

IMOCOR - Evaluation de l'Impact Morphodynamique des Ouvrages COTiers de La Réunion

Rapport final

BRGM/RP-65261-FR

Jun 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets
d'appui aux politiques publiques du BRGM 2013-PSP13REU43

E.Chateauminois, R. Belon, B. Le Moigne & J. Salomero

Avec la collaboration de
G.Thirard , R. Troadec, M. Mahabot

Vérificateur :

Nom : BRIVOIS Olivier
Fonction : Ingénieur littoral
Date : 11/07/2016

Approbateur :

Nom : Bès de Berc S.
Fonction : Directrice BRGM Réunion
Date : 07/10/16

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



Mots-clés : Ouvrages littoraux – Erosion côtière – Submersion - Impacts hydrosédimentaires, La Réunion

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

E.Chateuminois, R. Belon, B. Le Moigne & J. Salomero – coll. G.Thirard, R. Troadec, M. Mahabot, (2016) – IMOCOR - Evaluation de l'Impact Morphodynamique des Ouvrages COTiers de La Réunion - Rapport final. BRGM/RP-65261-FR, 122 p., 26 fig., 5 tabl., 4 ann.

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

Synthèse

Dans le cadre de ses différentes missions sur le littoral de l'île de La Réunion, et notamment concernant ses actions de gestion du Domaine Public Maritime, la DEAL a récemment lancé plusieurs études afin d'améliorer sa connaissance sur la dynamique littorale, ainsi que sur la présence d'ouvrages côtiers sur le DPM.

Dans ce contexte, la DEAL a demandé au BRGM de réaliser une étude afin de caractériser l'impact des ouvrages côtiers sur l'évolution morpho-dynamique du littoral. Cette étude a pour objectifs, entre autres, de servir d'outil d'aide à la décision pour statuer sur la délivrance ou non d'autorisations de reconstruction des ouvrages littoraux existants lorsque ceux-ci seront endommagés ou détruits par les aléas littoraux. Une telle décision doit en effet pouvoir se prendre en toute connaissance de cause sur les conséquences de la présence de l'ouvrage sur son environnement proche et lointain en termes d'impact hydro-sédimentaire, mais également en termes de fonctionnalité vis-à-vis de la submersion marine et des risques associés.

Dans le cadre de la réalisation du plan POLMAR, le laboratoire GEOMER (Université de Bretagne Occidentale) a réalisé en 2012 un recensement des ouvrages littoraux présents sur les côtes réunionnaises (Atlas de sensibilité environnementale annexé au plan POLMAR-Terre ; Le Berre et al., 2012). Le travail réalisé dans le cadre de cette convention s'inscrit dans la suite de ce premier travail de référencement des ouvrages littoraux à La Réunion. Afin de répondre à la problématique de la DEAL, il a donc été proposé de construire une méthodologie adaptée suivant deux typologies d'ouvrages : les aménagements portuaires et les ouvrages littoraux de taille plus modeste.

Concernant cette deuxième catégorie, 435 ouvrages ont été visités, référencés, géo-localisés, décrits en termes géométriques et en termes d'implantation sur le *cordon littoral*. L'approche mise en œuvre a permis de hiérarchiser et d'évaluer l'impact potentiel de chacun de ces ouvrages sur la dynamique hydro-sédimentaire dans leur environnement proche en fonction de tous les paramètres descriptifs recueillis. Pour autant, il convient de noter que l'évaluation quantifiée de l'impact de ces ouvrages reste un exercice difficile compte tenu du manque de données précises et d'une profondeur historique faible des bases de données existantes.

Pour les aménagements portuaires, l'approche méthodologique déployée a permis une analyse plus objective de l'impact des ouvrages sur les dynamiques naturelles. Des comparaisons pré-post aménagements ont été réalisées et ont permis d'évaluer et quantifier les modifications qu'a entraînées la réalisation des ouvrages sur les dynamiques du trait de côte dans les champs proches et lointains.

Ce projet a également permis de réaliser une synthèse des travaux entrepris par le LGSR (Laboratoire GéoSciences Réunion) dans le cadre du suivi des profils des plages de l'Ouest. Pour des raisons d'incertitudes liées aux différentes méthodes de suivi utilisées, il a été décidé d'analyser 25 profils sur une période d'exploitation globale de 1991 à 2010, afin de garantir une bonne fiabilité de l'analyse comparative. Ces analyses sont présentées en annexe de ce rapport.

La base de données ainsi créée a également permis de mettre en perspective l'évolution historique de l'anthropisation des différents compartiments des cordons littoraux sur le secteur

d'étude. En effet, les dates de réalisation des ouvrages ont pu être déterminées grâce à une analyse diachronique des images aériennes historiques permettant de remonter jusqu'en 1950.

L'analyse des informations met en relief les différentes vagues d'aménagement des espaces littoraux. Dans un premier temps, les importants aménagements portuaires ont contribué à l'artificialisation du trait de côte sur de sept sites (Saint-Pierre, Saint Leu, Saint-Gilles, Saint-Marie, Saint Rose, Port Est et Port Ouest). Par la suite, l'urbanisation des cordons littoraux a entraîné le développement de l'habitat sur des espaces de haut de plage dans les zones balnéaires et prisées de l'Ouest et du Sud. Après cette phase de croissance irrégulière de l'anthropisation du milieu, les données produites sur les différents compartiments des cordons littoraux montrent une certaine stabilité du processus d'anthropisation depuis le début des années 2000. Différentes raisons peuvent potentiellement expliquer ce phénomène : développement de la réglementation (loi littorale, PPR) et structuration des schémas de développement communaux et régionaux (PLU, SAR), prise de conscience des risques littoraux avec l'advenue d'évènements extrêmement énergétiques au cours des années 2000 (cyclones Dina en 2002, Gamède en 2007, et houles australes de 2007). Une autre hypothèse moins optimiste consisterait à considérer que l'expansion de l'urbanisation sur les zones littorales est arrivée à un niveau de saturation. Dans un avenir proche, avec les procédures en cours d'élaboration des Plans de Prévision des Risques Littoraux, les contraintes réglementaires concernant l'aménagement de ces zones littorales exposées aux risques devraient se préciser.

A l'avenir, cette base de données pourrait être complétée afin de couvrir l'intégralité du littoral Réunionnais. Il sera peut être également nécessaire de la mettre à jour avec une fréquence qui reste à définir, et qui pourrait être rythmée par le passage des évènements énergétiques cycloniques ou de houles australes qui peuvent parfois redessiner la carte des ouvrages présents sur le littoral réunionnais.

Sommaire

1. Contexte de l'étude	8
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	8
1.2. ZONE GEOGRAPHIQUE.....	9
1.3. CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA PROBLEMATIQUE	9
2. Ouvrages littoraux.....	13
2.1. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR LES OUVRAGES LITTORAUX.....	13
2.1.1. Typologies des flux sédimentaires	13
2.1.2. Analyse sectorisée des cordons littoraux	14
2.1.3. Identification et analyse des zones témoins	18
2.1.4. Définition des zonages d'analyse	22
2.1.5. Exploitation des zonages	23
2.1.6. Description des fiches ouvrage	24
2.1.7. Méthodologies d'évaluation des champs des fiches ouvrage	26
2.1.8. Visites de terrain	27
2.2. ANALYSE DES RESULTATS	27
3. Aménagements portuaires	33
3.1. BASE DE DONNEES DES TRAITS DE COTE HISTORIQUES	33
3.2. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR LES AMENAGEMENTS PORTUAIRES.....	33
3.2.1. Préparation des photographies aériennes.....	34
3.2.2. Définition et numérisation des traits de côte.....	35
3.2.3. Calcul du recul du trait de côte.....	36
3.3. ANALYSE DE L'IMPACT DES AMENAGEMENTS PORTUAIRES	38
3.3.1. Port de Saint-Gilles-les-Bains	38
3.3.2. Port de Saint-Leu.....	43
3.3.3. Port de Saint-Pierre	48
4. Analyse des tendances des plages récifales (chapitre rédigé par le LGSR – Université de La Réunion).....	53
4.1. BREF HISTORIQUE DES SITES SUIVIS ET DES METHODES EMPLOYEEES.....	53
4.2. METHODE DE SUIVI DES PROFILS DU LGSR.....	55
4.2.1. Description de l'appareil de mesure	55
4.3. ANALYSE DES RESULTATS	59
5. Conclusion.....	65

6. Bibliographie.....	67
7. Lexique.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Typologies des flux sédimentaires sur le cordon littoral.....	14
Tableau 2 : Typologies de transports par zone et fréquence d'interaction	17
Tableau 3 : Limites géométriques des zonages d'analyse.....	22
Tableau 4 – Détail des campagnes photographiques IGN utilisées	35
Tableau 5 : Synthèse des analyses sur les profils du LGSR	63

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude sur Google Earth©.....	9
Figure 2 – Flux sédimentaires à l'origine de l'évolution morphologique naturelle du littoral (Université de Laval)	13
Figure 3 : Sectorisation du cordon littoral	15
Figure 4 : A gauche, Profils de référence zones témoins - Secteurs Les Aigrettes, Les Brisants, La Saline et Saint-Leu ; A droite, Fond ortho 2012 ©IGN – Traits jaunes pointillés : profils de référence – Trait vert : PHMA – Trait rouge : Ouvrage	19
Figure 5 : A gauche, Profils de référence des secteurs - Secteurs Saint-Pierre Ravine Blanche et Saint-Pierre Centre ville (Gendarmerie) ; à droite, Fond ortho 2012 ©IGN – Traits jaunes pointillés : profils de référence – Trait vert : PHMA – Trait rouge : Ouvrage	20
Figure 6 : Synthèse des largeurs de plage sur les zones témoins - Tiret noir = moyenne des valeurs ; Tiret rouge = médiane des valeurs.....	21
Figure 7 : Exemple de zonages sur les plages de l'Ermitage (à gauche) et de Ravine Blanche à Saint- Pierre (à droite) – Ouvrages signifiés en rouge et vert tiret plein.....	23
Figure 8 : Exemple de fiche ouvrage issue de la base Microsoft Access® 2010	25
Figure 9 : Répartition typologique des ouvrages en termes d'implantation long-shore (en haut) et cross-shore (en bas)	28
Figure 10 : Calcul du taux d'artificialisation du littoral par tronçon de littoral de 1000 m. En bleu : linéaire longshore – En rouge : linéaire cross-shore	29
Figure 11 : Evolution historique de l'urbanisation des différents compartiments de plage au cours des 60 dernières années. En haut l'analyse tous ouvrages confondus – En bas sans les ouvrages portuaires.....	30
Figure 12 : Nombre d'ouvrages présentant un impact Fort / Modéré / Faible par secteur géographique. Impact retenu = max de tous les impacts de l'ouvrage. Analyse menée par tronçon de littoral de 1000m.	31
Figure 13 : Localisation des ouvrages portuaires étudiés (Google Earth 2016)	34
Figure 14 – Implantation des transects DSAS autour du port de Saint-Gilles	37
Figure 15 – Principe de régression linéaire pondérée par DSAS (Himmelstoss, 2009)	37

Figure 16 : Situation du port de Saint-Gilles en 1950 (à gauche) et 1966 (à droite) – source ©IGN.	39
Figure 17 : Traits de côte 1950 (en bleu) et 1966 (violet). Les flèches rouge indiquent la dynamique générale du déplacement du trait de côte entre ces deux dates (Fond Orthophoto IGN 1950)	40
Figure 18 : Situation du port de Saint-Gilles en 1978 (à gauche) et 2012 (à droite) – source ©IGN	41
Figure 19 : Localisation Port de Saint-Leu et les ravines (Orthophotographie IGN 2012).....	43
Figure 20 : Situation du port de Saint-Leu en 1950 (à gauche) et 1966 (à droite) – source ©IGN	44
Figure 21 : Situation du port de Saint-Leu en 1978 (à gauche) et 2012 (à droite) – source ©IGN	46
Figure 22 : Artificialisation des embouchures de ravine sur le littoral de Saint-Leu en 2012 – a : ravine de la Chaloupe ; b : ravine de la Fontaine ; c : ravine du Petit et du Grand- Etang ; d : ravine des Poux, - fond orthophoto ©IGN 2012	47
Figure 23 : Littoral de Saint-Pierre en 1950 (en haut) et 1966 (en bas)	49
Figure 24 : Littoral de Saint-Pierre en 1978 (en haut) et 2012 (en bas)	50
Figure 25 : Localisation des profils suivis par le Laboratoire Géosciences Réunion depuis 1991	54
Figure 26 : Principe de mesure des profils de plage, (a) description de l'appareil de mesure, (b) principe de relevé (Source: Troadec 2002)	55

Liste des annexes

Annexe 1	Description des champs de la base de données et methode de renseignement
Annexe 2	Analyse de la qualité des images historiques
Annexe 3	Evolution des profils du LGSR
Annexe 4	Bilans volumiques sur les profils suivis par le LGSR

1. Contexte de l'étude

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Lors des 50 dernières années, La Réunion a connu une forte augmentation de sa population. Avec le développement économique de l'île, l'amélioration de ses infrastructures routières et le développement des activités balnéaires et touristiques, l'urbanisation des littoraux a connu une forte densification sur l'ensemble du pourtour de l'île et plus particulièrement à proximité des grandes villes et des secteurs de l'Ouest et du Sud où le climat ensoleillé et la présence des zones balnéaires est appréciée et recherchée.

Ce phénomène a été accompagné par l'histoire de l'évolution du Domaine public maritime à la Réunion. Ce zonage, élaboré durant la période coloniale, est actuellement appelé « cinquante pas géométriques ». Cet espace, propriété de l'Etat, qui constitue une réserve domaniale, a cependant bénéficié, entre 1922 et 1986 (élaboration de la loi littorale actuelle), d'assouplissements ayant entraîné un déclassement des parcelles situées dans ce zonage, permettant ainsi l'installation d'enjeux sur cet espace côtier.

Dans les années 70, les ports de pêche et de plaisance ont été réalisés sur Saint-Gilles-les Bains et Saint-Leu. Le Port de Saint-Pierre a lui été livré dans sa première version en 1882. Actuellement des projets d'extension portuaire sont toujours en cours de réalisation dans les ports Ouest et Est de la commune du Port.

A ces équipements lourds et structurants s'ajoutent également de nombreux ouvrages plus légers et réalisés sur des initiatives privées dans un cadre de réalisation ou d'extension d'habitations ou de délimitation de parcelles privatives. Un grand nombre de ces ouvrages sont présents à proximité des zones récifales. De la même manière, un certain nombre d'ouvrages ou d'aménagements à vocation touristique (restaurants, hôtellerie...) ont été réalisés durant les 20 dernières années sur la bande littorale. Ces aménagements peuvent parfois prendre place sur des secteurs sensibles du *cordon littoral* et ainsi entraver, modifier ou annihiler un certain nombre de processus naturels.

Cette densification du bâti et l'augmentation du nombre d'ouvrages présents sur le littoral posent la question des impacts cumulés de ces aménagements sur leur environnement proche et lointain. Cette question est d'autant plus prégnante que les problématiques d'érosion du littoral et de recul du trait de côte commencent à avoir des répercussions importantes dans certaines collectivités qui engagent des études et réflexions sur les stratégies à mettre en place pour s'adapter ou lutter contre ces aléas littoraux.

Dans le cadre de ses différentes missions sur le littoral de l'île de La Réunion, et notamment concernant sa mission de gestion du Domaine Public Maritime, la DEAL a récemment lancé plusieurs études afin d'améliorer sa connaissance de la dynamique littorale et de l'occupation du DPM par des ouvrages littoraux.

Dans le cadre de la réalisation du plan POLMAR, le laboratoire GEOMER (Université de Bretagne Occidentale) a réalisé en 2012 un recensement des ouvrages littoraux présents sur les côtes réunionnaises (Le Berre et al., 2012).

Dans ce contexte, la DEAL a demandé au BRGM de réaliser une étude ayant pour objectif la caractérisation de l'impact des ouvrages côtiers sur la morpho-dynamique littorale. Cette étude a pour objectif, entre autres, de servir d'outil d'aide à la décision pour statuer sur la délivrance

ou non d'autorisations de reconstruction des ouvrages littoraux existants situés sur le DPM lorsque ceux-ci seront endommagés ou détruits par les aléas littoraux. Une telle décision doit en effet pouvoir se prendre en toute connaissance de cause sur les conséquences de la présence de l'ouvrage sur son environnement proche et lointain en termes d'impact hydro-sédimentaire, mais également en termes de fonctionnalité vis-à-vis de la submersion marine et des risques inhérents.

1.2. ZONE GEOGRAPHIQUE

Conformément à la demande de la DEAL, la zone d'étude a dans un premier temps été focalisée sur les zones récifales de l'ouest réunionnais, puis a été étendue à l'ensemble du littoral compris entre les communes de la Possession et Saint-Pierre.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude sur Google Earth©

Sur cette zone d'étude, le travail de recensement et d'analyse a concerné dans un premier temps les ouvrages ayant été recensés dans la base de donnée du plan POLMAR réalisée par le laboratoire GEOMER (Université de Bretagne Occidentale). Lors des visites de terrain, cette base de données a été complétée par des ouvrages non référencés lors de cette première campagne.

1.3. Considérations générales sur la problématique

Afin de répondre à la problématique proposée par la DEAL, à savoir qualifier (et quantifier lorsque cela est possible) l'impact des ouvrages sur la dynamique littorale, une méthodologie spécifique a été proposée.

En première approche, l'analyse de l'impact d'un ouvrage ou d'un groupe d'ouvrages sur son environnement nécessite de connaître suffisamment bien les dynamiques naturelles qui prévalaient avant l'implantation du ou des ouvrages, et de les comparer aux dynamiques post-aménagements qui sont censées être impactées par la présence de l'ouvrage. Cette approche se heurte souvent à la difficulté de la disponibilité de données suffisamment fines et détaillées décrivant les processus avant et après l'implantation de l'ouvrage.

Sur La Réunion, les bases de données décrivant les évolutions morphologiques des littoraux ne remontent pas très loin dans le temps. A partir des années 90, les données du LSTUR (*Laboratoire GéoSciences Réunion*, anciennement *Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de La Réunion*) commencent à décrire l'évolution des cordons littoraux avec une méthode quantitative (profil topographique). Avec le temps, les méthodes se sont affinées et précisées mais les données présentent des gaps temporels importants (absence de levés pendant plusieurs périodes) et ne sont pas systématiquement inter-comparables.

Les données les plus anciennes décrivant les évolutions morphologiques des littoraux proviennent des analyses diachroniques des photographies aériennes des littoraux réunionnais. Ces données permettent de remonter jusque dans les années 50, mais les indicateurs morphologiques que ces données permettent d'identifier sont entachés d'une relative imprécision qui dépend à la fois de la qualité des données brutes (qualité de la photographie, calage...) que des difficultés d'interprétation qui peuvent en être faites (difficulté d'identification des indicateurs morphologiques, dépendance aux paramètres maritimes variables...). Ces relatives imprécisions ne permettent de mener des analyses que sur des longues périodes ou sur de grands ensembles dont les dynamiques littorales sont suffisamment importantes et supérieures à la précision de la méthode. Cette approche semble donc difficilement applicable pour des ouvrages d'emprise limitée, mais peut être utile pour qualifier les impacts d'ouvrages de grande ampleur ou de groupements d'ouvrages à une échelle plus importante.

Face à ce constat, on comprend bien que la question posée par la DEAL se heurte aux deux problématiques suivantes : le manque de données précises et fiables sur la dynamique littorale, et le manque de recul historique des bases de données existantes. Par ailleurs il faut noter la forte disparité géographique des données existantes alors que les ouvrages littoraux se répartissent régulièrement sur la zone d'étude.

