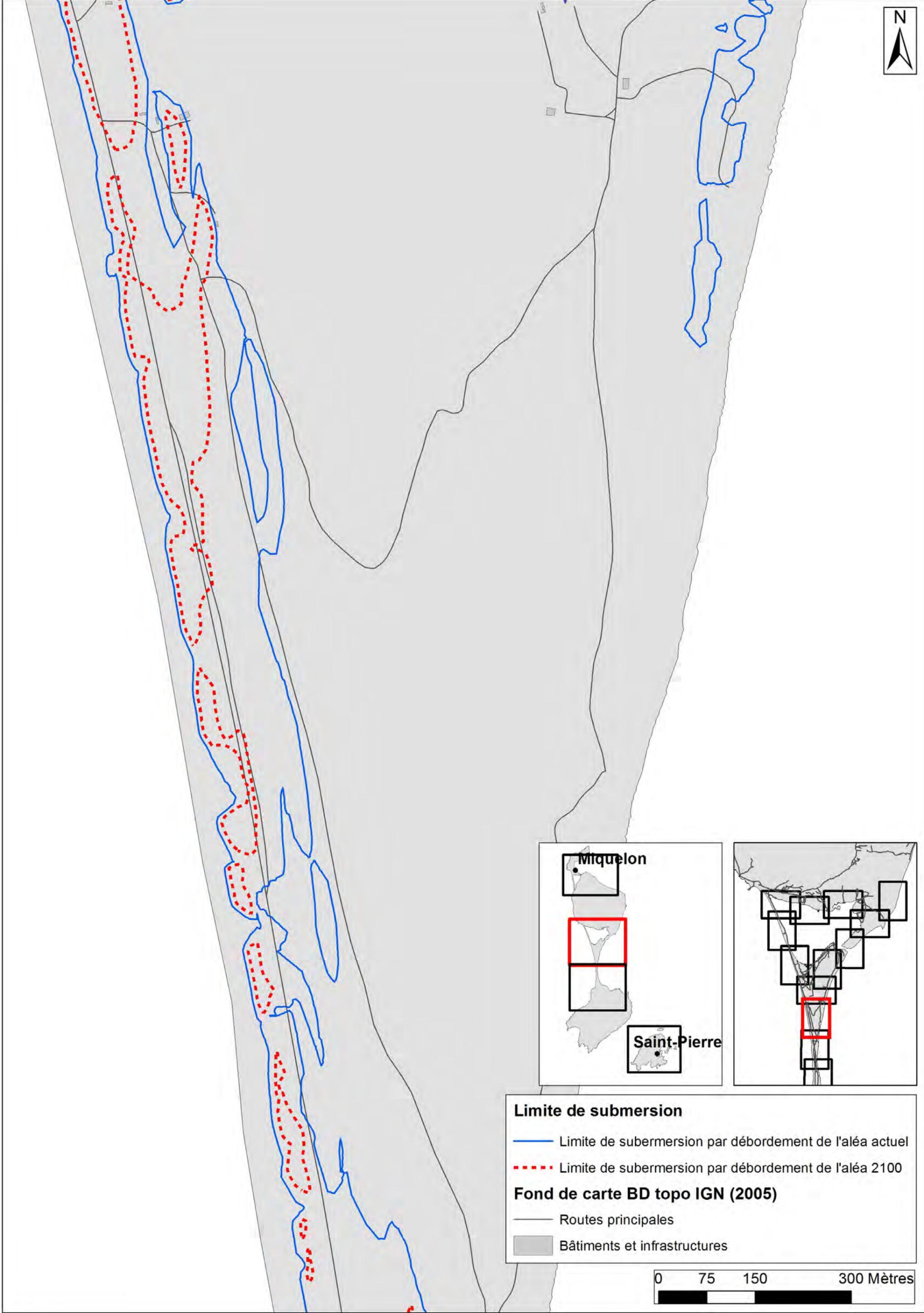
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





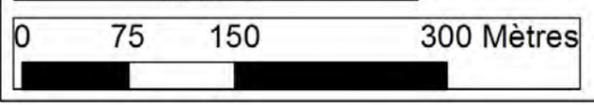
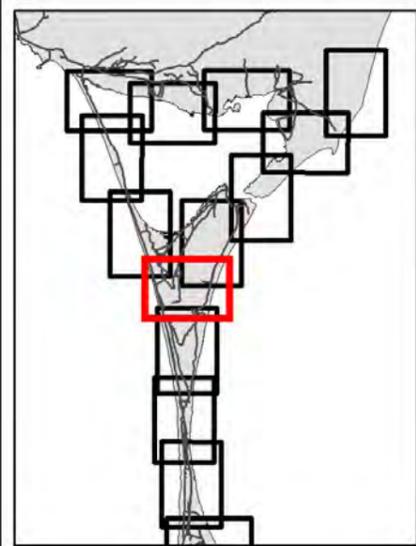
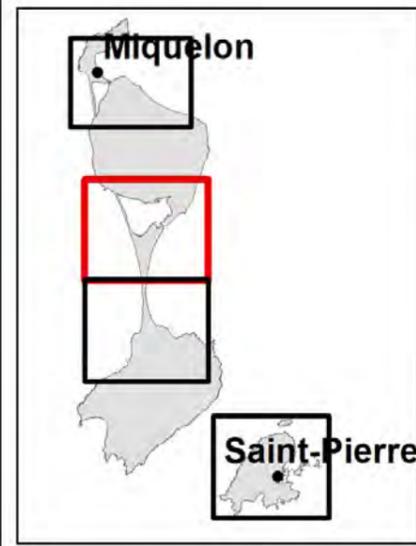
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



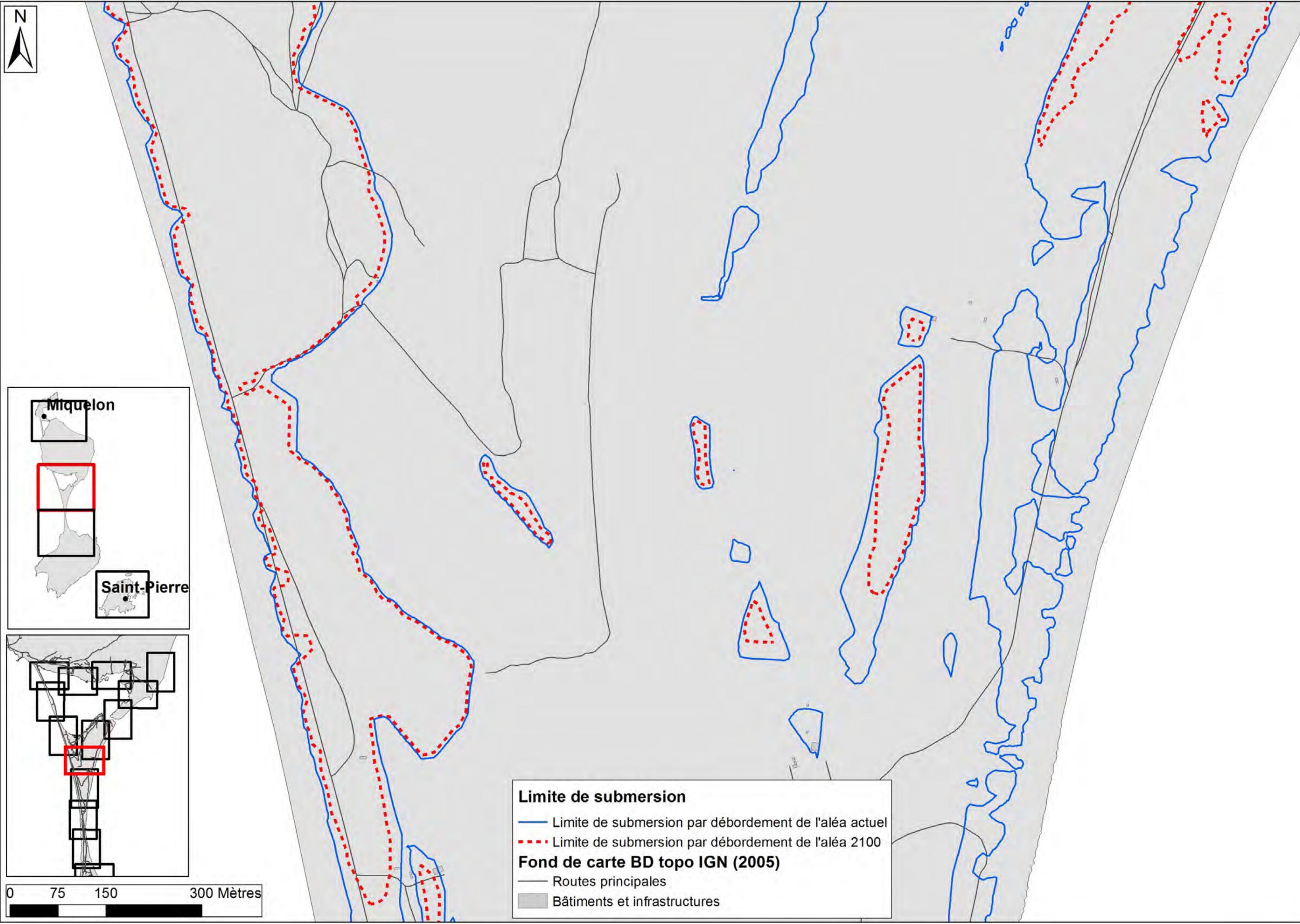


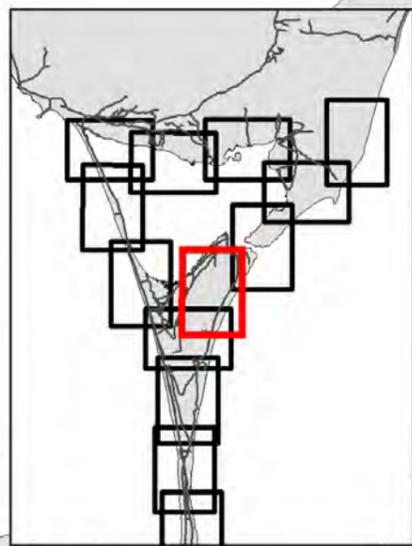
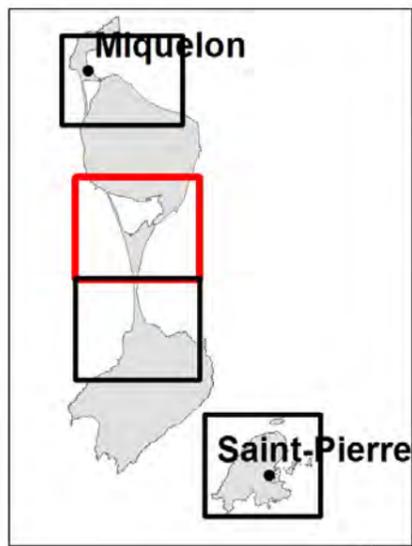
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



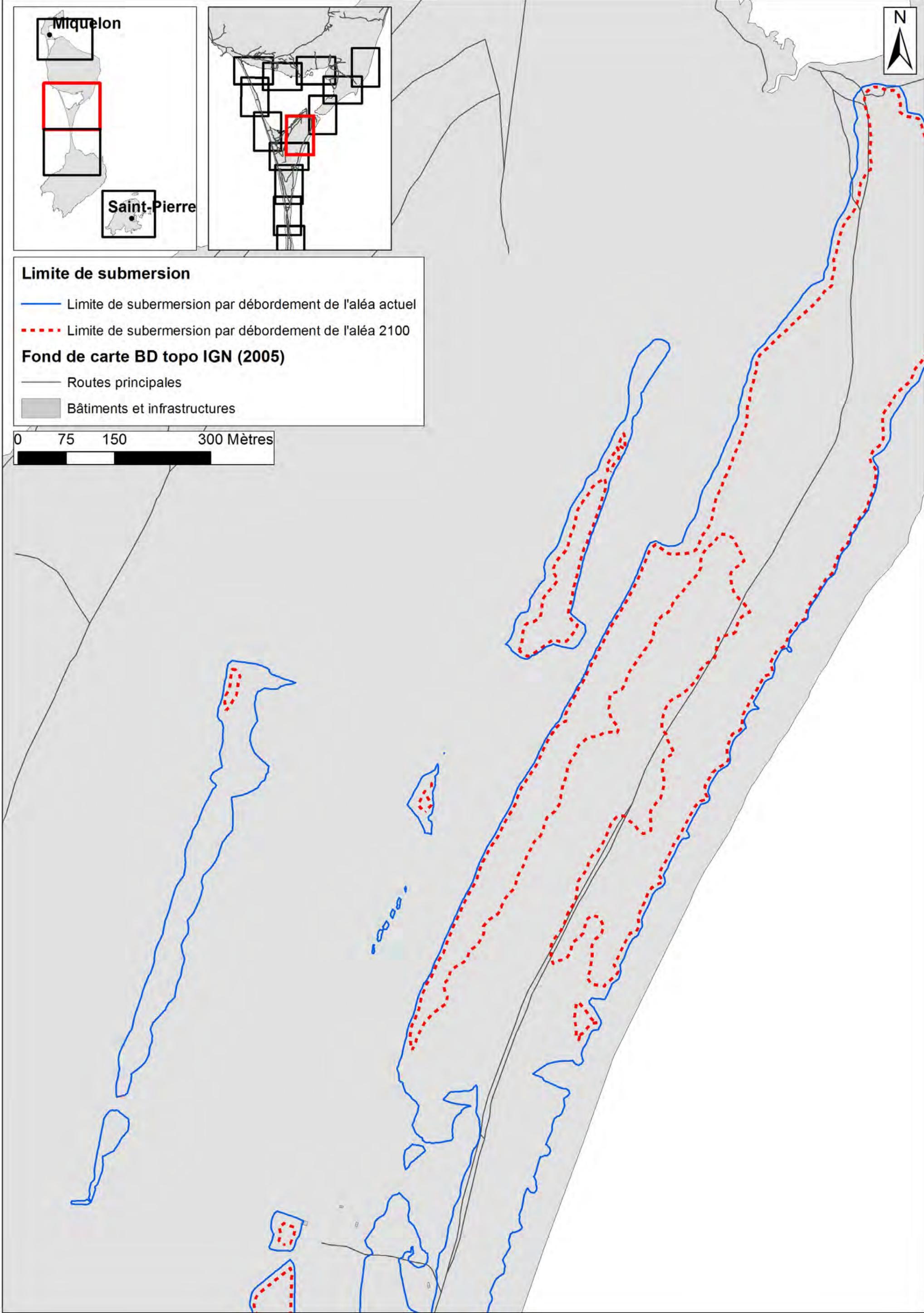
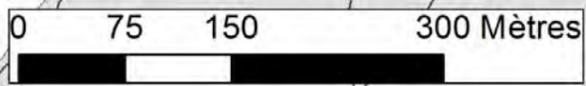


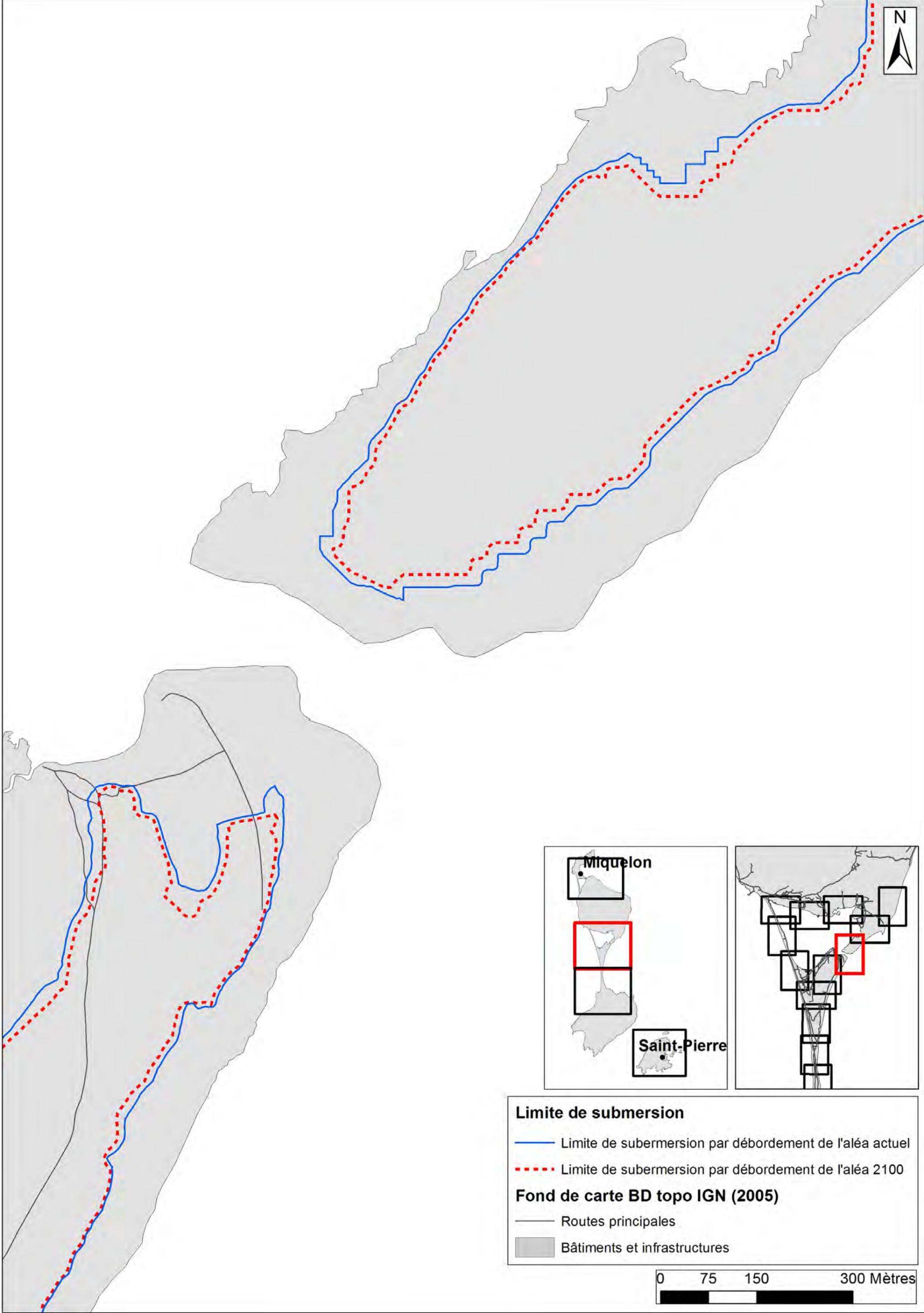
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





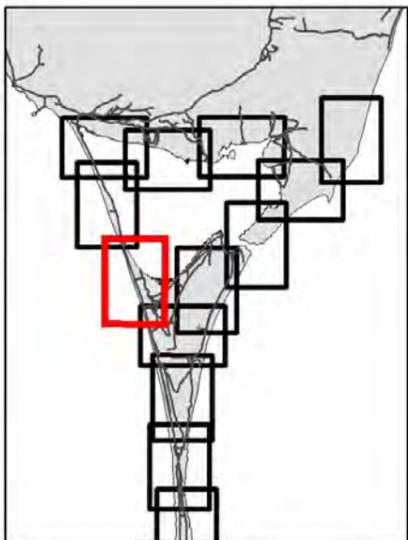
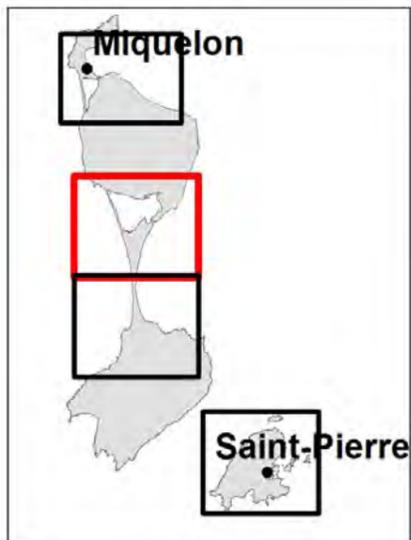
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

0 75 150 300 Mètres

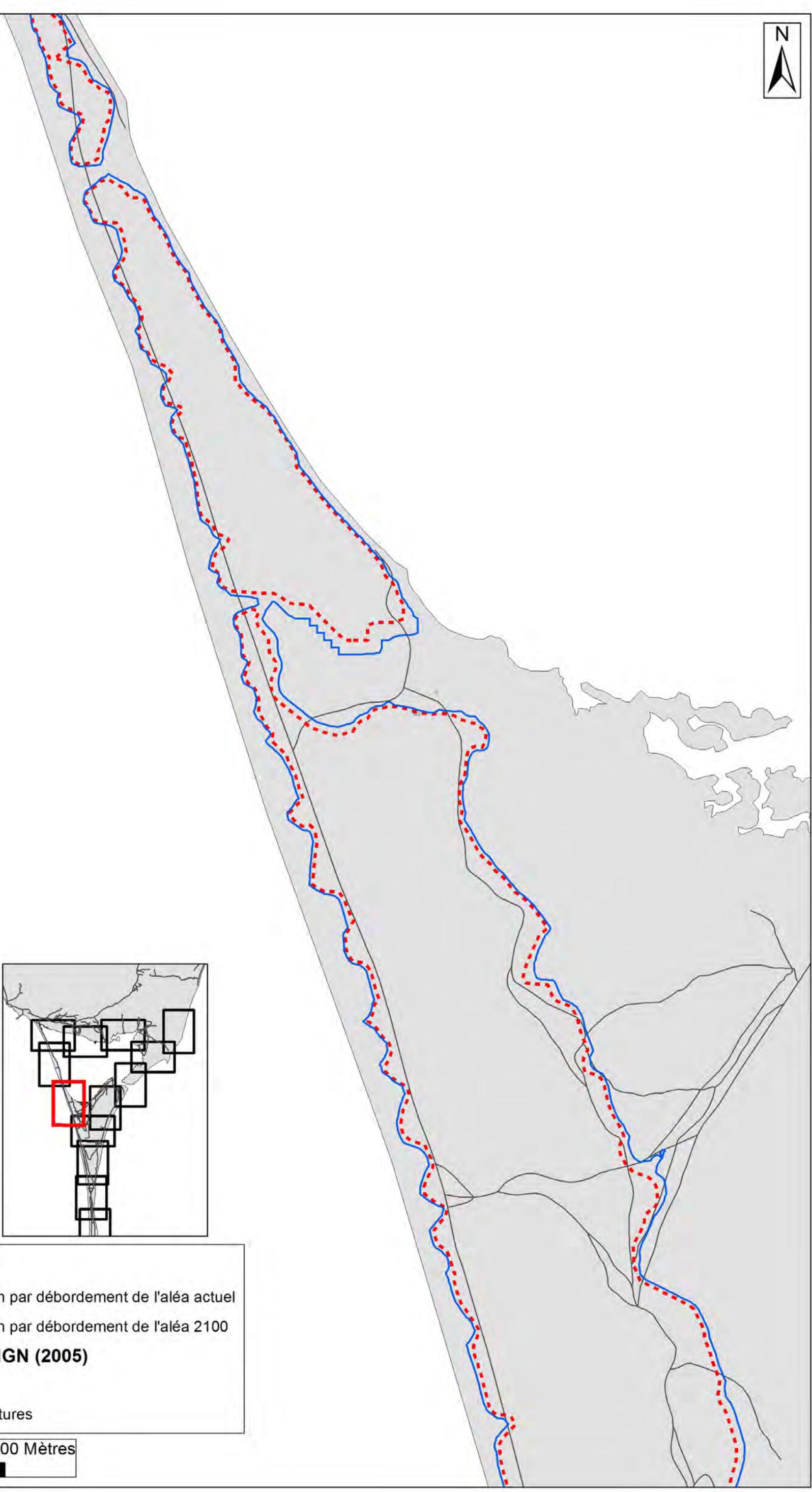
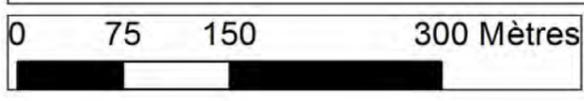


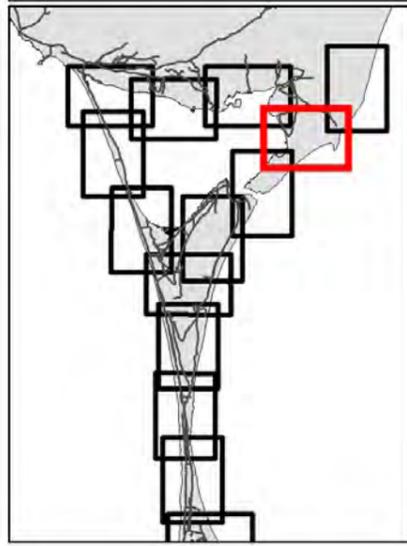
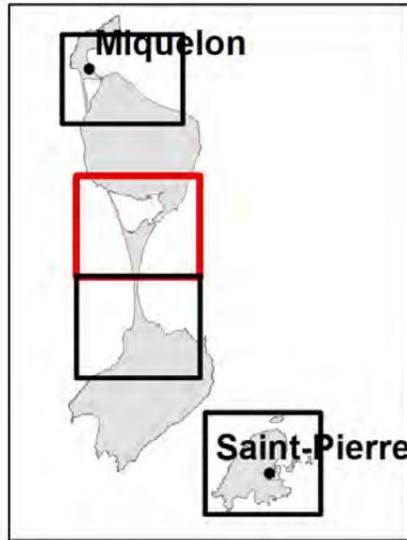
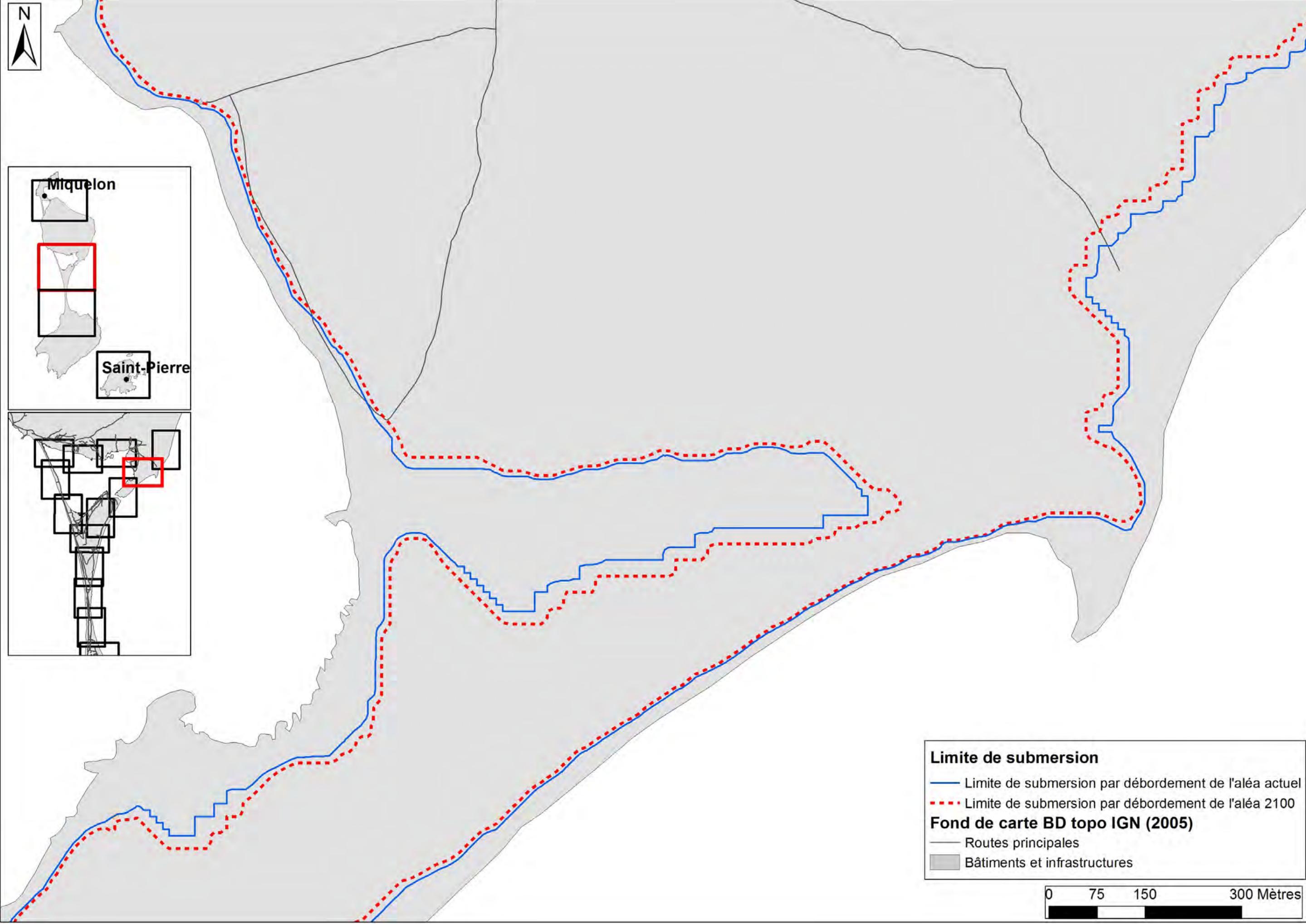
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



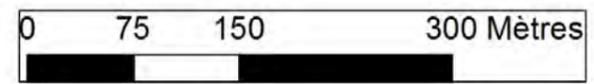


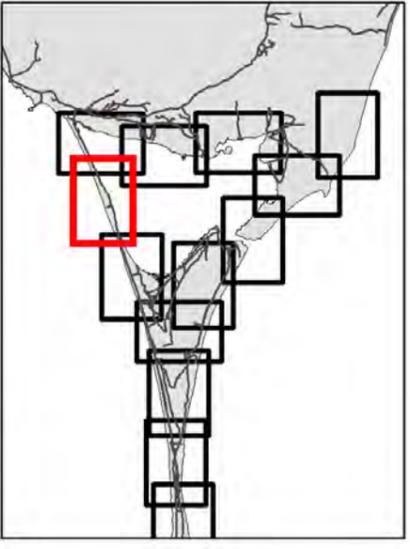
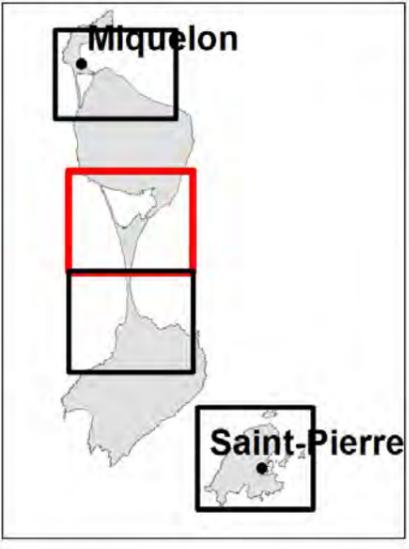
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