Afin de répondre à la problématique de la DEAL, il a donc été proposé de construire une méthodologie adaptée suivant deux typologies d'ouvrages :

- Les ouvrages littoraux de petite et moyenne taille (moins de 200 m) que l'on appellera « ouvrages littoraux » : pour ces ouvrages de plus faible extension, la méthodologie déployée ne prétend pas mesurer directement l'impact des ouvrages sur leur environnement au regard des lacunes sur les données exposées ci-dessus, mais vise plutôt à qualifier le potentiel perturbateur de ces ouvrages vis-à-vis des processus naturels.
- La méthode et les résultats issus de cette méthode sont décrits dans le chapitre 2. Les aménagements portuaires : cette typologie d'ouvrage regroupe les ouvrages lourds portuaires réalisés en blocs artificiels le plus souvent. L'impact de ces aménagements pouvant être observable sur une grande emprise spatiale et temporelle, une méthode d'analyse diachronique des images aériennes a été retenue pour quantifier cet impact sur les processus hydro-sédimentaires. En concertation avec la DEAL, trois ports ont été sélectionnés dans le cadre de cette étude :
 - ✓ Le port de Saint-Gilles-les-Bains
 - ✓ Le port de Saint-Leu
 - ✓ Le port de Saint-Pierre

La méthode et les résultats issus de cette méthode sont décrits dans le chapitre 3.

Par ailleurs, une analyse des données acquises par le LGSR (Laboratoire de GéoSciences Réunion) a également été menée afin de caractériser les tendances d'évolution des sites qui ont fait l'objet de suivis depuis le début des années 90. La méthode déployée et les résultats obtenus sont décrits dans le chapitre 4 de ce rapport.

2. Ouvrages littoraux

2.1. Méthodologie employée pour les ouvrages littoraux

La méthodologie consiste à qualifier l'impact d'un ouvrage sur les différents processus élémentaires qui régissent la dynamique littorale.

2.1.1. Typologies des flux sédimentaires

En première approche, les phénomènes qui induisent un transport des matériaux naturels sous l'action de l'écoulement d'un fluide (air ou eau) peuvent être listés. Pour simplifier la démarche, il est proposé de dissocier les phénomènes en fonction de l'origine du flux sédimentaire (vecteur de transport liquide ou aérien, Figure 2), des différents compartiments de plage où se déroulent ces processus (*plage sous-marine (ou avant plage)*¹, *zone de swash*, *plage aérienne*, *dune*, *arrière plage...*), et en fonction de leurs directions préférentielles *cross-shore* ou *long-shore*.

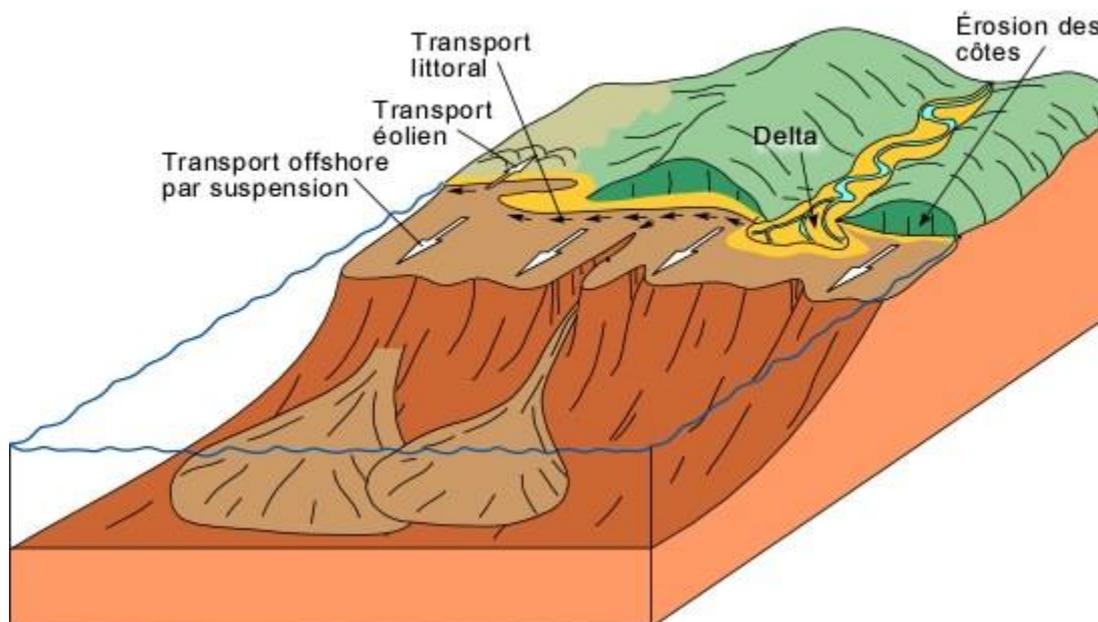


Figure 2 – Flux sédimentaires à l'origine de l'évolution morphologique naturelle du littoral (Université de Laval)

Cette segmentation nous amène à définir les cinq catégories de transport suivantes :

Origine du transport	Type de transport/localisation
Transport par le vent	Transport éolien sur la plage émergée, la <i>dune</i> et l' <i>arrière plage</i>
Transport par les agents maritimes ; écoulements hydrodynamiques.	Transport <i>long-shore</i> généré par le courant de dérive et la houle sur la <i>plage sous-marine</i> et la <i>Dépression d'arrière-récif (DAR)</i>
	Transport <i>long-shore</i> généré dans la <i>zone de swash</i>

¹ Un lexique des termes techniques en italique est fourni en fin de rapport.

	Transport <i>cross-shore</i> entre la <i>DAR</i> , la plage sous-marine et émergée, la <i>dune</i> , l' <i>arrière plage</i> et les zones avant-récifales par les passes
Transport par l'eau d'origine pluviale : ruissellement et écoulements limitrophes	Transport par ruissellement sur la plage émergée, la <i>dune</i> et l' <i>arrière plage</i> .

Tableau 1 : Typologies des flux sédimentaires sur le cordon littoral

Dans un second temps on s'interroge sur la capacité de l'ouvrage à perturber chacun de ces processus naturels. Ce potentiel perturbateur va dépendre :

- des caractéristiques géométriques de l'ouvrage (ses dimensions dans les directions *long-shore* et *cross-shore*, sa hauteur...),
- de l'implantation de l'ouvrage sur le *cordon littoral*. Un ouvrage va entraîner des perturbations sur les processus qui s'y déroulent naturellement, et suivant sa localisation les perturbations potentielles seront plus ou moins importantes.

On considèrera également deux phénomènes qui peuvent être à l'origine de déplacements sédimentaires :

Le facteur anthropique

La présence même d'un ouvrage sur une zone peut entraîner une augmentation de la fréquentation du secteur par le public qui peut engendrer, par piétinement, un glissement du sable vers l'aval ou une dégradation du milieu. C'est le cas notamment des restaurants de plage qui entraînent une densification de la fréquentation d'un site ou lorsque l'ouvrage génère une circulation préférentielle du public en un point ou le long d'un corridor délimité par cet ouvrage.

Le blocage morphologique

Un ouvrage situé en *arrière plage*, même s'il est rarement atteint par les vagues ou impacte faiblement le transit éolien, peut pour autant bloquer ou entraver une réponse morphologique du *cordon littoral* suite à une sollicitation située plus bas dans le profil. Par exemple, un ouvrage de type fondation peut bloquer des apports sédimentaires *cross-shore* en provenance de l'amont qui, en l'absence de l'ouvrage, permettraient l'alimentation du bas de plage. Ce blocage morphologique est d'autant plus important que les fondations de l'ouvrage sont profondes.

2.1.2. Analyse sectorisée des cordons littoraux

Afin de pouvoir évaluer l'impact des aménagements sur les différentes typologies de transport sédimentaire définies (cf. Tableau 1), il est proposé de segmenter le *cordon littoral* en plusieurs zones représentatives des secteurs sur lesquelles ces processus prennent place. Chaque ouvrage sera décrit en termes d'implantation et d'envergure géométrique dans les 4 zones proposées suivantes (zones A, B, C, D,

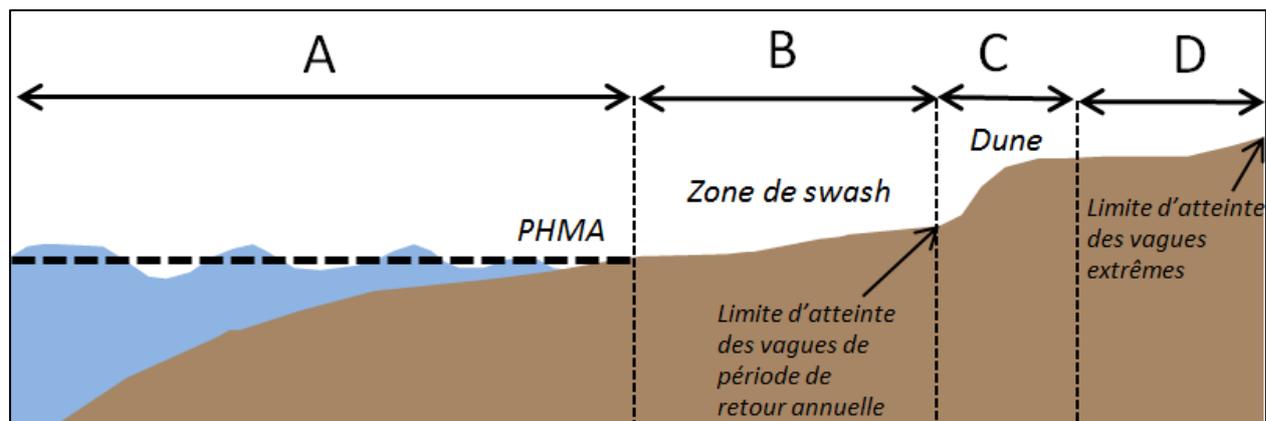


Figure 3).

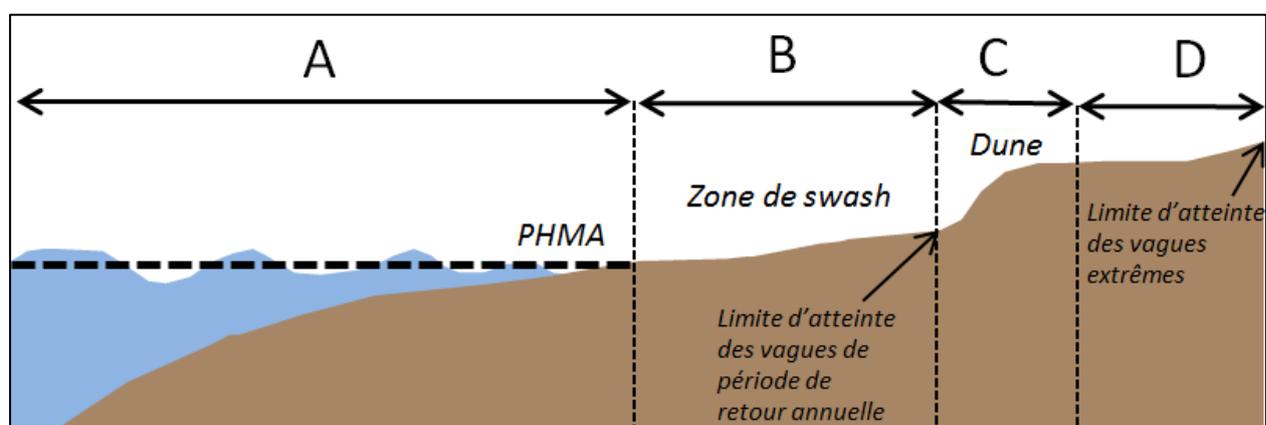


Figure 3 : Sectorisation du cordon littoral

➤ Zone A

Cette zone concerne la partie immergée de la plage (*avant-plage*). Sa limite supérieure a été considérée comme étant la limite de plus haute mer de marée astronomique (*PHMA*). La limite basse de cette zone est constituée par le large ou le front récifal. Les ouvrages ou parties d'ouvrages situés dans cette zone ont un rôle perturbateur sur les transports qui s'y déroulent, et notamment sur les transports générés par les courants de dérive littorale et de vidange/remplissage du système récifal. Ces courants ont généralement une direction *long-shore* très marquée. La présence d'un ouvrage transversal dans cette zone entraîne généralement un blocage important du transit sédimentaire et un déséquilibre important de la répartition des matériaux sur le site : accumulation en amont transit et érosion en aval transit. Cette zone est donc très sensible à l'implantation d'ouvrages.

➤ Zone B

La zone B est définie comme étant la zone de plage émergée balayée par les houles lors d'un évènement de période de retour annuel. Cette définition permet de rattacher cette zone à une fréquence importante d'écoulements énergétiques (zone de *swash*) et donc à une zone soumise à d'importants flux sédimentaires. Au niveau géomorphologique cette zone correspond généralement à l'estran et au haut de plage, c'est-à-dire la plage située entre le niveau d'eau statique, et le premier marqueur morphologique de haut de plage : pied de *dune*, limite de végétation...

➤ Zone C

La zone C se trouve en arrière de la zone B. Sur une plage naturelle, elle correspond à la zone dunaire. Lorsque la *dune* n'existe pas comme c'est régulièrement le cas à La Réunion du fait d'une forte anthropisation de la plage, cette zone délimite la largeur sur laquelle la *dune* devrait s'étaler dans un contexte naturel. Cette zone permet de référencer les ouvrages présents sur la *dune* ou empêchant sa reformation.

➤ **Zone D**

La zone D se trouve en arrière de la zone C. Elle délimite le secteur pouvant être atteint par les vagues lors des événements extrêmes dont les périodes de retour seraient supérieures à 100 ans. Les écoulements hydrodynamiques dans cette zone restent donc possibles, mais ils sont rares et énergétiques.

Sur cette base, on peut reprendre la répartition typologique du Tableau 1 et décliner les zones et les phénomènes qui concernent chacune d'entre elles ainsi qu'une évaluation à dire d'expert de la fréquence des interactions.

		Zone A	Zone B	Zone C	Zone D
	Définition	Plage sous-marine/DAR	Estran Inf + Estran Sup + Haut de plage Zone balayée par les houles (swash) pour un événement de PR annuelle	Zone dunaire (si la dune existe) Zone de développement potentielle de la dune (dans le cas contraire)	Limite haute potentiellement atteignable pas les vagues
Vecteur de transport	Type de transport/localisation				
Transport par le vent	Transport éolien	-	XX	XX	X
Transport par les agents maritimes ; écoulements hydrodynamiques.	Transport <i>long-shore</i> généré par le courant de dérive et la houle sur la plage sous-marine et la DAR	XXX	-	-	-
	Transport <i>long-shore</i> généré dans la zone de swash		XX	X	X
	Transport <i>cross-shore</i>	XXX	XX	X	X
Transport par l'eau d'origine pluvial : ruissellement et écoulements limitrophes	Transport par ruissellement	-	XX	XX	X

XXX interactions fréquentes

XX interactions épisodiques

X interactions rares (cyclones / fortes houles australes)

- Pas d'interaction

Tableau 2 : Typologies de transports par zone et fréquence d'interaction

Limites de la méthode de zonage

Sur le secteur d'étude, en raison d'une forte anthropisation des cordons littoraux, il apparaît que la limite haute de la zone B et la limite arrière de la zone C (pied de dune et arrière dune) sont la plupart du temps non observables sur le terrain en raison de la présence même des ouvrages. C'est le cas lorsque les ouvrages sont significativement impactants pour la dynamique littorale et empêchent la formation d'un milieu dunaire. Il est donc légitime de se

poser les questions suivantes : si le *cordon littoral* n'était pas contraint par la présence de l'ouvrage, où se trouverait la limite du haut de plage, le pied de la *dune* et l'arrière *dune* ?

Pour répondre à ces questions, la méthodologie développée dans le cadre de ce projet propose d'identifier sur la zone d'étude les secteurs de cordon littoraux sur lesquels on peut observer la présence d'un milieu dunaire. Ces secteurs correspondent à des plages où les marqueurs naturels de haut de plage (pied de *dune* notamment) peuvent être observés naturellement, et où leur délimitation est le fait d'un équilibre naturel entre les forçages naturels (vagues, vents), les sédiments disponibles, et les capacités de développement des végétaux en place et donc de la *dune*. A ce titre, on considèrera que sur ces secteurs, la limite de haut de plage et donc la largeur de la plage est « non ou peu contrainte » par la présence d'un ouvrage à proximité. Il est à noter que cette dénomination reste toutefois un abus de langage tant ces littoraux sont situés dans un environnement global sous forte influence anthropique.

Sur ces secteurs qu'on appellera par la suite « zones témoins », les caractéristiques du *cordon littoral* ont été mesurées : largeur de la plage, altitude du pied de *dune*, hauteur et largeur de la *dune*.

L'analyse de ces zones témoins est explicitée dans le paragraphe suivant.

2.1.3. Identification et analyse des zones témoins

Sur le secteur d'étude, 6 zones ont été identifiées comme présentant des caractéristiques morphologiques peu ou non contraintes par la présence d'ouvrages à proximité. Sur chacun de ces secteurs, on peut observer la présence d'un milieu dunaire ou d'un embryon de milieu dunaire caractérisé par la présence de végétation. Ces six secteurs sont présentés sur la Figure 2.

Sur chacun de ces secteurs, 5 à 10 profils en travers ont été extraits sur la base du MNT (Modèle Numérique de Terrain) issu du produit Litto3D de l'IGN (2009). Le long de chacun de ces profils d'élévation, les informations suivantes ont été identifiées et positionnées, sur la base de l'orthophotographie de La Réunion (©IGN) en date de 2012 :

- la position de la limite du pied de *dune* (limite de végétation)
- La position du premier ouvrage existant en arrière

Les profils d'élévation sont présentés dans les figures pages suivantes (Figure 4 à Figure 5). On peut y repérer la présence des indicateurs de limite de végétation et du premier ouvrage, ainsi que le profil moyen représentatif du secteur.

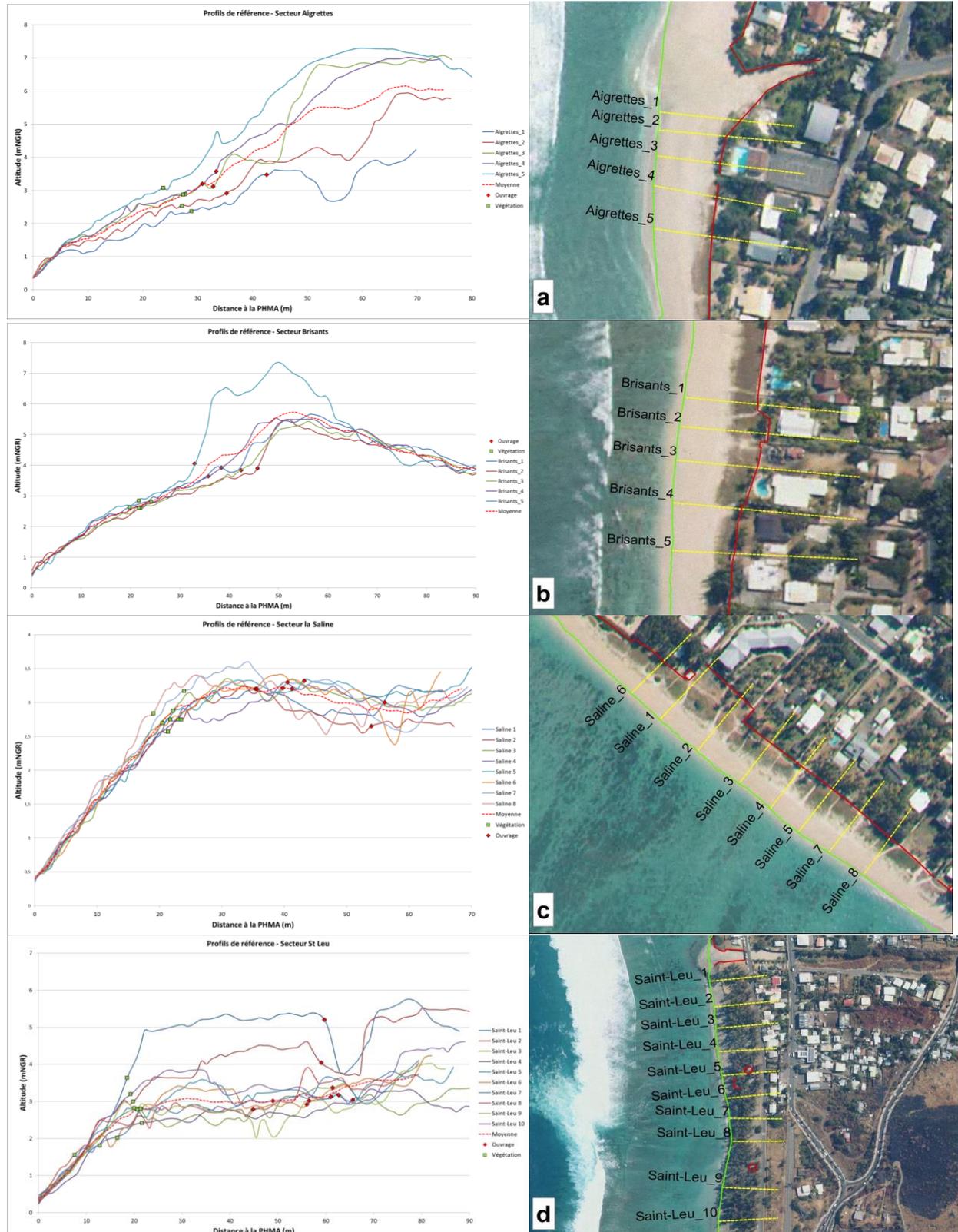


Figure 4 : A gauche, Profils de référence zones témoins - Secteurs Les Aigrettes, Les Brisants, La Saline et Saint-Leu ; A droite, Fond ortho 2012 ©IGN – Traits jaunes pointillés : profils de référence – Trait vert : PHMA – Trait rouge : Ouvrage

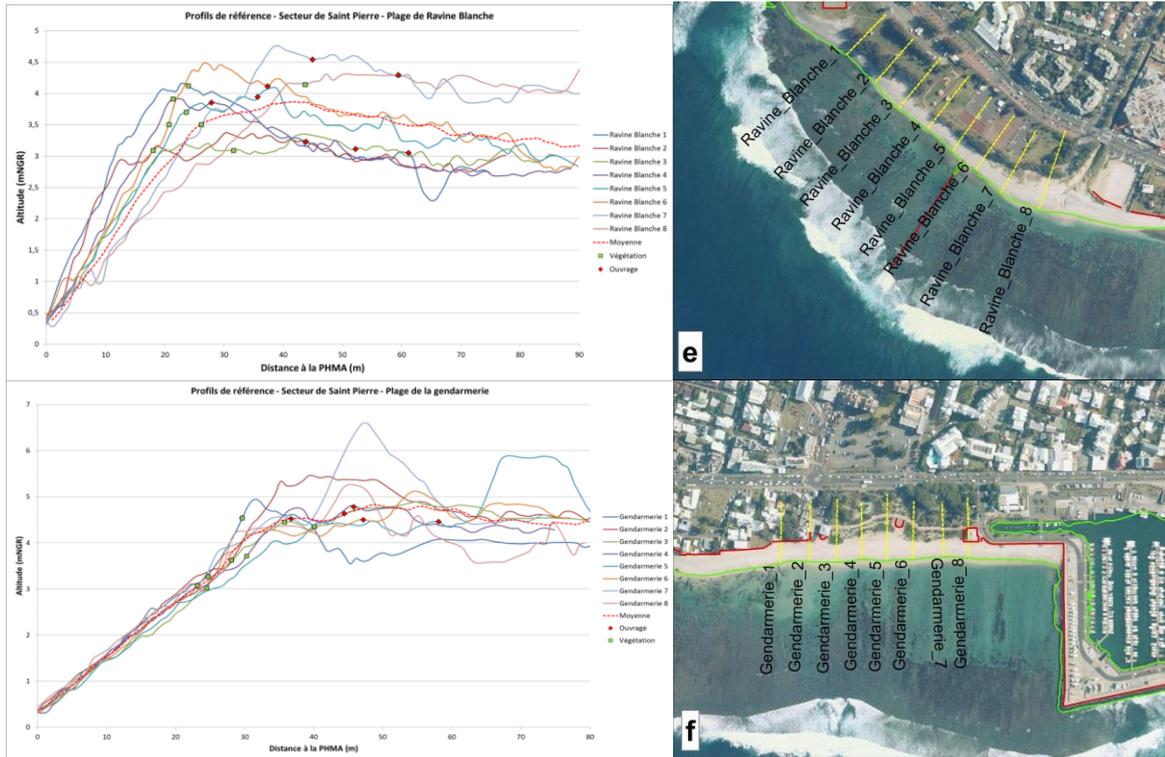


Figure 5 : A gauche, Profils de référence des secteurs - Secteurs Saint-Pierre Ravine Blanche et Saint-Pierre Centre ville (Gendarmerie) ; à droite, Fond ortho 2012 ©IGN – Traits jaunes pointillés : profils de référence – Trait vert : PHMA – Trait rouge : Ouvrage

Pour chaque secteur et chaque profil, la largeur de plage a ainsi pu être déterminée comme la distance entre la PHMA et la limite de végétation. La synthèse des mesures réalisées sur l'ensemble des profils est présentée dans la Figure 6.

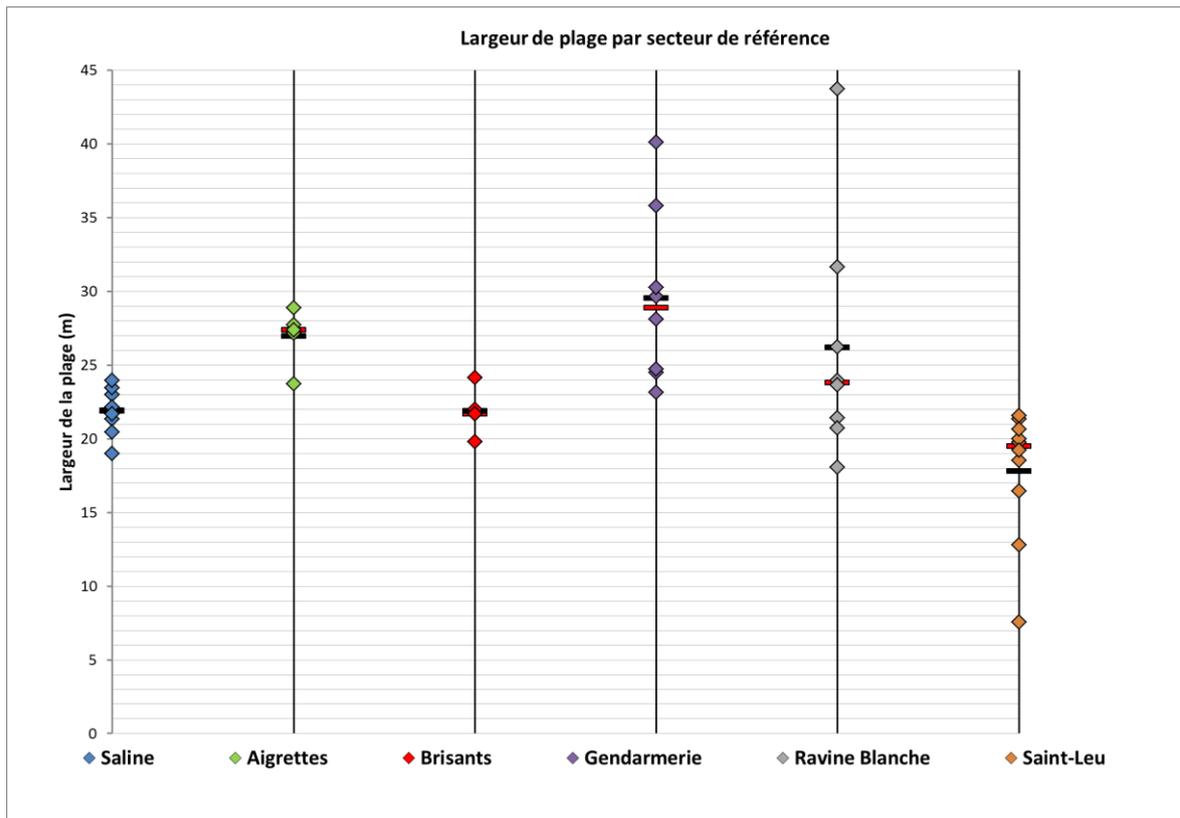


Figure 6 : Synthèse des largeurs de plage sur les zones témoins - Tiret noir = moyenne des valeurs ; Tiret rouge = médiane des valeurs

L'analyse de la Figure 6 montre :

- Un certain regroupement des valeurs de largeur de plage sur les secteurs de la Saline, des Aigrettes, des Brisants et Saint-Leu. La largeur moyenne de plage sur ces quatre secteurs est de 22 à 27 m.
- Les deux secteurs de Saint-Pierre présentent un certain étalement dans les valeurs, les plages sur ces secteurs semblent être légèrement plus grandes.

Cette différenciation peut peut-être s'expliquer par une exposition différente aux forçages entre les secteurs de l'Ouest et ceux de la commune de Saint-Pierre, plus exposés aux houles australes du Sud-Ouest. Compte tenu de cette analyse il est proposé de retenir comme largeur de référence :

- une largeur de plage de 25m pour les secteurs de plages de l'Ouest
- une largeur de plage de 30m sur les deux secteurs de Saint-Pierre

Concernant la largeur de *dune*, aucune des zones témoins identifiées n'a permis de constater la présence d'un marqueur d'arrière *dune*. La présence d'ouvrages ou de secteurs boisés (Filaos) en haut de plage ne permettent pas un développement dunaire naturel.

L'analyse de la littérature scientifique ne permet pas non plus de déterminer la largeur minimale pour qu'un milieu dunaire puisse s'installer. A défaut, et par convention, il sera considéré dans le cadre de cette étude, qu'une largeur minimale identique à la largeur de plage est nécessaire pour le développement d'un milieu dunaire, soit 25m sur les plages de l'Ouest et 30m sur les plages de Saint-Pierre.

2.1.4. Définition des zonages d'analyse

Suivant leur localisation (plages de l'Ouest et plages du Sud), les zonages ABCD sont ainsi définis par des grandeurs géométriques représentatives de ces deux grands secteurs considérés comme homogènes. Les limites des zones sont décrites dans le Tableau 3.

	Définition	limite inférieure	Limite supérieure
Zone A	Plage sous-marine/DAR	NA (large)	Limite niveau PM marée astronomique (PHMA)
Zone B	<i>Estran</i> Inf + <i>Estran</i> Sup + Haut de plage Zone balayée par les houles (<i>swash</i>) pour un évènement de période de retour annuelle.	Limite supérieure ZA: PHMA	Limite de plage active observée ou limite supérieure calculée à partir de la largeur théorique observée : -25m pour les plages de l'Ouest -30m pour les plages du Sud
Zone C	Zone dunaire (si la <i>dune</i> existe) Zone potentielle de développement dunaire	Limite supérieure ZB	Limite supérieure calculée à partir de la largeur théorique observée : -25m pour les plages de l'Ouest -30m pour les plages du Sud
Zone D	Limite haute potentiellement atteignable pas les vagues	Limite supérieure ZC	Limite haute potentiellement atteignable par les vagues

Tableau 3 : Limites géométriques des zonages d'analyse

Dans la pratique, la limite haute de la zone D n'a pas fait l'objet d'une délimitation précise. Pour connaître cette limite haute, on peut éventuellement se référer à la position de l'ancienne voie ferrée bien que celle-ci ait également connu des épisodes de destruction dans l'histoire due à des épisodes de submersion. Le recours aux zonages des PPRL, correspondant théoriquement à un évènement de fréquence de retour centennal, a également été utilisé sans que pour autant une application stricte de cette règle ait été appliquée pour sélectionner les ouvrages. Le choix des ouvrages à référencer s'est réalisé sur le terrain, par l'expertise, en ciblant les ouvrages susceptibles de jouer un rôle dans la dynamique littorale.

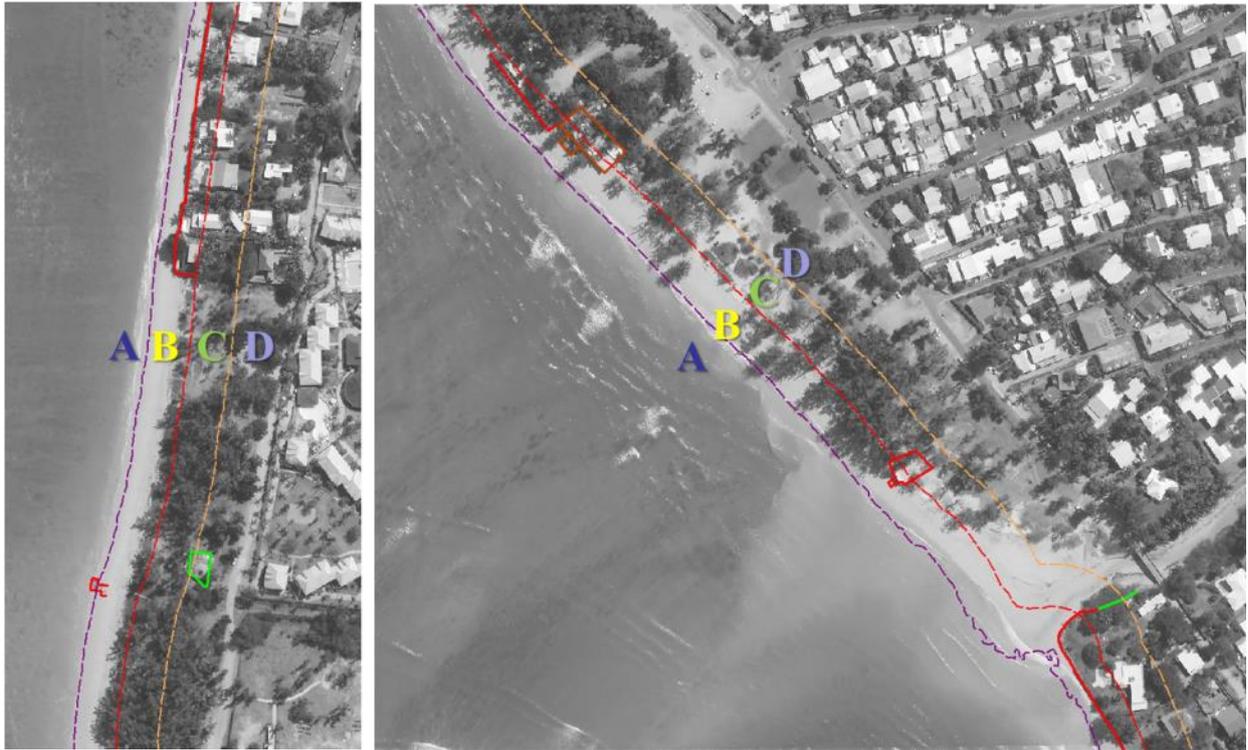


Figure 7 : Exemple de zonages sur les plages de l'Ermitage (à gauche) et de Ravine Blanche à Saint-Pierre (à droite) – Ouvrages signifiés en rouge et vert tiret plein.

La Figure 7 présente un cas d'école sur la plage de l'Ermitage où des habitations ont été construites sur la plage active et sur la *dune* en arrière. Sur la zone boisée, on peut constater que la limite de haut de plage se trouve 4 à 5 m en arrière par rapport à la ligne des premiers ouvrages qui servent de clôture aux habitations plus au Nord. De manière générale, on constate que la limite haute de la zone B coïncide bien avec la limite de végétation constituée soit de Filaos, soit de Patate à Durant (*Ipomoea pes-caprae*).

2.1.5. Exploitation des zonages

Les zonages A, B, C, D, ainsi définis vont servir à quantifier d'un point de vue géométrique, l'espace occupé par chacun des ouvrages. Une fois ces derniers décrits en termes d'envergure géométrique *long-shore* (parallèle au trait de côte) et *cross-shore* (perpendiculaire au trait de côte), ces deux grandeurs vont être segmentées et réparties dans les différents compartiments du *cordon littoral* (zone A, B, C ou D) qui les concernent.

Pour un ouvrage empiétant sur plusieurs zones, il sera ainsi possible de distinguer les différentes parties d'ouvrages pouvant impacter les différents processus naturels qui se déroulent sur le milieu.

La description de ces ouvrages se réalise au travers d'une fiche ouvrage descriptive dont le contenu détaillé est précisé dans le paragraphe suivant.

2.1.6. Description des fiches ouvrage

Pour chaque ouvrage recensé, une fiche ouvrage correspondante a été élaborée. Cette fiche, renseignée sur le terrain, a pour vocation de décrire un ensemble de paramètres indispensables à la compréhension du rôle de l'ouvrage et de son impact sur son environnement proche et éloigné.

Ces renseignements ont été stockés dans une base de données générée via Microsoft Access® 2010. Ces données ont été livrées à la DEAL. Ce logiciel présente l'intérêt de permettre la constitution d'une base de données complexe (avec menus déroulants, choix multiples, etc.), mais également d'associer à chaque objet des pièces jointes ou encore de réaliser un formulaire de saisie en lien avec la table.

La fiche ainsi réalisée est constituée d'un ensemble de blocs à renseigner :

➤ **Bloc 1 « Localisation de l'ouvrage » :**

- Référence de l'ouvrage
- Lieu-dit
- Commune
- Date du constat

➤ **Bloc 2 « Description de l'ouvrage » :**

- Coordonnées X
- Coordonnées Y
- Z min
- Z max
- H min
- H max
- Date de réalisation
- Constitution
- Nature
- Fonction
- Propriétaire
- Gestionnaire
- Arrière-côte
- Titre d'occupation DPM
- Etat général
- Commentaires

➤ **Bloc 3 « Indicateurs » :**

- Linéaire *cross-shore*
- Linéaire *long-shore*
- Surface d'interception des fluides
- Surface de drainage
- Distance du trait de côte
- Altitude minimale
- Dénivelée avec le terrain naturel
- Végétalisation
- Tendence du secteur

➤ **Bloc 4 « Impact sur les transferts sédimentaires » :**

- Transport éolien
- Transport *long-shore* du *swash*
- Transport *long-shore* des courants
- Transport *cross-shore*
- Ruissellement
- Blocage morphologique
- Transport anthropique
- Synthèse sur les transports

➤ **Bloc 5 « Impact sur la submersion marine » :**

- Aléa submersion PPRL
- Enjeux
- Distance minimale des enjeux
- Imperméabilité des écoulements
- Impact morphologique indirect des terrains naturels
- Ouvrage biotechnologique
- Présence de végétation
- Type de végétation
- Risque d'affouillement
- Risque de déstructuration
- Risque de basculement
- Risque d'érosion après sinistre
- Risque de submersion après sinistre
- Incidence sur les secteurs limitrophes
- Synthèse sur la submersion

Un exemple de fiche est présenté Figure 8.

Référence de l'ouvrage :	SPA049		
Commune :	Saint-Paul		
Lieu-Dit :	Petit Boucan		
Date du constat :	06/08/2015		

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

X :	314 911	Y :	7 672 876
Z min :	1.5	Z max :	3
H min :	1.5	H max :	3.5
Date réal. :		Fonction :	Délimitation de parcelle
Nature :	Clôture		
Constitution :	Béton		
Propriétaire :	Privé	Gestionnaire :	Privé
Occupation arrière :	Habitation		
Titre d'occupation DPM :	<input type="checkbox"/>	Etat général :	Bon
Commentaires :			

INDICATEURS

	ZA	ZB	ZC	ZD
Linéaire CS (m) :	0.0	0.0	0.0	0.0
Linéaire LS (m) :	0.0	220.0	0.0	0.0
Surface interc. fluides (m ²) :	0	550		
Surface de drainage (m ²) :	0.0			
Distance du TC (m) :	9.0			
Altitude min (m) :	1.5			
Dénivelé TN (m) :	2			
Végétalisation :	Nulle			
Tendance du secteur :	Erosion modérée			

IMPACT SUR LES TRANSFERTS SÉDIMENTAIRES

Transport éolien :	Fort
Transport longshore du swash :	Fort
Transport longshore des courants :	Nul
Transport cross-shore :	Nul
Ruissellement :	Nul
Blocage morpho :	Fort
Transport anthropique :	Faible
SYNTHESE SUR LES TRANSPORTS :	

IMPACT GLOBAL :

IMPACT SUR LA SUBMERSION MARINE

Aléa submersion PPRL :	Fort
Enjeux :	Biens privés
Distance min. des enjeux (m) :	10
Imperméabilité écoulements :	Fort
Impact indirect morpho TN :	Fort
Ouvrage biotechnologique :	<input type="checkbox"/>
Présence de végétation :	Nulle
Type végétation :	Aucune
Risque affouillement :	Fort
Risque destructuration :	Modéré
Risque basculement :	Fort
Risque d'érosion après sinistre :	Fort
Risque de submersion après sinistre :	Augmentation
Incidence sur secteurs limitrophes :	Aggravation
SYNTHESE SUR LA SUBMERSION :	

LOCALISATION



PHOTOGRAPHIE N°1



PHOTOGRAPHIE N°2



Figure 8 : Exemple de fiche ouvrage issue de la base Microsoft Access® 2010

Pour chaque fiche réalisée, et afin d'illustrer la base de donnée et d'appréhender l'environnement de chaque ouvrage, trois pièces jointes viennent compléter cette description :

- Une vue aérienne permettant la localisation de l'ouvrage
- Deux photographies de l'ouvrage selon deux angles différents si l'ouvrage le permet, ou deux portions du même ouvrage si la dimension de celui-ci est trop importante (ex : ensemble de clôtures de propriétés privées s'étalant sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres)

A la fin de chaque fiche, une note de synthèse est proposée dans le but de caractériser l'impact global de l'ouvrage en question sur les blocages sédimentaires et les dynamiques de submersion.