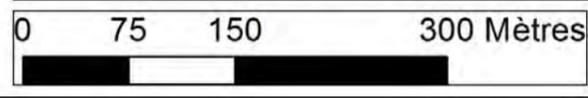


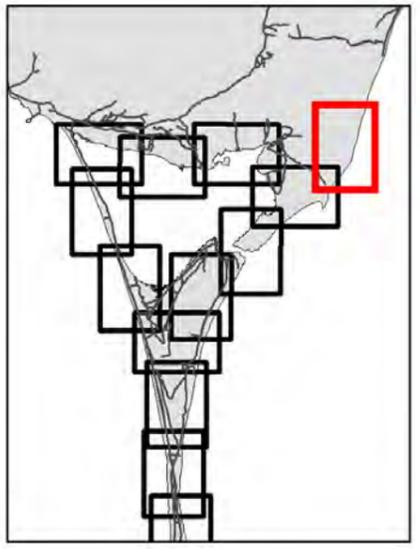
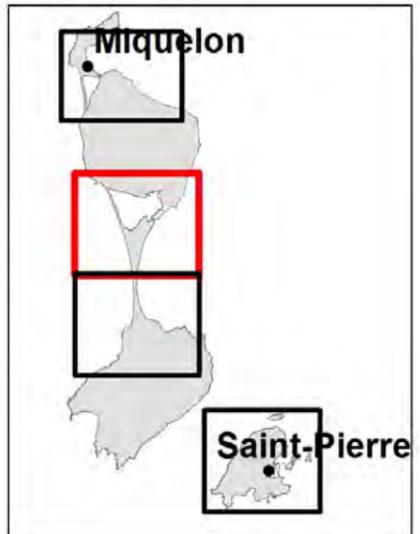
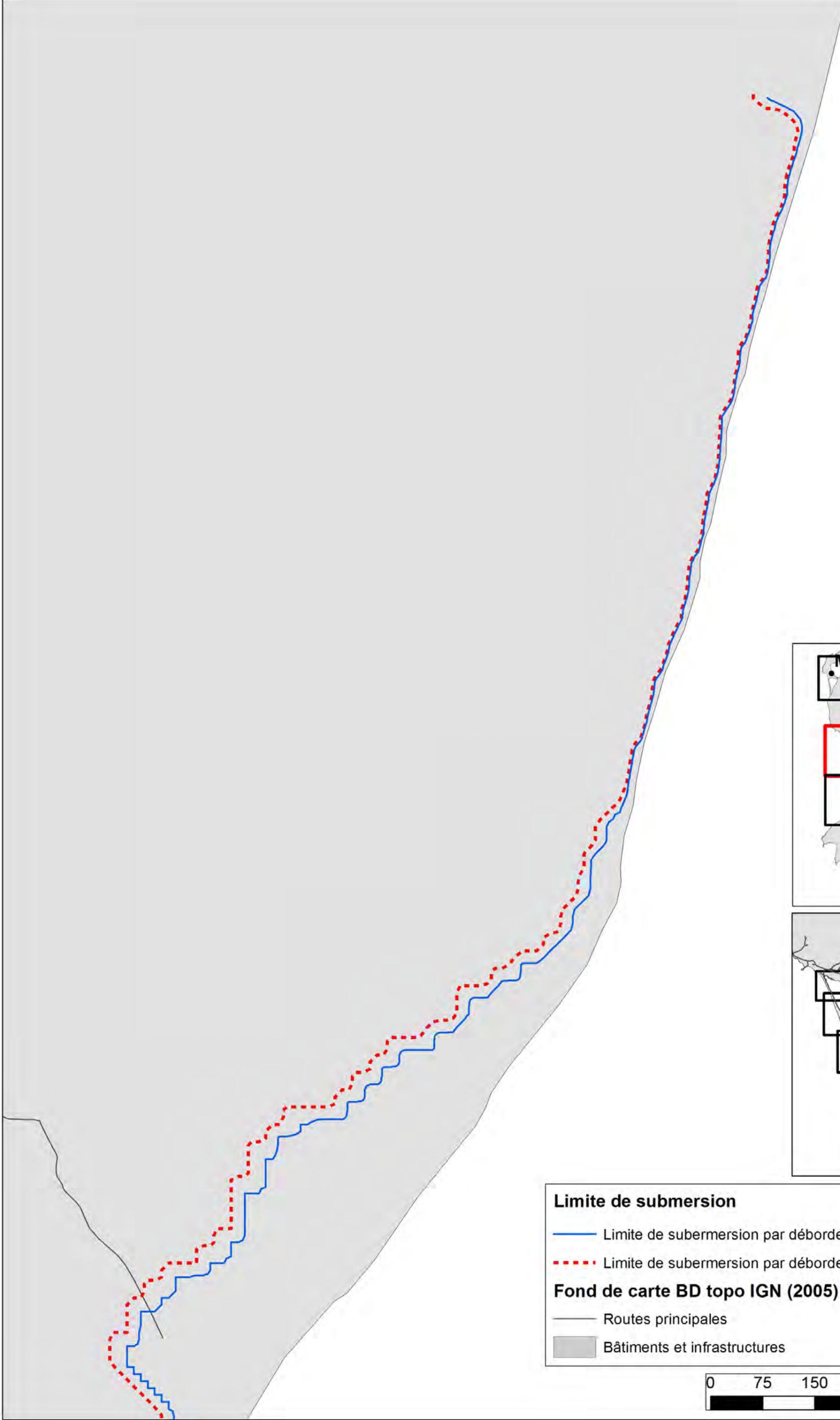
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



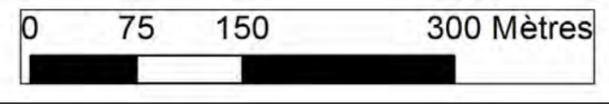


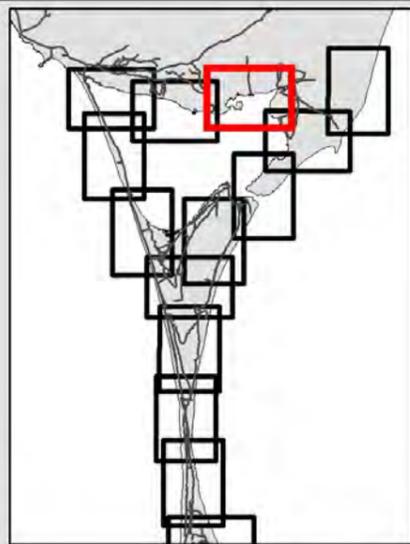
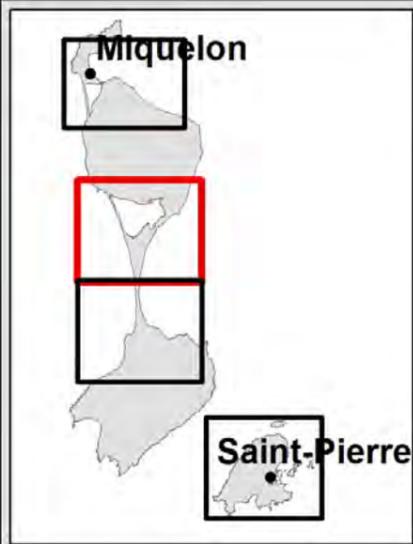
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



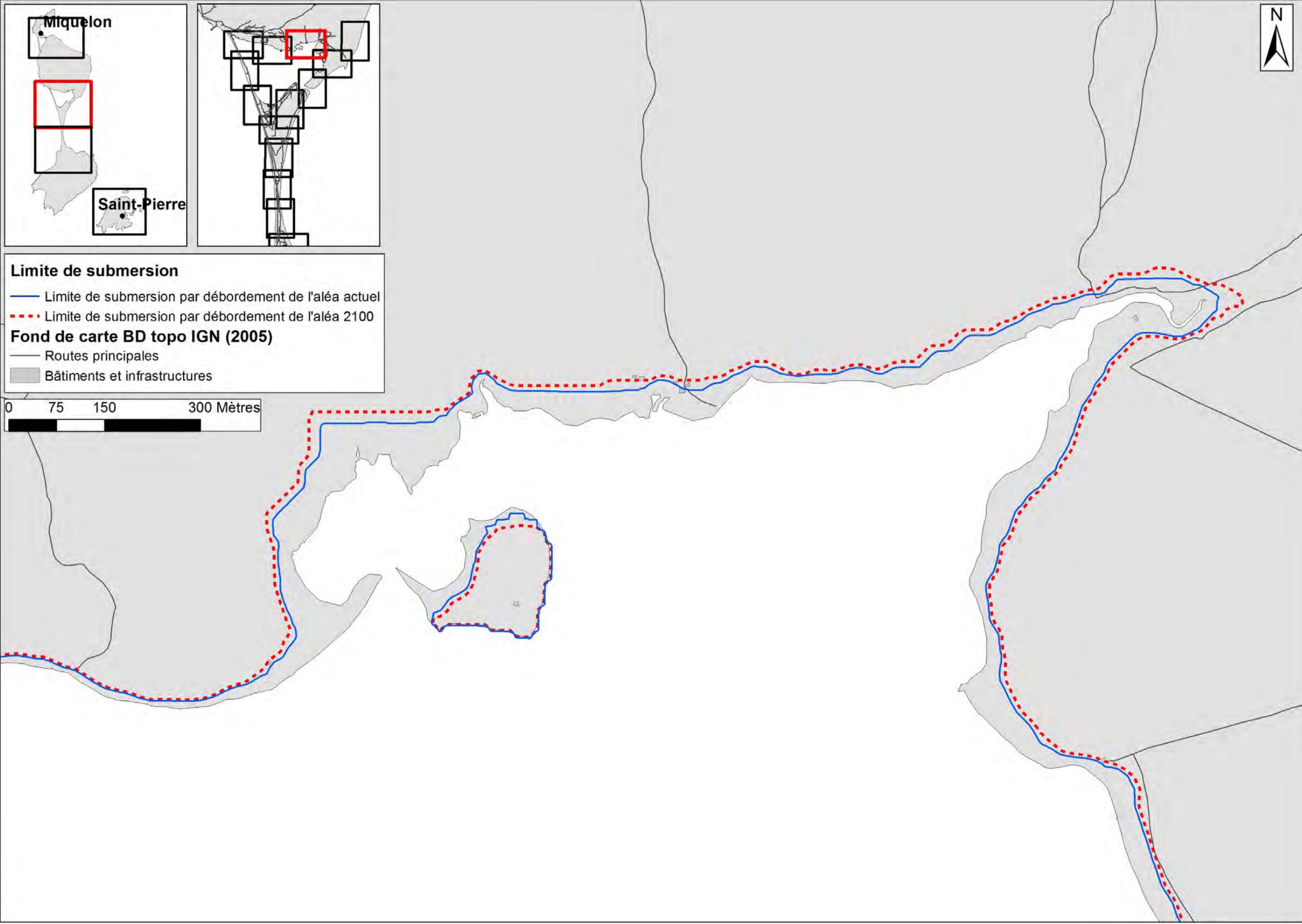
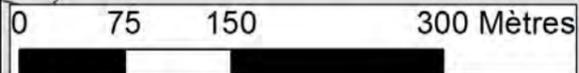


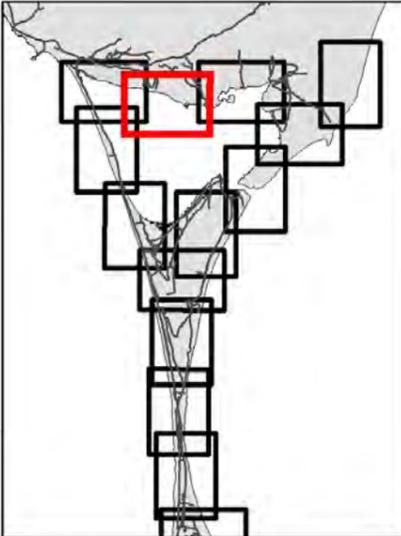
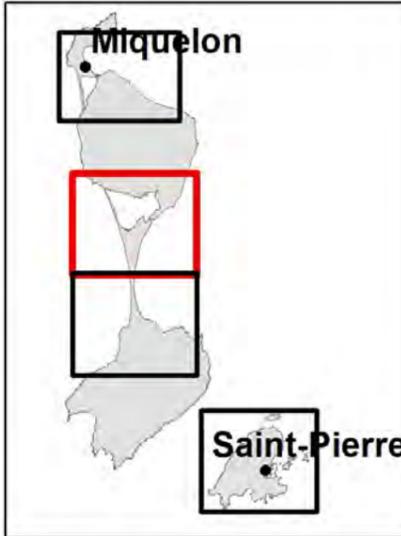
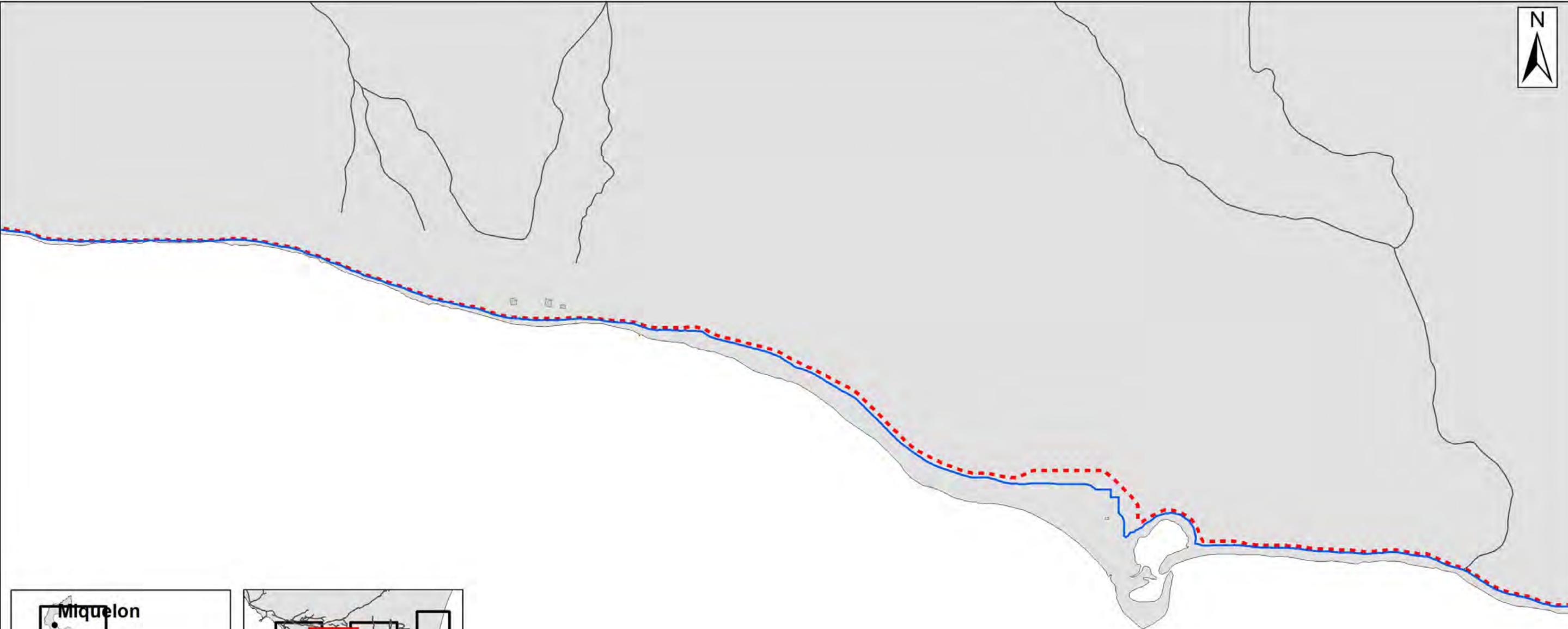
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

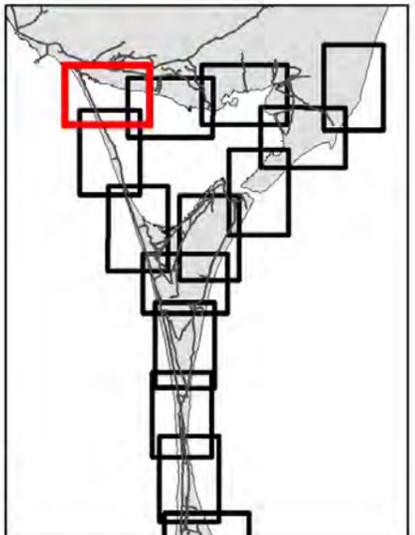
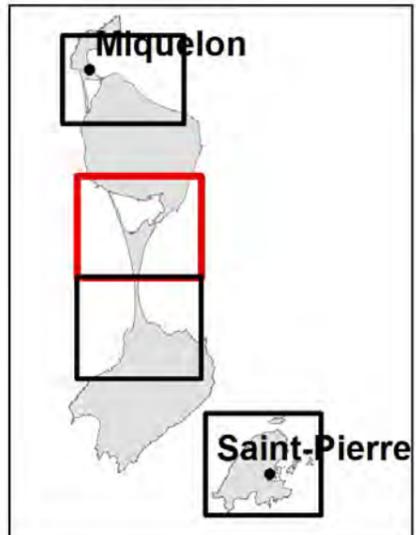
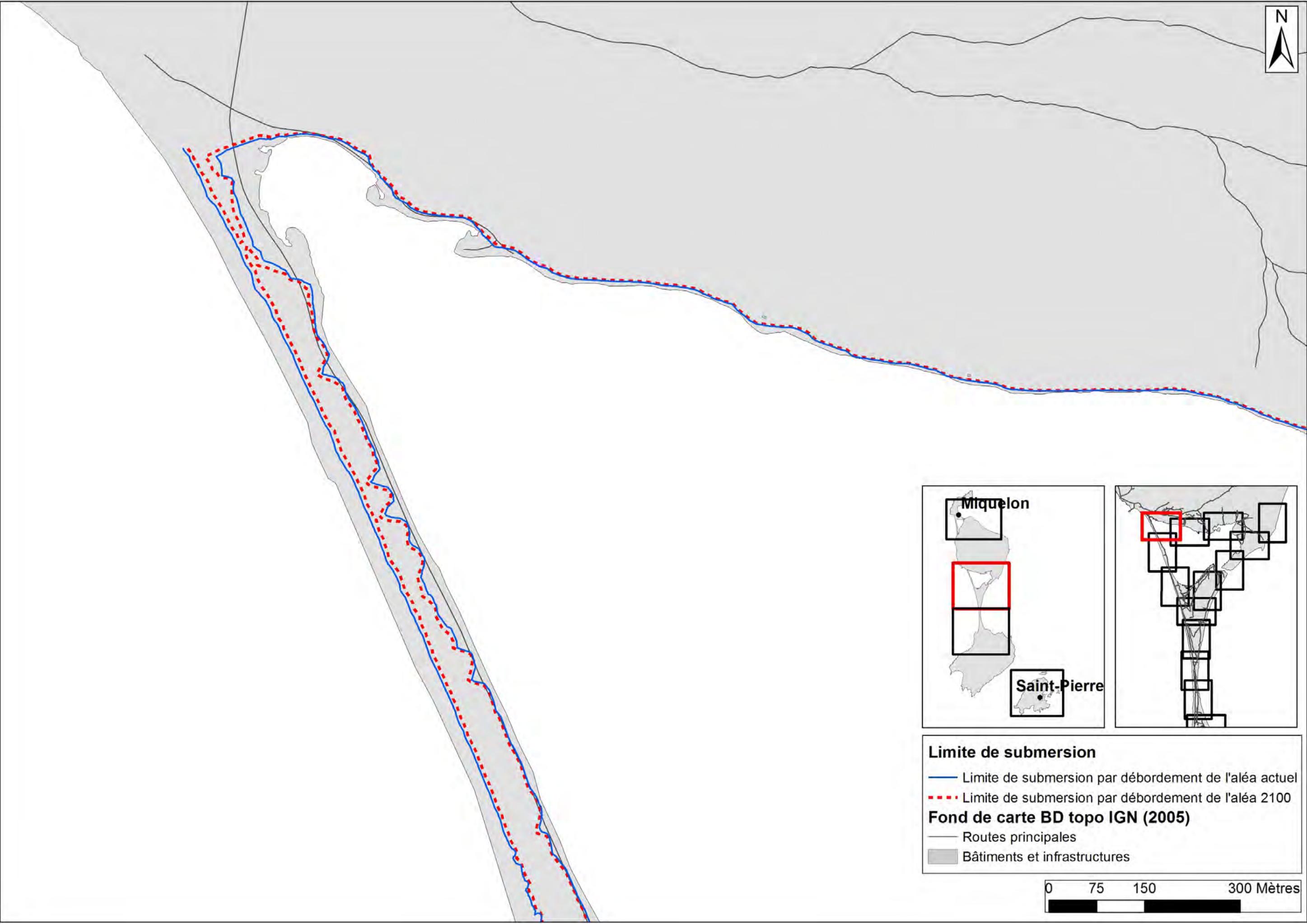




Limite de submersion
— Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)
— Routes principales
■ Bâtiments et infrastructures



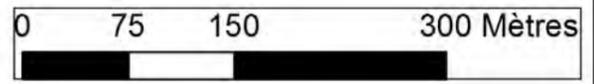


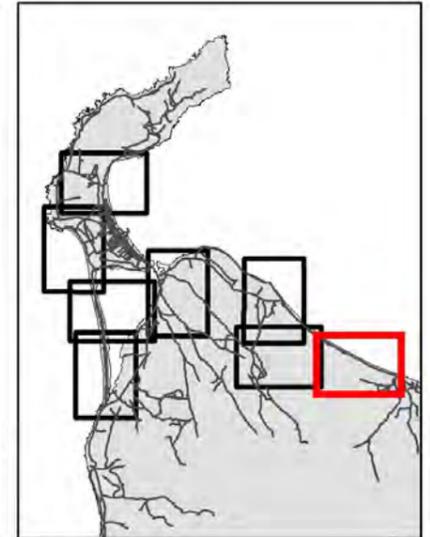
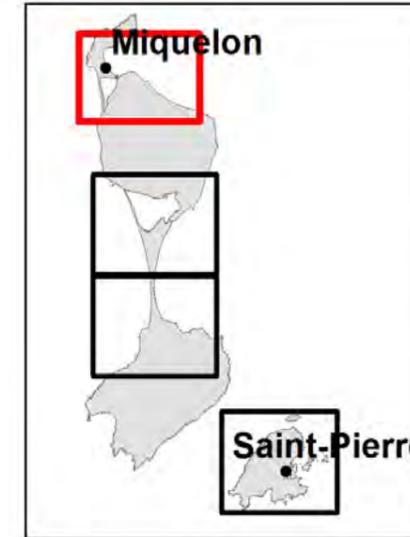
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



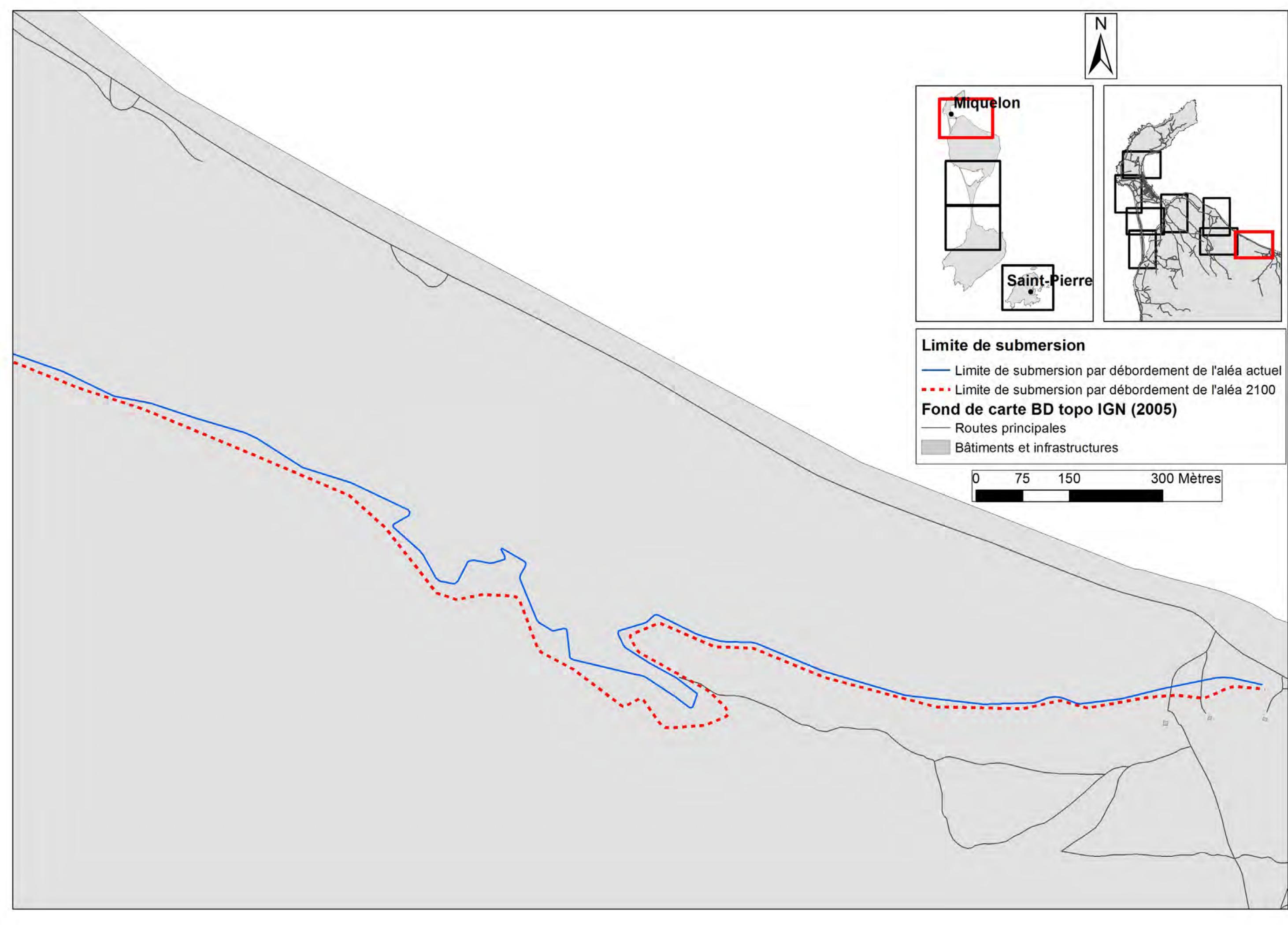


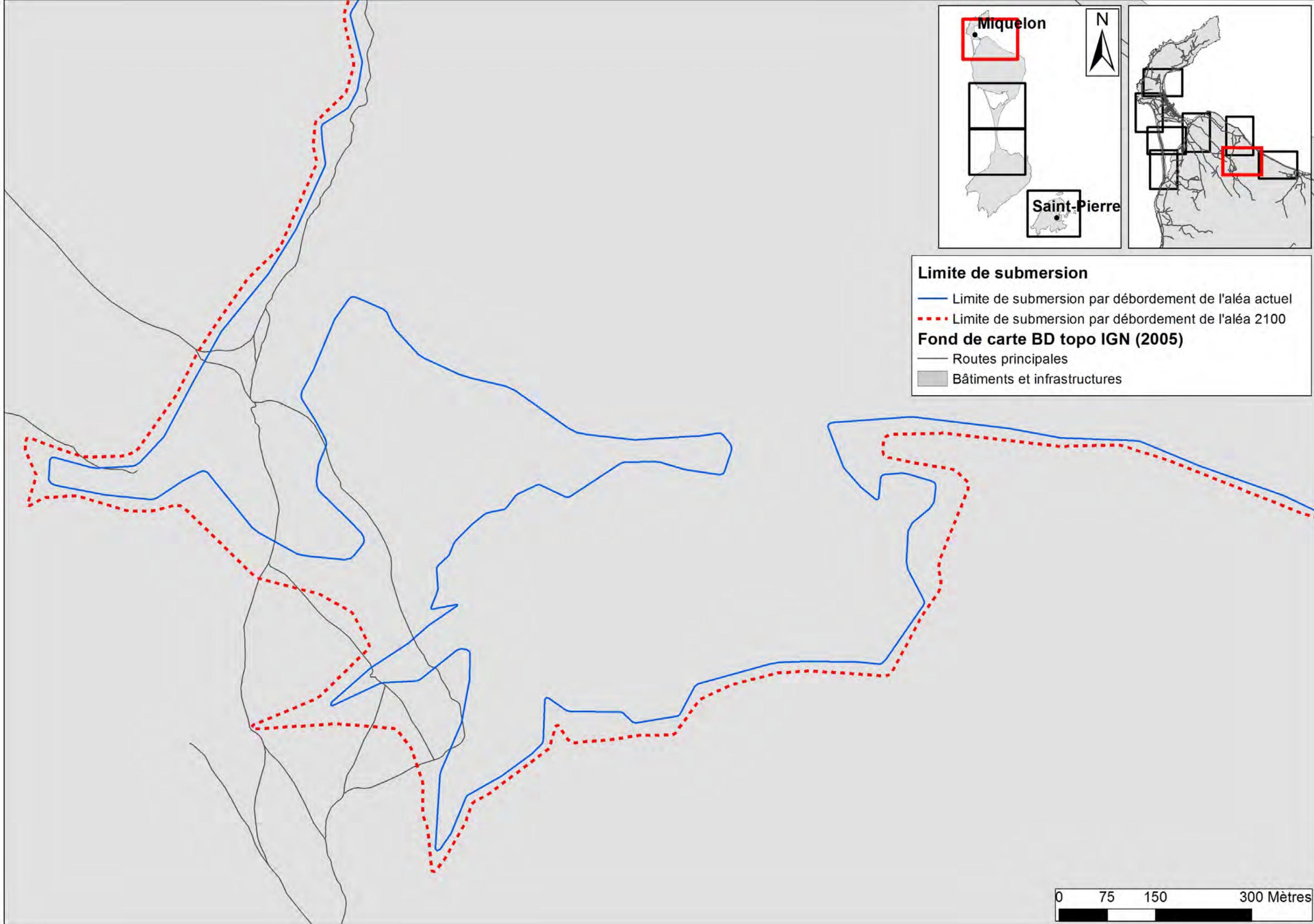
Limite de submersion

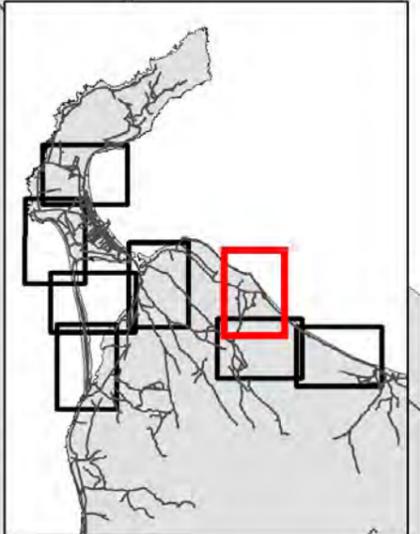
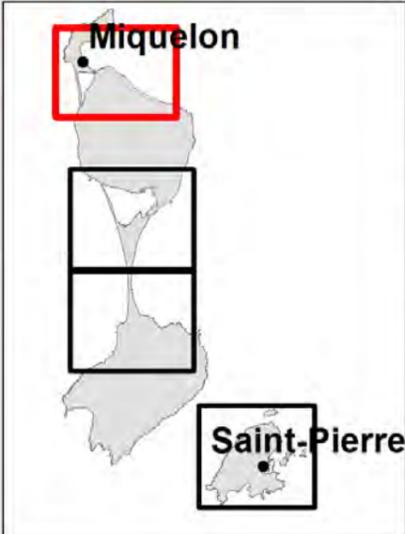
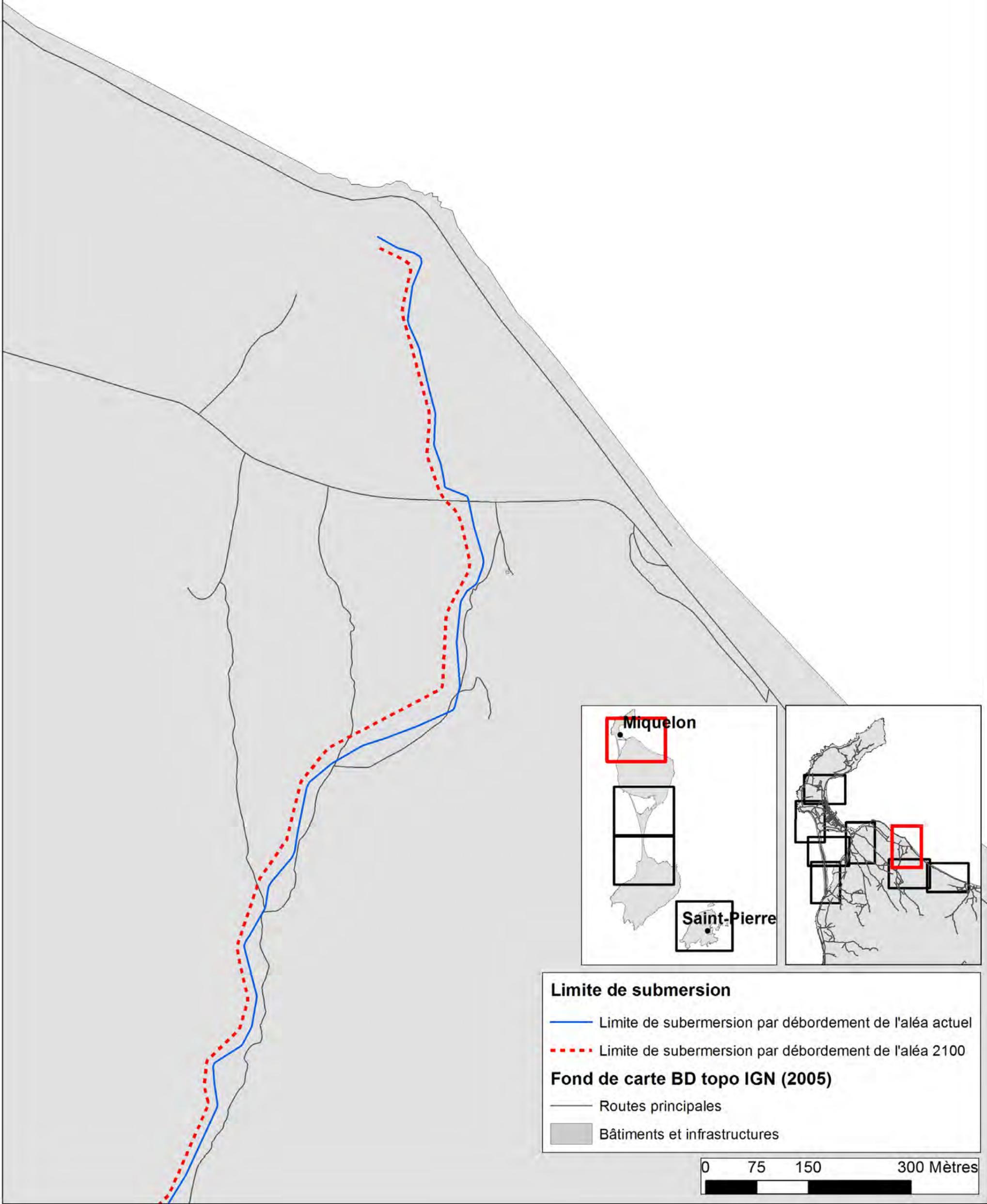
- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