En complément de cette base Access®, une couche SIG a été créée afin de spatialiser chaque ouvrage. La table attributive de cette couche d'information géographique est renseignée avec les champs de la base Access, et ce dans le but de pouvoir effectuer des requêtes spatiales et des calculs en fonction des données acquises. Ce fichier a été généré à partir de la couche des ouvrages côtiers recensés par l'Université de Bretagne Occidentale (Le Berre et al, 2012), complétée et enrichie dans le cadre de cette étude.

2.1.7. Méthodologies d'évaluation des champs des fiches ouvrage

Des critères d'évaluation ont été définis pour chacun des champs à renseigner. Un tableau de synthèse constituant la métadonnée des fiches et permettant une meilleure compréhension de la notation est par ailleurs disponible en Annexe 1.

Par ailleurs, les valeurs affectées à chacun des champs peuvent être de types différents :

- Numérique pour les champs quantifiables (hauteur, altitude, distance du trait de côte, dénivelée, etc.) ;
- Oui/non pour les champs descriptifs nécessitant un unique niveau d'information sur la présence ou non d'une caractéristique (ex : Titre d'occupation du Domaine Public Maritime) ;
- Texte « ouvert » pour les champs descriptifs (nature de l'ouvrage, fonction de l'ouvrage, type de matériau, végétation...) ;
- Texte à choix multiples « fermé » pour les critères d'évaluation nécessitant un gradient de notation (ex : de nul à très fort pour le transport éolien ; de très mauvais à très bon pour l'état général de l'ouvrage ; de nul à fort pour le risque de déstructuration ; etc.).

Les champs de « type numérique », « oui/non » et « texte ouvert », dépendent soit d'observations de terrain, soit de données quantifiables. Dans les deux cas, ces renseignements apparaissent objectifs et ne dépendent pas de l'interprétation de l'expert qui effectue la saisie.

En revanche, les champs de type « texte à choix multiple fermé » dépendent de cette interprétation et ne sont pas quantifiables. Il a donc été nécessaire de fixer des critères de notation précis pour chaque champ, de manière à rendre comparables les résultats des différentes fiches. Une réflexion méthodologique conséquente a permis d'aboutir aux classes de notations définies dans la colonne « Description du champ » de l'Annexe 1.

A titre d'exemple, l'impact du transport éolien est considéré comme :

- « Nul » si la superficie d'interception des sédiments transportés par le vent = 0 m² ;
- « Faible » pour l'intervalle [0;20 m²] ;
- « Modéré » pour l'intervalle [20;50 m²] ;
- « Fort » pour l'intervalle [50;100 m²] ;
- « Très fort » pour les valeurs >100 m².

Ainsi, un critère d'évaluation subjectif en première approche devient quantifiable et est donc évalué avec plus d'objectivité. Les champs du bloc 4 (Impact sur les transferts sédimentaires) ont ainsi pu être objectivés, cependant quelques critères de notation restent à l'appréciation de l'expert, notamment ceux du bloc 5 (Impact sur la submersion marine). C'est notamment le cas des champs de notation liés aux risques pesant sur l'ouvrage tels que les risques d'affouillement, de déstructuration, de basculement, etc.

Notons aussi que l'intégralité des champs ne peut être remplie lors de la même phase de travail. Le remplissage complet d'une fiche nécessite en effet un ensemble de cinq opérations :

- Des observations de terrain (fonction de l'ouvrage, nature de l'ouvrage, nature de l'arrière côte, etc.) ;
- Des mesures de terrain (hauteurs minimale et maximale de l'ouvrage, impact et dénivelée vis-à-vis des terrains naturels, etc.) ;
- Des observations SIG (date de réalisation, aléa submersion du PPRL, etc.) ;
- Des mesures SIG (linéaires *cross-shore* et *long-shore*, Z min et max, distance du trait de côte, etc.) ;
- Des données fournies par les partenaires (titre d'occupation DPM).

2.1.8. Visites de terrain

En tout, 435 ouvrages ont été visités sur le terrain. Les fiches ont été systématiquement remplies sur le terrain pour les champs qui le nécessitent, et un complément d'analyse a été réalisé pour les champs nécessitant l'utilisation d'outils SIG notamment.

2.2. Analyse des résultats

La base de données peut être exploitée pour analyser la typologie des ouvrages référencés dans le cadre de cette étude. Les deux graphiques suivant permettent de détailler cette répartition en séparant les ouvrages en termes d'implantation *long-shore* et *cross-shore*.

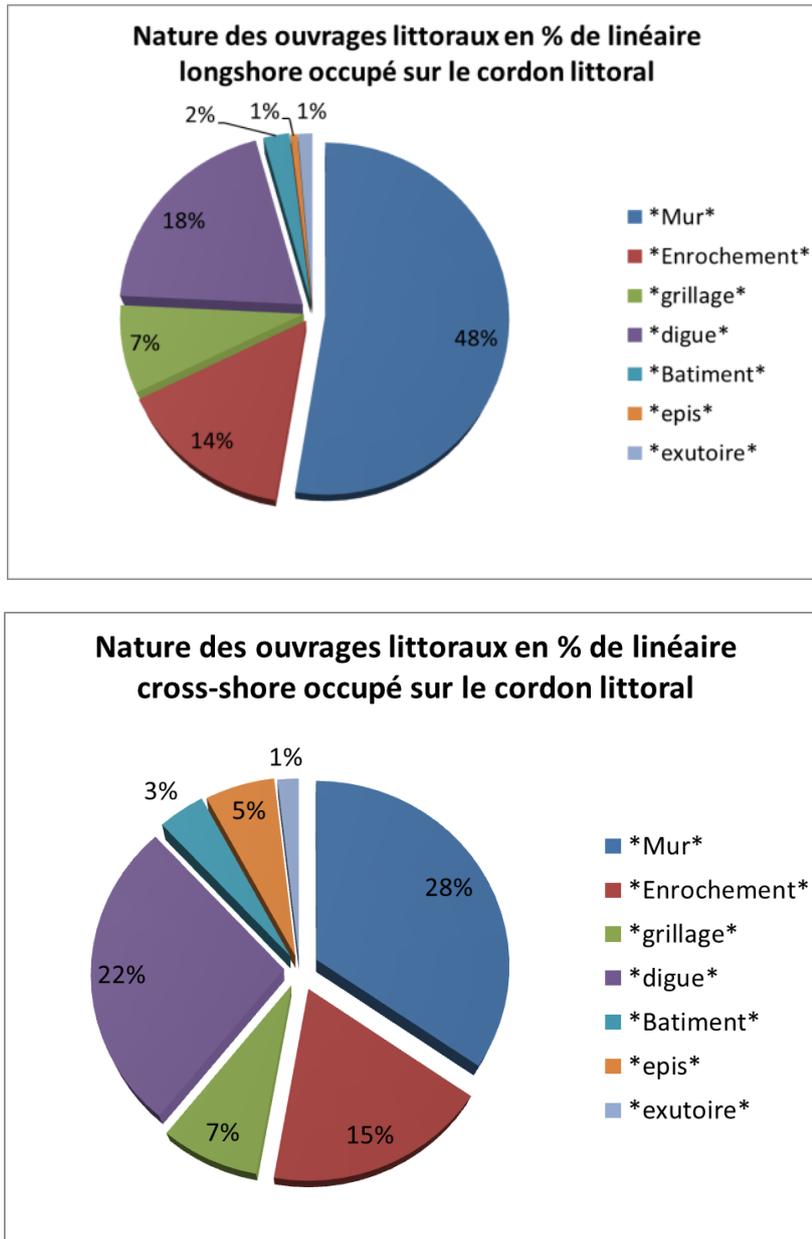


Figure 9 : Répartition typologique des ouvrages en termes d'implantation long-shore (en haut) et cross-shore (en bas)

Près de la moitié des ouvrages *long-shore* est constituée par des ouvrages de type « mur ». Ces ouvrages ont la plupart du temps une fonction de délimitation de parcelles bâties positionnées sur le front de mer. 18% du linéaire sont des digues, 14% sont des enrochements, 7% des grillages. Les bâtiments, épis et exutoire n'occupent que 4% du linéaire.

Pour ce qui est des ouvrages *cross-shore*, les proportions sont du même ordre que pour ceux *long-shore* excepté les ouvrages de type « mur » qui n'occupe plus qu'un tiers du linéaire.

La base de données permet également de visualiser la répartition de l'implantation des ouvrages sur le littoral entre la commune de La Possession et la commune de Saint-Pierre. Le graphique ci-dessous montre le résultat d'un calcul de densité d'artificialisation du littoral. Le calcul est réalisé en discrétisant le linéaire côtier en éléments de longueur 1000 ml. Sur chaque tronçon, le linéaire *long-shore* d'ouvrage est totalisé puis divisé par 1000. On obtient donc un

pourcentage de linéaire artificialisé sur chaque tronçon. Une correspondance géographique des secteurs est donnée en dessous du graphique.

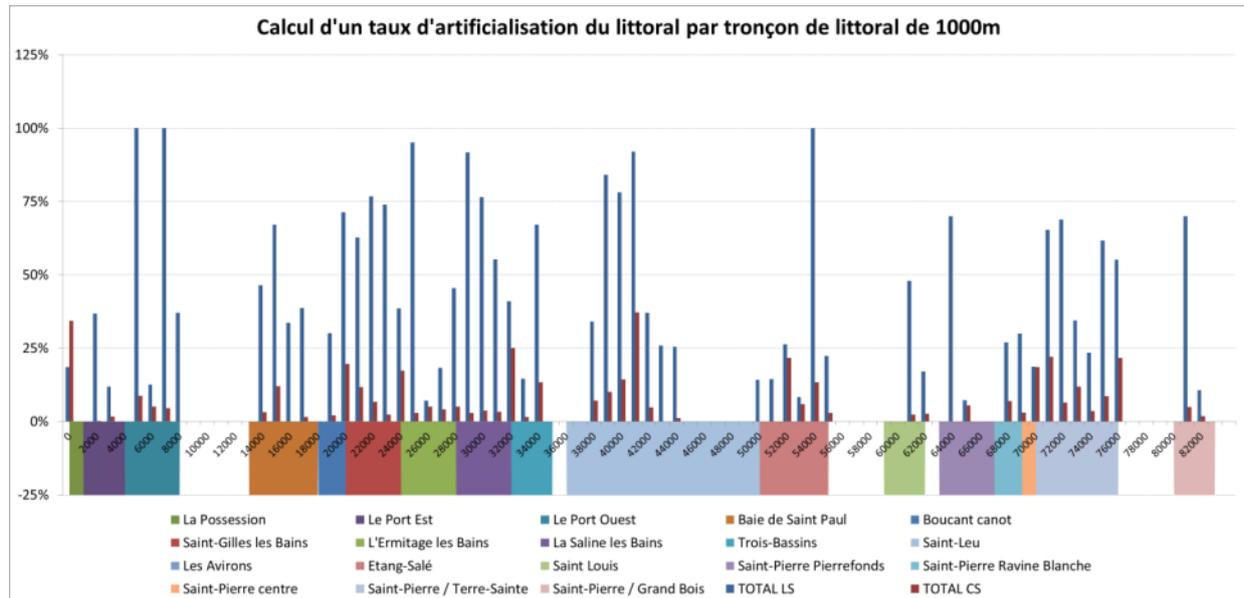


Figure 10 : Calcul du taux d'artificialisation du littoral par tronçon de littoral de 1000 m. En bleu : linéaire longshore – En rouge : linéaire cross-shore

La base de données peut également être exploitée pour évaluer l'historique de l'urbanisation des différents compartiments du *cordon littoral* par les ouvrages. Encore une fois, cette analyse est découpée en terme d'implantations *cross-shore* et *long-shore* (somme des longueurs des ouvrages) et est déclinée dans les 4 zones d'analyse (A, B, C, D) décrites dans les paragraphes précédents.

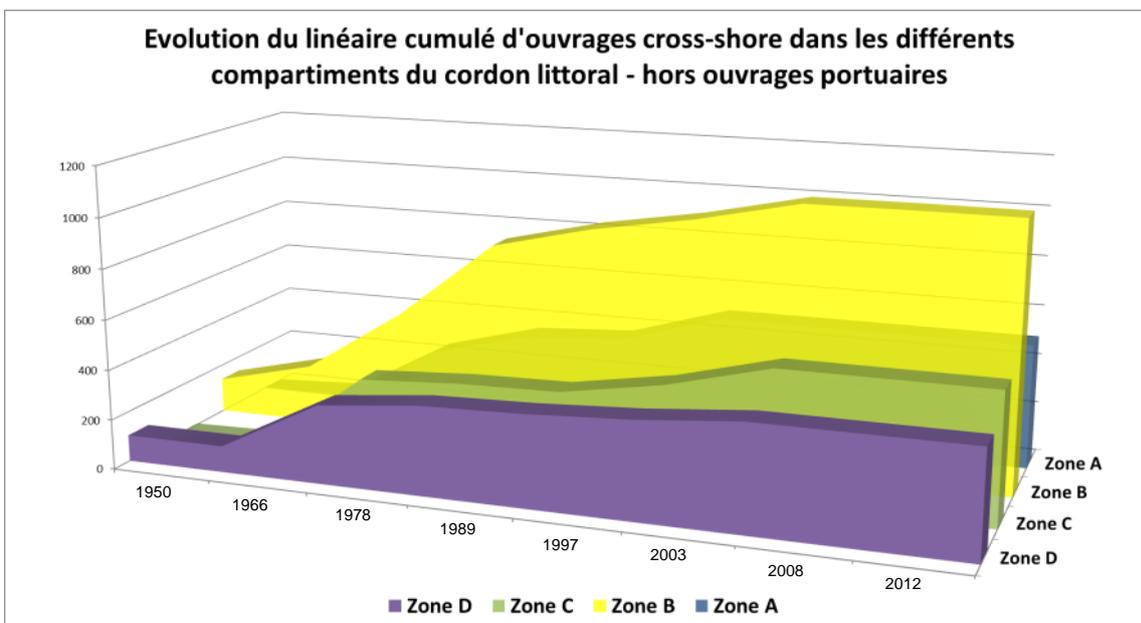
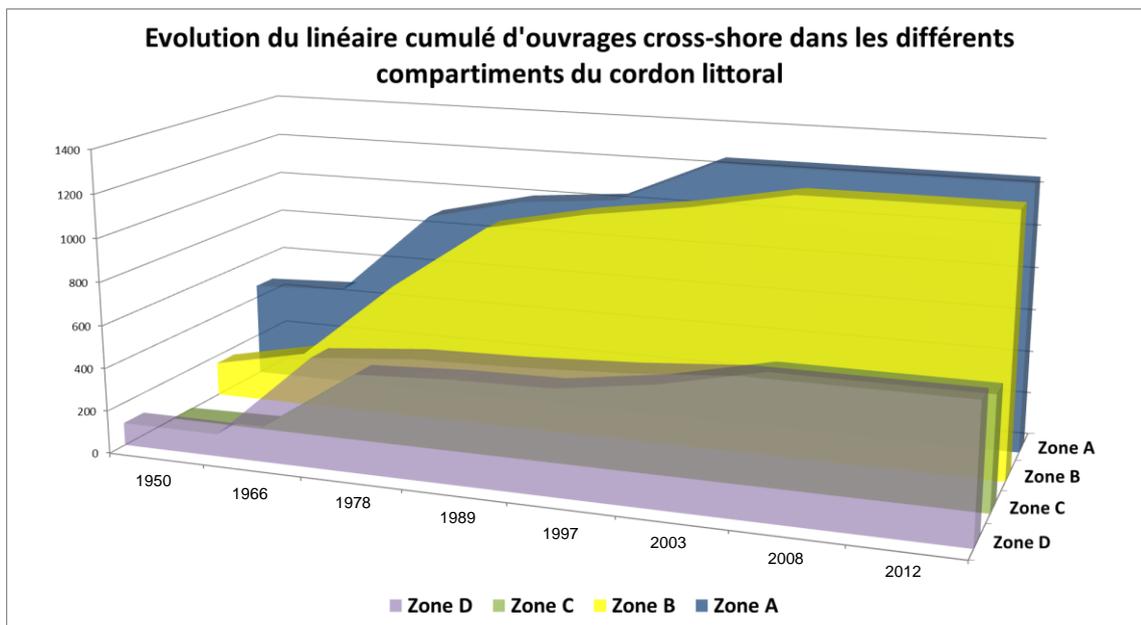


Figure 11 : Evolution historique de l'urbanisation des différents compartiments de plage au cours des 60 dernières années. En haut l'analyse tous ouvrages confondus – En bas sans les ouvrages portuaires

Ces graphiques montrent qu'historiquement, l'urbanisation des espaces littoraux s'est réalisée en plusieurs étapes caractéristiques. On constate une première vague de création d'ouvrages dans les années 70. En analysant dans le détail les données, on constate que cette première vague correspond à la réalisation des ouvrages portuaires de Saint Leu et de Saint Gilles. Ces aménagements ont amené à la réalisation d'ouvrages de grande taille en mer et perpendiculaires au trait de côte (épis). L'accumulation d'ouvrages de ce type se traduit par une forte augmentation du linéaire *cross-shore* dans les zones A, B et C. On peut toutefois noter qu'en 1950, le linéaire *cross-shore* de la zone A est déjà important en raison de la présence des ouvrages du port de Saint Pierre à cette époque.

Par la suite, entre les années 70 et la fin des années 90, on peut constater une augmentation croissante de l'urbanisation des espaces littoraux et notamment de la zone B qui correspond à la plage active. Cette zone est de loin la plus urbanisée par les ouvrages (en linéaire *long-shore*). A partir des années 2000, le linéaire d'ouvrage semble se stabiliser jusqu'à nos jours dans tous les compartiments du *cordon littoral*.

Il convient de noter que la méthodologie déployée ne référence que les premiers ouvrages présents en front de mer. De fait, si un ouvrage est observé en zone B, les ouvrages présents potentiellement en arrière dans la zone C ne sont pas référencés dans la base de données, ni dans les statistiques. C'est le cas notamment de toutes les habitations existantes sur les hauts de plage de l'Ermitage : seules les clôtures ceinturant les parcelles ont été référencées dans la base de données, mais les habitations en arrière n'apparaissent pas dans l'analyse.

La figure suivante est un recensement des ouvrages présents sur la zone d'étude, classés par catégorie d'intensité de leurs impacts individuels sur les processus (le maximum de l'impact de l'ouvrage sur l'ensemble des processus étant retenu).

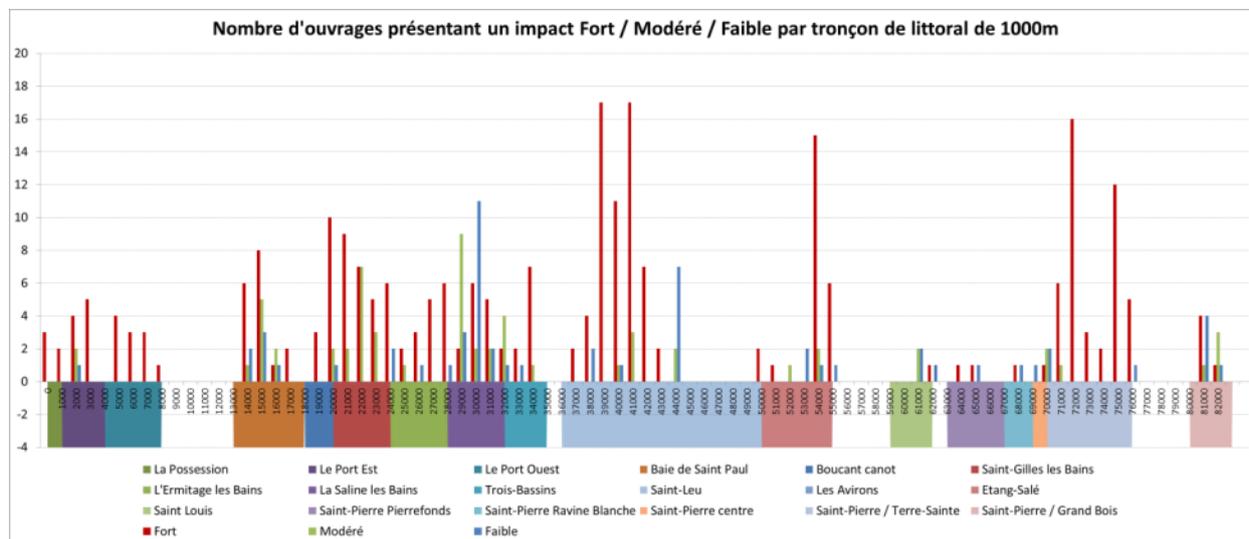


Figure 12 : Nombre d'ouvrages présentant un impact Fort / Modéré / Faible par secteur géographique. Impact retenu = max de tous les impacts de l'ouvrage. Analyse menée par tronçon de littoral de 1000m.

La majorité des ouvrages semblent avoir un impact fort sur la dynamique littorale tout en étant répartis de manière hétérogène le long du linéaire côtier. Les communes de Saint-Leu, l'Etang-Salé et Saint-Pierre présentent des tronçons kilométriques particulièrement occupés par ces ouvrages.

3. Aménagements portuaires

3.1. Base de données des traits de côte historiques

Dans le cadre de sa mission d'appui à la DEAL dans la réalisation des PPRL des communes de La Réunion, le BRGM a constitué une base de données des traits de côte historiques. Cette base de données a été réalisée en s'appuyant sur les photographies aériennes historiques de l'IGN géo-référencées et/ou ortho-rectifiées lorsque cela a été possible. Sur ces photographies, différents marqueurs géomorphologiques ont été identifiés et numérisés (limite végétation, limite jet de rive). Ces marqueurs peuvent servir d'indicateurs sur les dynamiques passées et actuelles qui concernent l'évolution du trait de côte. Les années disponibles exploitées sont les suivantes :

1950 – 1961 – 1966 – 1978 – 1989 – 1997 – 2003 – 2008 – 2012

Chacune des photographies a fait l'objet d'une analyse qualitative concernant différents critères représentatifs de la qualité de la photographie et de l'indice de confiance qui peut être accordé à l'indicateur qui en est extrait. Parmi ces critères, on peut noter : la résolution de la photographie, sa netteté, sa colorimétrie, la qualité de son calage, le niveau d'agitation de la mer présent lors de la photographie (important pour l'interprétation de la position du jet de rive). Ce tableau est reproduit en Annexe 2.

Par ailleurs cette base de données a déjà fait l'objet d'une analyse dans le cadre de la réalisation des PPRL (Chateauminos et al, 2013), pour quantifier les dynamiques historiques de recul du trait de côte. Cette analyse a également été exploitée dans le cadre de cette étude.

3.2. Méthodologie employée pour les aménagements portuaires

Il est admis que les ouvrages portuaires peuvent jouer un rôle plus ou moins conséquent sur les flux sédimentaires en milieu littoral. Ils peuvent en effet affecter les transferts *long-shore* et *cross-shore*, en bloquant aussi bien les sédiments émergés présents sur la *plage aérienne*, qu'immergés dans les petits fonds.

Cet impact est variable et dépend de nombreux critères tels que :

- Les caractéristiques propres de l'ouvrage :
 - ✓ La longueur de l'ouvrage (emprise *long-shore* et *cross-shore*) ;
 - ✓ La hauteur et/ou la profondeur d'implantation de l'ouvrage ;
 - ✓ La perméabilité de l'ouvrage ;
- L'intensité des flux sédimentaires environnant ;
- La localisation de l'ouvrage par rapport à un point d'apport potentiel en sédiments (embouchure de ravine ou de rivière).

Les trois aménagements portuaires étudiés dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- Le port de Saint-Gilles-les-Bains, sur la commune de Saint-Paul, situé au niveau de la passe de la ravine Saint-Gilles ;
- Le port de Saint-Leu, situé dans le lagon de la commune éponyme, près de l'exutoire à la confluence des ravines du Grand et du Petit Etang ;

- Le port de Saint-Pierre, situé à l'exutoire de la rivière d'Abord, en contact direct avec le complexe récifal.



Figure 13 : Localisation des ouvrages portuaires étudiés (Google Earth 2016)

Pour ces trois aménagements, une méthode d'analyse diachronique des images aériennes (IGN) disponibles a été retenue pour quantifier leurs impacts sur les processus hydro-sédimentaires environnants. La profondeur historique des images aériennes à La Réunion permet d'envisager de mener une analyse différenciée des dynamiques d'évolution du trait de côte avant et après l'implantation de ces aménagements sur le littoral considéré.

Pour ce faire, l'analyse de la cinématique du trait de côte se base sur la photo-interprétation de clichés aériens anciens. Le calcul du recul du trait de côte suit les étapes suivantes :

- Préparation et calage (si besoin) des photographies aériennes verticales historiques ;
- Définition et numérisation du trait de côte pour chacune des dates à disposition ;
- Calcul du recul du trait de côte à partir du logiciel DSAS (Himmelstoss (2009).

3.2.1. Préparation des photographies aériennes anciennes

Le tableau ci-dessous liste les années pour lesquelles des photographies aériennes ont pu être récupérées pour l'intégralité de la zone d'étude, ainsi que quelques critères descriptifs de base.

Années	Nature des clichés	Echelle de prise de vue	Résolution image numérique	Méthode de calage
1950	Noir & Blanc	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m	Ortho-rectification
1966	Noir & Blanc	1 : 20 000	1 pixel = 0.4 m	Géo-référencement
1978	Couleur et Noir & Blanc	1 : 20 000	1 pixel = 0.5 m	Géo-référencement
1989	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5m	Géo-référencement
1997	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 1 m	Ortho-rectification
2003	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m	Ortho-rectification
2008	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m	Ortho-rectification
2011	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.2 m	Ortho-rectification

Tableau 4 – Détail des campagnes photographiques IGN utilisées

Les clichés de 1997, 2003, 2008 et 2011 sont issus de la « BD Ortho » de l'IGN. Les photographies aériennes de 1966, 1978 et 1989 (IGN) ont quant à elles été numérisées à 1200 dpi puis géo-référencées par la méthode d'ajustement dite « spline » grâce au logiciel ArcGis® 10.0. Le géo-référencement a été privilégié à l'ortho-rectification car les certificats de calibration de ces missions IGN ne sont pas disponibles. Cependant, le littoral étudié étant constitué de côtes basses, les déformations des photographies ont pu être compensées par l'intermédiaire du géo-référencement.

L'ortho-photographie de 1950 a quant à elle été récupérée auprès de l'Ifremer. Cette campagne a été traitée par un bureau d'étude spécialisé, et l'ortho-rectification a été réalisée en tenant compte du relief.

3.2.2. Définition et numérisation des traits de côte

Dans un second temps, le travail a consisté à positionner et numériser des indicateurs d'évolution du trait de côte pour chaque année. Généralement, l'indicateur de suivi du trait de côte le plus facilement identifiable sur les photos anciennes est la position de la limite de végétation. Pour autant, sur les secteurs étudiés fortement anthropisés, cet indicateur montre ses limites. En effet, la limite de végétation n'est pas systématiquement représentative des dynamiques affectant réellement le milieu. De nombreux filaos et vacoas ont notamment été plantés sur le littoral ces 60 dernières années. Lorsque c'est le cas, l'utilisation de cet indicateur dans les zones fortement anthropisées peut donc amener à estimer des dynamiques inverses de celles réellement observées vis-à-vis des stocks sédimentaires disponibles (l'indicateur « limite de végétation » migre artificiellement vers le large alors qu'il s'agit d'une plage en érosion).

Pour cette raison, l'évolution de la limite du jet de rive a donc été préférée comme indicateur de la position du trait de côte dans le cadre de cette étude. Le marnage moyen étant évalué à 30 cm sur les côtes réunionnaises, la différence de position entre les limites de jet de rive de basse et de haute mer est minime, d'autant plus dans les lagons, où l'impact du jet de rive sur l'*Estran*

est limité par un déferlement s'exerçant sur le récif. Sur la plage de l'Ermitage, la pente de la *plage aérienne* à proximité du 0.00 NGR est de 12.5%. Une amplitude de marée verticale de 0.3 m entraîne un déplacement horizontal du jet de rive de 2.5m. Ce déplacement est faible par rapport à l'amplitude des phénomènes à quantifier. Un biais persiste cependant dans des conditions de très forte agitation liées notamment à la présence de houles australes durant la saison hivernale. Une telle configuration peut en effet être impactante sur le jet de rive au moment du cliché. Pour cette raison, la marge d'erreur liée à ce paramètre est pris en compte dans les sorties du modèle DSAS.

Afin de limiter au maximum la marge d'erreur liée à la digitalisation, le trait de côte a été numérisé sous ArcGis à une échelle comprise entre le 1:500 et 1:1000 en fonction de la résolution de l'année considérée.

La marge d'erreur totale issue de cette photo-interprétation du trait de côte dépend de la qualité des images aériennes (échelle, grain de la pellicule argentique pour les plus anciennes, résolution, géo-référencement) ainsi que de l'interprétation du trait de côte dans les zones délicates. Elle est estimée à un maximum de 5 à 10 m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à cette marge n'ont pas été conservés. Une évaluation multicritère des clichés aériens a été réalisée afin de caractériser la qualité de chaque année. Le tableau descriptif est disponible en Annexe 1.

3.2.3. Calcul du recul du trait de côte

L'utilisation de l'extension d'ArcGis « DSAS » permet d'automatiser le calcul de l'évolution de la position du trait de côte sur la période considérée. A partir d'une ligne de base située en arrière de l'enveloppe de traits de côte, des transects sont générés à un intervalle prédéfini. Les taux d'évolution annuels sont calculés pour chaque transect, selon plusieurs méthodes statistiques possibles.

Les transects ont été implantés tous les 20 m et le taux d'évolution a été calculé à partir d'une régression linéaire pondérée (Weight Linear Regression - WLR) adaptée à l'échantillon de traits de côte.

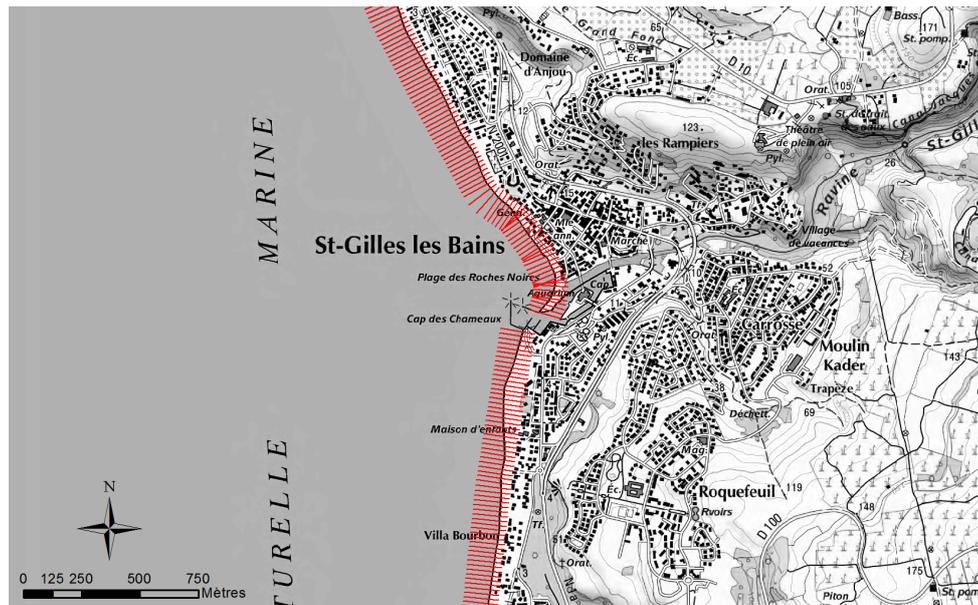


Figure 14 – Implantation des transects DSAS autour du port de Saint-Gilles

La régression linéaire pondérée est une méthode d'ajustement couramment employée pour le calcul de l'évolution de la position 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 (Himmelstoss, 2009).

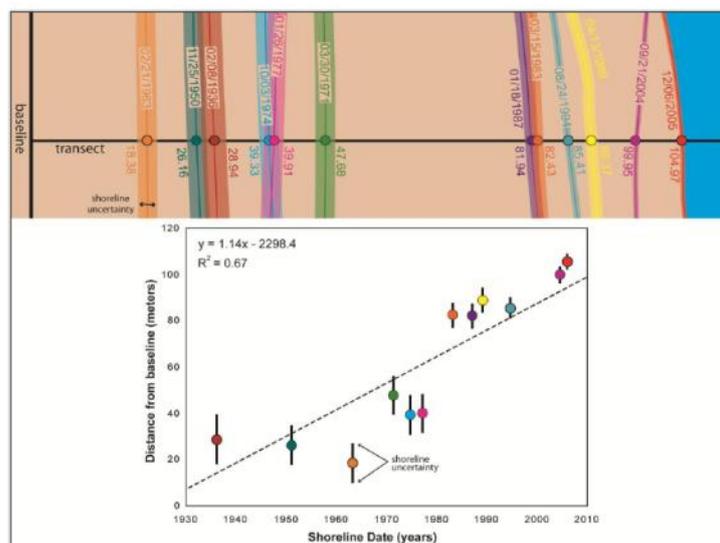


Figure 15 – Principe de régression linéaire pondérée par DSAS (Himmelstoss, 2009)

La marge d'erreur liée à la digitalisation des traits de côte a été quantifiée à partir des paramètres de description de chaque campagne de l'IGN (Annexe 1). Ont été pris en compte dans ce calcul :

- La résolution (taille des pixels)
- La qualité chromatique
- La lisibilité (netteté, interprétation)
- La qualité radiométrique (ombres, homogénéité)

- Le contraste et la luminosité
- La qualité du calage
- L'état de mer au récif au moment du cliché

Pour chaque critère et pour chaque année, une note sur 5 a été attribuée. Un coefficient d'importance de 2 a également été appliqué à la qualité du calage et de 3 à l'état de mer au récif, ces paramètres étant particulièrement impactants dans le calcul de la marge d'erreur. Quand cela a été nécessaire, des notes différentes ont été attribuées en fonction des secteurs pour caractériser l'état de mer. En effet, les campagnes de l'IGN s'étalant sur plusieurs jours, les secteurs couverts peuvent présenter des conditions d'agitation différentes.

En fonction des notes attribuées, une marge d'erreur globale a été calculée pour chaque trait de côte. Certaines valeurs peuvent paraître importantes mais il s'agit d'une marge d'erreur potentielle cumulée et non d'une marge d'erreur réelle et avérée. Cela correspond par ailleurs à une marge d'erreur maximale localisée (en aucun cas généralisée). Les valeurs de marge d'erreur maximales localisées sont les suivantes :

- 1950 : 8 m pour toute la campagne
- 1966 : 8 m pour le nord du port de Saint-Gilles (Saint-Paul)
- 1966 : 4 m pour le sud du port de Saint-Gilles, Saint-Leu, et Saint-Pierre
- 1978 : 9 m pour Saint-Paul
- 1978 : 7 m pour Saint-Leu et Saint-Pierre
- 1989 : 4 m pour toute la campagne
- 1997 : 8 m pour toute la campagne
- 2003 : 6 m pour Saint-Paul et Saint-Pierre
- 2003 : 5 m pour Saint-Leu
- 2008 : 5 m pour Saint-Paul et Saint-Leu
- 2008 : 3 m pour Saint-Pierre
- 2011 : 20 m pour Saint-Paul (houles australes violentes)
- 2011 : 2 m pour Saint-Leu
- 2011 : 3 m pour Saint-Pierre

Un ajustement par régression linéaire est ensuite calculé à partir de ces valeurs tel qu'expliqué à la Figure 15. Les valeurs de déplacement du trait de côte sont ainsi pondérées pour tenir compte de cette marge d'erreur potentielle et accorder plus de poids dans les calculs aux tronçons les plus fiables.

Les résultats obtenus par cette méthodologie sont explicités dans le chapitre 3.3.

3.3. Analyse de l'impact des aménagements portuaires

3.3.1. Port de Saint-Gilles-les-Bains

Tendance avant la mise en place du port

L'analyse historique nous montre que les ouvrages extérieurs du port de Saint-Gilles ont été mis en place entre les années 1966 et 1978, probablement vers la fin des années 1960.

Le transit sédimentaire sur ce secteur se fait majoritairement du sud vers le nord, contraint le plus fréquemment par les houles australes durant la saison hivernale. Une dynamique inverse peut cependant survenir ponctuellement du fait des houles cycloniques de nord durant l'été austral.

Dès 1950 étaient déjà présents deux ouvrages en enrochement au niveau de l'exutoire de la ravine Saint-Gilles :

- Un ouvrage au sud de 40m en *cross-shore* sur 65m en *long-shore* ;
- Un épi au nord du premier ouvrage de 75m en *cross-shore* sur 6m en *long-shore*.

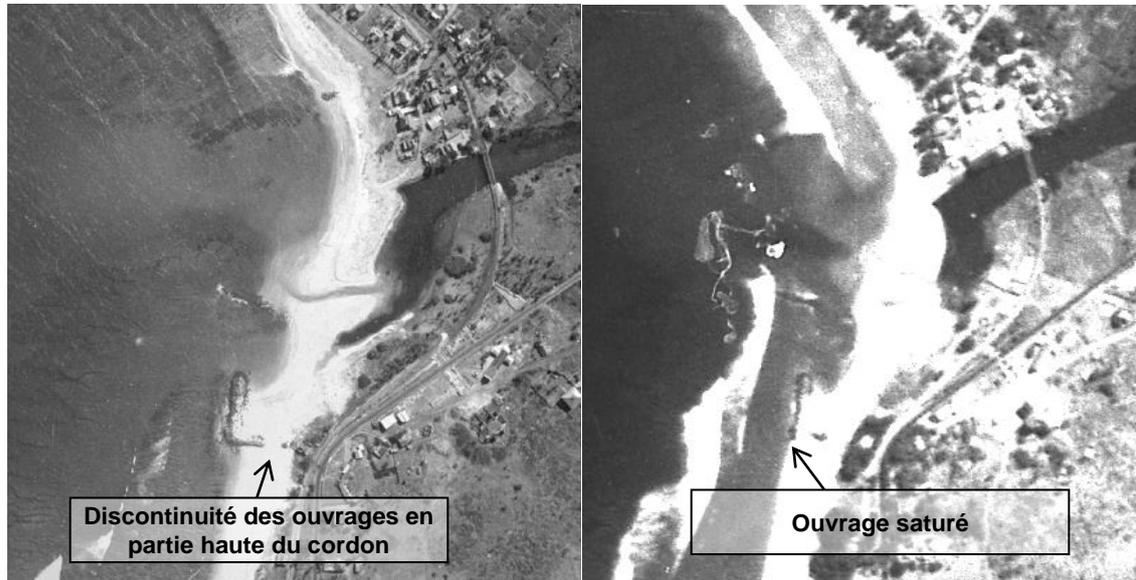


Figure 16 : Situation du port de Saint-Gilles en 1950 (à gauche) et 1966 (à droite) – source ©IGN.

Comme on peut le voir sur la Figure 16, ces ouvrages n'interceptent pas entièrement le *cordon littoral* : il semble y avoir toujours une certaine continuité du cordon de la partie haute de la plage. Cependant, malgré cette perméabilité partielle, on peut supposer que ces ouvrages participaient déjà à une modification des échanges sédimentaires entre le nord et le sud de la ravine. On note notamment que l'ouvrage sud (au nord de la plage des Brisants), est à environ 15 m d'une saturation potentielle en 1950 alors qu'il semble déjà totalement saturé sur la photographie de 1966.