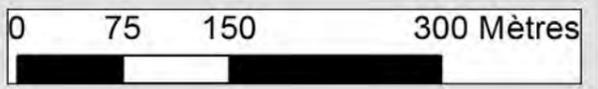


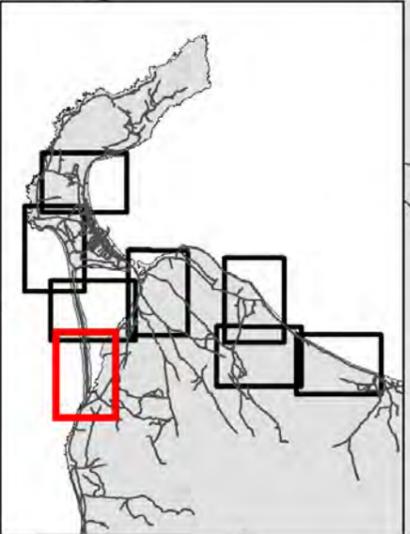
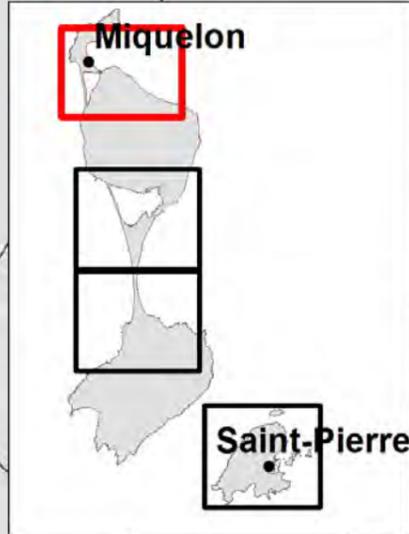
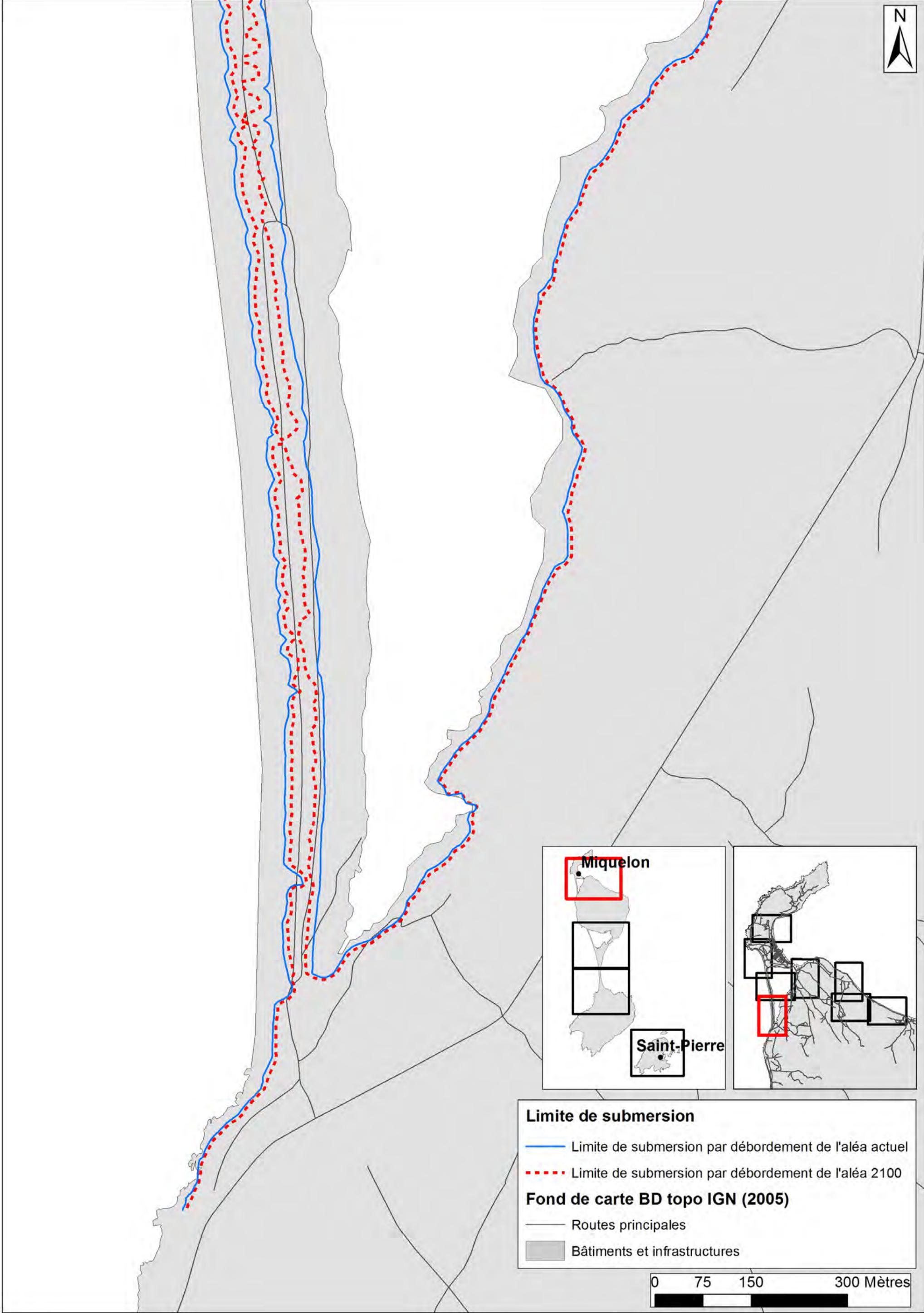
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



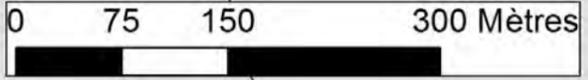


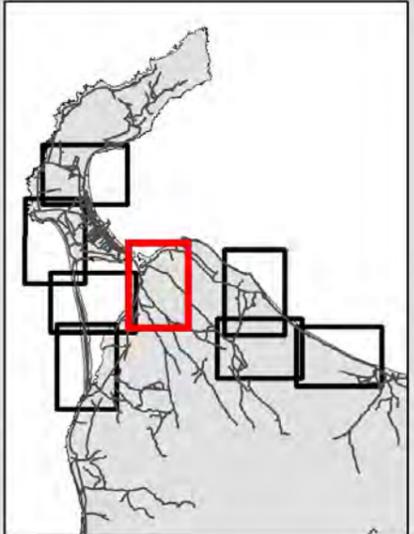
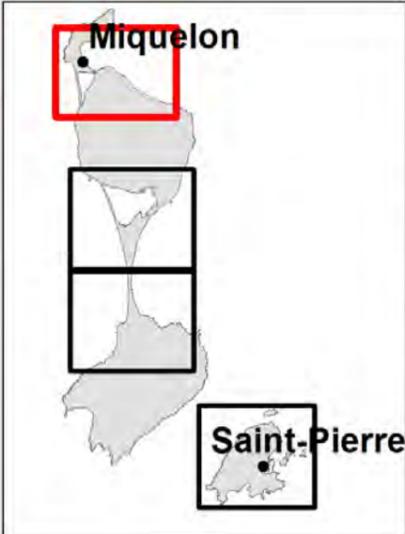
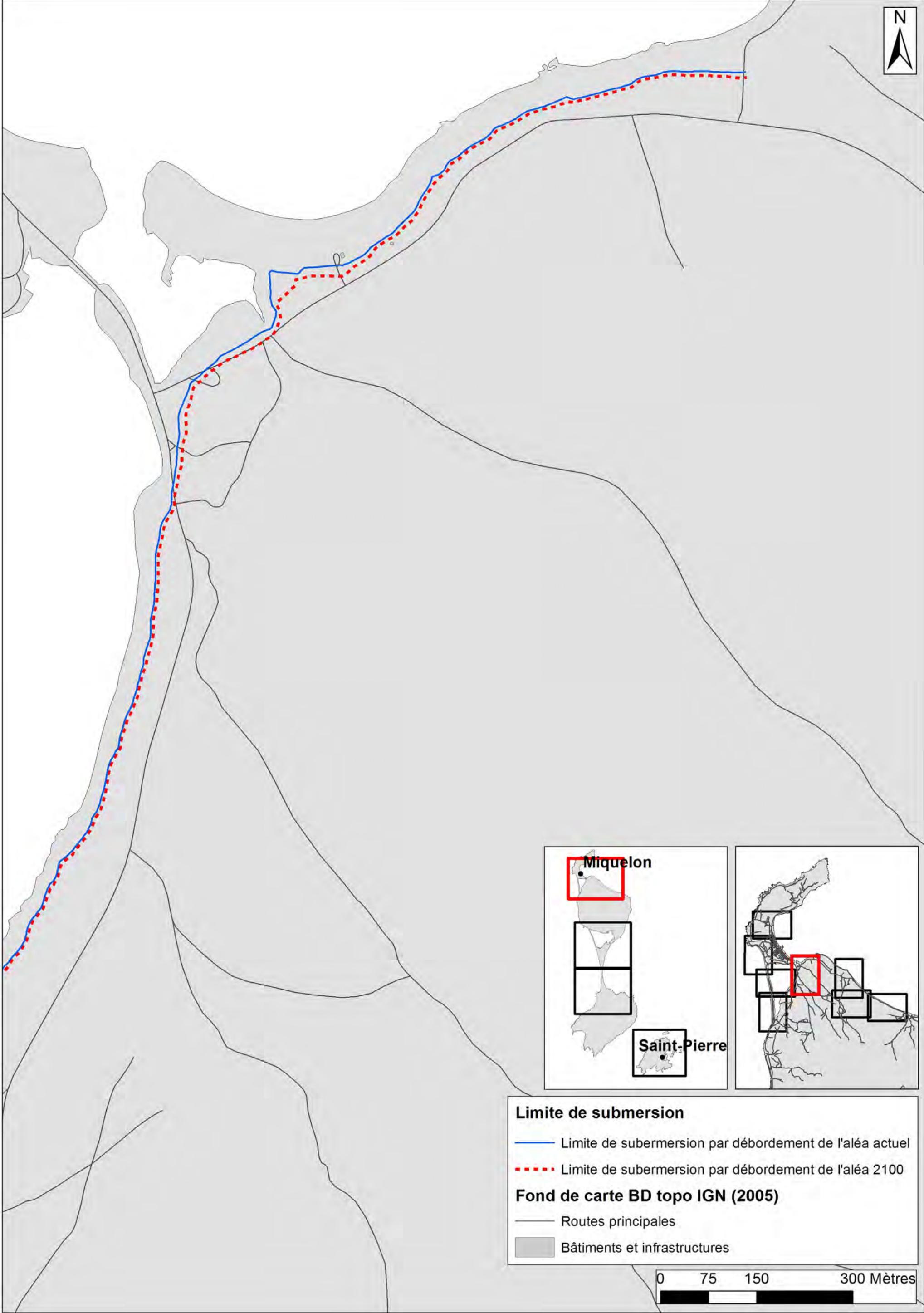
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



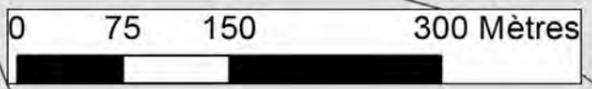


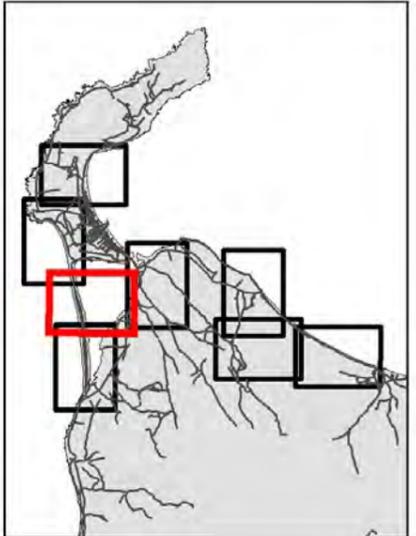
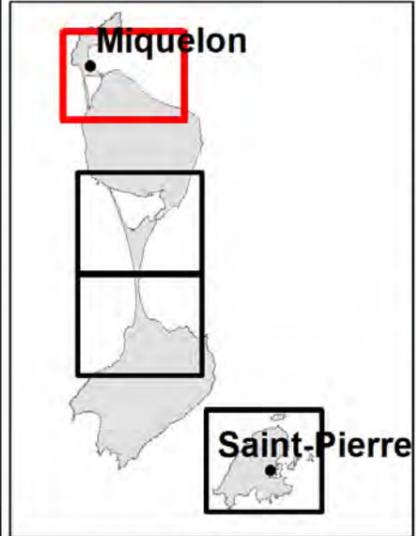
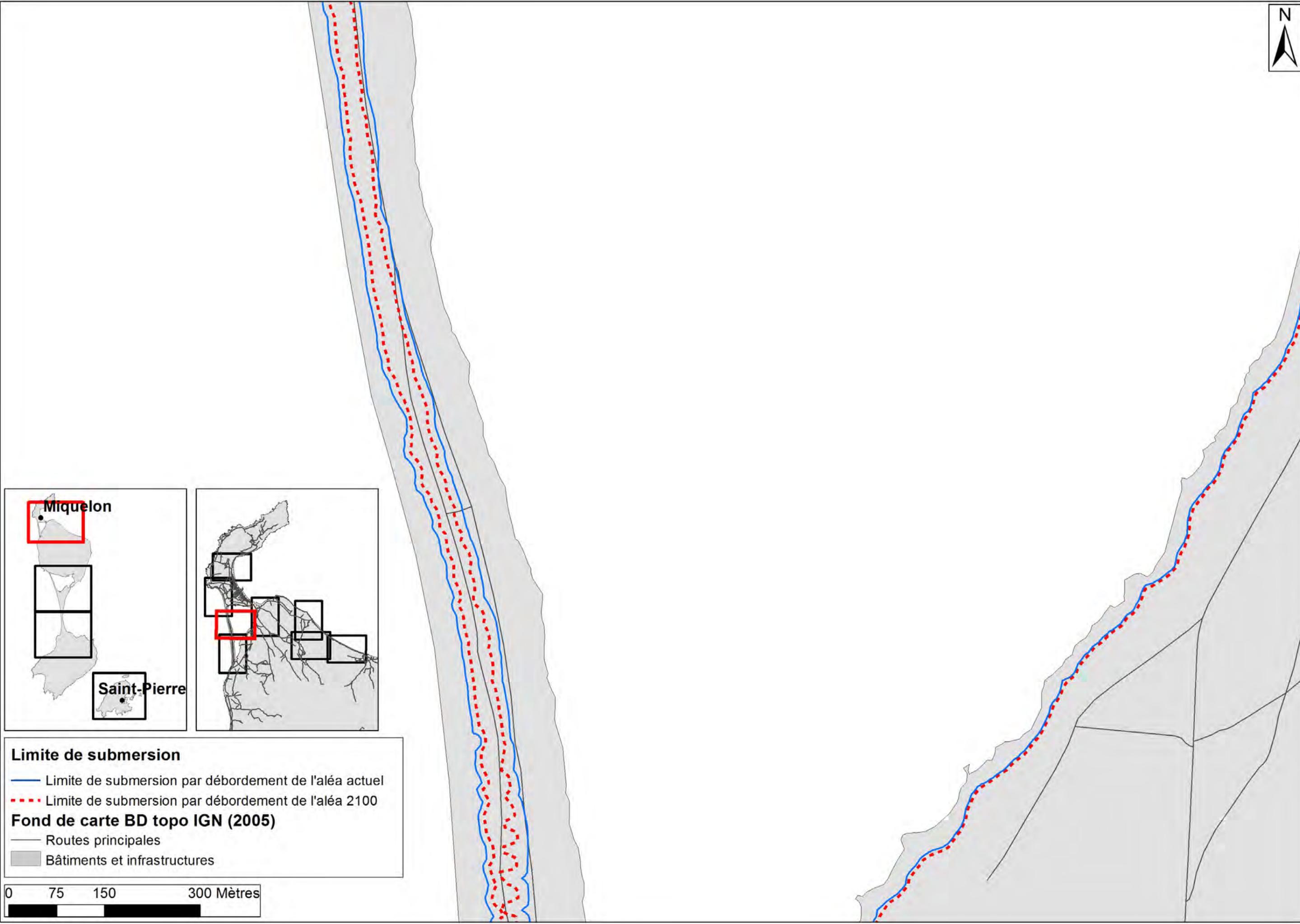
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





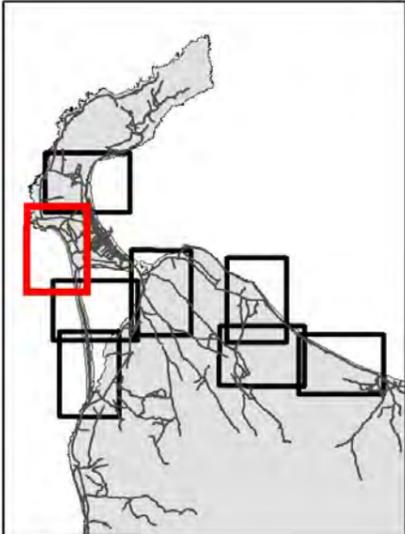
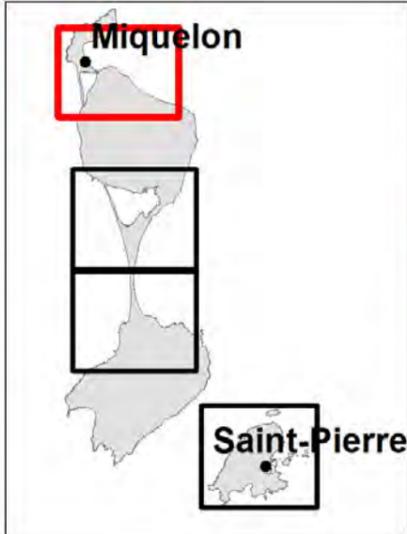
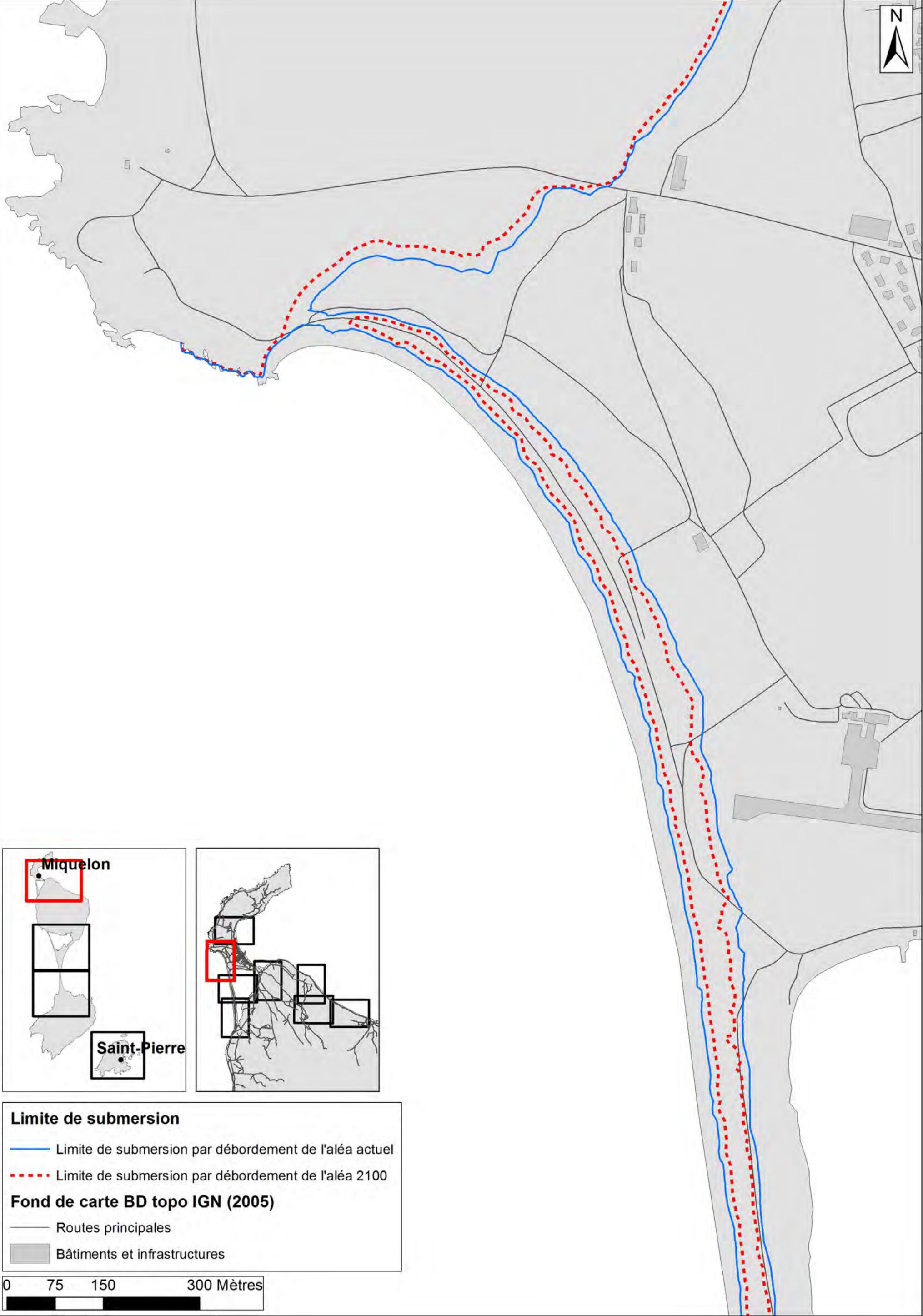
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





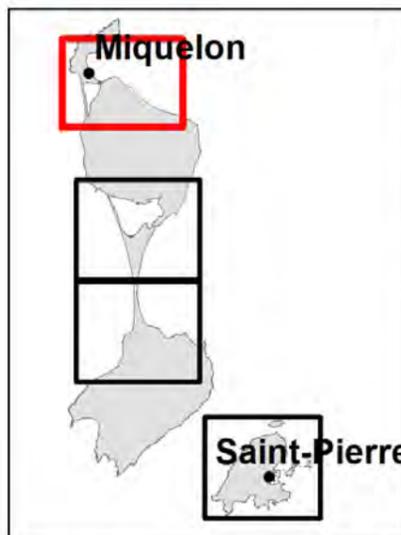
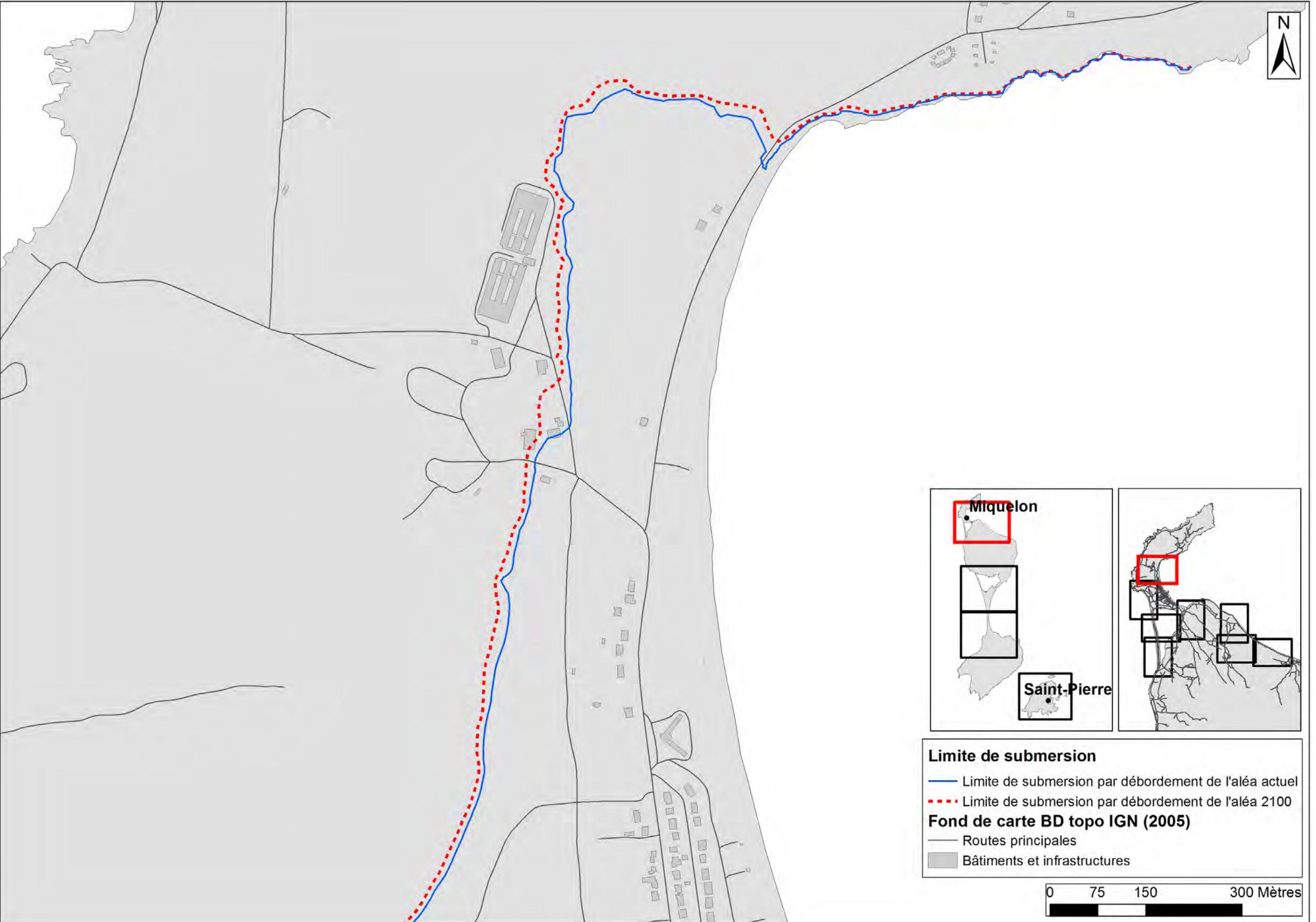
Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



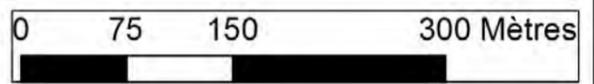


Limite de submersion

- Limite de submersion par débordement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par débordement de l'aléa 2100

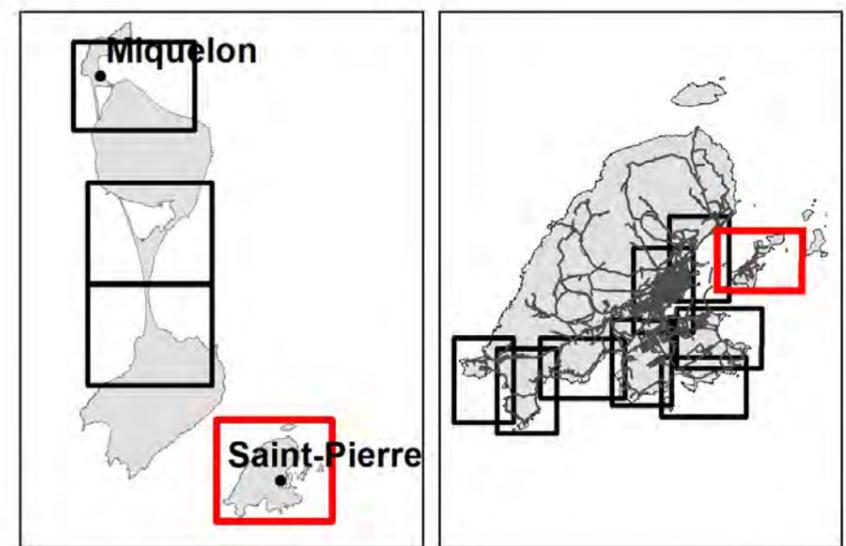
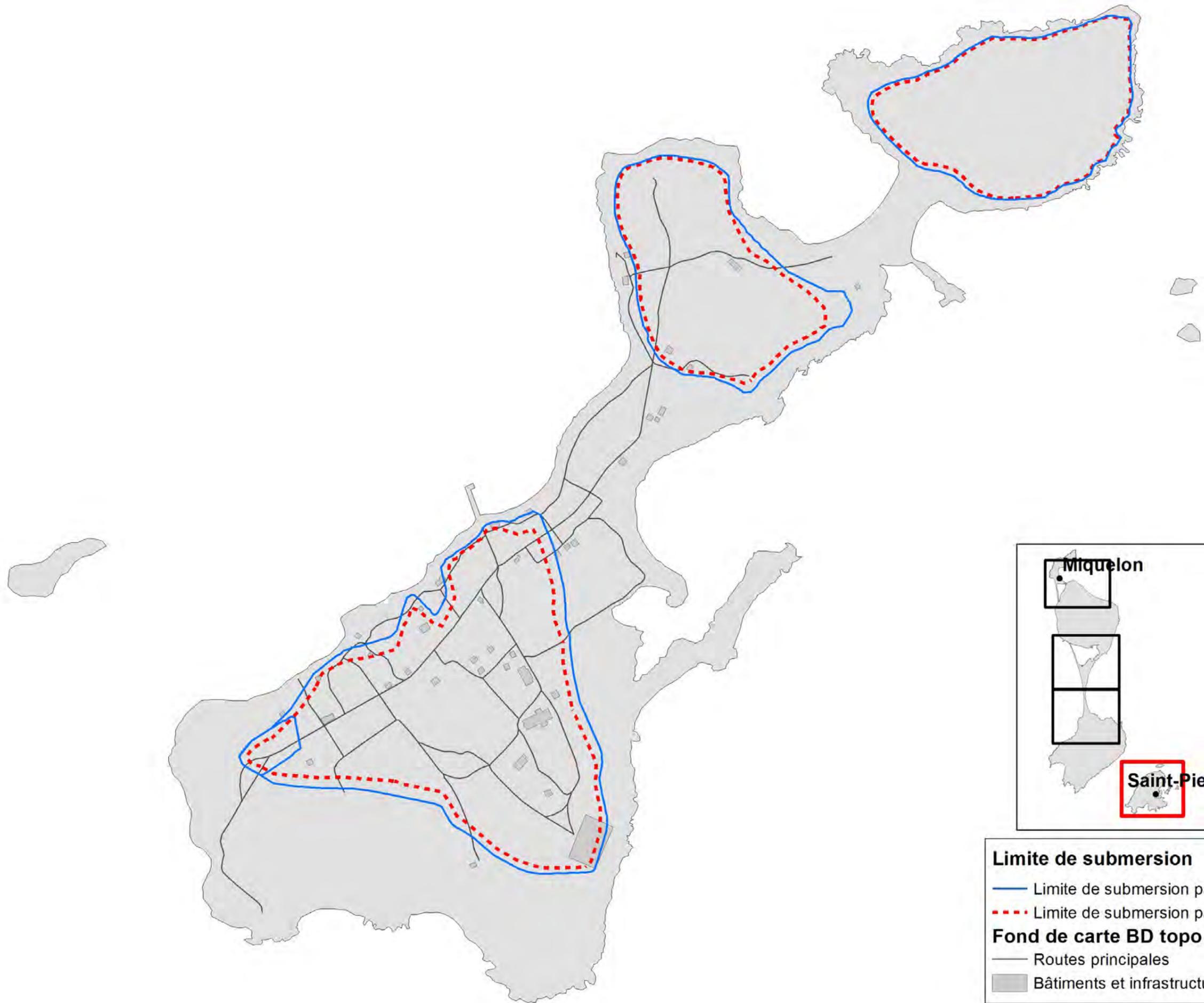
Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



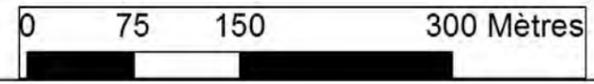
Annexe 5

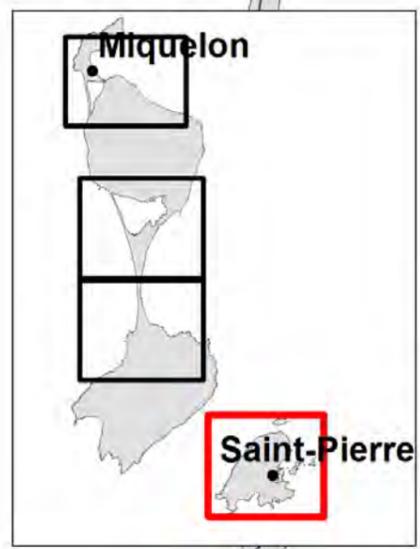
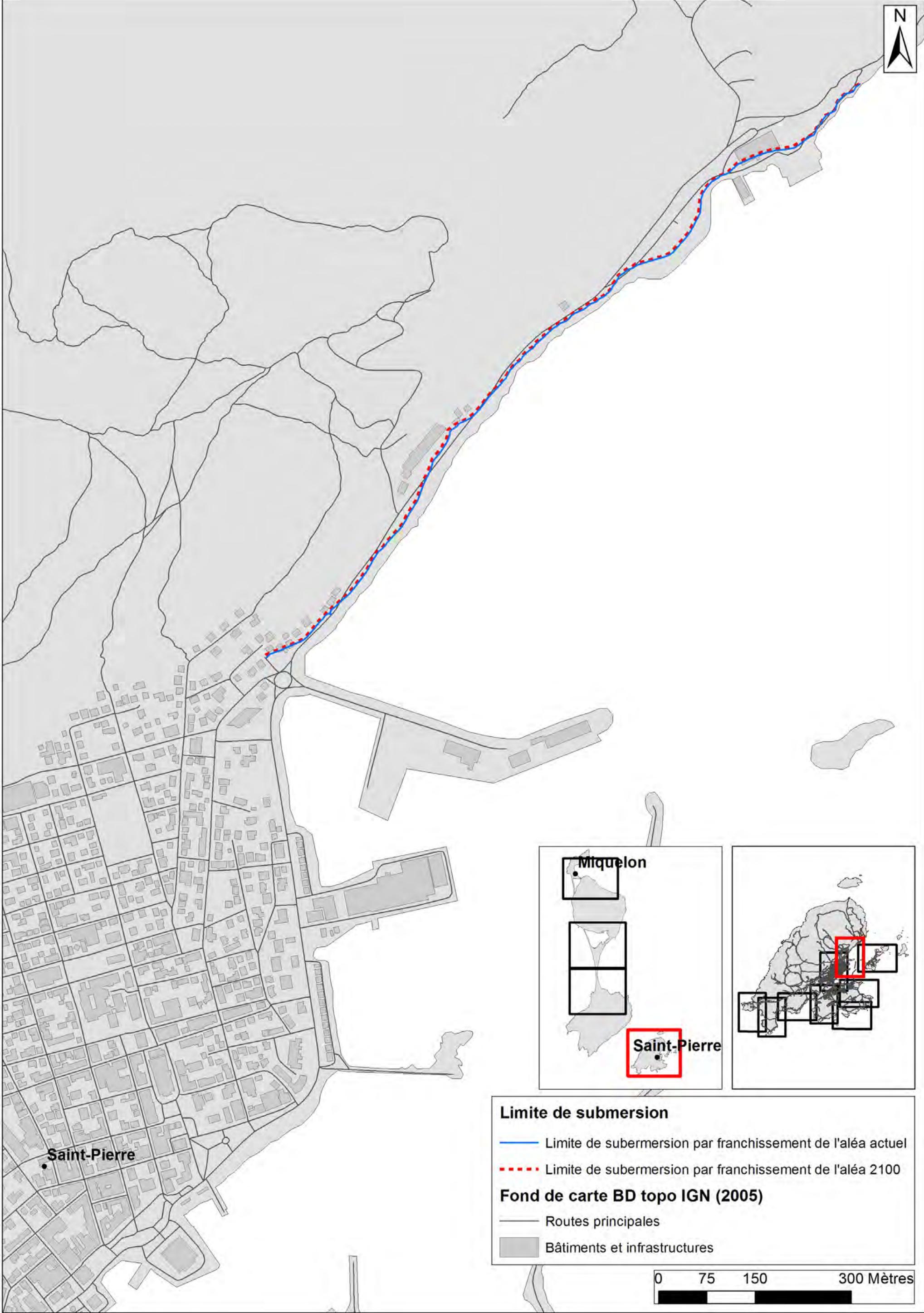
Cartographie au 1/5000 de l'aléa submersion marine par franchissement



Limite de submersion
— Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)
— Routes principales
■ Bâtiments et infrastructures



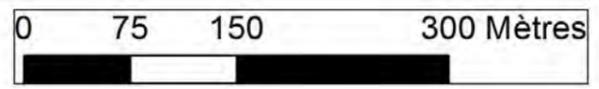


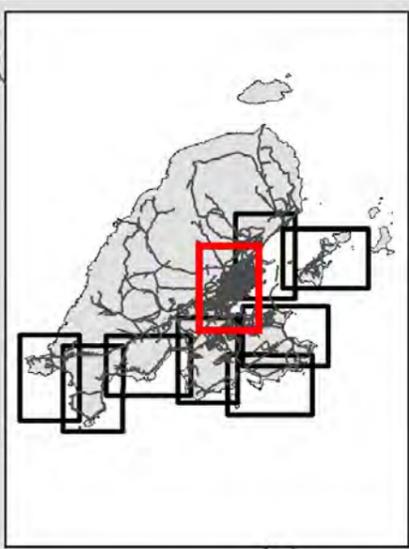
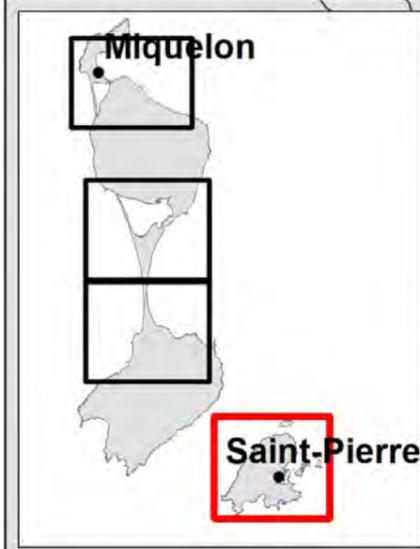
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



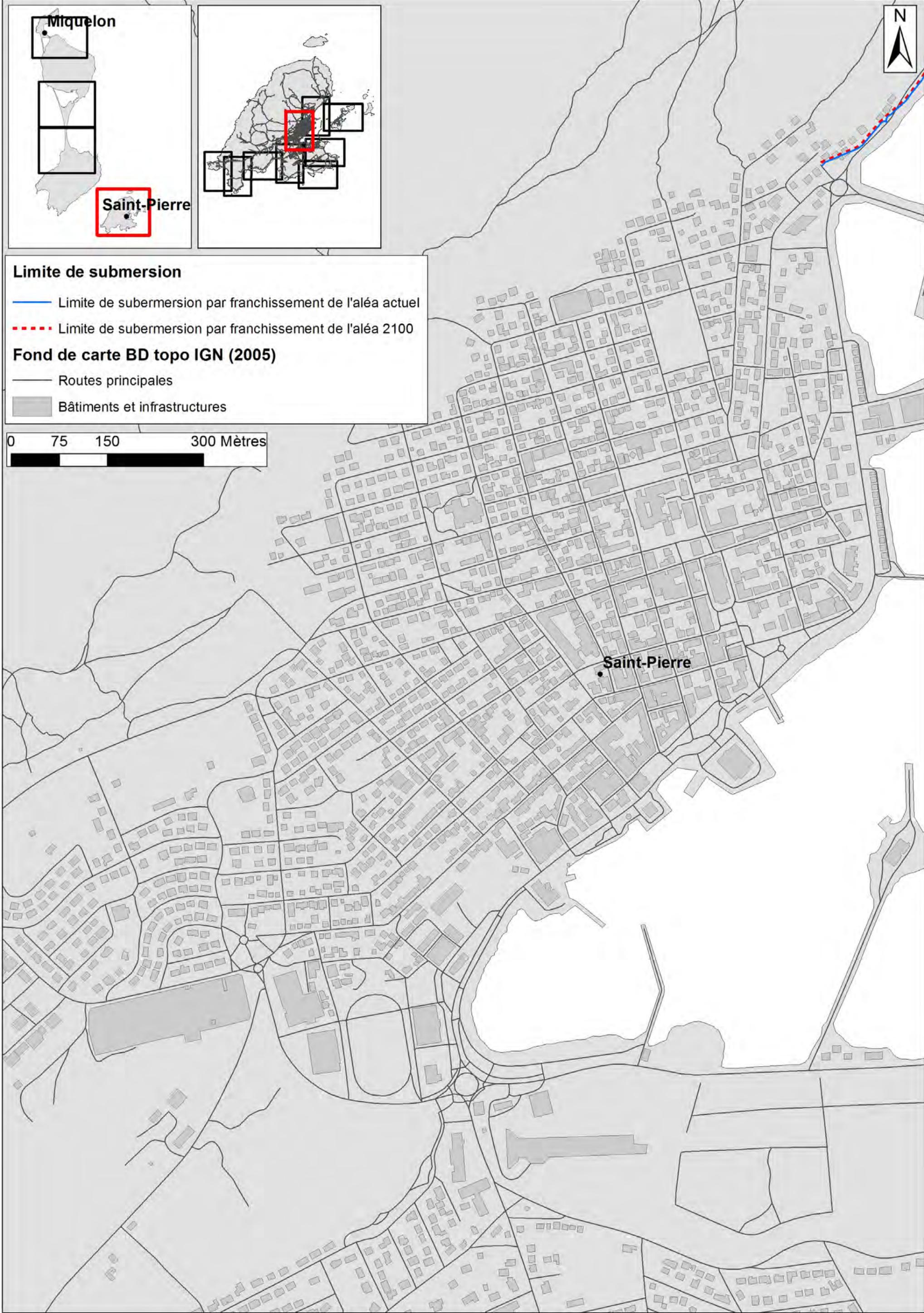
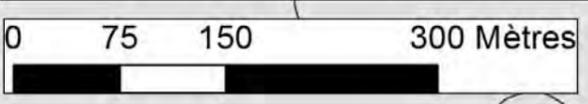


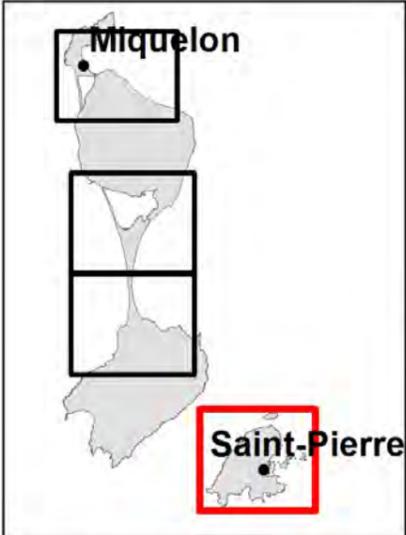
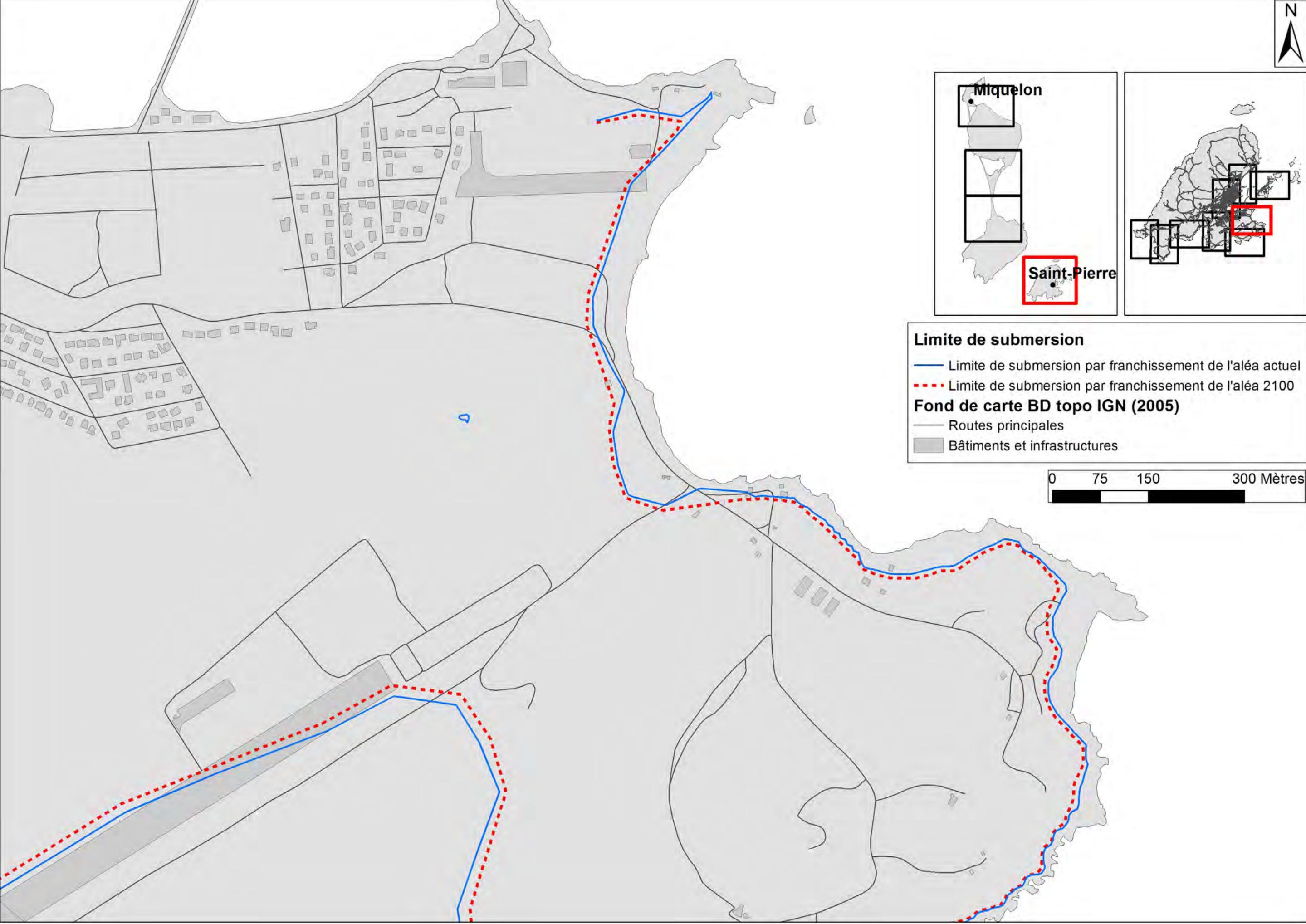
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



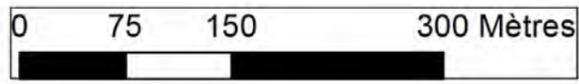


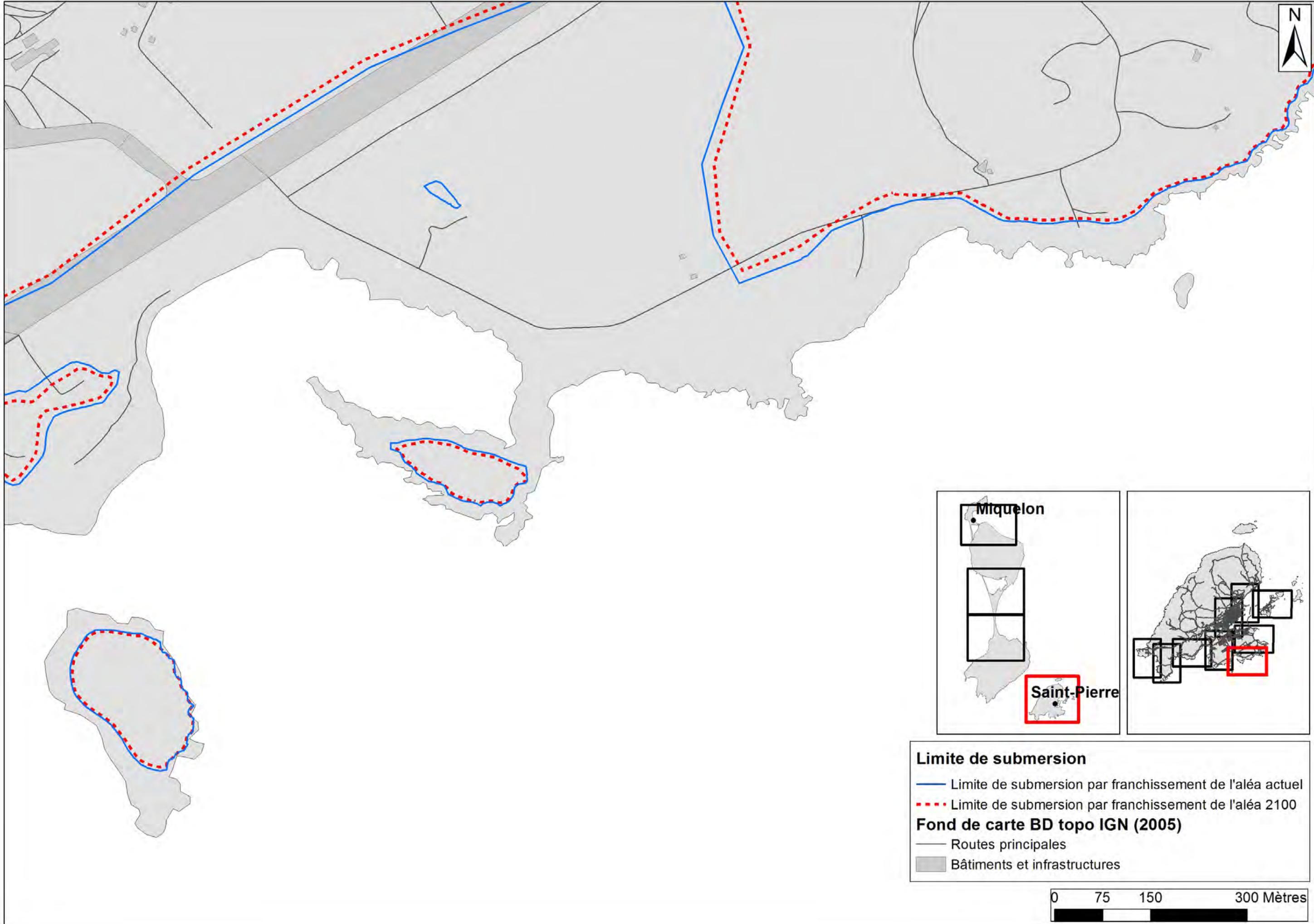
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



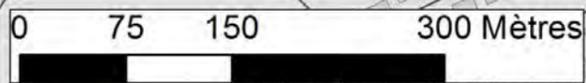


Limite de submersion

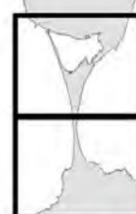
- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

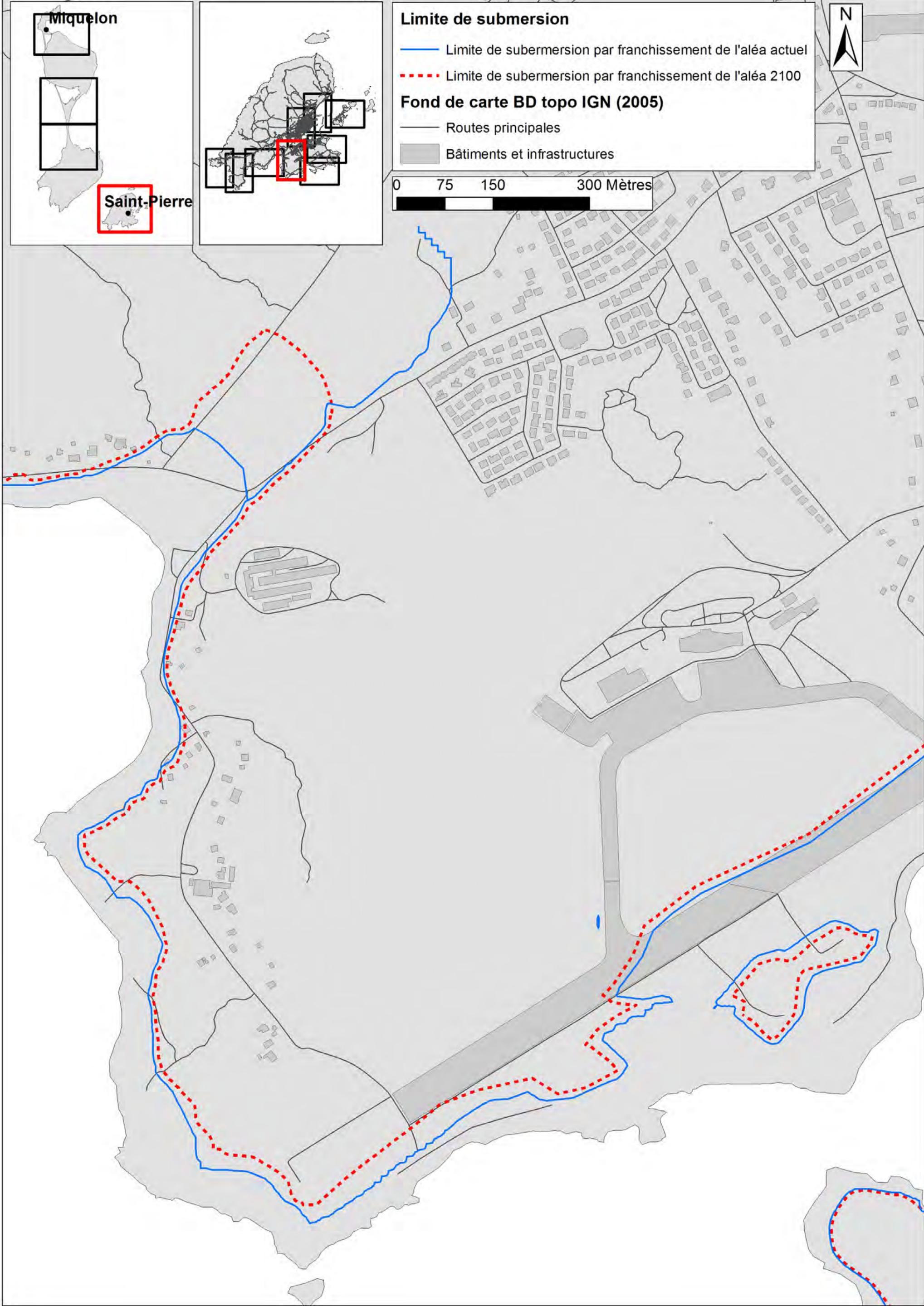
- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

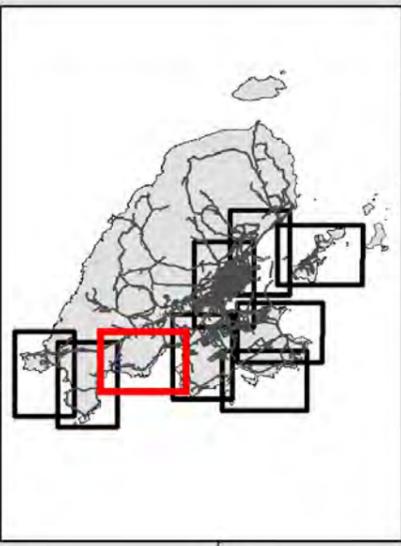
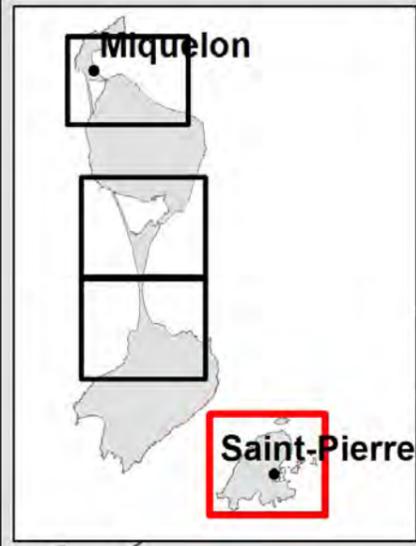


Miquelon



Saint-Pierre



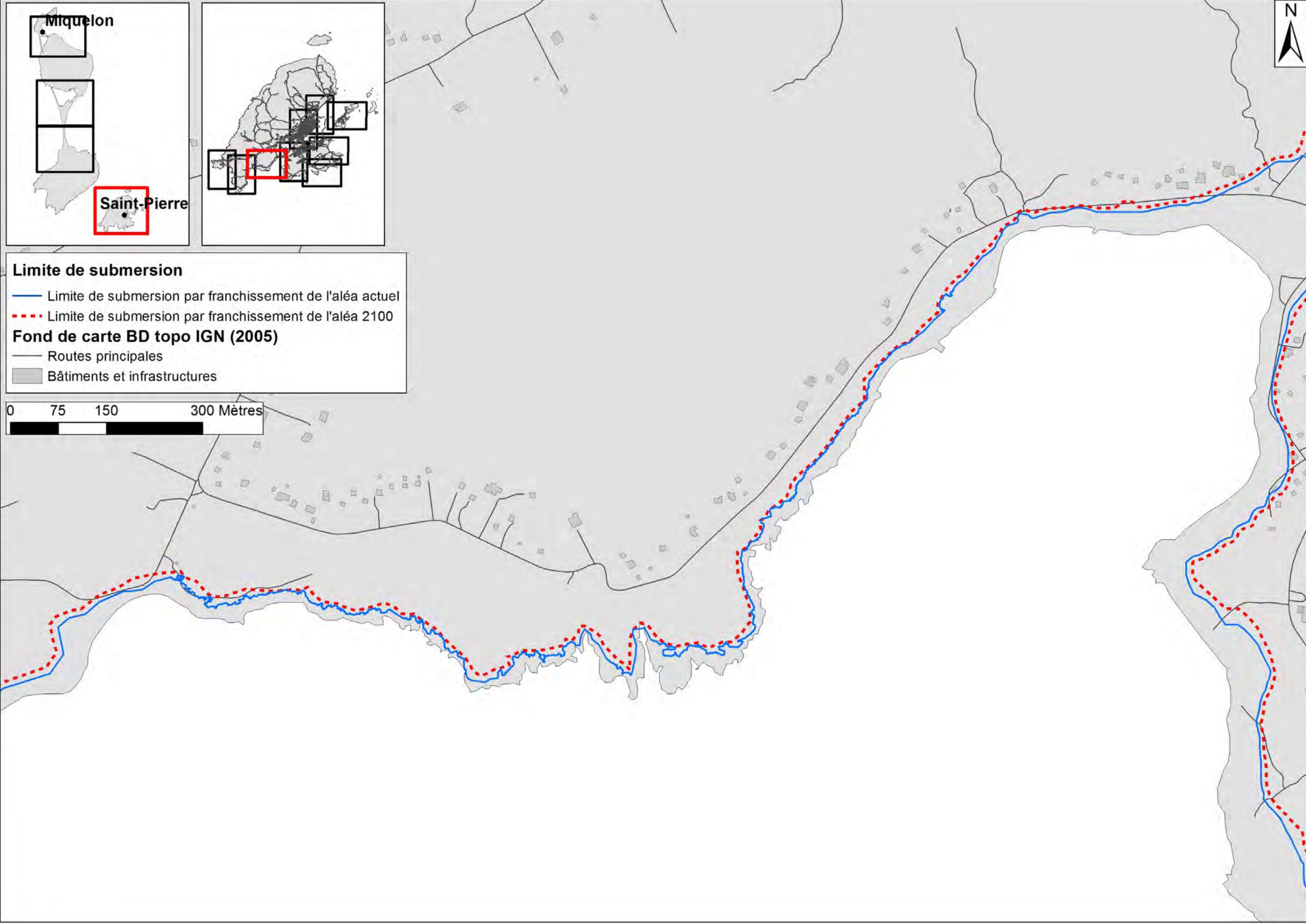


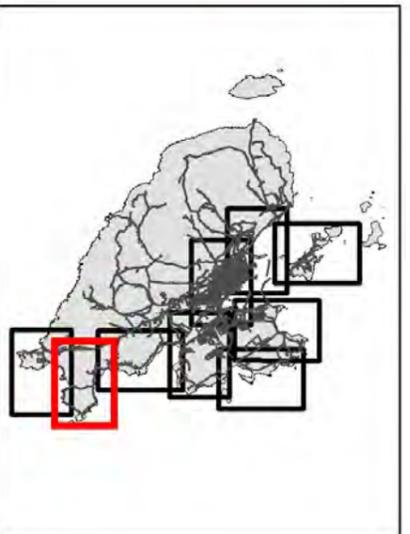
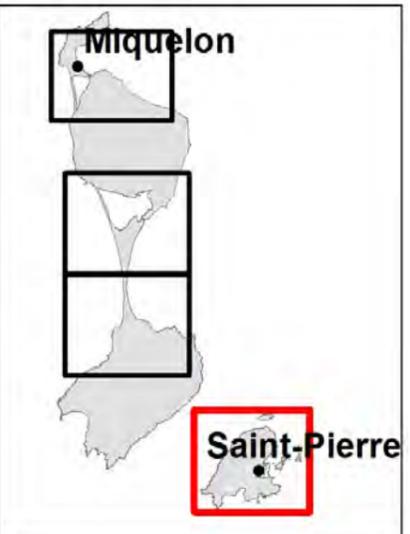
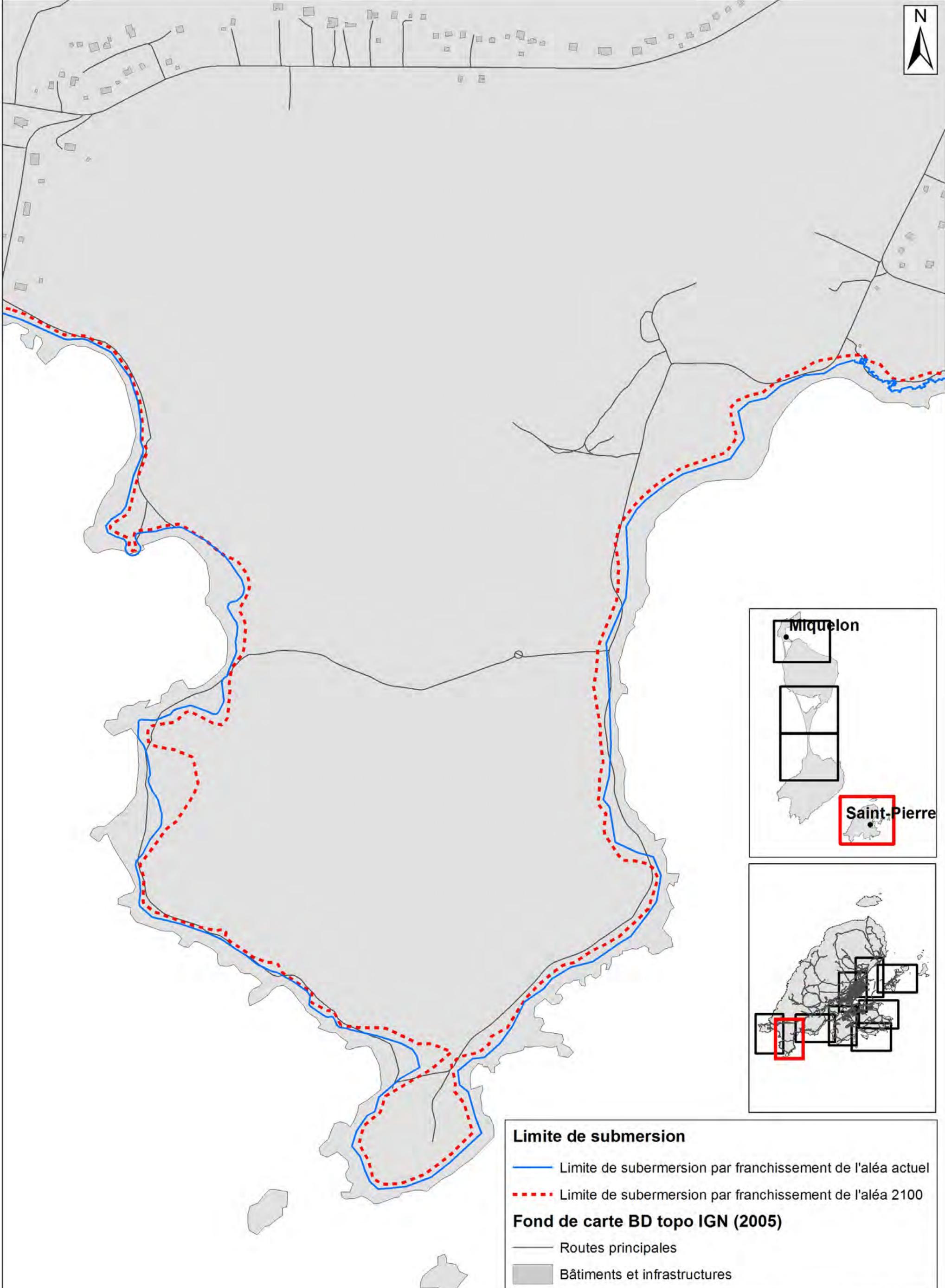
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