En 1950, la largeur de la plage des Brisants était d'environ 50 m, valeur qui reste inchangée sur la photographie de 1966 malgré une avancée du pied de plage. L'ensemble du système *plage/dune* a avancé vers la mer avec une colonisation par la végétation basse du cordon dunaire vers la plage. Cette tendance est confirmée par l'analyse DSAS qui montre une accrétion moyenne de la plage des Brisants de l'ordre de 1 m/an (valeurs comprises entre 0,63 et 1,42 m/an sur une distance de 200 m au sud de l'ouvrage). On notera que cette accumulation se poursuit jusqu'à environ 450 m au sud de l'enrochement.

Au nord, l'évolution de la plage semble déjà exprimer une tendance à l'érosion entre 1950 et 1966, et notamment sur toute la partie nord du tronçon entre la ravine Saint-Gilles et le cap des Aigrettes, soit une longueur de trait de côte de près de 2 km. L'érosion semble par ailleurs moins marquée au sud de la zone, au niveau de la plage des Roches Noires, dont la largeur reste quasiment constante (environ 40 m). Au nord, les valeurs sont comprises entre 0,3 m et 1 m de recul par an, en allant vers le cap Homard. Ces chiffres sont cependant à modérer du fait du constat de problèmes de calage ponctuels de l'ortho-photographie de 1950 sur ces secteurs. Ceci étant, cette tendance à l'érosion reste confirmée par la mesure de la largeur de plage sur les deux années, faisant état de 4 à 8 m de recul selon les secteurs, soit de 0,25 à 0,5 m/an.

Notons qu'à ce niveau de l'analyse, en s'appuyant sur deux dates et sans photographies aériennes antérieures, il semble difficile d'imputer de tels constats aux deux seuls ouvrages recensés. Il apparaît donc essentiel de confirmer cette tendance en étudiant l'évolution des dynamiques suite à la mise en place des ouvrages portuaires que l'on connaît de nos jours.

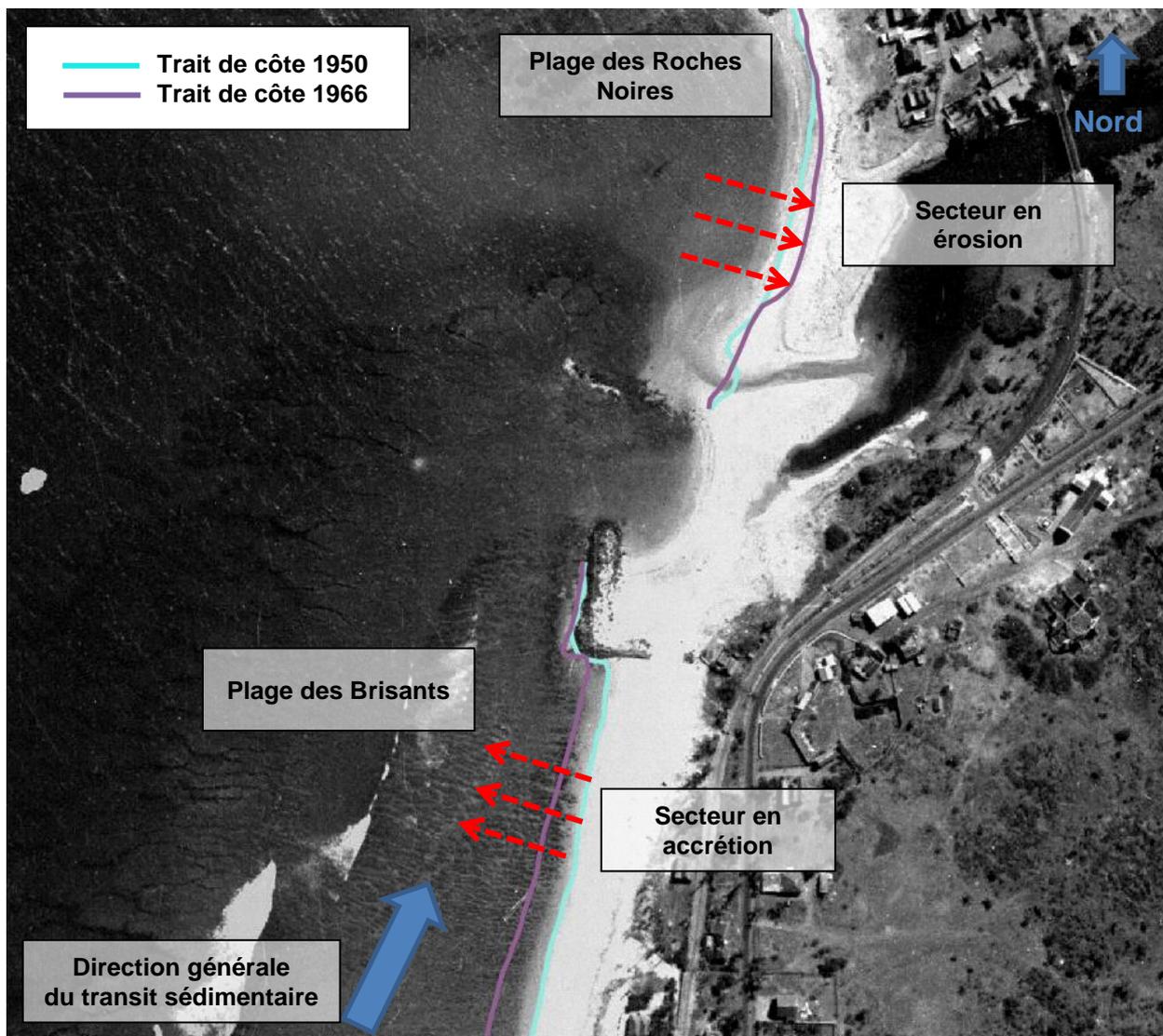


Figure 17 : Traits de côte 1950 (en bleu) et 1966 (violet). Les flèches rouge indiquent la dynamique générale du déplacement du trait de côte entre ces deux dates (Fond Orthophoto IGN 1950)

Tendance après la mise en place du port

Dès 1978, on constate sur les photographies aériennes (Figure 18) la mise en place du port dans sa configuration actuelle pour ce qui est des ouvrages côtiers, et notamment des digues principales au nord et au sud (la partie intérieure de port subira encore quelques agrandissements). Les travaux ont coupé le cordon sableux du fait du creusement de la darse portuaire, et le transport sédimentaire est stoppé au niveau de la passe de la ravine Saint-Gilles. La ravine est quant à elle déjà dissociée du port par une digue qui remonte le long du cours d'eau. Les dimensions des deux principaux ouvrages portuaires sont les suivantes :

- 161 m de linéaire d'ouvrage pour la digue sud (dont un total de 115 m en *cross-shore* et 110 m en *long-shore*) ;
- 90 m de linéaire d'ouvrage pour la digue nord (dont 85 m en *cross-shore* sur 9 m en *long-shore*).



Figure 18 : Situation du port de Saint-Gilles en 1978 (à gauche) et 2012 (à droite) – source ©IGN

L'analyse des différents traits de côte de 1978, 1989, 1997, 2003, 2008 et 2012 montre plusieurs tendances assez nettes.

Tout d'abord, le secteur sud du port (plage des Brisants), est en accrétion sur les 33 années étudiées. DSAS fait état d'un gain de 0,2 m/an à proximité sud de l'ouvrage, et jusqu'à 0,54 m/an à environ 550 m de la digue sud. Au total, on constate une accumulation sur une longueur de trait de côte de près de 900 m au sud de l'ouvrage, avec une moyenne d'évolution à 0,26 m/an.

Le secteur nord connaît quant à lui une évolution dissociée. D'une part, la plage des Roches Noires connaît une tendance nettement à l'érosion avec un maximum de 1 m de recul par an. Le secteur du nord de la digue au bout de l'esplanade des Roches Noires connaît un recul moyen de 0,6 m/an. Le linéaire total concerné par cette érosion s'étend sur environ 1km avec une diminution de l'érosion au nord et un recul moyen de 0,25 m/an sur l'ensemble de la zone.

Au-delà de ce point d'inflexion situé à 1km au nord des ouvrages, la dynamique est beaucoup moins marquée avec des fluctuations du trait de côte suivant les années d'observation.

Comparaison des dynamiques d'évolution

Sur la partie sud du port, si l'on compare les tendances antérieure et postérieure à la mise en place de la digue sud, il est possible de faire deux constats principaux :

- La tendance est toujours à l'accrétion, cependant le rythme d'accumulation de la plage a évolué, passant de 0,82 m/an sur la période 1950-1966 à 0,26 m/an sur la période 1978-2011 sur les 900 m linéaire de plage situés au sud du port.
- Par ailleurs, la longueur de côte affectée par cette dynamique s'est considérablement allongée, passant de 450 m à 900 m.

On peut supposer que le blocage du transit sédimentaire occasionné par le premier ouvrage antérieur à la digue sud, a constitué un obstacle vis-à-vis du transit. Ce dernier a engendré une réponse immédiate du système, générant une accrétion rapide contre l'ouvrage en question, sur une distance limitée à l'amont-dérive de cet ouvrage, du fait de sa rapide saturation.

La mise en place de l'actuelle digue du port de Saint-Gilles-les-Bains a confirmé cette tendance. Du fait d'un dimensionnement plus important, la réponse du système a consisté en une répartition des apports sédimentaires en provenance du sud sur un linéaire côtier plus conséquent. En lien avec l'augmentation de cette zone de dépôt, le rythme d'accrétion au mètre linéaire a diminué, ce qui n'est pas pour autant représentatif d'une diminution des apports globaux sur le secteur.

Au nord du port, on constate qu'antérieurement à la mise en place des digues, quelques échanges sédimentaires s'opéraient entre la cellule « Ravine de l'Ermitage/Ravine Saint-Gilles » et le sud de la cellule « Ravine Saint-Gilles/Cap des Aigrettes ». Ces échanges se faisaient principalement au niveau de la plage des Roches Noires, grâce à une continuité du cordon dunaire au niveau de la ravine Saint-Gilles.

Malgré les deux enrochements présents dans les années 1950/1960, les transferts sédimentaires pouvaient toujours s'opérer partiellement sur le haut de plage et de manière subaérienne, la plage étant toujours continue. La rupture de cette continuité par creusement de la darse et la mise en place des digues portuaires a généré une coupure totale des échanges entre les deux cellules. La plage des Roches Noires est aujourd'hui quasiment isolée de la plage des Brisant du point de vue hydro-sédimentaire depuis la réalisation de l'aménagement définitif du port de Saint Gilles.

Les plages situées plus au nord de la ravine Saint-Gilles ont connu un changement de dynamique entre la période 1950-1966 et la période 1978-2011. D'abord en érosion importante, ces plages sont passées à une phase plus fluctuante d'évolution, les limites de jet de rive montrant une légère accrétion alors que la limite de végétation montre plutôt une érosion et un recul du haut de plage. Une zone très localisée montre une accrétion immédiatement au sud du cap des aigrettes. Ces plages du Nord de la ravine sont alimentées par les apports sédimentaires du système récifal et par les transits sédimentaires en provenance du sud. Il se pourrait toutefois que cette analyse soit biaisée par l'impact du cyclone Denise qui a touché La Réunion quelques mois avant la campagne IGN de 1966. Ce cyclone pourrait avoir redistribué temporairement les sédiments sur cette partie du littoral.

Au final, l'infrastructure portuaire semble avoir eu pour conséquence :

- **Une accrétion au sud du port et donc au nord de la cellule « Ravine de l'Ermitage/Ravine Saint-Gilles ».**
La saturation en sédiments actuelle de la digue sud du port de Saint-Gilles amène à penser que les transits sédimentaires qui pourraient toujours se produire aux pieds des ouvrages portuaires transportent les flux vers des profondeurs trop importantes pour être remobilisés au niveau de la plage des Roches noires.

- **Un arrêt de l'approvisionnement de la plage des Roches Noires, et donc une accélération de l'érosion sur ce secteur.**

3.3.2. Port de Saint-Leu

Le port de Saint-Leu est situé au sein du lagon. De nombreuses ravines délimitent des secteurs de plages qui ont des dynamiques sédimentaires propres.

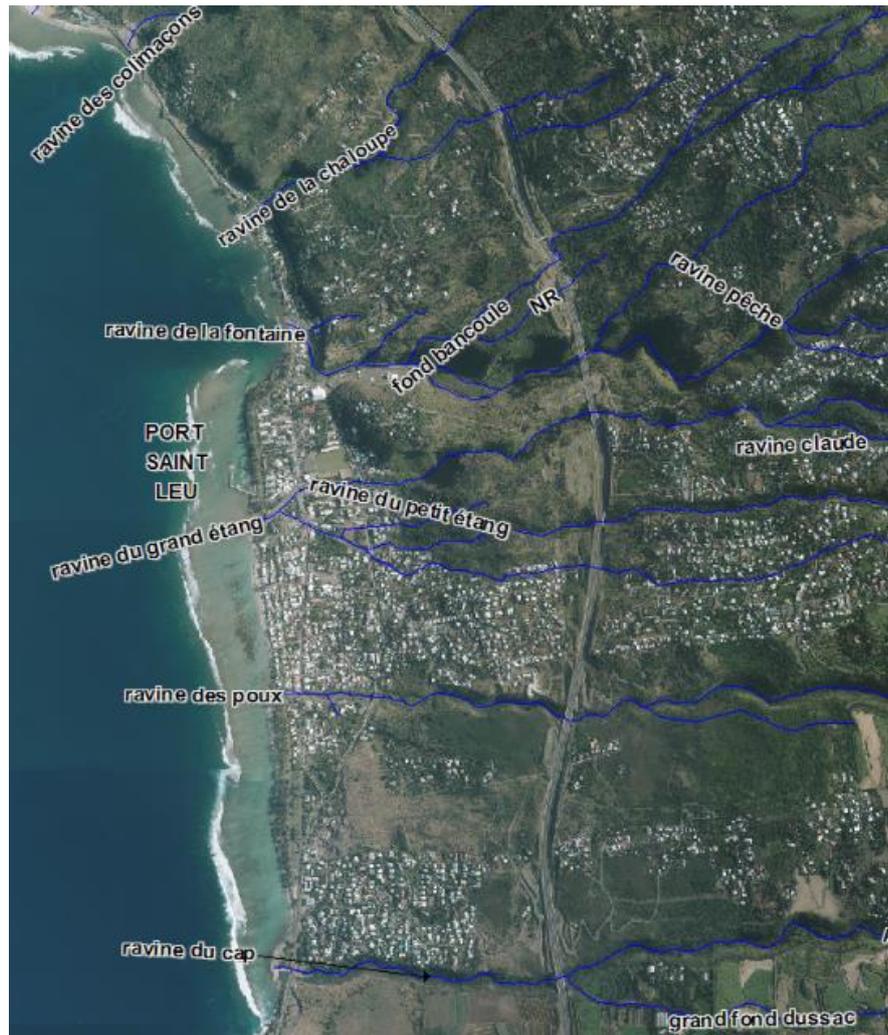


Figure 19 : Localisation Port de Saint-Leu et les ravines (Orthophotographie IGN 2012)

Tendance avant la mise en place du port

La commune de Saint-Leu a connu une évolution particulièrement marquée de son littoral depuis 1950. Comme à Saint-Gilles-les-Bains, le sens du transit se fait majoritairement du sud vers le nord, la commune de Saint-Leu étant soumise au même régime de houle que celle de Saint-Paul. L'installation du port de plaisance a eu lieu, d'après les photographies aériennes, entre 1966 et 1978, soit sur la même période que le port de Saint-Gilles. Une première digue

apparaît en 1966 et en 1973 l'infrastructure maritime semble en partie terminée. Sur la photo aérienne de 1978, les premières embarcations apparaissent.

En 1950 (Figure 20), le littoral de Saint-Leu était peu urbanisé, avec des bâtiments espacés. Une large plage naturelle (entre 30 à 50 m) est en place au nord de l'exutoire des ravines du Petit et du Grand Etang, au sud de l'actuel port. Au sud de la ravine (au niveau de l'actuelle plage communale), on observe une densité de bâti un peu plus importante et plus proche du rivage. De nombreux bâtiments sont par ailleurs situés à une dizaine de mètres de l'eau.



Figure 20 : Situation du port de Saint-Leu en 1950 (à gauche) et 1966 (à droite) – source ©IGN

En termes de tendance érosive, on observe deux dynamiques dissociées. Le tronçon nord, de l'exutoire des ravines du Petit et du Grand Etang à celui de la ravine de la Chaloupe, connaît une accrétion très nette entre 1950 et 1966, ce qui est corrélé avec le bon état du stock sédimentaire observé sur les photographies aériennes. L'analyse DSAS fait état d'une accrétion moyenne de 0,13 m/an sur l'ensemble de ce secteur, avec un maximum à 1,28 m/an au niveau de la passe nord du système récifal, face à l'actuelle école de surf.

A contrario, l'analyse du secteur sud permet de constater une tendance à l'érosion très marquée avec un recul moyen de 0,34 m/an sur un linéaire de 700m jusqu'à la ravine des Poux et de 0,39 m/an en moyenne sur 1,7km jusqu'à la ravine du Cap, à l'extrême sud des plages coralliennes.

Tendance après la mise en place du port

Le port de Saint-Leu a donc été installé entre les années 1966 et 1978 dans sa configuration actuelle, à savoir :

- Une digue principale au Sud, d'une longueur totale de 190 m (130 m en *long-shore* sur 95 m en *cross-shore*) ;
- Un épi secondaire au Nord de l'installation portuaire d'une longueur de 40 m en *cross-shore*.

Par ailleurs, on peut constater sur l'image de 1978 (Figure 21) que le trait de côte a été fixé sur un linéaire de près de 400m au nord du port, entre le port et la passe, avec la mise en place d'une promenade sur le front de mer. Cet aménagement est protégé par un talus en enrochement qui fige la position du trait de côte et entraîne la disparition de la plage.



Figure 21 : Situation du port de Saint-Leu en 1978 (à gauche) et 2012 (à droite) – source ©IGN

Par ailleurs, parallèlement à l'installation du port, on remarque la mise en place de deux ouvrages en enrochements au sud de l'exutoire des ravines du Petit et du Grand Etang, et donc au nord du secteur en érosion. Ces deux ouvrages ont les caractéristiques suivantes :

- Un épi de 35 m de long (*cross-shore*) au niveau de l'exutoire en rive gauche;
- Un enrochement de 85 m de long (*long-shore*), positionné à 120 m au sud du premier ouvrage, face à des résidences de particuliers.

Troisième évolution majeure, l'exutoire des ravines principales de Saint-Leu (ravine des Poux, ravine du Petit et du Grand-Etang, ravine de la Fontaine et ravine de la Chaloupe), ont été canalisées et endiguées au niveau de l'interface littorale. On constate par ailleurs une urbanisation des anciens cônes de déjection de ces ravines, sur l'*Estran* supérieur (Figure 22).



Figure 22 : Artificialisation des embouchures de ravine sur le littoral de Saint-Leu en 2012 – a : ravine de la Chaloupe ; b : ravine de la Fontaine ; c : ravine du Petit et du Grand-Etang ; d : ravine des Poux, - fond orthophoto ©IGN 2012

Du point de vue des dynamiques d'évolution depuis 1978, on observe au sud du port une érosion de l'ordre de 0,12 m/an en moyenne jusqu'à la ravine des Poux et de 0,16 m/an jusqu'à la ravine du Cap.

Au nord, du fait de la mise en place de la promenade et de sa digue de protection, la position du trait de côte reste stable sur environ 400 m. Pour autant la réalisation de cet ouvrage a entraîné la disparition quasi-totale du cordon sédimentaire préexistant. Cette tendance est par ailleurs confirmée au nord de la promenade, avec un recul moyen de 0,46 m/an entre les ravines de la Fontaine et de la Chaloupe.

Comparaison des dynamiques d'évolution

Entre 1978 et 2012, tous ces nouveaux aménagements vont entraîner une modification de la dynamique sédimentaire.

Au sud du port, suite à la réalisation de l'aménagement portuaire, on constate que la dynamique de recul se poursuit mais semble cependant ralentie, avec même quelques micro-secteurs en accrétion au niveau de la ravine des Poux, à près d'un kilomètre de la digue sud du port de plaisance.