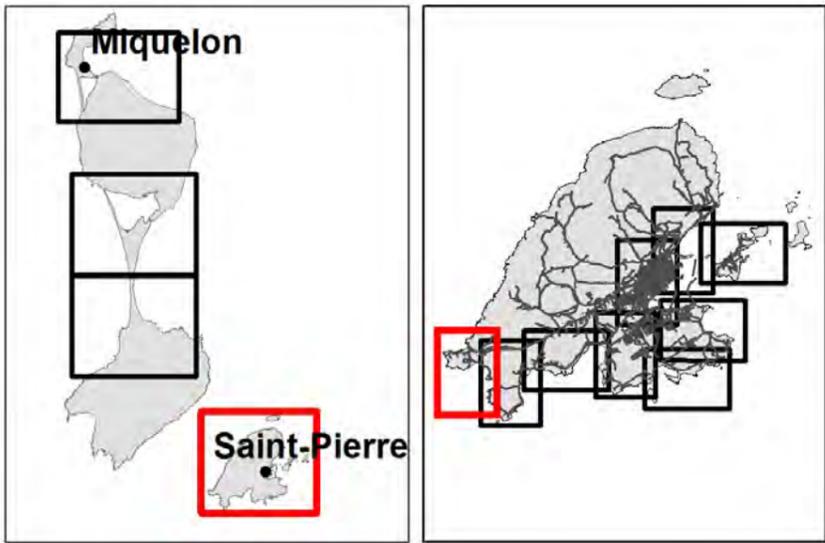
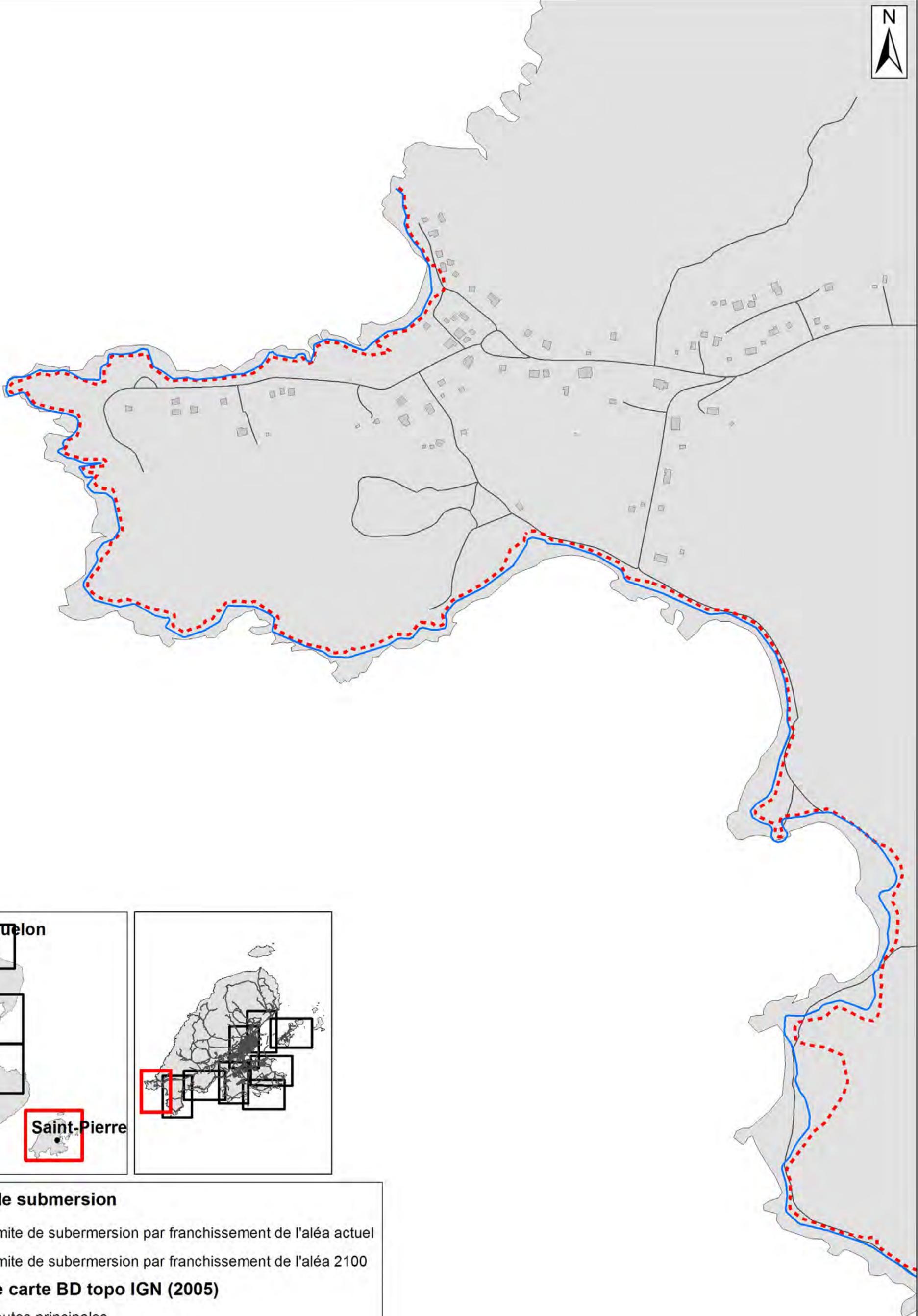
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



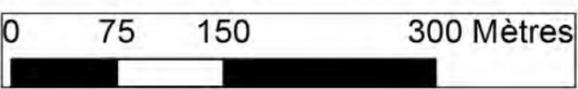


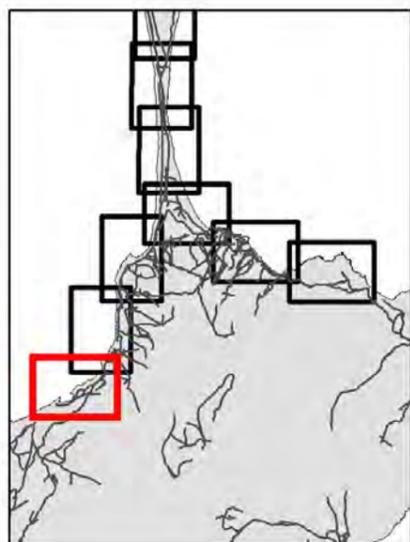
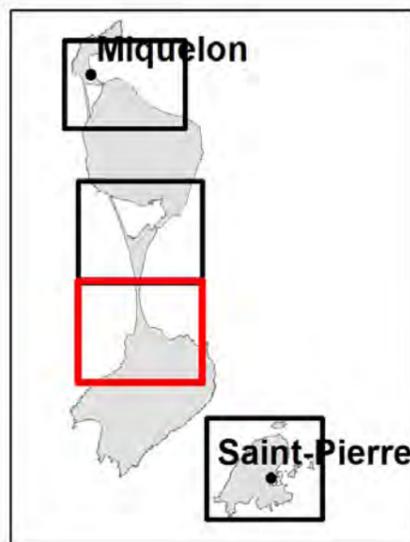
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



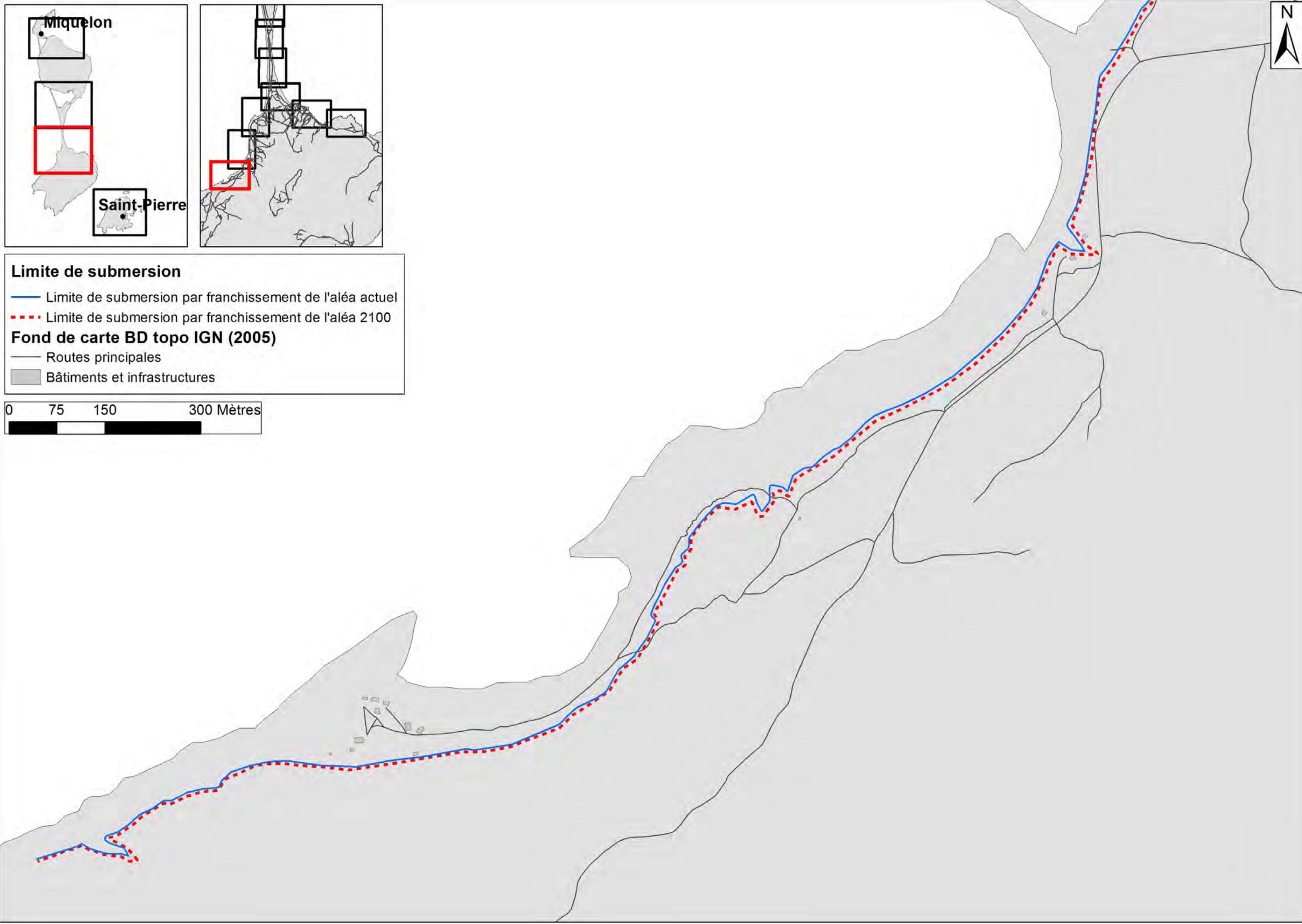


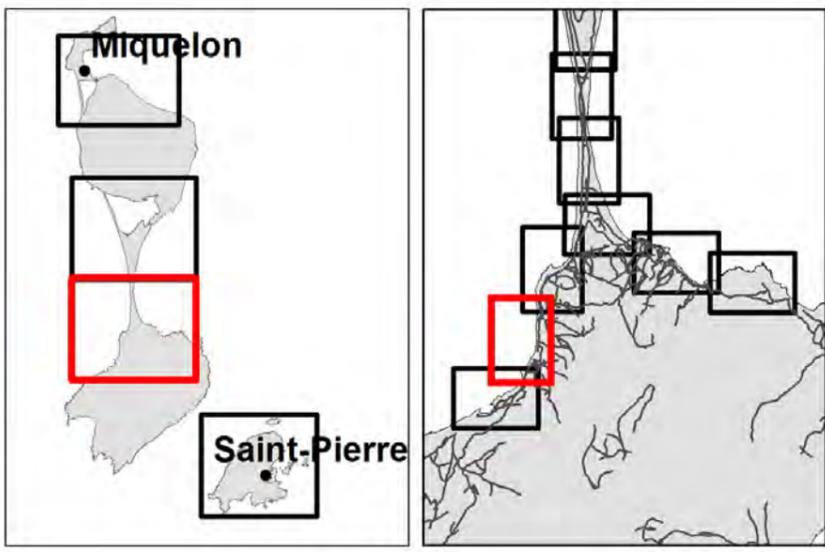
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



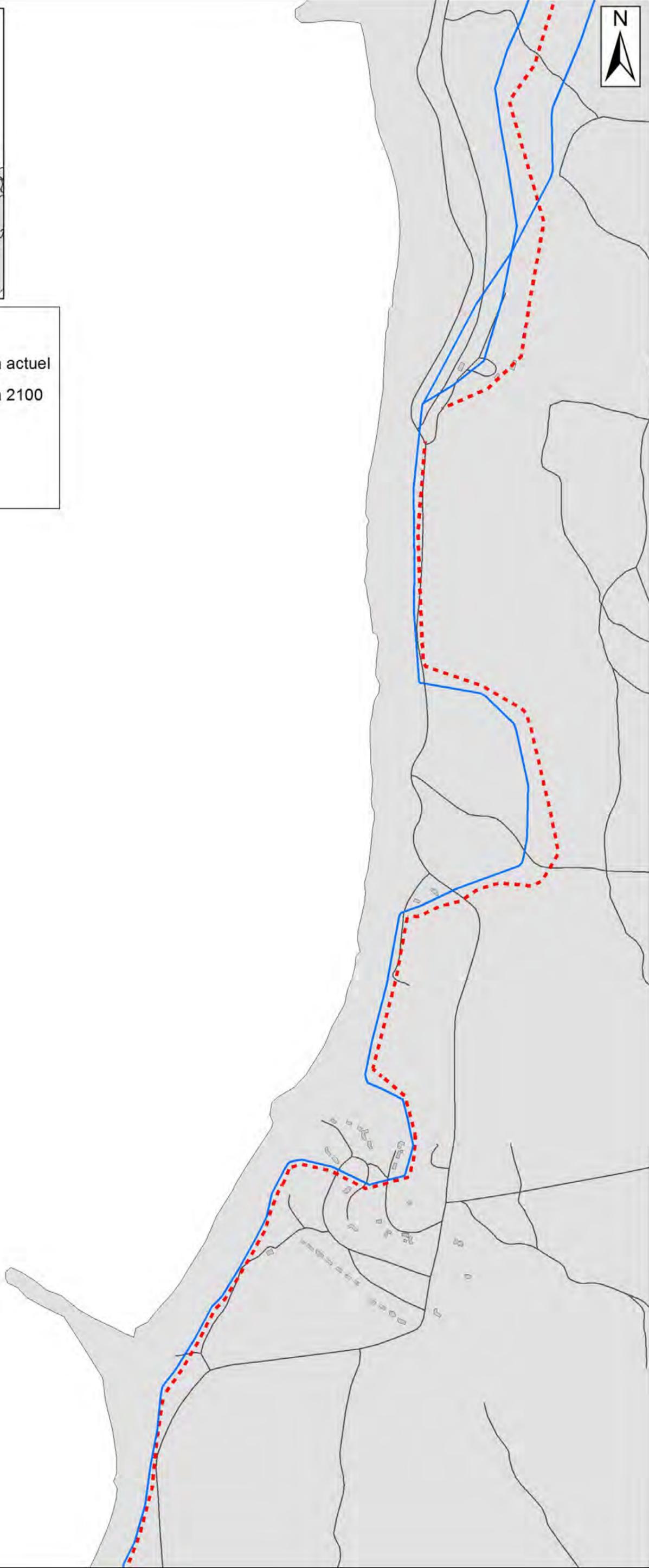


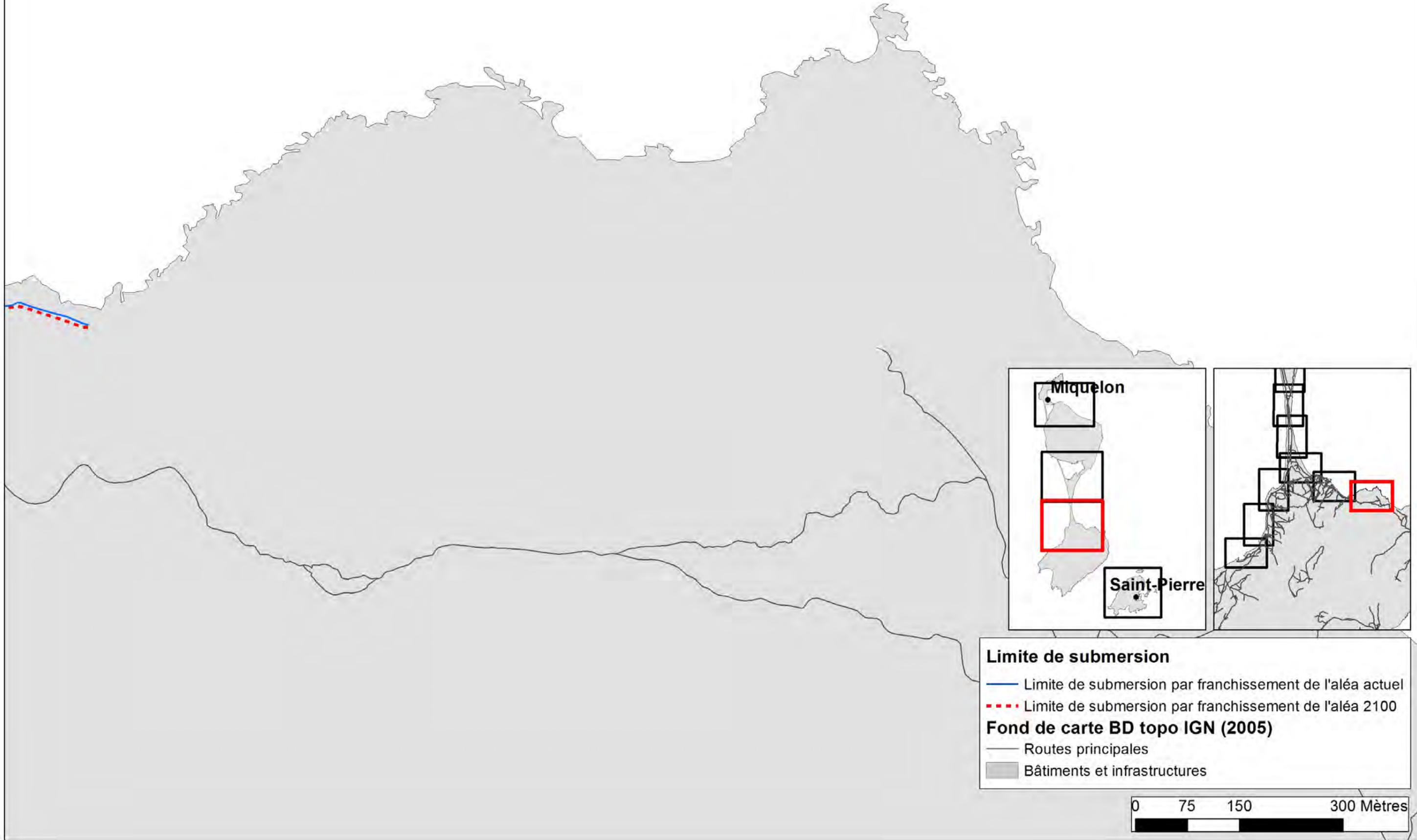
Limite de submersion

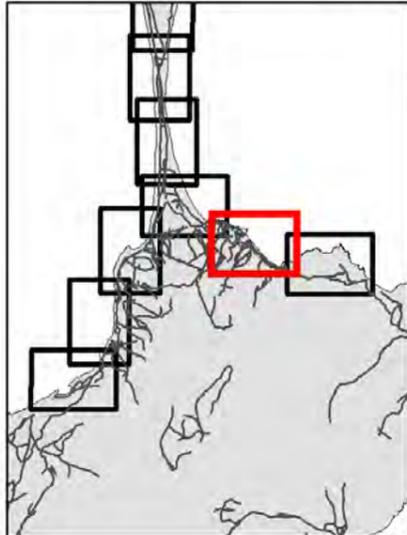
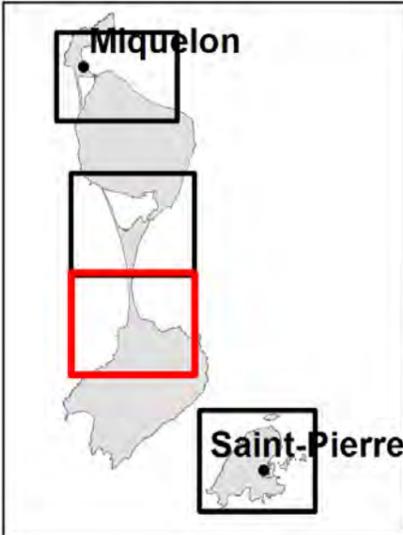
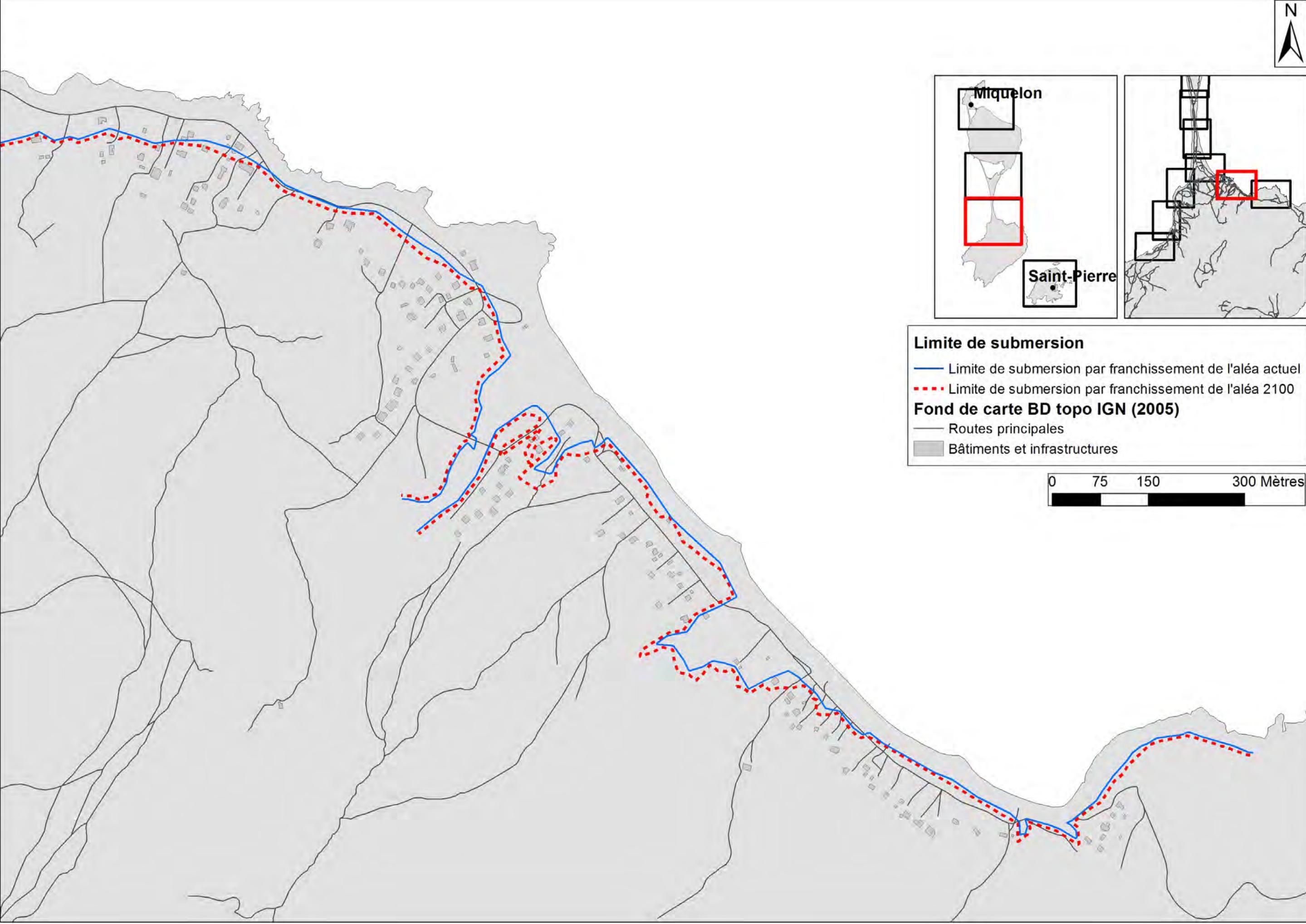
- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





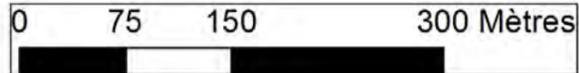


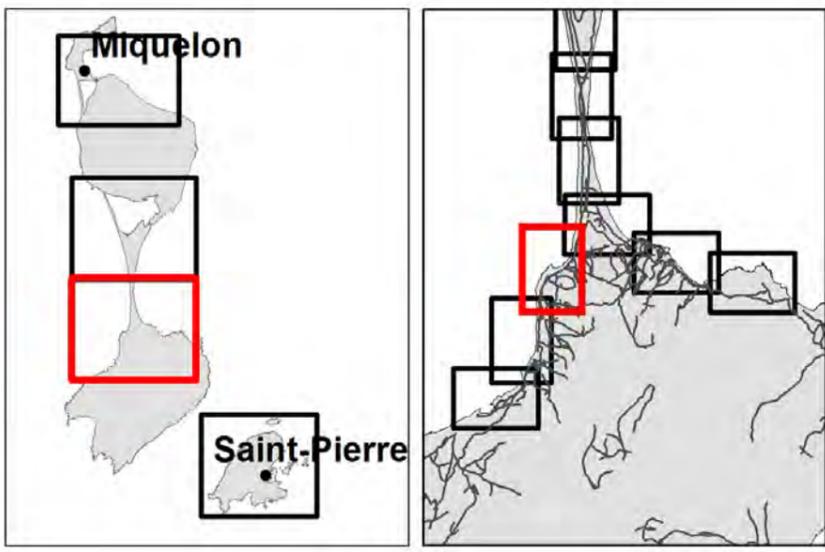
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



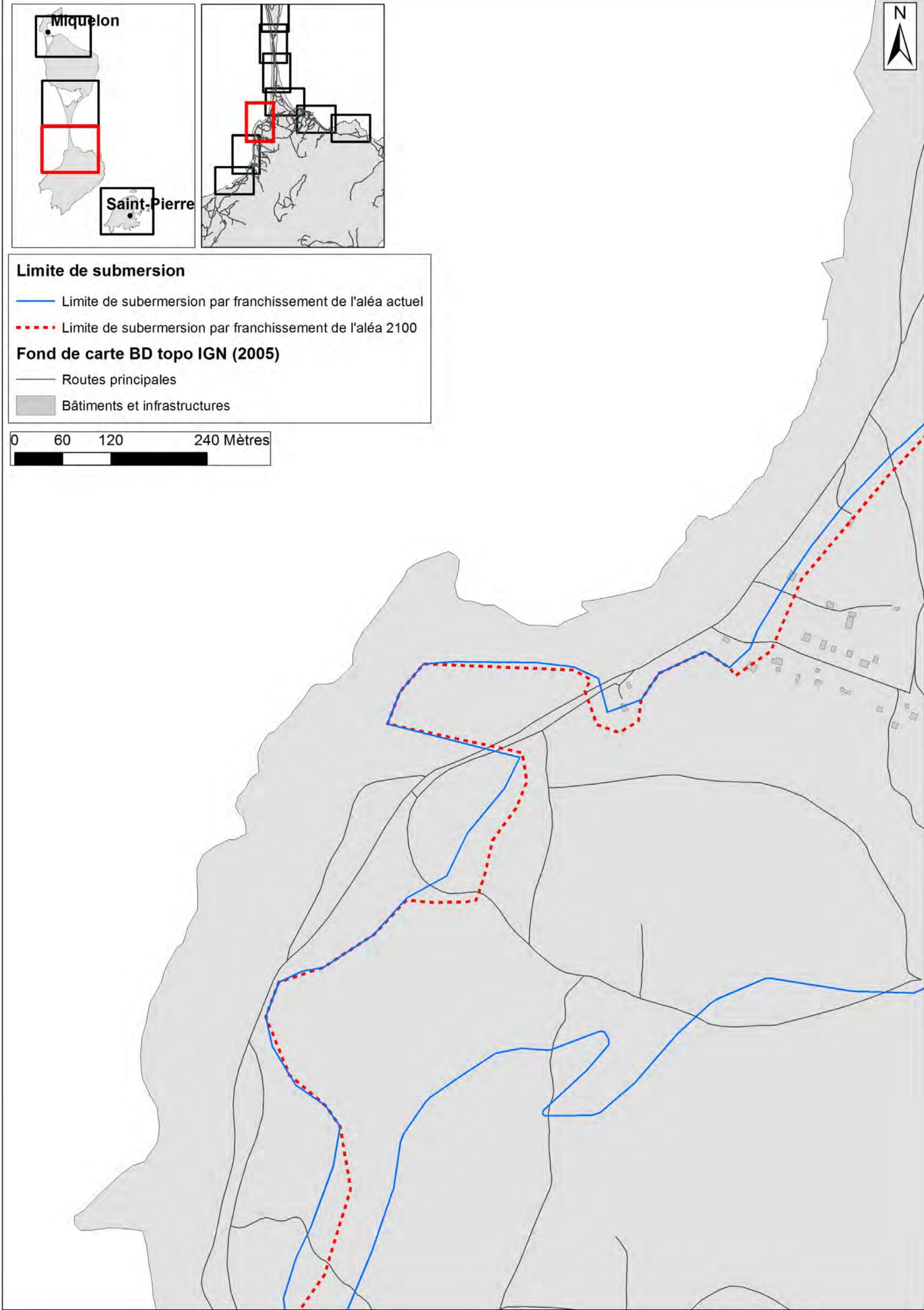


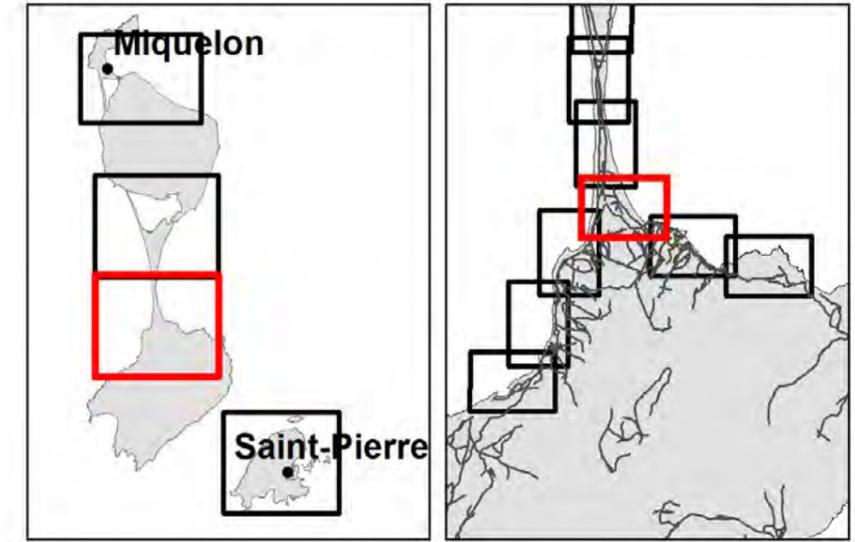
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



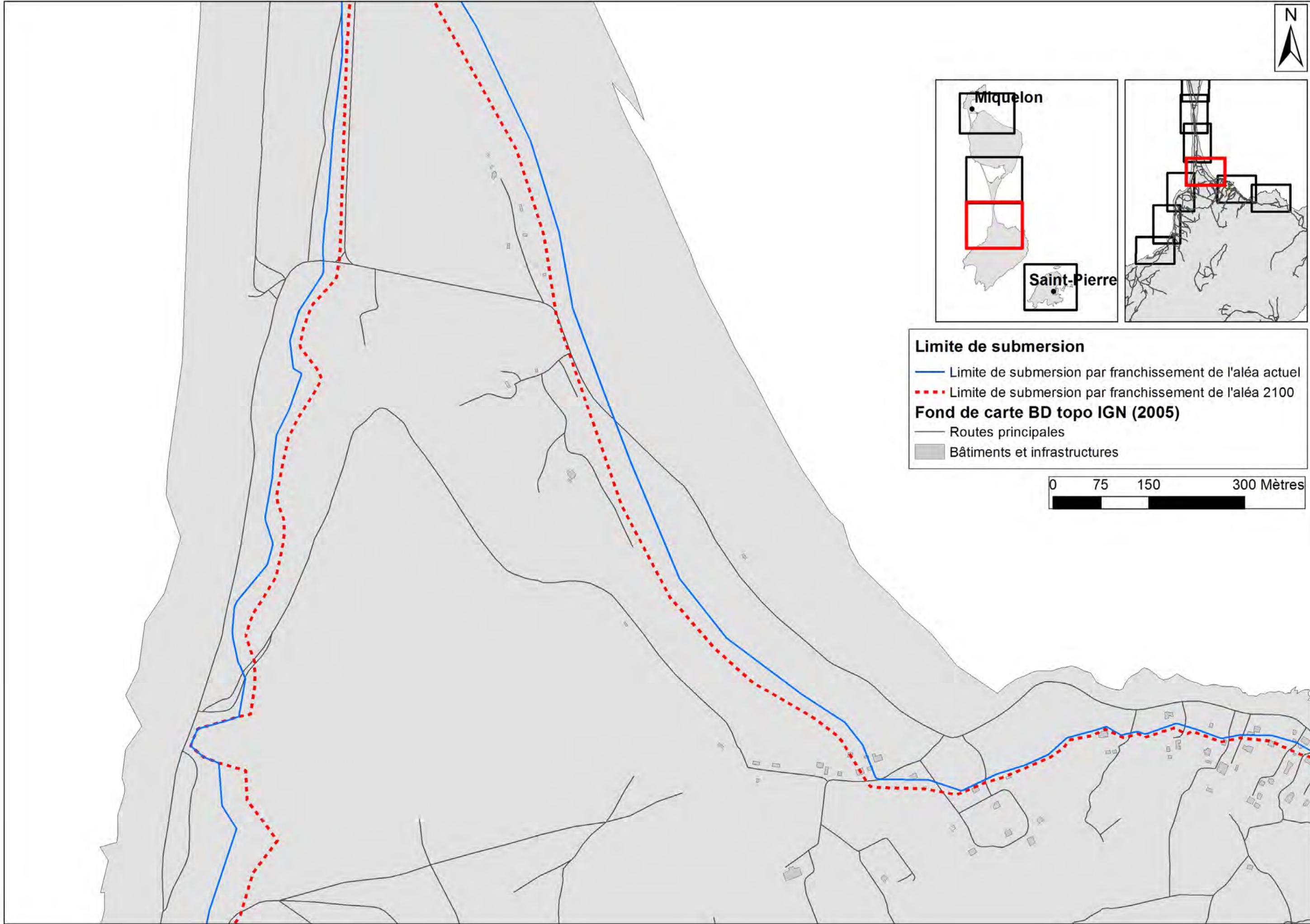
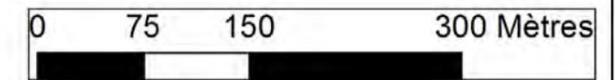


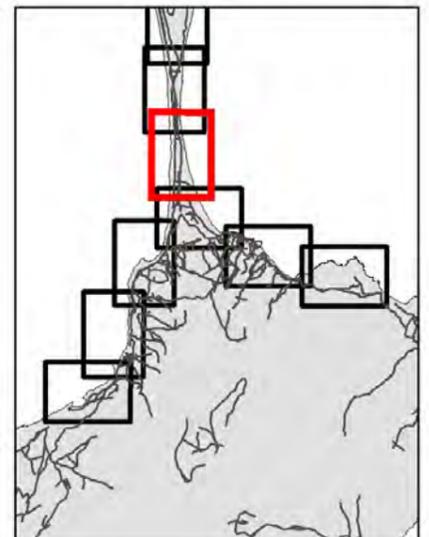
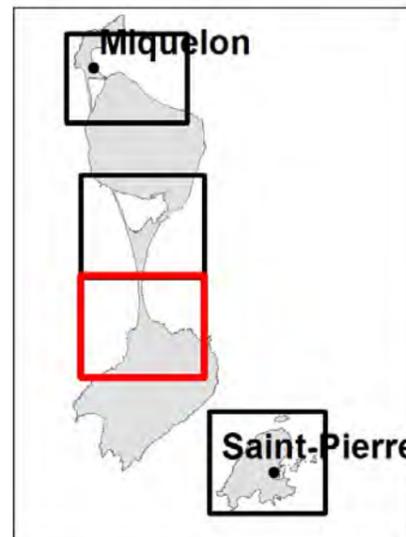
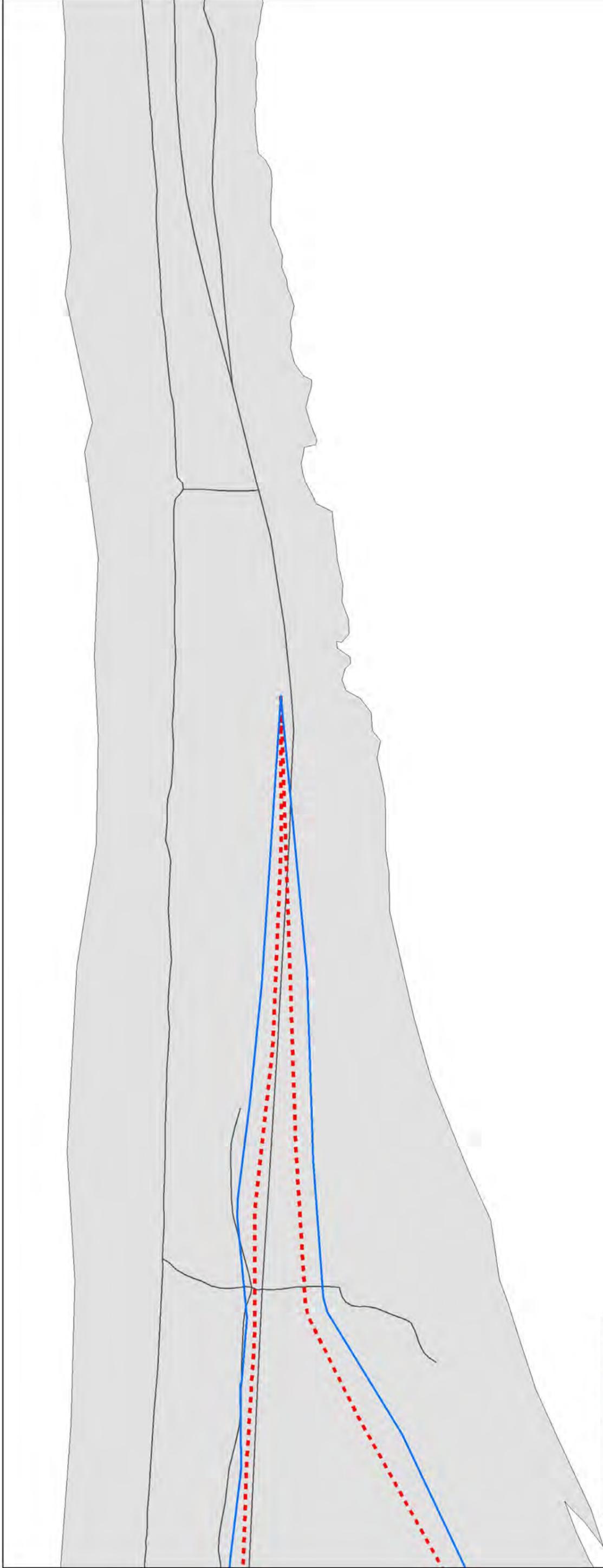
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



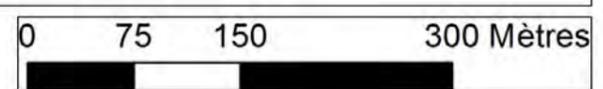


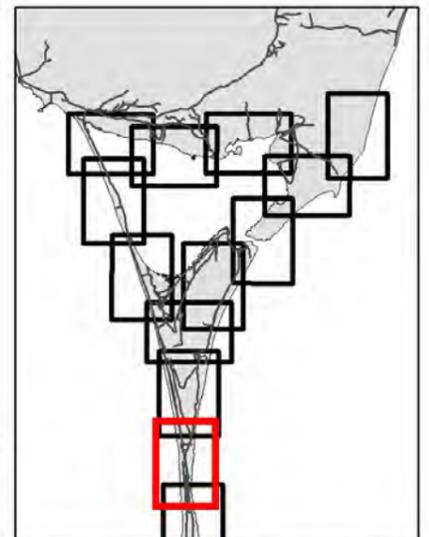
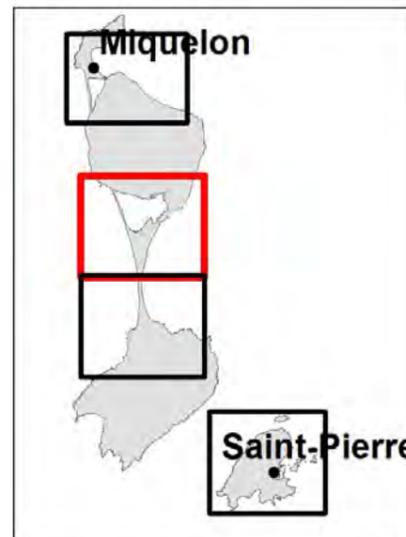
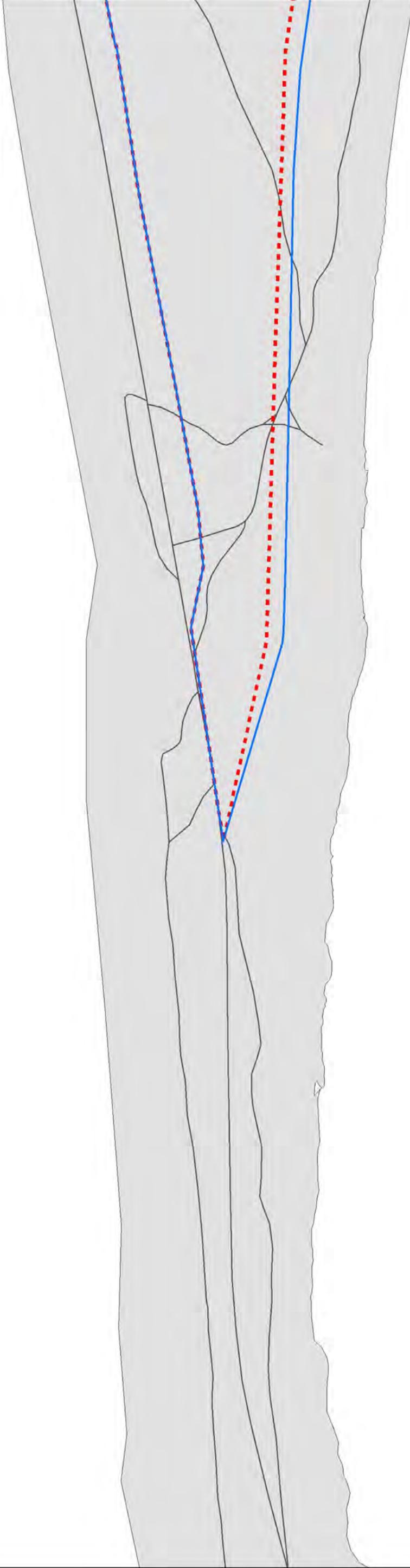
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





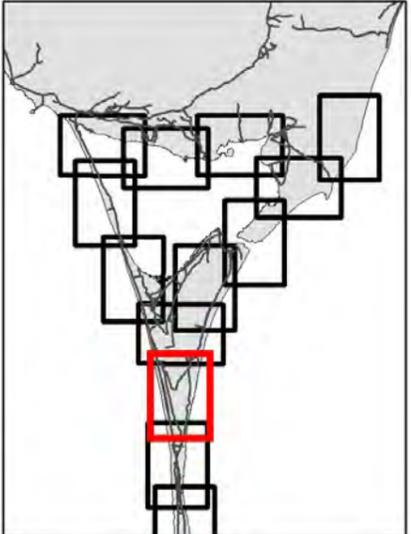
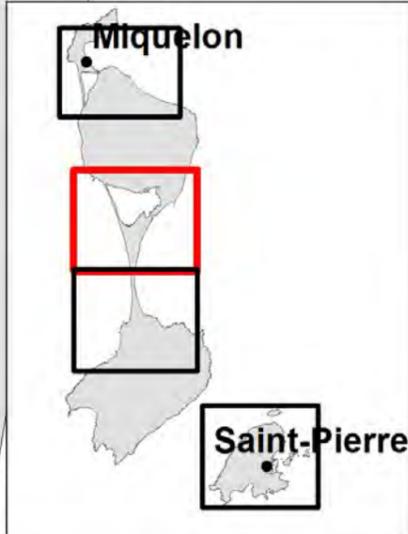
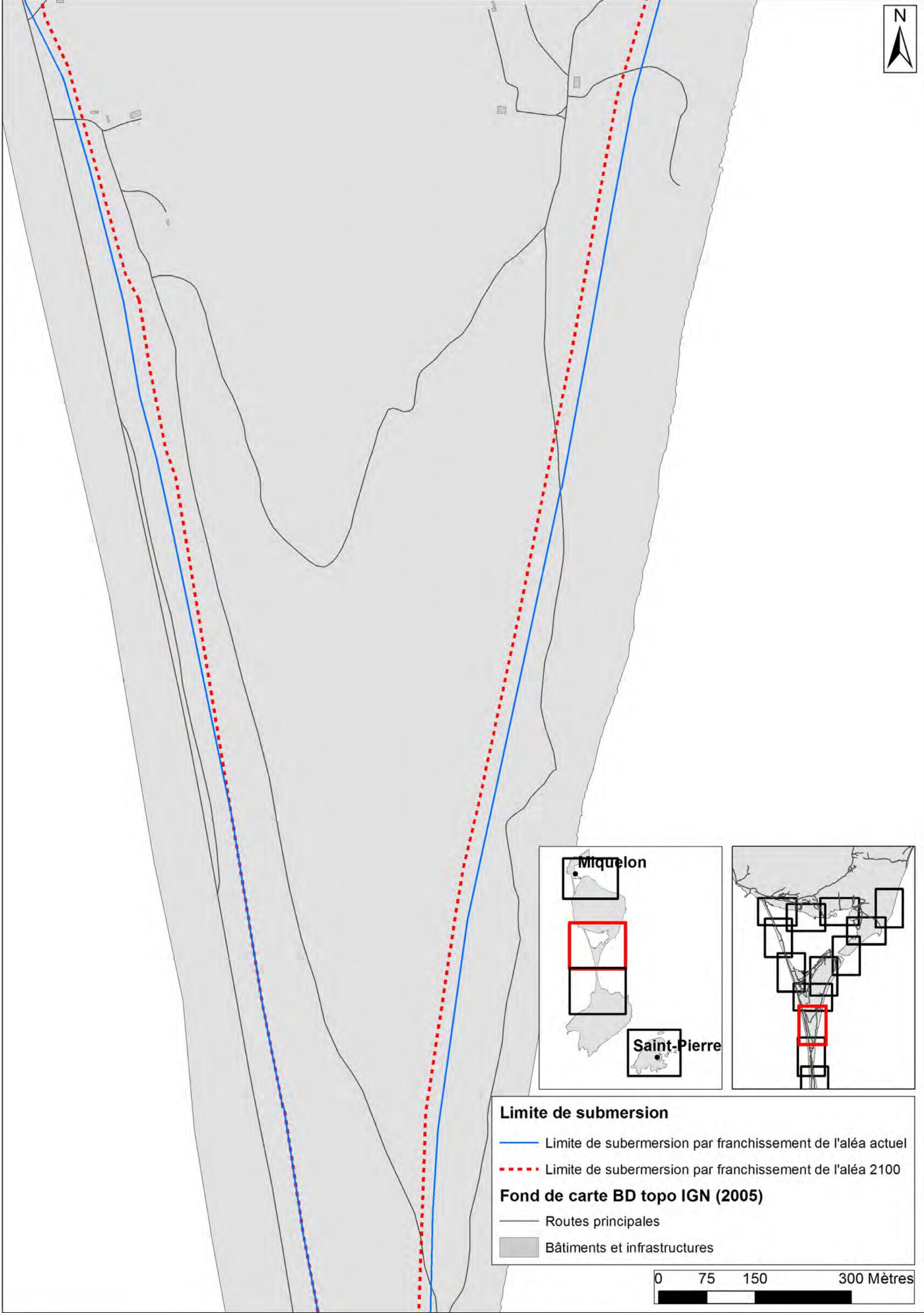
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

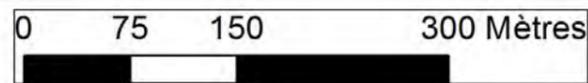
Fond de carte BD topo IGN (2005)

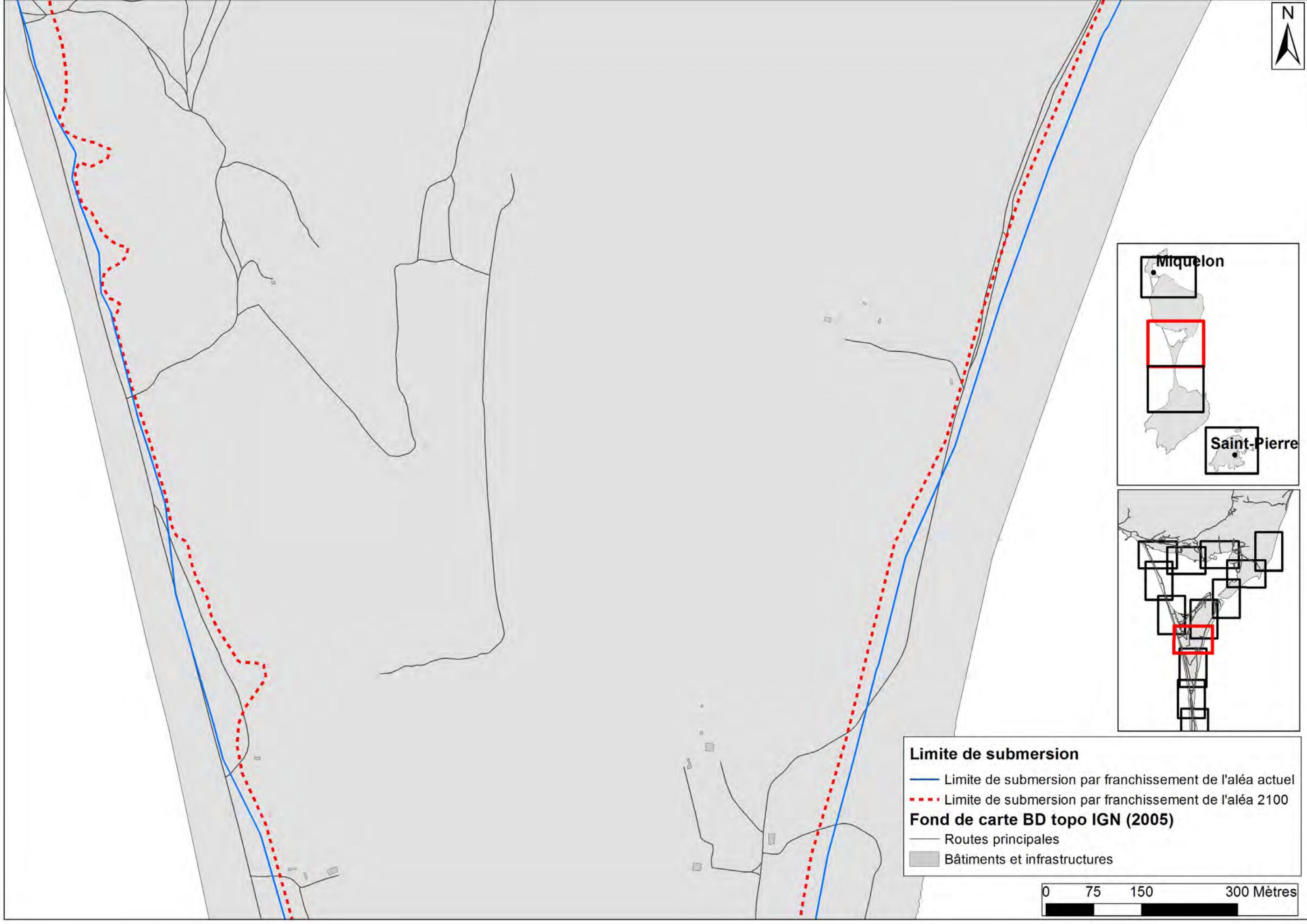
- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





- Limite de submersion**
- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
 - - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100
- Fond de carte BD topo IGN (2005)**
- Routes principales
 - Bâtiments et infrastructures



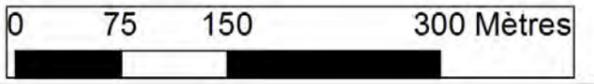


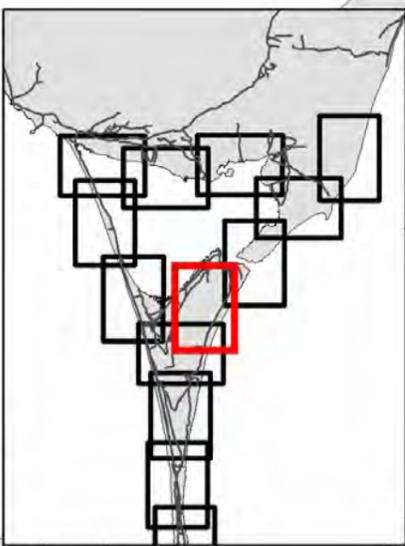
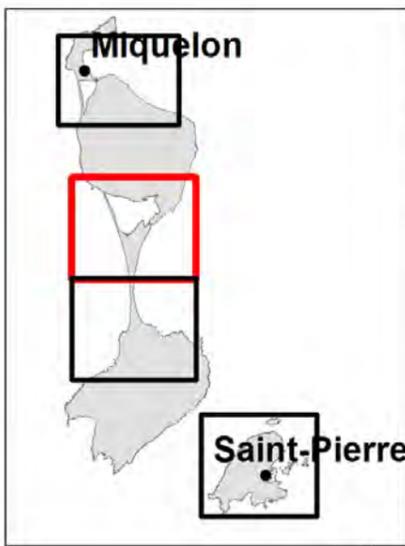
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



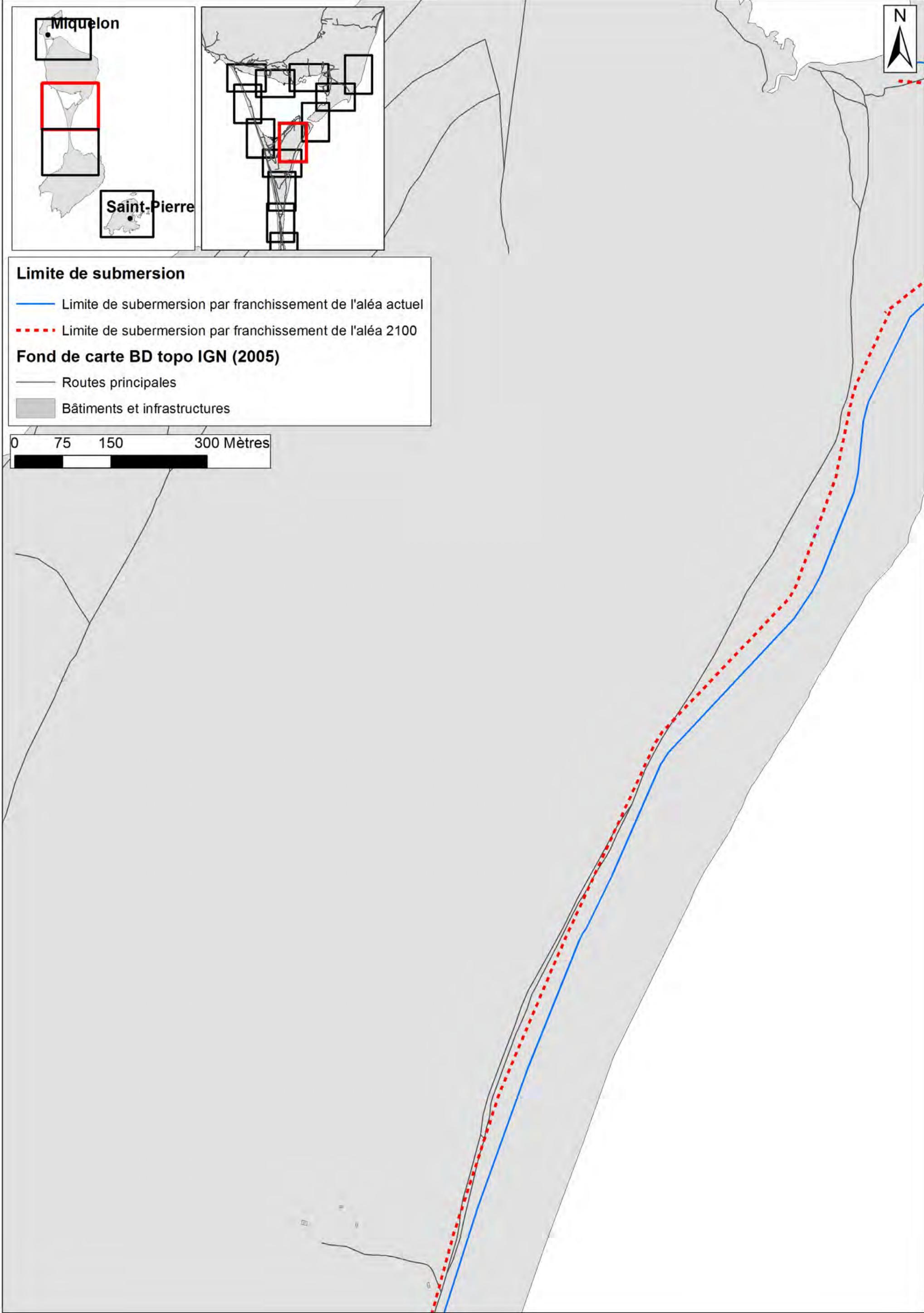


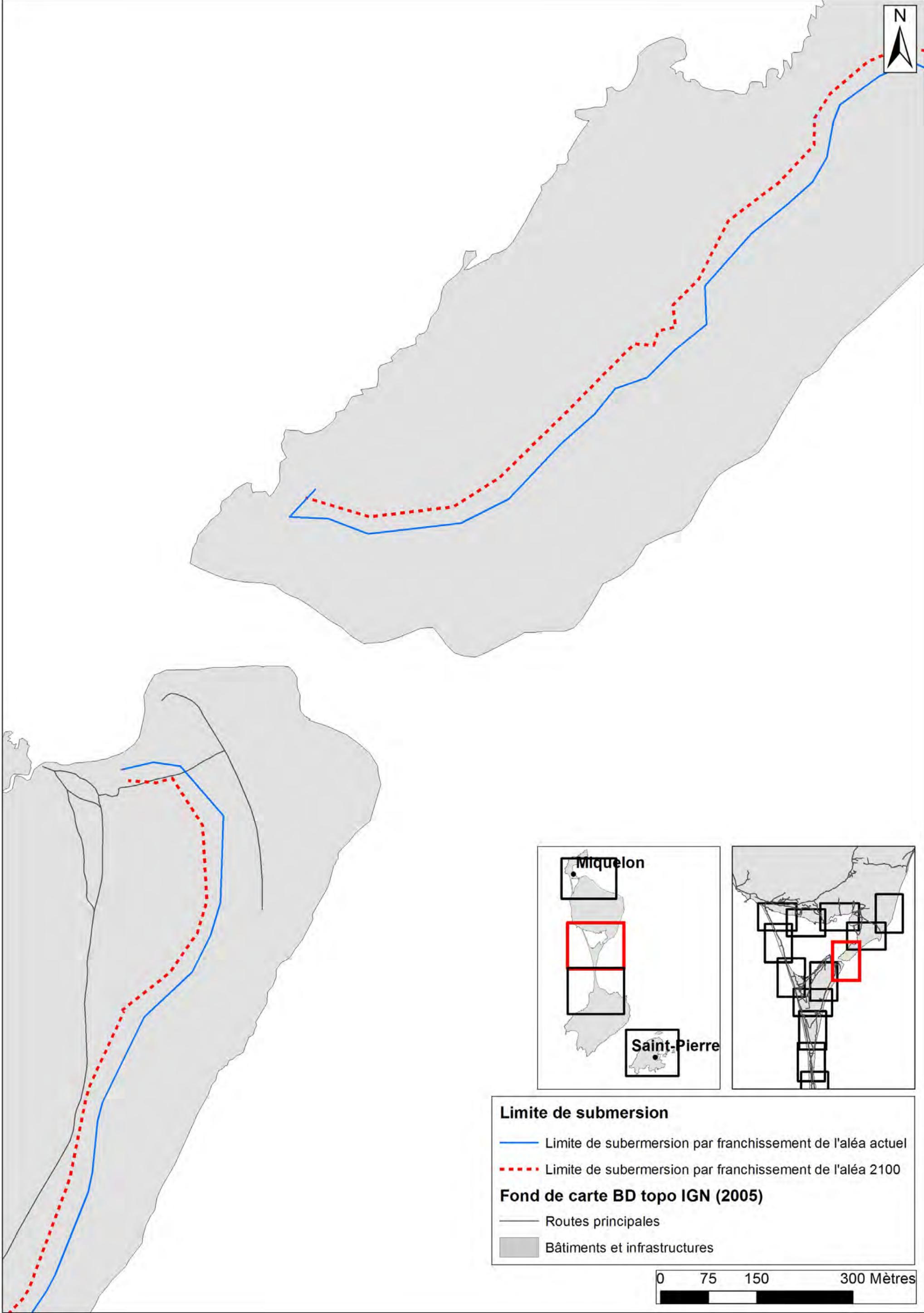
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



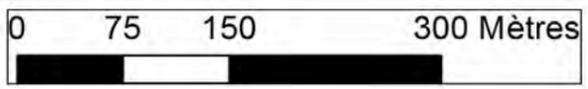


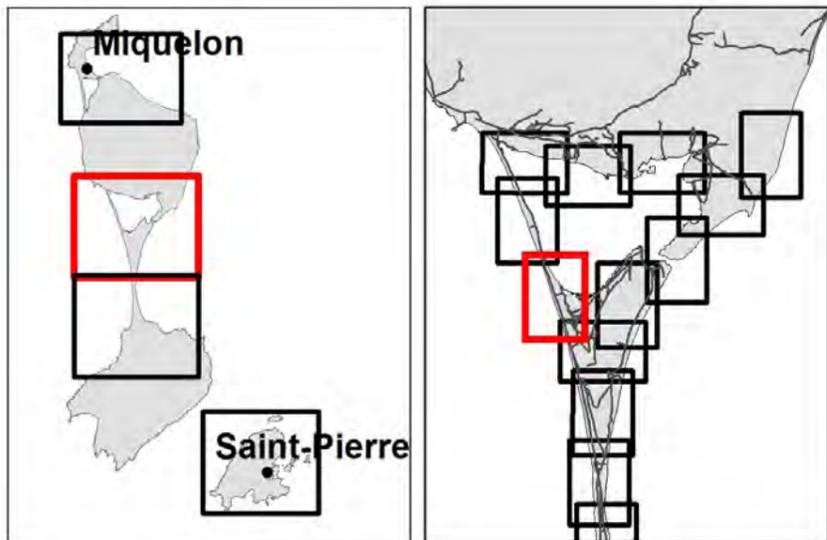
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