Le blocage du transit sédimentaire se ressent également sur le littoral situé au nord du port avec une dynamique qui s'est inversée suite à la réalisation des ouvrages portuaires. On constate en effet que ce secteur bénéficiaire sur la période 1950-1966, est devenu largement déficitaire suite à la construction des ouvrages et ce jusqu'à la ravine de la Chaloupe.

3.3.3. Port de Saint-Pierre

Le port de Saint-Pierre possède la particularité d'être le premier port réalisé à La Réunion. Par conséquent, étant déjà installé avant la date de la première campagne IGN disponible, il a été impossible de caractériser une dynamique pré/post ouvrage, comme cela a pu être le cas pour les ports de Saint-Gilles ou de Saint-Leu. Une étude diachronique sur l'ensemble de la période 1950-2012 a cependant été menée afin de comprendre les dynamiques sur l'ensemble de la période.

Les travaux du port ont commencé dès 1854 et se sont achevés en 1882. Le port avait alors déjà ses dimensions actuelles, étant constitué :

- D'une digue Ouest délimitant la darse de 750 m de linéaire, dont 340 m en *long-shore* et 260 m en *cross-shore* ;
- D'un épi Est de 240 m en *cross-shore*, qui ferme le lagon au sud et permet aux bateaux un accès vers le large.

Cet ouvrage est implanté au niveau d'une passe, à l'exutoire de la rivière d'Abord. Précisons que les échanges sédimentaires du secteur se font en majorité de l'ouest vers l'est, Saint-Pierre est soumis au régime de houles australes dont l'orientation peut varier dans le cadran Sud à Sud-Ouest. Le site peut également être atteint par les houles d'alizés, mais celles-ci n'ont généralement pas suffisamment d'énergie pour franchir le platier récifal et atteindre la *dépression d'arrière-récif*. Elles ont donc peu d'influence sur le transit sédimentaire. Seules les houles cycloniques associées à un cyclone passant par l'Est de La Réunion (de type Hollanda) sont à même d'inverser le sens des houles dominantes, et donc le transit associé.



Figure 23 : Littoral de Saint-Pierre en 1950 (en haut) et 1966 (en bas)



Figure 24 : Littoral de Saint-Pierre en 1978 (en haut) et 2012 (en bas)

L'analyse de l'évolution des positions des traits de côte historiques nous permet de caractériser les dynamiques sur les 60 dernières années. De l'ouest vers l'est, on observe une alternance d'accrétion et d'érosion :

- Au niveau de la plage de ravine Blanche, sur la période 1950-2012, on caractérise une érosion de 0,14 m/an en moyenne sur la moitié ouest de la plage et sur un linéaire de 250 m. A contrario, la partie est de cette même plage a connu dans le même temps une accrétion de 0.14 m/an en moyenne. Il semble donc en première approche qu'il existe un transfert des sédiments vers l'est de cette plage.
- Au niveau du quartier de la Gendarmerie, on constate une érosion assez importante, avec un recul moyen de 0,17 m/an sur la période 1950-2012. En 1950, une plage d'une

vingtaine de mètres était présente sur ce secteur. Aujourd'hui, celle-ci a totalement disparue, et la partie basse des murs de protection des habitations est immergée constamment. On peut toutefois noter que deux paramètres ont probablement accentué ce phénomène :

- Ce secteur a fait l'objet d'une urbanisation importante et les images aériennes permettent de constater la présence d'un îlot urbanisé clairement avancé vers la mer par rapport aux secteurs situés plus à l'ouest au niveau de la plage de ravine blanche. Cette importante anthropisation de la plage a probablement réduit sa capacité de résilience
 - Ce secteur est situé au droit d'un affaissement topographique du platier récifal qui permet à la houle de pénétrer plus facilement jusque dans la *DAR*. Cette configuration expose cette zone à un niveau d'énergie des houles plus important que les secteurs limitrophes.
- Sur la plage du centre-ville, directement accolée à la digue ouest du Port, on remarque une certaine stabilité du trait de côte. Sur les 500 m de linéaire de cette plage, l'analyse DSAS montre un équilibre presque parfait de la position du trait de côte (recul de 0,001 m/an) avec quelques micro-secteurs en accrétion. Le maintien du stock sédimentaire peut éventuellement être attribué à la digue qui aurait tendance à retenir le sable, cet ouvrage transversal bloquant en effet les échanges entre l'ouest et l'est de la zone.
- Le petit secteur récifal de Terre-Sainte ne montre quant à lui aucune évolution sur la période définie, étant principalement constitué de côte rocheuse basaltique.

L'impact de l'implantation du port de Saint-Pierre est difficile à observer et mesurer puisqu'aucune image aérienne n'est disponible avant sa réalisation. Pour autant, on peut noter que son implantation s'est réalisée dans la partie la plus en aval de la zone récifale par rapport au transport sédimentaire dominant du site dirigé vers l'est. En conséquence, les ouvrages portuaires ont un effet de blocage des sédiments sur la partie ouest du port. L'analyse effectuée montre par ailleurs que la petite plage de l'est ne semble pas montrer d'érosion significative.

4. Analyse des tendances des plages récifales (chapitre rédigé par le LGSR – Université de La Réunion)

4.1. Bref historique des sites suivis et des méthodes employées

Depuis 1991, le Laboratoire Géosciences Réunion a mis en place un suivi de l'évolution topographique des plages coralliennes à travers la réalisation de levés de profils de plage.

A l'origine, les études devaient répondre à une demande de l'ancienne Cellule Locale de l'Environnement (CLOE) concernant le nettoyage des plages à intérêts touristiques (Troadec, 1994).

La méthode choisie de levés, dite du « topomètre », basée sur une acquisition de dénivelés en fonction d'un pas constant le long d'un profil fixe, a été définie au début des années 90 par le LGSR. Elle devait répondre à des problématiques spécifiques de recherche avec pour objectif principal de détecter la réponse morpho-sédimentaire des plages face aux forçages dynamiques naturels et anthropiques. Cela a donc nécessité des interventions rapides et répétées sur des linéaires discontinus de côte, d'accès pas toujours aisé et en l'absence de géo-référencements bien établis à l'époque.

L'usage du topomètre a permis d'enregistrer des observations de terrain selon un rythme défini ou à la demande. Ces types de données manquent bien souvent dans des opérations de suivi des littoraux où le caractère « pointu » des techniques employées rend plus complexe leur usage (coût, mise en œuvre et exploitation selon des rythmes semblables).

Ce suivi, reconduit au fil des ans, a donc contribué à une meilleure connaissance de la fonctionnalité des estrans par la prise en compte de leurs évolutions morphologiques successives dans le court terme.

Au total, **40 profils différents** ont été suivis de façon plus ou moins régulière **sur les plages coralliennes comprises entre le Cap Champagne au nord et Grand Anse au sud** (Figure 25).

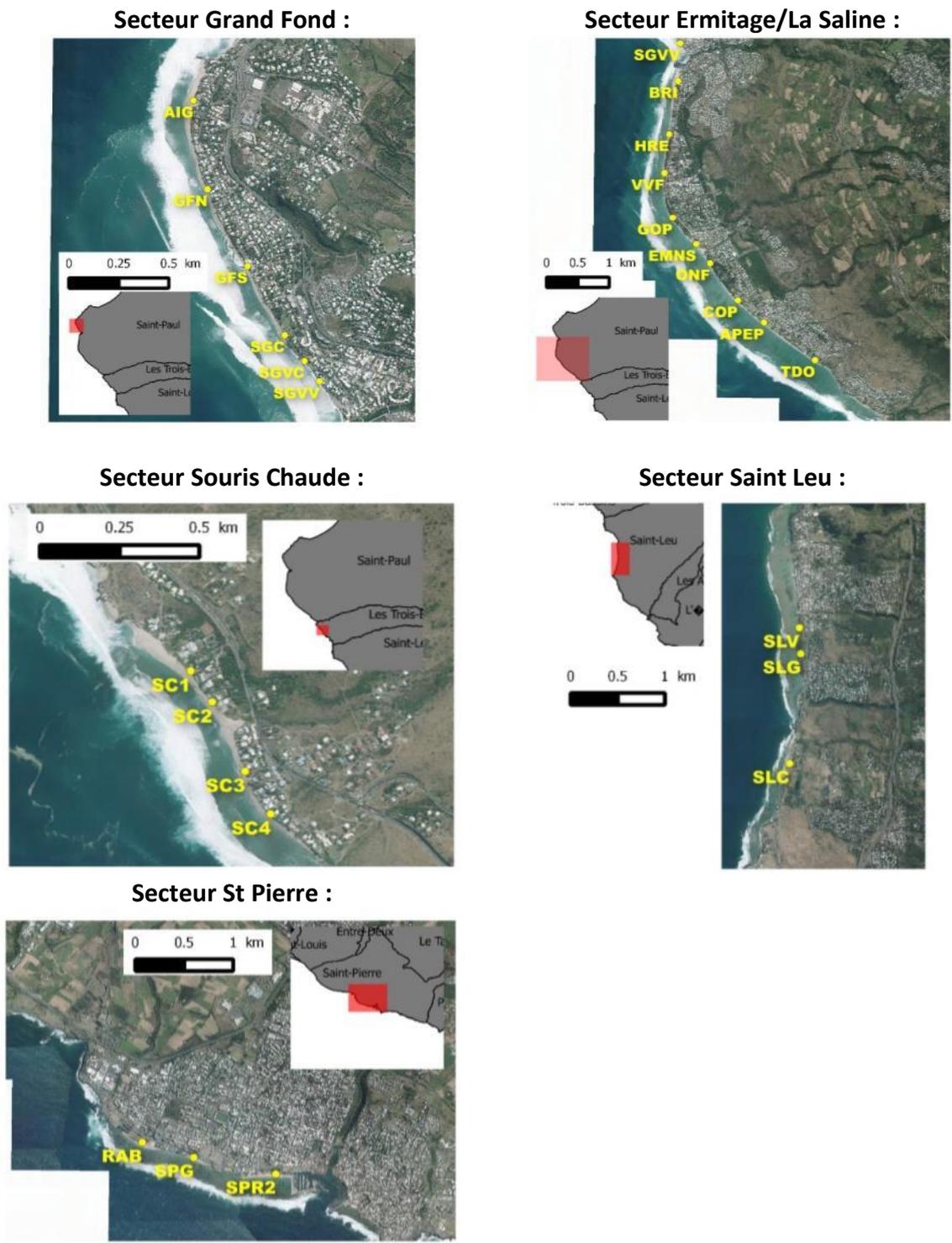


Figure 25 : Localisation des profils suivis par le Laboratoire Géosciences Réunion depuis 1991

Les levés devaient être assurés au minimum deux fois par an à raison d'un levé par saison. Cependant, depuis 2004, la régularité de ce suivi s'est dégradée. On ne compte en effet qu'un levé en 2004, en 2005 et un levé partiel en 2006, puis les levés ont cessé jusqu'en 2010 où une campagne de mesure a été menée dans le cadre d'un stage de Master 2.

4.2. Méthode de suivi des profils du LGSR

4.2.1. Description de l'appareil de mesure

La méthode employée actuellement se base sur l'utilisation d'un instrument de mesure de dénivélé conçu par R. Troadec dans le cadre de ce suivi (Figure 26). L'instrument utilisé depuis 1998 se compose de deux tiges, l'une fixe et l'une coulissante, distantes de un mètre et reliées par des barres horizontales. Le tout est en aluminium afin de garantir solidité et légèreté à l'instrument. La tige coulissante est graduée et permet la lecture du dénivélé. Un niveau à bulle fixé sur la barre supérieure permet de garantir l'horizontalité de l'instrument lors de l'acquisition de la mesure. A la base des montants, des patinettes plates et souples sont fixées afin d'éviter l'enfoncement de l'appareil dans le sable. La méthode permet donc d'acquérir une mesure de dénivélé relatif tous les mètres. On retiendra cependant que cet appareil n'est utilisé que depuis 1998 ; les mesures antérieures ont été réalisées par des visées successives entre deux jalons gradués libres et le pas de mesure était de 1,5m.

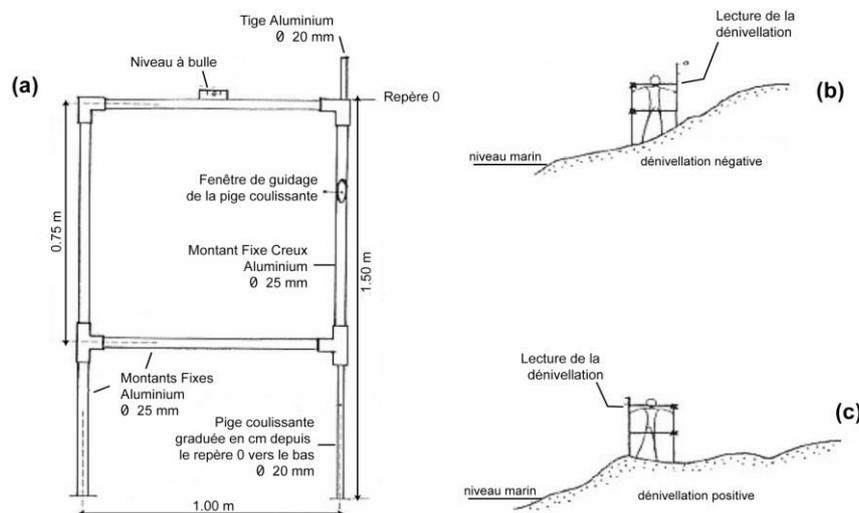


Figure 26 : Principe de mesure des profils de plage, (a) description de l'appareil de mesure, (b) principe de relevé (Source: Troadec 2002)

Protocole de mesure et d'analyse

Les mesures sont effectuées à partir d'un point de référence (PR) représentant la tête du profil. Ce point, matérialisé par une marque ou un clou, est généralement situé en haut de plage sur un repère considéré comme fixe (clôture, arbre, rocher en place...). A chaque levé, la hauteur entre le PR et le sol est mesurée, puis les mesures se font en suivant une direction connue (azimut) qui à l'origine est choisie perpendiculaire au linéaire de plage.

Les données sont ensuite numérisées puis cumulées. Il est alors possible de travailler dans un système relatif ou de rattacher les données à un référentiel grâce aux coordonnées XYZ des PR dans un référentiel planimétrique et altimétrique. Les données ont pu être géo-référencées verticalement grâce aux coordonnées des PR acquises en 2002 (Villeneuve, 2002) et en 2012 pour certains par GPS différentiel. Il existe cependant un manque de précision sur les coordonnées de 2002.

Discussion sur la précision de la méthode

En 2012, l'évaluation de la méthode utilisée par le LGSR a montré une tendance des profils réalisés au topomètre à s'écarter du profil de référence (réalisés au DGPS). Les écarts observés augmentent avec la distance au PR et peuvent être de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètre en bas de profil.

Cette déviation a été constatée par d'autres études utilisant une méthode similaire (Emery, 1961 ; Delgado & Loyd, 2004, 2009 ; Puleo et al., 2008) et provient de la propagation des erreurs ponctuelles sur chaque mesure lors du cumul des dénivelés relatifs. Ces erreurs peuvent être liés à l'appareil de mesure (calibrage du niveau à bulle, modifications de l'appareil...), à l'opérateur (incertitudes de lecture des valeurs, pointage de l'azimut...)... Ces déviations n'affectent pas la morphologie des profils de plage et permettent une bonne restitution des structures supérieures au pas de mesure. Cependant, il n'existe à l'heure actuelle aucune quantification précise de la marge d'erreur.

La fréquentation importante de la frange littorale, l'urbanisation ainsi que la configuration des sites suivis ont provoqué des variations des PR entraînant une perte dans la continuité des mesures.

On réalisera cependant que ces déviations n'affectent que très peu la morphologie d'ensemble de chaque profil de plage et que des appréciations comparatives se limitant à l'évolution des morphologies restent pertinentes en particulier pour définir et reconnaître les morphotypes.

On retiendra donc que le topomètre n'offre pas une restitution précise de l'altimétrie des points relevés. Aussi l'incertitude cumulative de points en points doit être prudemment considérée lors du calcul de bilans volumétriques par superposition de profils successifs.

Namikas et al., (2007) ont réévalué la précision de la méthode Delgado & Loyd (2004) et obtiennent des rapports de 0,91 à 0,99 entre l'élévation donnée par la méthode Delgado & Loyd (instrument similaire au topomètre) et l'élévation donnée par un théodolite. En tenant compte de cette précision, ils estiment la marge d'erreur sur les bilans volumiques à au moins 9% en comparant les mesures réalisées avec l'instrument de Delgado & Loyd. Cependant, le pourcentage d'erreur qu'ils obtiennent est calculé en considérant une erreur similaire sur chaque point. Or à notre niveau, il est constaté que l'erreur est fonction de la distance. Ce même constat avait été fait par Emery (1961).

On rappellera qu'en dépit de ses limites, la méthode a été exploitée sur d'autres littoraux meubles des îles de l'Océan indien occidental (Anjouan, Mohéli, Mayotte, Tromelin et Glorieuses) :

- Cette méthode du fait de ses particularités s'adapte aux conditions de ces terrains et des objectifs en termes de comparaisons relatives des évolutions morphologiques et de dynamique littorale.
- En raison de sa simplicité, elle peut être mise en œuvre par des non spécialistes, ce qui présente l'avantage de pouvoir multiplier les mesures et de contribuer ainsi à enrichir des bases de données dans un contexte de vulnérabilité de ces littoraux insulaires face à la pression anthropique et aux phénomènes paroxysmaux relatifs au changement climatique annoncé.

Les profils retenus pour l'analyse

Ils sont au nombre de **25** dont les levés s'étalent sur une période d'exploitation globale de 1991 à 2010 pour l'ensemble des profils mais à des dates variables pour certains.

N'ont été retenus que ceux dont l'analyse a montré qu'ils répondaient à des critères de fiabilité suffisante, concernant en particulier le respect du protocole nécessaire aux levés topographiques, afin de procéder ainsi à des analyses comparatives.

L'ensemble des profils est présenté dans l'Annexe 3. Les résultats de l'analyse sont décrits dans le chapitre 4.3. De plus un bilan volumique sur les profils suivis par le LGSR est présenté en Annexe 4.

4.3. Analyse des résultats

radiale	long approx actuelle (m)	départ du profil	position point départ	caractéristique zone			observations
				urbanisation	veg ramp haut plage	beach rock	
AIG	35-40	structure anthropique		x			Profil à tendance convexe situé en aval d'un transit dominant sud-nord. Caractérisé par la présence d'une berme traduisant un engraissement. Les données historiques montrent une progradation d'une dizaine de mètres en 1992 et 2012. Profil situé à proximité d'une embouchure de ravine dont l'écoulement et la topographie induits à l'embouchure influencent la dynamique de la radiale.
GFN	15-20	structure anthropique		x	x	x	Secteur de plage fortement contraint en arrière par l'urbanisation. Malgré les changements du point de référence, l'ensemble des profils de 1992 à 1994 ont montré une forte tendance à l'érosion dans ce secteur. Pas de changement significatif du profil depuis 2000 mais on observe une tendance au redressement autour de bilans sédimentaires relativement équilibrés dans leur alternance.
GFS	20-25	structure anthropique		x	x	x	Secteur de plage fortement contraint en arrière par l'urbanisation et pouvant montrer des variations conséquentes des bilans sédimentaires. Pas de changement significatif du profil depuis 2000 mais maintien du lissage avec tendance à la concavité et au redressement du profil.
SGC	30	filao			x	x	Jusqu'en 2005, ce profil situé en limite nord d'une zone urbanisée mais disposant d'une partie de son <i>arrière plage</i> montre une tendance convexe. On observe une perte progressive de sédiments sur l' <i>Estran</i> inférieur et l'apparition d'un talus à environ 5 m du PR entre 2005 et 2010. Le maintien de bilans sédimentaires négatifs confirme cette évolution.
SGVC	15	structure anthropique		x		x	Les données, dans ce secteur très contraint, montrent l'évolution d'un profil à tendance convexe en 2000 vers un profil concave en 2012 et une perte importante de sédiments, confirmés par des bilans sédimentaires négatifs.