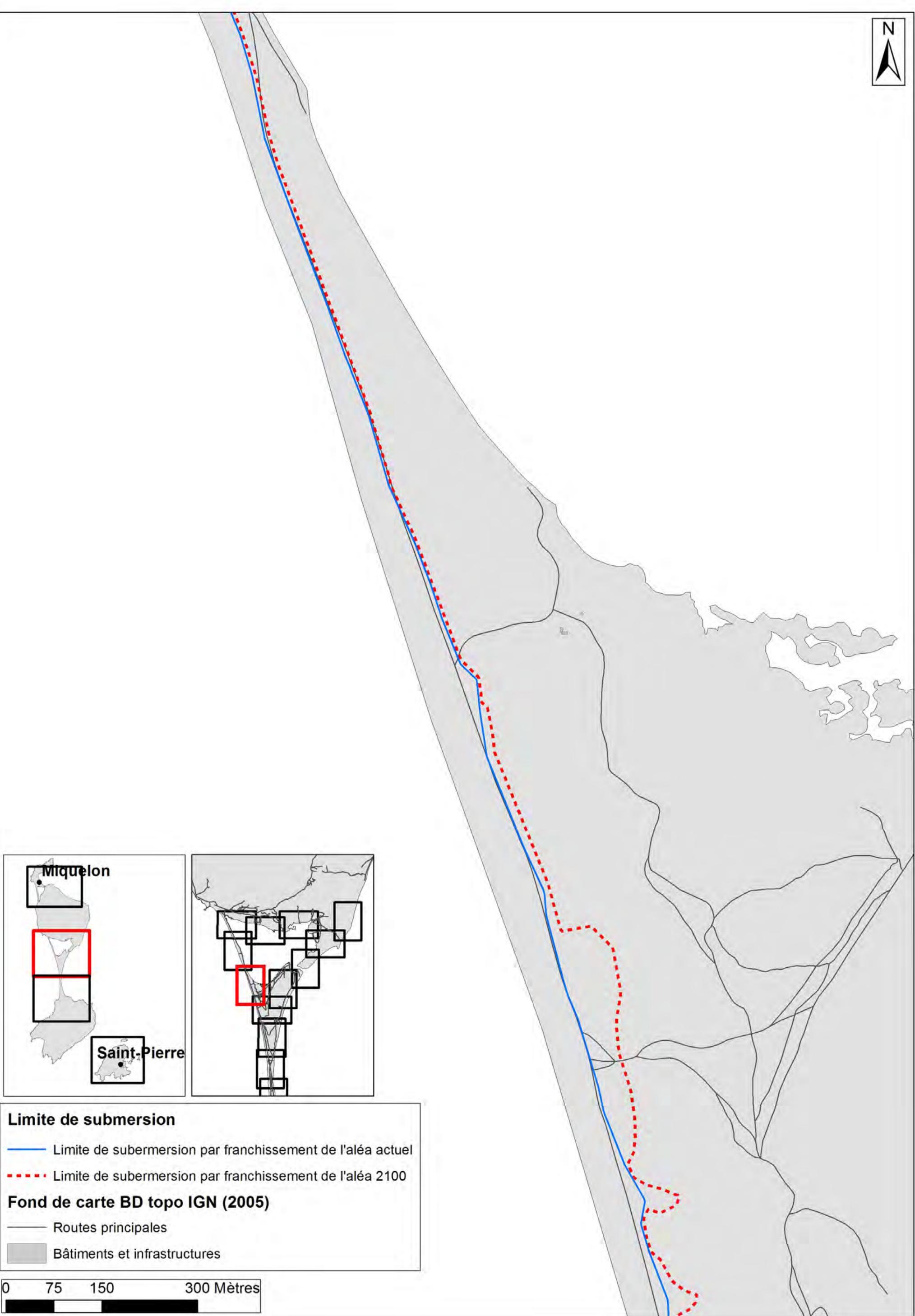
Limite de submersion

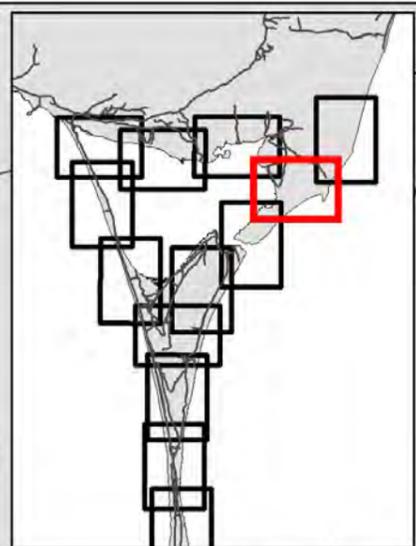
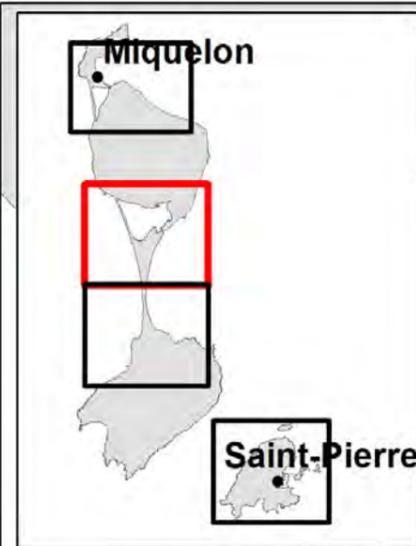
- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

0 75 150 300 Mètres



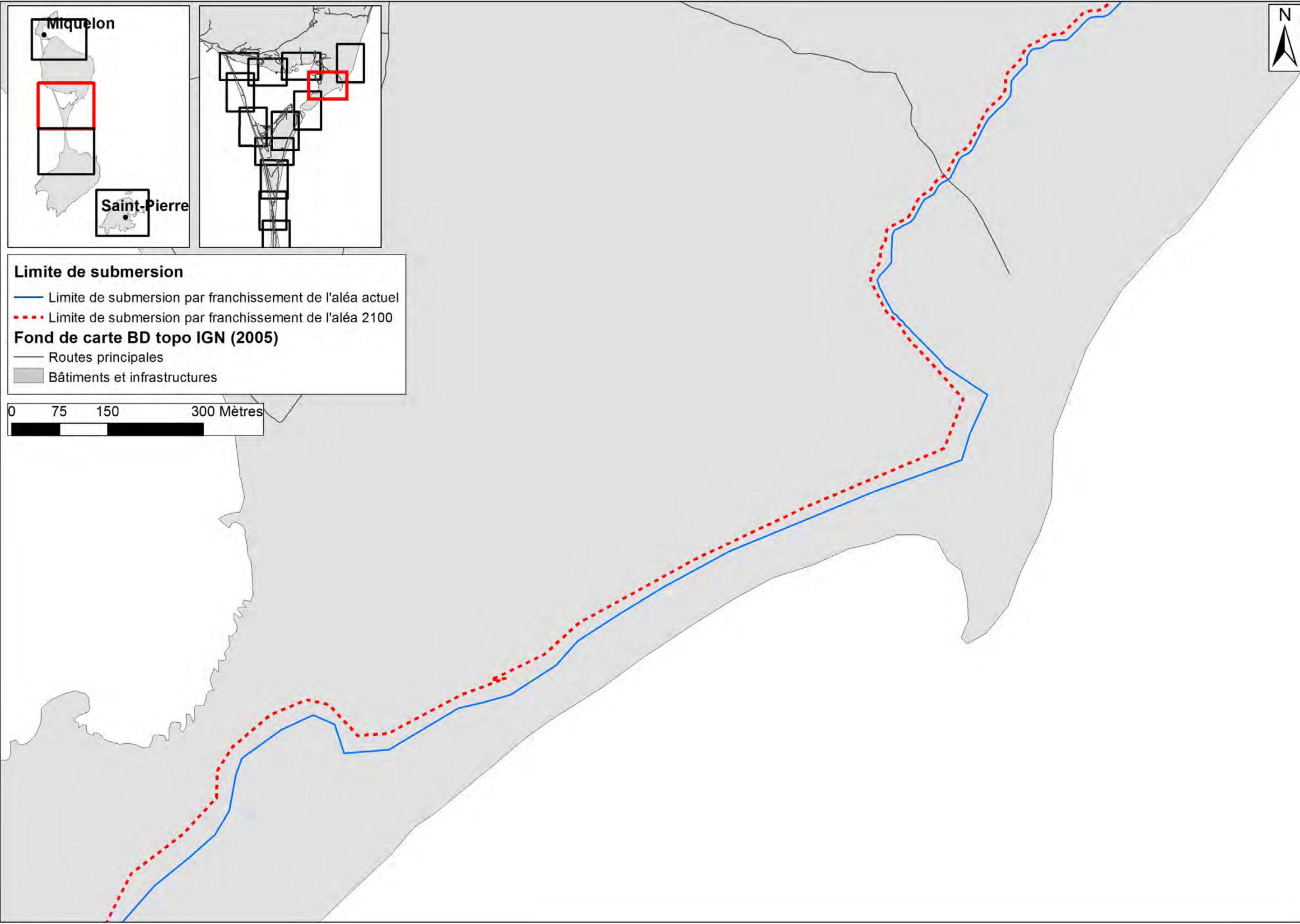
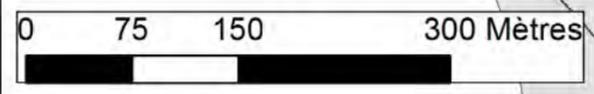


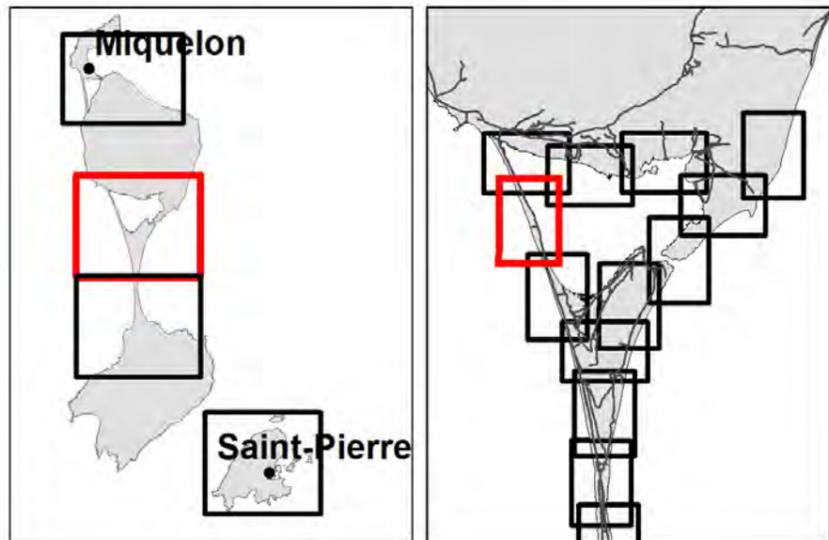
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



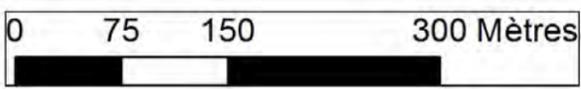


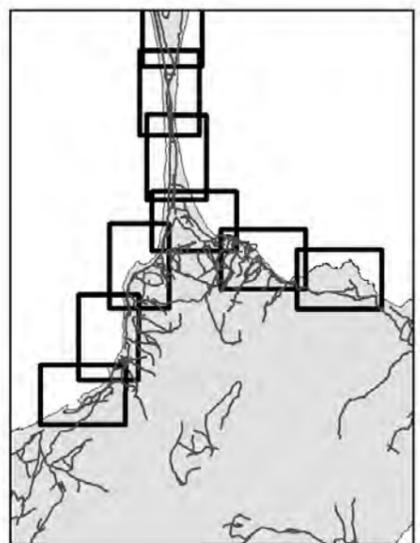
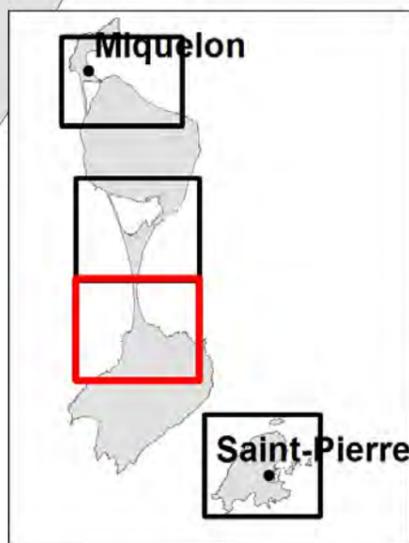
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



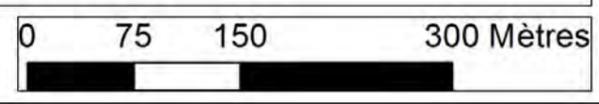


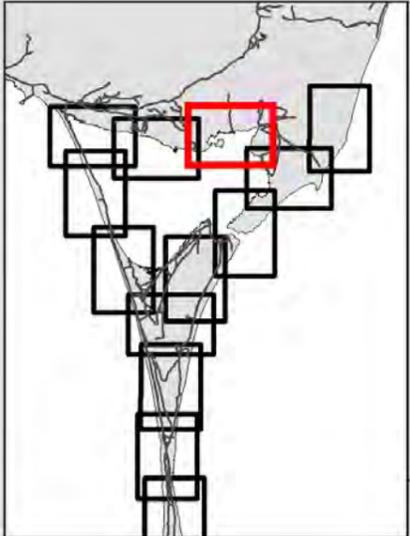
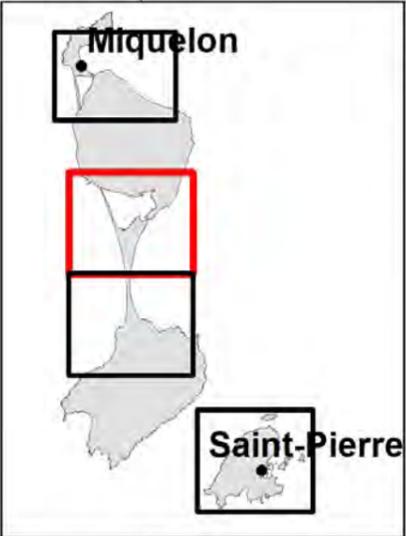
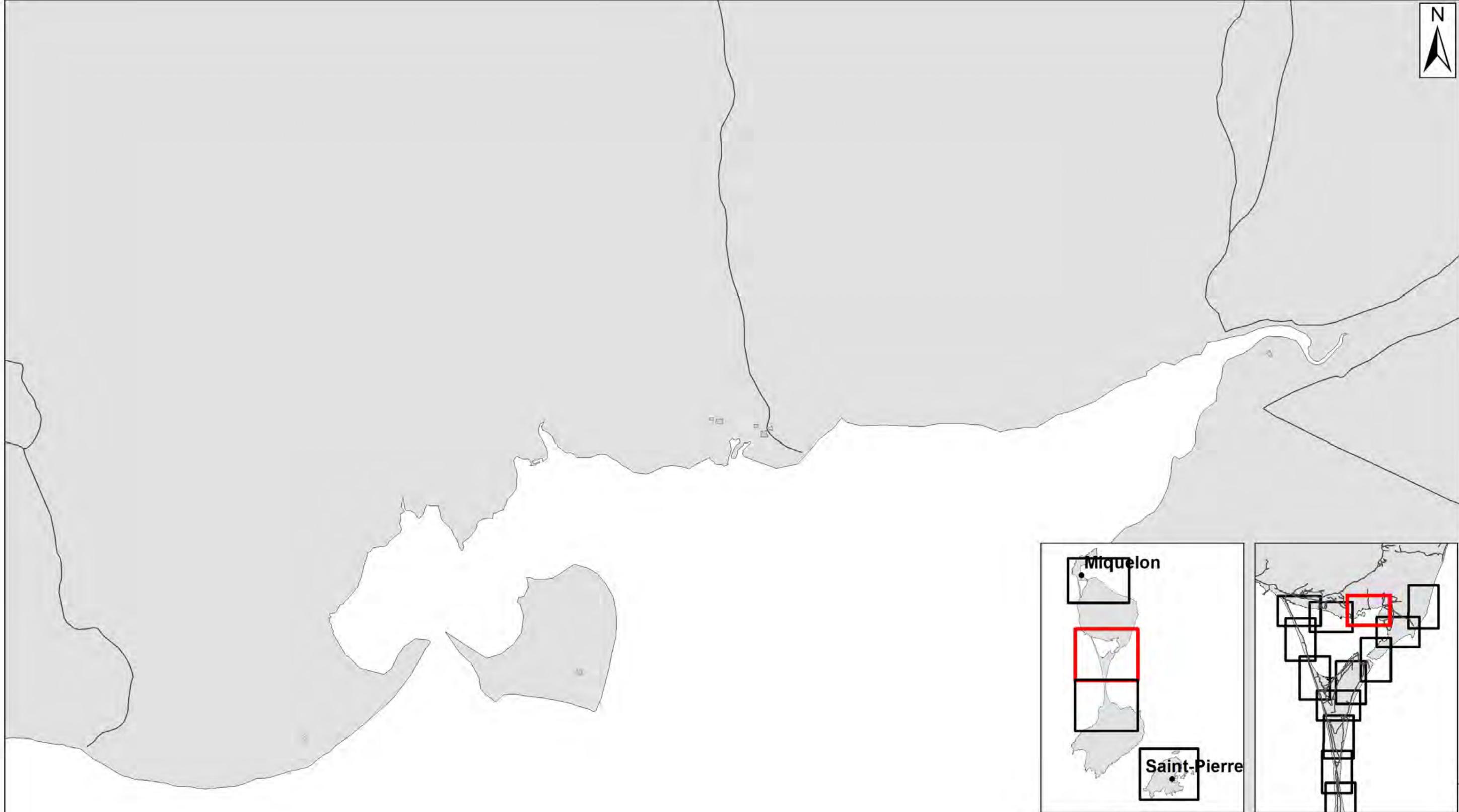
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



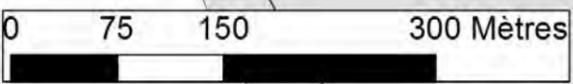


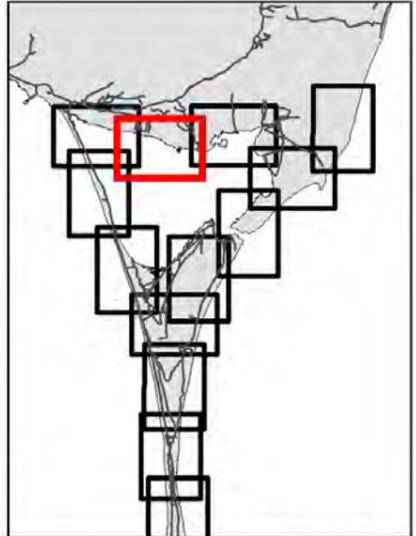
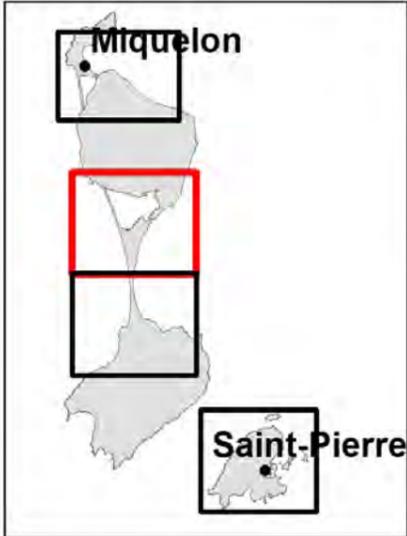
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





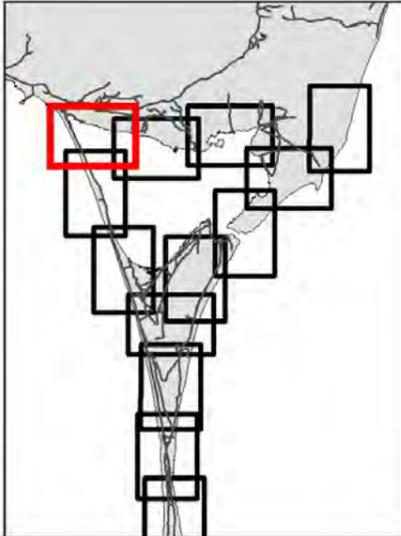
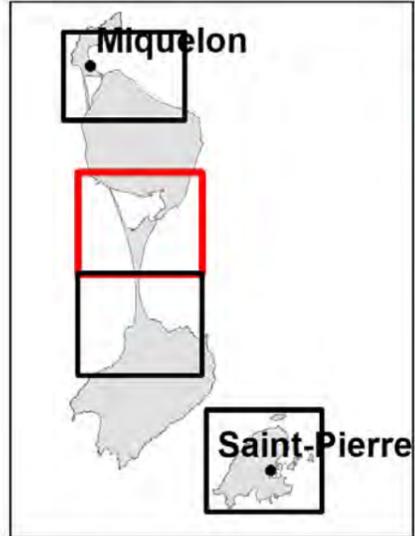
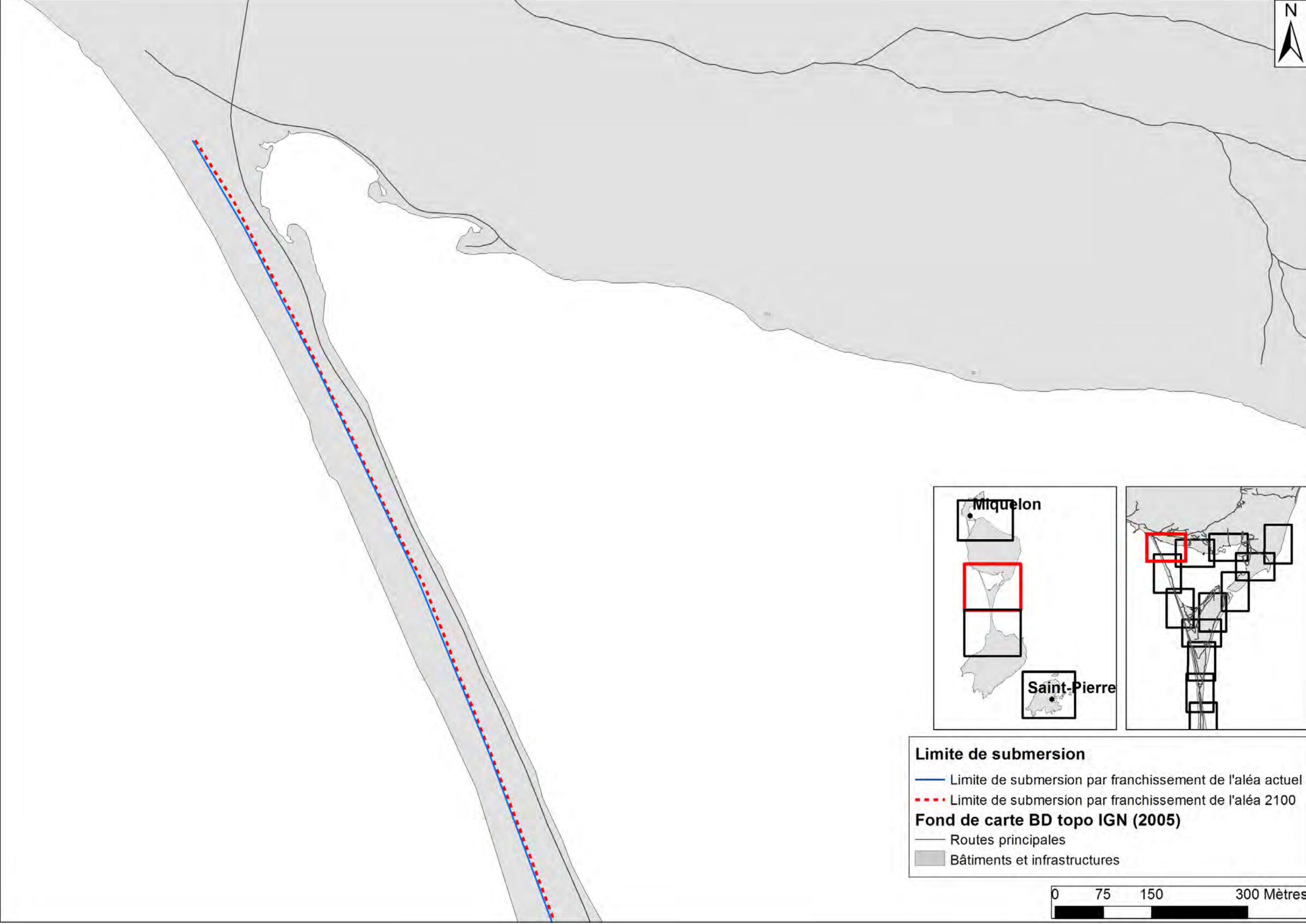
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



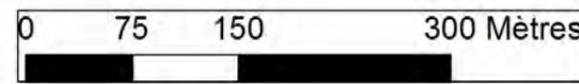


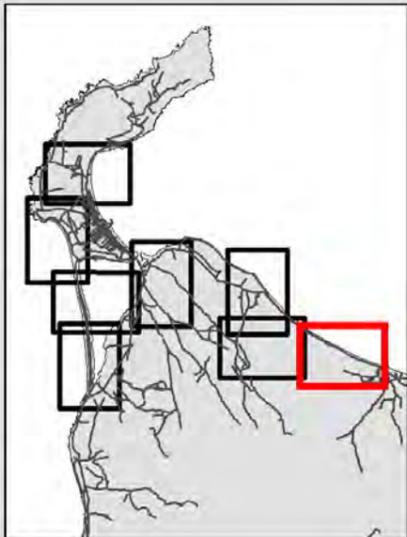
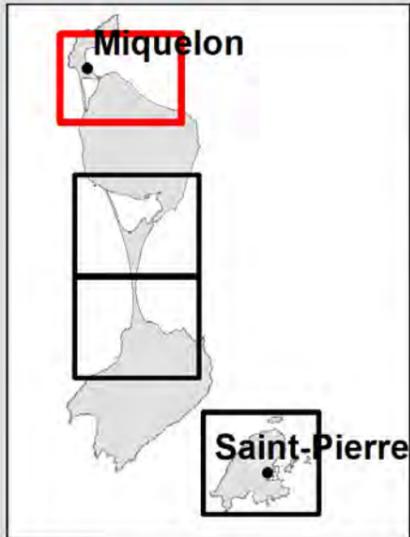
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

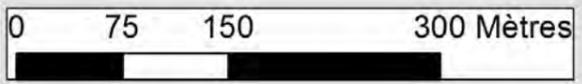
- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures

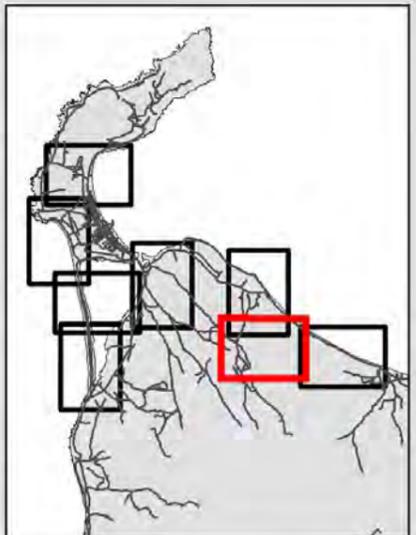
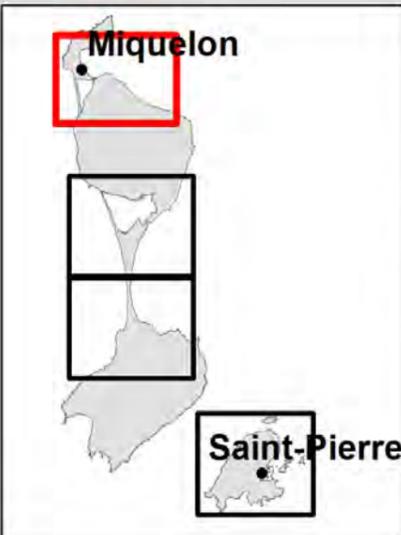
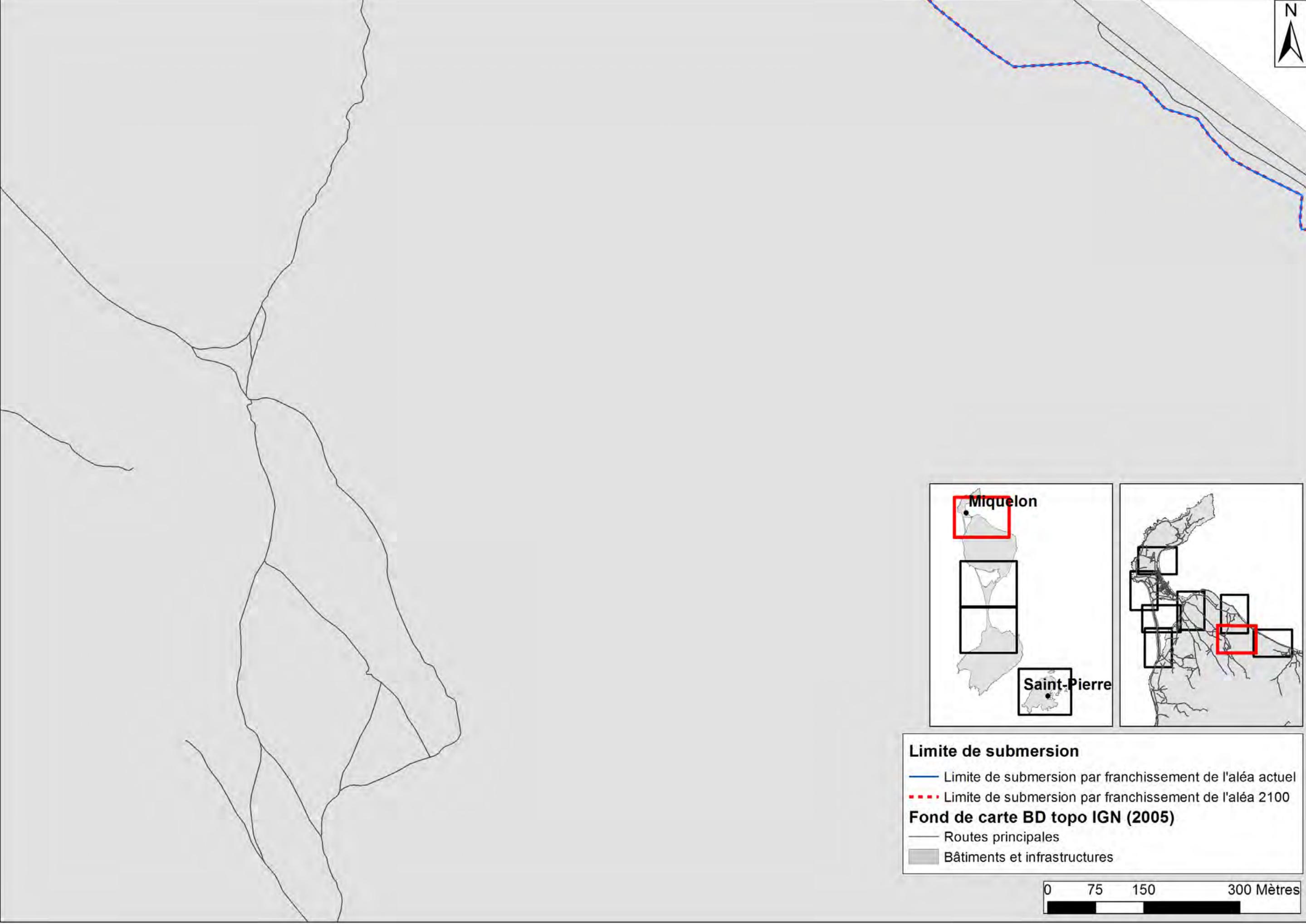




Limite de submersion
— Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)
— Routes principales
■ Bâtiments et infrastructures



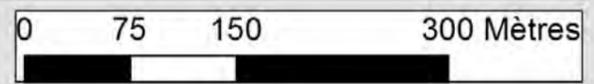


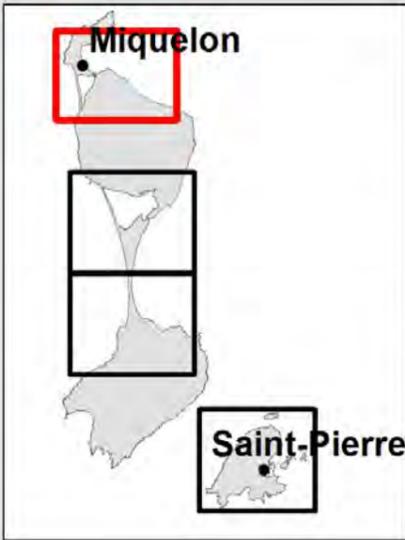
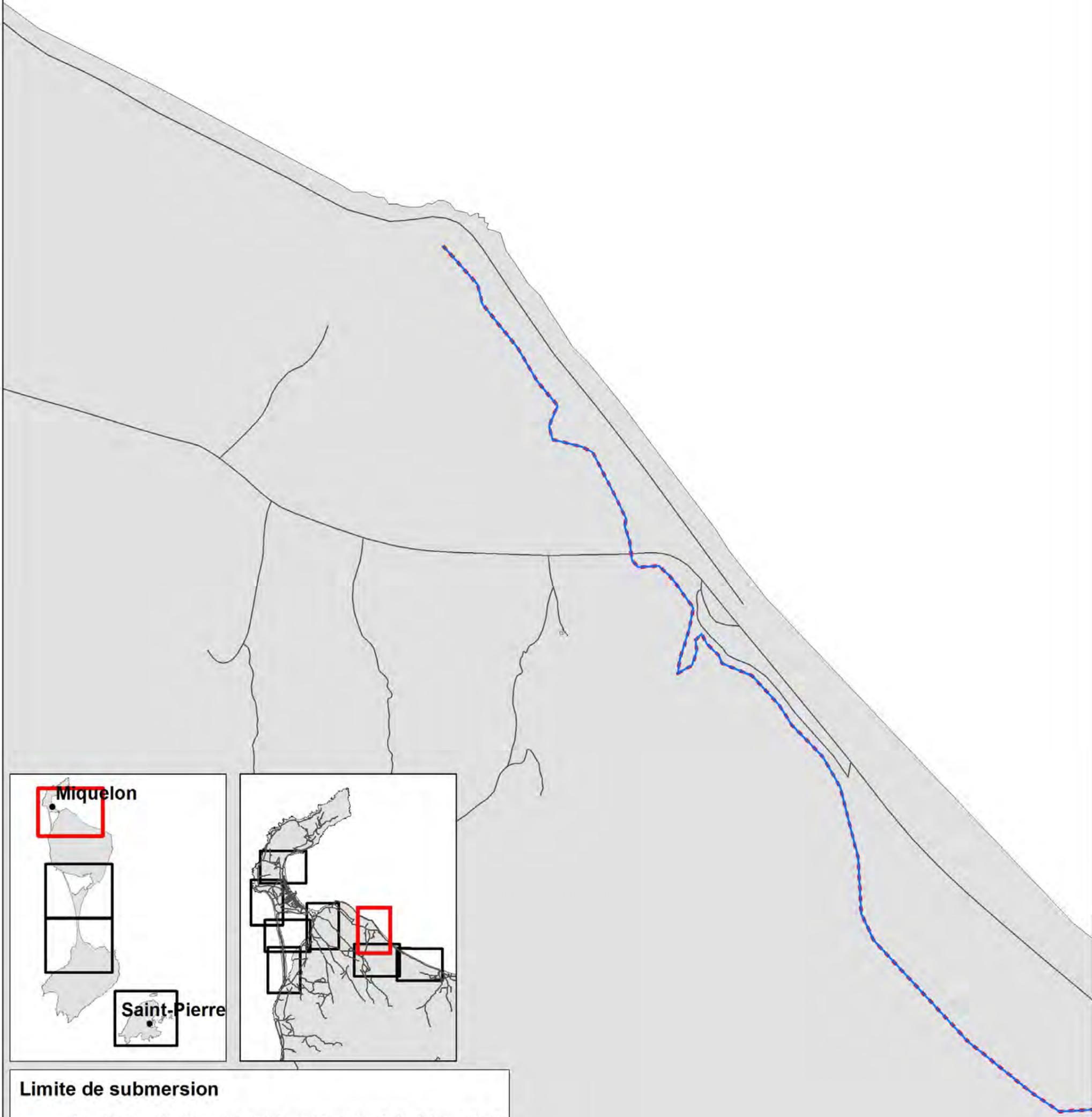
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





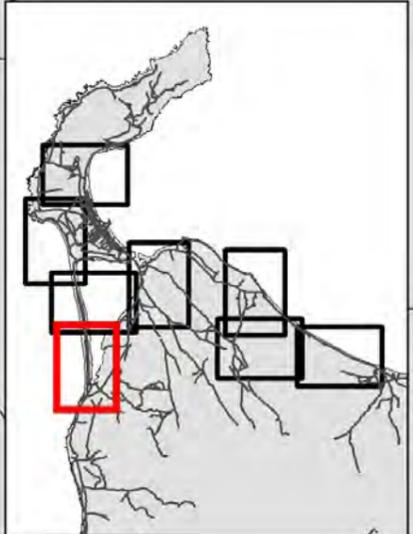
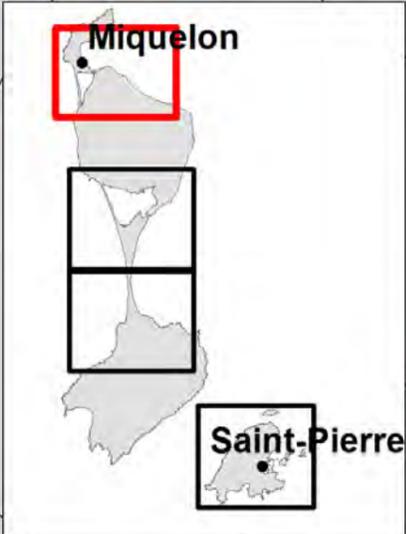
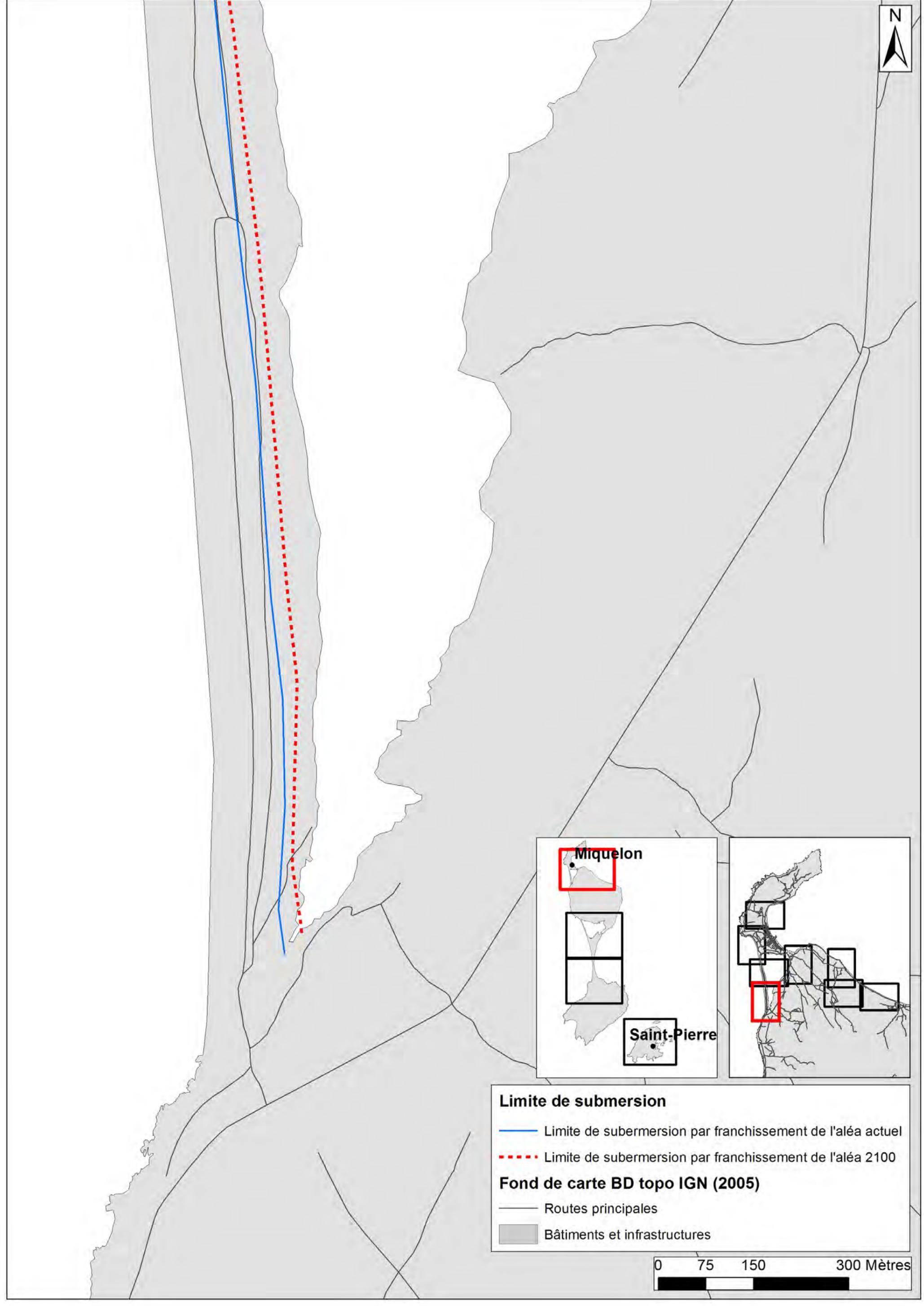
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





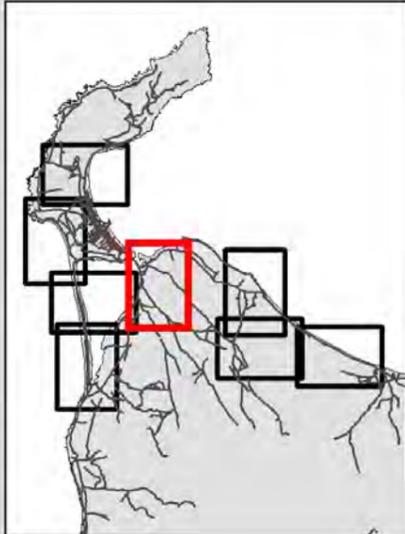
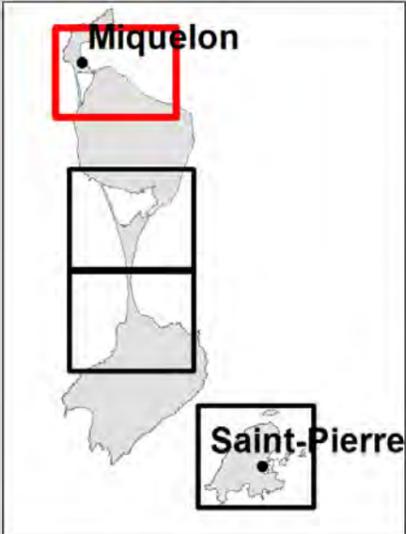
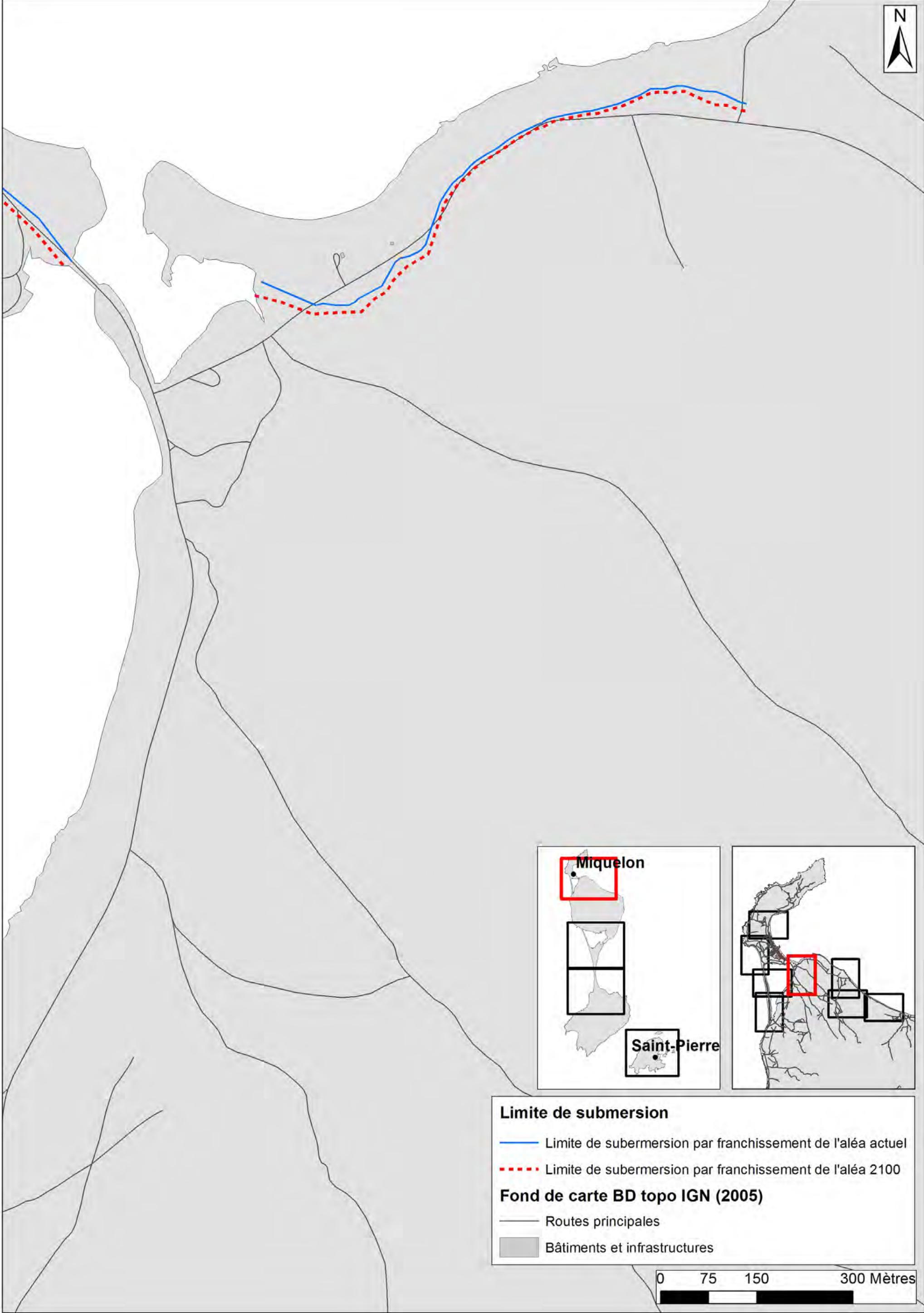
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





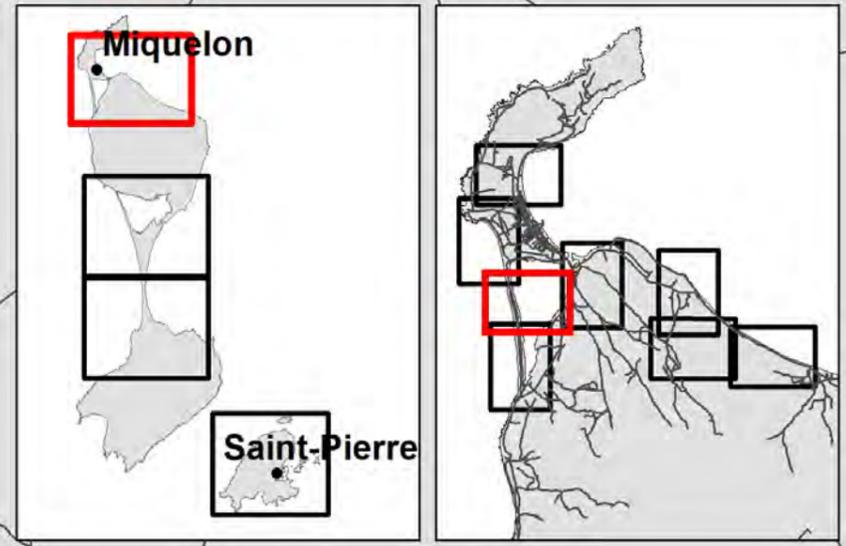
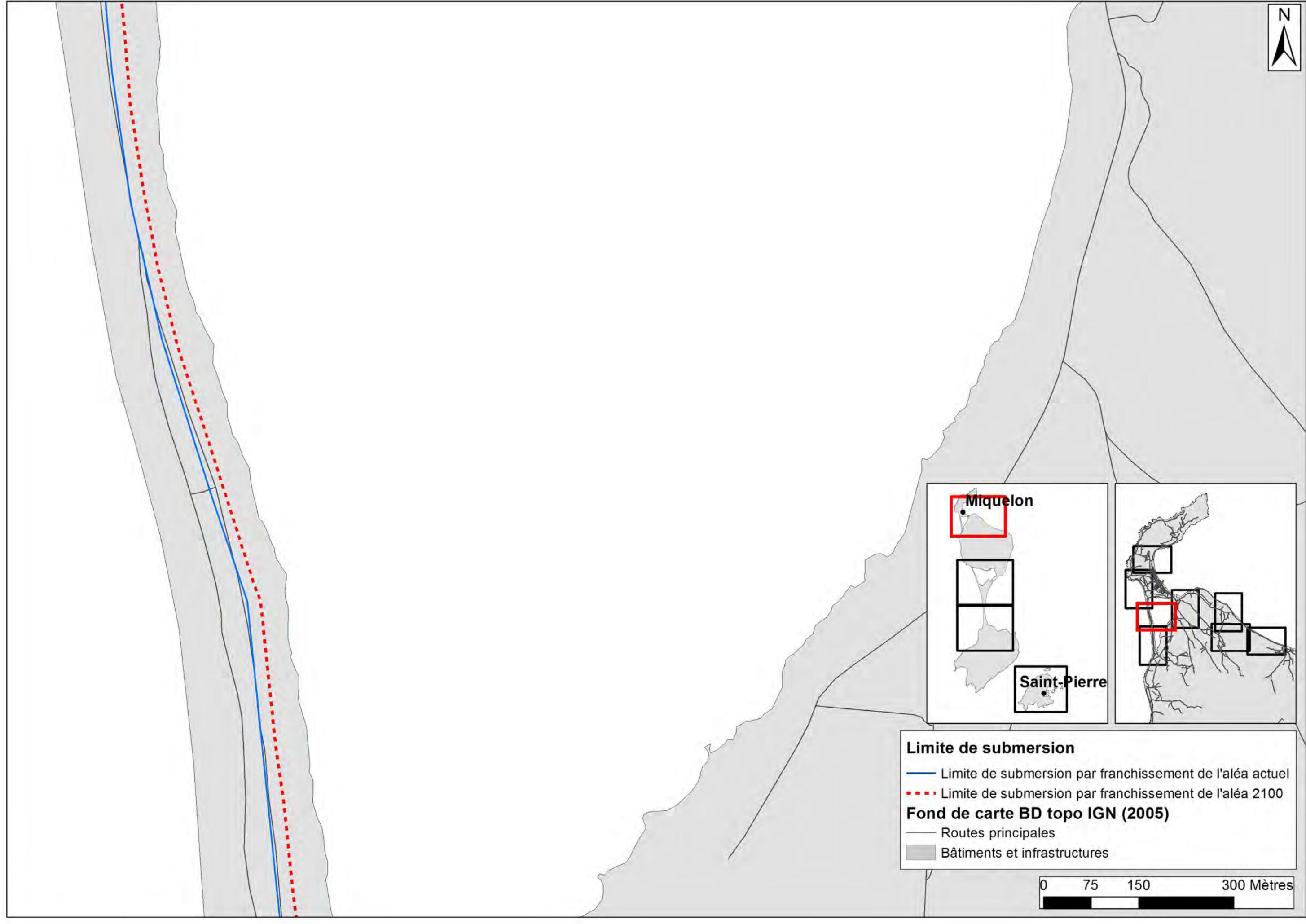
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



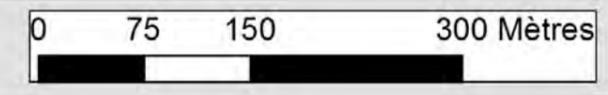


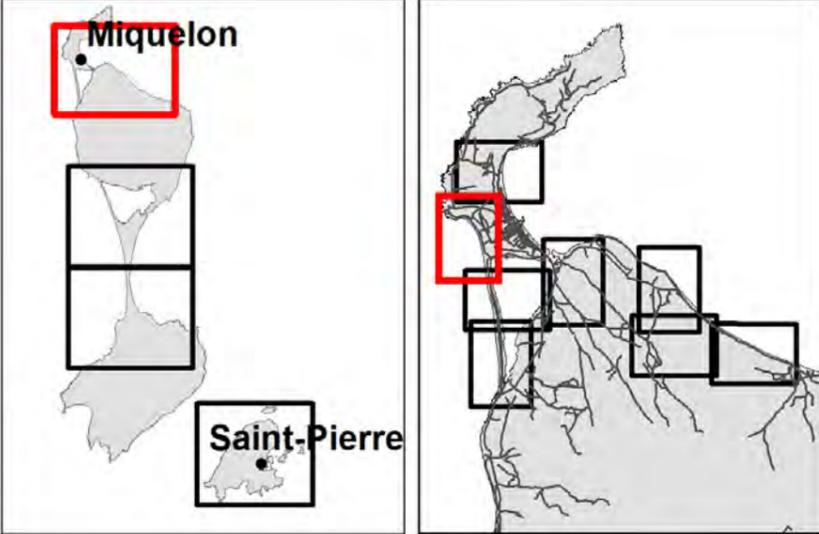
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures



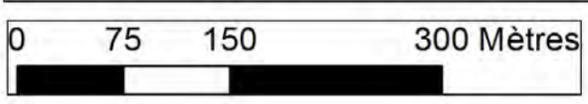


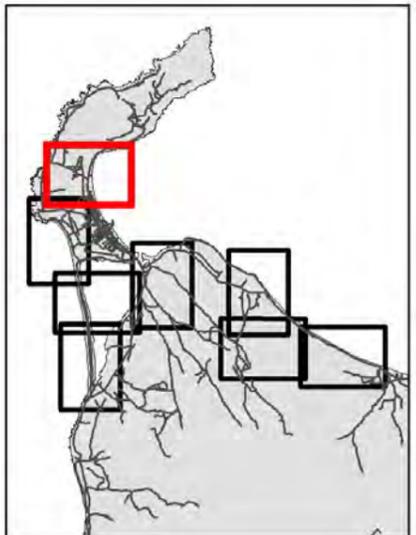
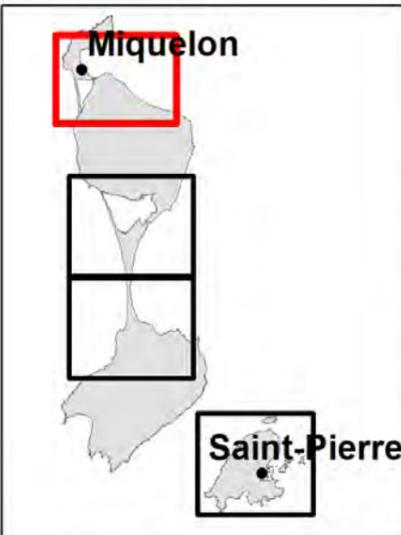
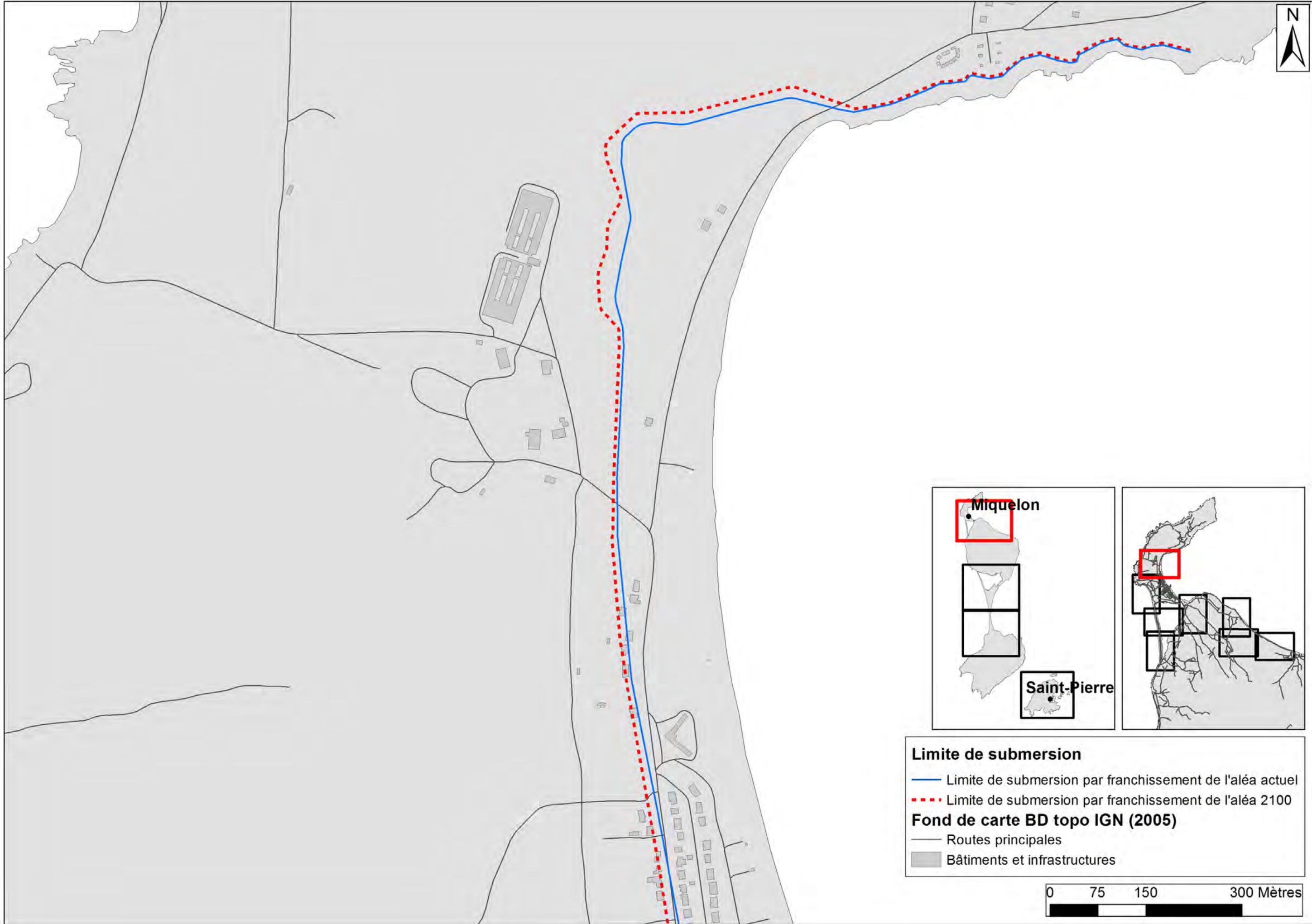
Limite de submersion

- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
- - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100

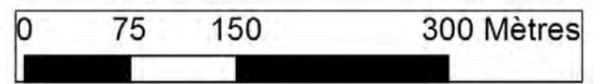
Fond de carte BD topo IGN (2005)

- Routes principales
- Bâtiments et infrastructures





- Limite de submersion**
- Limite de submersion par franchissement de l'aléa actuel
 - - - Limite de submersion par franchissement de l'aléa 2100
- Fond de carte BD topo IGN (2005)**
- Routes principales
 - Bâtiments et infrastructures





Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction interrégionale Atlantique
Parc d'activités de Colin
La Lézarde
97170 – Petit-Bourg – France
Tél. : 05 90 41 35 48

2.1.2. Définition et numérisation des traits de côte

Compte-tenu du niveau marin et des conditions d'agitation changeantes d'une campagne photographique à l'autre (marée et déferlement des vagues), la position du trait de côte ne peut se définir par le contact terre-mer visible sur les photographies aériennes.

La limite haute du littoral a donc été privilégiée pour matérialiser le trait de côte, à savoir (Illustration 2) :

- la limite de végétation ou le pied des aménagements pour les côtes basses ;
- la partie sommitale du versant pour les côtes à falaise.

Le trait de côte a été numérisé sous SIG par digitalisation à l'écran à une échelle de 1/2500 en prévision d'une restitution cartographique au 1/5000. Le type de limite de trait de côte considéré est renseigné dans les données attributaires de la couche SIG ainsi créée.



*Illustration 2 – Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes littoraux:
a. limite de végétation ; b. limite de haut de versant ; c. limite en pied d'aménagement
(BD Ortho IGN 2005)*

La marge d'erreur issue de cette photo-interprétation du trait de côte dépend de la qualité des images (échelles, grain de la pellicule argentique pour les plus anciennes, résolution, orthorectification, géoréférencement) et de l'interprétation du trait de côte dans les zones délicates (ombres portées, falaises en pente douce, ...). Elle est estimée globalement entre 5 et 10m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à 10 m ont été écartés de l'étude.

Des coupes topographiques réalisées sur le MNS (Figure 3) montrent que, sur des zones qui devraient être plate et lisse (piste de l'aéroport, rues etc..), la topographie est très bruitée avec des sauts d'altitudes pouvant atteindre le mètre par exemple.

L'hypothèse envisagée était de corriger les altitudes du MNS de MICMAC en lui appliquant une grille de correction basée sur les erreurs entre l'altitude du MNS et les altitudes mesurées au DGPS. Le fait que le MNS soit très bruité et que les écarts dus à ce bruit peuvent être très importants (plusieurs décimètres à plusieurs mètres, Figure 1), cette approche ne peut être appliquée avec succès.

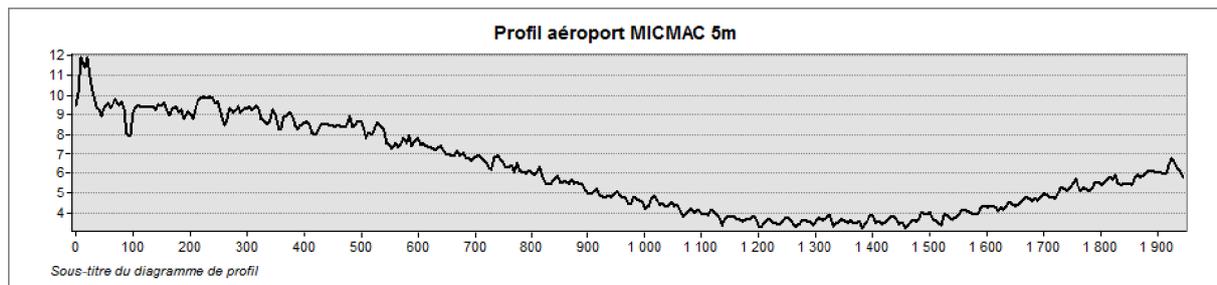


Figure 3 : Coupe topographique réalisé au centre de la piste de l'aéroport de Saint-Pierre (MNS MICMAC)

Ainsi, il nous paraît plus raisonnable de recréer des MNT à plus faible résolution mais basés sur les mesures réalisées au DGPS sur les zones basses, les suivis du trait de côtes et les profils de plage. Ces mesures ne couvrant pas totalement les territoires concernés et afin de faire le raccord avec les zones en relief et le trait de côte, elles ont été complétées par des points extraits du MNT IGN 25m pour les points plus élevés et par des points fictifs à 0m générés tous les 50m à partir des limites du trait de cote et des îles. Ces nuages de points ont ensuite été utilisés pour réaliser des MNT à résolution de 10m sur les zones concernées. Compte tenu d'une part du très grand nombre de points utilisés et d'autre par de la volonté de restituer un MNT au plus proche des mesures, la méthode de triangulation et d'interpolation linéaire a été mise en œuvre (logiciel surfer).

Pour chaque secteur, sont présentés ci-dessous les points d'altitude utilisés, les MNT générés ainsi que quelques coupes permettant de visualiser et de comparer les topographies issus des MNT IGN 25m, MICMAC 2,5m et du MNT à 10m réalisés dans ce projet.



Figure 6 : Image satellite plaquée sur le MNT 10m