SGVV	15-20	structure anthropique		x		x	Les données, sur ce secteur également très contraint, montrent la transition d'un profil à tendance convexe en 1992 vers un profil concave en 2012 et un budget sédimentaire très négatif.
BRI	70-80	structure anthropique	haut de plage	x		x	Profil à tendance convexe caractérisé par la présence d'une berme traduisant un engraissement dû à sa position aval dans un transit sud-nord. Les données historiques montrent une progradation d'une dizaine de mètres entre 1992 et 2012. Tendance observée également sur l'analyse des pentes.
HRE	20	structure anthropique	<i>Estran</i> supérieur	x		x	Diverses petites variations de PR compliquent l'interprétation des données de ce profil situé à la frontière d'une zone à haute plage urbanisée et d'une zone à <i>arrière plage</i> végétalisée. Le morphotype "plat", les faibles variations volumétriques et le maintien d'une certaine compensation du budget sédimentaire traduisent le caractère transitionnel de ce secteur de plage encore nourri par des apports sédimentaires.
VVF	35-40	filao	haut de plage			x	Radiale qui montre le passage d'un profil convexe à plat entre 1992 et 2010. Sur la période 1992 à 1994, le profil montre une tendance convexe. Sur la période 1999 à 2003, <i>Estran</i> plat, pas de variation significative du profil mais un engraissement apparent de l' <i>Estran</i> inférieur. De 2003 à 2006, recul de l' <i>Estran</i> inférieur. Entre 2006 et 2010, le profil a subi une érosion marquée par le recul de la berme supérieure d'environ 3 m et une perte significative de sédiments sur les 15 premiers mètres, bien que l' <i>Estran</i> inférieur n'ait pas reculé. L'évolution des bilans sédimentaires confirment la tendance érosive.
GOP	30-35	filao	haut de plage				Profil plat caractérisé par la présence d'un talus d'érosion à environ 10 m du PR. Pas de variation significative du profil mais un recul du talus de 3 m entre 2006 et 2010. Pas de présence d'ouvrage construit dans ce secteur mais interactions très fortes entre les pieds de filaos et les déferlements.

MNS	30	structure anthropique	<i>Estran</i> supérieur				Profil plat à tendance concave sans variation significative depuis près de 10 ans. La présence de nombreux filaos affouillés sur plus de 2 m dans ce secteur témoigne d'une érosion importante des hauts de plage. A dire d'expert (cf. Troadec), la phase érosive de ce secteur est antérieure au début du suivi et remonte aux années 70 à 80. Petite incertitude sur l'altitude précise du PR.
ONF	30-35	structure anthropique	<i>Estran</i> supérieur	x			Profil plat, limité à l'estran; en limite sud d'une <i>arrière plage</i> emmurée. Pas de variation morphologique significative depuis 1992 mais des fluctuations du budget sédimentaire autour d'un relatif équilibre, liées au caractère transitionnel du secteur eu égard au transfert littoral.
COP	35	structure anthropique	haut de plage	x	x		Profil plat a tendance convexe. Pas de changement significatif. Tendance à l'engraissement du haut de plage végétalisé par une végétation rampante et arbustive (patates à Durand, veloutiers).
APEP	25-30	structure anthropique	haut de plage	x	x		Morphotypes plats à concaves. Peu de changements significatifs sauf entre 2006 et 2010 avec une érosion marquée du haut de plage (disparition de la berme par action anthropique).
TDO	25-30	filao	<i>Estran</i> supérieur		x		Profil plat. Pas de variation significative du profil. Doute sur l'altitude précise du PR (haute plage souvent remaniée par actions anthropiques).
SC1	25-30	structure anthropique	haut de plage	x	x	x	Pas de variation forte observée en topographie. Sur la période 1998 à 2003; on observe la présence d'une berme en haute-plage qui paraît stable. L' <i>Estran</i> montre une tendance concave. Le 2eme jeu de profil (2003-2005), suite à un décalage du PR en haute plage, montre une morphologie différente avec un <i>Estran</i> plus rectiligne et une présence de 2 petites bermes. La tendance à l'accrétion se confirme.
SC2	20-25	structure anthropique	<i>Estran</i> supérieur	x		x	Profil à tendance rectiligne en pied de mur. Il n'a pas subi de changement significatif depuis 1998; toutefois la présence d'un beach-rock, présent dès les premières observations (années 70) en basse-plage, témoigne d'une érosion ancienne (antérieure aux premières études de ce secteur). Les fluctuations des bilans sédimentaires s'équilibrent.

SC3	15	structure anthropique	<i>Estran</i> supérieur	x		x	Profil plat en pied de mur, n'ayant pas subi de changement significatif entre 98 et 2010. La présence d'un beach-rock rendu visible dans les années 80 à 90 et situé en zone lagunaire, témoigne d'une érosion marquée de ce secteur à cette époque. Les fluctuations des bilans sédimentaires restent faibles.
SC4	20-25	structure anthropique	<i>Estran</i> supérieur	x	x		<i>Estran</i> à profil plat devant une parcelle privée. Les variations les plus importantes s'observent au niveau du haut de plage qui a subi beaucoup d'empiètements anthropiques. Cela pourrait expliquer l'apparition de l'accumulation de sable au pied de la clôture entre janvier et octobre 2000 (travaux de décaissement sableux dans la parcelle).
SLV							De nombreux changements de PR compliquent l'interprétation des données mais les profils hérités sont restés voisins dans le linéaire. On notera cependant le passage d'un morphotype convexe curviligne à un convexe simple; la forte anthropisation des hauts de plage (équipements, fréquentation...) pouvant expliquer l'arasement de l'ourlet dunaire. Une tendance érosive est installée (bilans sédimentaires négatifs).
SLG							Dans les mêmes conditions que précédemment, des changements de PR ont été opérés et compliquent aussi l'interprétation des données. On remarquera cependant la tendance au maintien d'un morphotype convexe modéré et l'accentuation d'une contre-pente sur une <i>arrière plage</i> très fréquentée; ce qui peut expliquer une accrétion plus modérée qu'en 2002.
SLC			haut de plage		x	x	Secteur ayant conservé un système dunaire végétalisé en appui sur un muret longeant une route nationale. Depuis les premières acquisitions topographiques le profil de type convexe modéré montre peu de changements significatifs avec toutefois une tendance à l'accrétion qui semble s'amortir. La présence de beach rock en pied de plage témoigne d'une très ancienne perte de sédiments; les différentes strates de beach-rock étant datées à plus de 2000 ans B.P.

RAB	45-50				x		Cette plage exposée aux vecteurs dynamiques saisonniers est située en aval-transit, les fluctuations révèlent une plasticité sédimentaire favorisant le phénomène de résilience et le maintien d'un budget sédimentaire positif.
SPG	30-35	structure anthropique			x		Pas de changement significatif sur ce secteur de plage très fréquenté où des glissements chroniques de sables issus de l' <i>Estran</i> supérieur expliquent la tendance continue vers un budget sédimentaire négatif.
SPMNS	25-30	structure anthropique					Pas de changement significatif d'un morphotype de type "plat"; cela d'autant plus que cette plage urbaine (réaménagée au milieu des années 2000) était déjà fréquemment entretenue autour d'un profil moyen pour répondre aux attentes d'une forte fréquentation à l'origine d'une tendance au glissement des sédiments vers la partie basse de l'estran.

Tableau 5 : Synthèse des analyses sur les profils du LGSR

5. Conclusion

Le travail réalisé dans le cadre de cette convention s'inscrit dans la suite du premier travail de référencement des ouvrages littoraux réalisés dans le cadre du Plan POLMAR à La Réunion. 435 ouvrages ont été visités, référencés, géo-localisés, décrits en termes géométrique et en termes d'implantation sur le *cordon littoral*. L'approche mise en œuvre a permis de hiérarchiser et d'évaluer l'impact potentiel de chacun de ces ouvrages sur la dynamique hydro-sédimentaire dans leur environnement proche en fonction de tous les paramètres descriptifs recueillis. Pour autant, il convient de noter que l'évaluation quantifiée de l'impact de ces ouvrages reste un exercice difficile compte tenu du manque de données précises et d'une profondeur historique faible des bases de données existantes.

La base de données ainsi créée a également permis d'identifier les différents types d'ouvrages, leur répartition géographique ainsi que leur positionnement sur le *cordon littoral* mais également de mettre en perspective l'évolution historique de l'anthropisation des différents compartiments des cordons littoraux sur le secteur d'étude. En effet, les dates de réalisation des ouvrages ont pu être déterminées grâce à une analyse diachronique des images aériennes historiques permettant de remonter jusqu'en 1950.

La majorité des ouvrages semblent avoir un impact fort sur la dynamique littorale tout en étant répartis de manière hétérogène le long du linéaire côtier. Les communes de Saint Leu, l'Etang-Salé et Saint-Pierre présentent des tronçons kilométriques particulièrement occupés par ces ouvrages.

Pour les aménagements portuaires, l'approche méthodologique déployée a permis une analyse plus objective de l'impact des ouvrages sur les dynamiques littorales. Des comparaisons pré-post aménagements ont été réalisées et ont permis d'évaluer et de quantifier les modifications qu'a entraînées la réalisation des ouvrages sur les dynamiques du trait de côte dans les champs proche et lointains.

L'infrastructure du port de Saint-Gilles semble avoir eu pour conséquence :

- Une accrétion au sud du port et donc au nord de la cellule « Ravine de l'Ermitage/Ravine Saint-Gilles ».

La saturation en sédiments actuelle de la digue sud du port de Saint-Gilles amène à penser que les transits sédimentaires qui pourraient toujours se produire aux pieds des ouvrages portuaires transportent les flux vers des profondeurs trop importantes pour être remobilisés au niveau de la plage des Roches noires.
- Un arrêt de l'approvisionnement de la plage des Roches Noires, et donc une accélération de l'érosion sur ce secteur.

Pour le port de Saint-Leu :

- Entre 1978 et 2012, tous ces nouveaux aménagements vont entraîner une modification de la dynamique sédimentaire.
- Au sud du port, suite à la réalisation de l'aménagement portuaire, on constate que la dynamique de recul se poursuit mais semble cependant ralentie, avec même quelques micro-secteurs en accrétion au niveau de la ravine des Poux, à près d'un kilomètre de la digue sud du port de plaisance.
- Le blocage du transit sédimentaire se ressent également sur le littoral situé au nord du port avec une dynamique qui s'est inversée suite à la réalisation des ouvrages portuaires. On constate en effet que ce secteur bénéficiaire sur la période 1950-1966,

est devenu largement déficitaire suite à la construction des ouvrages et ce jusqu'à la ravine de la Chaloupe.

L'impact de l'implantation du port de Saint-Pierre est difficile à observer et mesurer puisqu'aucune image aérienne n'est disponible avant sa réalisation. Pour autant, on peut noter que son implantation s'est réalisée dans la partie la plus en aval de la zone récifale par rapport au transport sédimentaire dominant du site dirigé vers l'est. En conséquence, les ouvrages portuaires ont un effet de blocage des sédiments sur la partie ouest du port. L'analyse effectuée montre par ailleurs que la petite plage de l'est ne semble pas montrer d'érosion significative.

Ce projet a également permis de réaliser une synthèse des travaux entrepris par le LGSR dans le cadre du suivi des profils des plages de l'Ouest. Sur chaque profil, l'ensemble des données inter comparables depuis les années 90 a été rassemblé, reproduit en annexe de ce rapport, et analysé.

A l'avenir, cette base de données pourrait être complétée afin de couvrir l'intégralité du littoral réunionnais. Il sera peut être également nécessaire de la mettre à jour avec une fréquence qui reste à définir, et qui pourrait être rythmée par le passage des événements énergétiques cycloniques ou de houles australes qui peuvent parfois redessiner la carte des ouvrages présents sur le littoral réunionnais.

6. Bibliographie

Chateauminois E., De La Torre Y., Le Roy S. et Pedreros R. – Collab. Druon J. (2013) – Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Littoraux des communes du Sud-Ouest de la Réunion. Rapport final. BRGM/RP-62172-FR, 69 p et 4 annexes hors-texte.

Delgado, I. et Lloyd, G. (2004) A simple low cost method for one person beach profiling. *Journal of Coastal Research*, p. 1246–1252.

Delgado-Fernandez, I. et Lloyd, G. (2009) Reply to: . Discussion of: . A Simple Low Cost Method for One-Person Beach Profiling, *Journal of Coastal Research*, 20(4), 1246–1252; *Journal of Coastal Research*, 23(5), 1337–1340. *Journal of Coastal Research*, p. 1059-1063.

Emery, K. O. (1961) A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography*, vol. 6, n°1, p. 90–93.

Himmelstoss (2009) DSAS v4 manual - USGS Woods Hole Coastal and Marine Science

Le Berre Iwan, Louze Julien, David Laurence (2012) – Atlas de sensibilité du littoral aux pollutions marines, Dispositif opérationnel ORSEC départemental de La Réunion. Annexe technique du dispositif spécifique Polmar-Terre. LETG-Brest Géomer / DEAL de La Réunion / IFREMER.

Mespouh  R., Troadec R., 1994. Suivi expérimental sur le nettoyage et la sauvegarde des plages balnéaires de la Réunion. Rapport. Conseil Régional / Conseil Général / CTR / Université de La Réunion.

Namikas, S. L., Edwards, B. L., Bitton, M. C. A., McKenna, W., Booth, J. L., Pennington, C. J. et Zhu, Y. (2007) Discussion of: Delgado, I. and Lloyd, G., 2004. A Simple Low Cost Method for One-Person Beach Profiling. *Journal of Coastal Research*, 20 (4), 1246-1252. *Journal of Coastal Research*, p. 1337–1340.

Puleo, J. A., Pearre, N. S., He, L., Schmied, L., O'Neal, M., Pietro, L. S. et Fowler, M. (2008) A single-user subaerial beach profiler.

Troadec R. ; 2002. Suivi de l'évolution des plages coralliennes de La Réunion 1998-2001. Bilan des rapports de stage d'étudiants du LSTUR : **Maréchal C., 1998 ; Fourcade J.N., 1999 ; Germain N., 1999-2000 ; Psaradellis M.A., 2000 ; partenariat de l'Association Vie Océane en 2000.** Rapport Conseil Régional /Université de La Réunion.

Troadec R., Saint-Ange F., Cordier E., Villeneuve N., 2002. Contribution à l'étude du site pilote de l'Ermitage / La Saline-les-Bains pour la compréhension de la dynamique sédimentaire des plans d'eau coralliens à la Réunion. Rapport. DIREN / BRGM / LSTUR.

7. Lexique

Arrière plage : espace situé au-delà du cordon dunaire (lorsqu'il existe) côté terre

Avant plage : Partie d'un littoral, immédiatement en dessous du niveau des basses mers.

Cordon littoral : remblai naturel, allongé en faisceaux parallèles au rivage et formé de matériaux détritiques (sables, galets) accumulés par la dérive littorale sur la partie haute d'une plage.

Cross shore : Caractérise un courant marin ou un transit sédimentaire dans une direction perpendiculaire à l'orientation de la côte.

Dépression d'arrière-récif (DAR) : En contexte de récif frangeant la dépression d'arrière-récif correspond au chenal étroit (quelques dizaines de mètres jusqu'à environ un km de large) entre formation corallienne jeune accolée et la côte non corallienne. On appelle communément «lagon», la dépression d'arrière récifale de l'Hermitage-La Saline bien que ce terme devrait être réservé aux vastes espaces immergés en arrière des récifs barrières plus anciens tels que l'on peut les rencontrer à Maurice ou Mayotte.

Dune : Accumulation de sable édiflée par un agent de transport, on distingue les *dunes* éoliennes (édifiées par le vent) des *dunes* sous-marines (édifiées par les courants ou la houle).

Estran : Zone de marnage ou zone intertidale est la partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées.

Long shore : Caractérise un courant ou un transit sédimentaire dans une direction parallèle à l'orientation de la côte :

PHMA : Plus haute mer astronomique (coef. 120)

Plage aérienne : Espace côtier situé entre les limites de haute et de basse mer, formé de sable ou de gravier (mais non de vase).

Zone de swash (ou jet de rive) : zone de flux et reflux des vagues sur la plage

Annexe 1

Description des champs de la base de données et methode de renseignement

N°		Nom du champ	Type de données	Choix multiples	Description du champ	Source
N°	N°	NuméroAuto	-	Numéro automatique attribué par Access		
1	Commune	Texte	Saint-Paul Trois-Bassins Saint-Leu Etang-Salé Saint-Pierre	Nom de la commune sur laquelle est implanté l'ouvrage		
2	Numéro de l'ouvrage	Texte	-	Numéro individuel de l'ouvrage (initiales de la commune de référence + numéro incrémentiel)		
3	Date du constat	Date/Heure	-	Date de la visite de l'ouvrage		
4	X	Texte	-	Coordonnées en X en mètres (en RGR92 - UTM40S)		
5	Y	Texte	-	Coordonnées en Y en mètres (en RGR92 - UTM40S)		
6	Altitude min	Numérique	-	Altitude minimale du TN sur l'implantation de l'ouvrage (en mètres)		Litto3D
7	Altitude max	Numérique	-	Altitude maximale du TN sur l'implantation de l'ouvrage (en mètres)		Litto3D
8	H min	Numérique	-	Hauteur minimale de l'ouvrage au dessus du TN (en mètres)		Mesure terrain
9	H max	Numérique	-	Hauteur maximale de l'ouvrage au dessus du TN (en mètres)		Mesure terrain
10	Nature	Texte	Mur Escalier Clôture Portail Batiment Pont Epi Digue Cale ...	Nature de l'ouvrage		Observation terrain
11	Fonction	Texte	Accès Délimitation de parcelle Habitation Restauration Vocation industrielle Vocation portuaire Maintien du trait de côte Protection propriété ...	Fonction de l'ouvrage		Observation terrain
12	Arrière côte	Texte	Habitation batiment public Espace public	Description de l'occupation du sol en arrière de l'ouvrage		Observation terrain
13	Constitution	Texte	Maçonnerie Béton Grillage Bois Gabion ...	Type de matériau constitutif de l'ouvrage		Observation terrain
14	Propriétaire	Texte	Privé Commune ...	Identification du propriétaire de l'ouvrage		Observation terrain
15	Gestionnaire	Texte	Privé Commune ...	Identification du gestionnaire de l'ouvrage		Observation terrain
16	Titre d'occupation DPM	Oui/Non	Oui	Autorisation ou non à occuper le domaine public maritime		Source DEAL

N°		Nom du champ	Type de données	Choix multiples	Description du champ	Source
N°	N°	NuméroAuto	-	Numéro automatique attribué par Access		
			Non			
17	Date de réalisation	Texte	-	Identification de la période durant laquelle l'ouvrage a été réalisé (par comparaison des photographies aériennes historiques)	Analyse SIG	
18	Etat général	Texte	Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon	Etat général dans lequel se trouve l'ouvrage lors de la visite de terrain	Observation terrain	
19	Commentaires	Texte	-	Commentaires associés à la visite de terrain	Observation terrain	
20	Localisation	Pièce jointe	-	Illustration permettant la localisation de l'ouvrage (ortho 2011)	Travail SIG	
21	Photo 1	Pièce jointe	-	Photographie n°1 de l'ouvrage	Observation terrain	
22	Photo 2	Pièce jointe	-	Photographie n°2 de l'ouvrage	Observation terrain	
23	Linéaire CS ZA (m)	Numérique	-	Linéaire <i>cross-shore</i> de l'ouvrage inclus dans ZA (en mètres) (cf rapport pour définition de ZA)	Travail SIG	
24	Linéaire CS ZB (m)	Numérique	-	Linéaire <i>cross-shore</i> de l'ouvrage inclus dans ZB (en mètres) (cf rapport pour définition de ZB)	Travail SIG	
25	Linéaire CS ZC (m)	Numérique	-	Linéaire <i>cross-shore</i> de l'ouvrage inclus dans ZC (en mètres) (cf rapport pour définition de ZC)	Travail SIG	
26	Linéaire CS ZD (m)	Numérique	-	Linéaire <i>cross-shore</i> de l'ouvrage inclus dans ZD (en mètres) (cf rapport pour définition de ZD)	Travail SIG	
27	Linéaire LS ZA (m)	Numérique	-	Linéaire <i>longshore</i> de l'ouvrage inclus dans ZA (en mètres) (cf rapport pour définition de ZA)	Travail SIG	
28	Linéaire LS ZB (m)	Numérique	-	Linéaire <i>longshore</i> de l'ouvrage inclus dans ZB (en mètres) (cf rapport pour définition de ZB)	Travail SIG	
29	Linéaire LS ZC (m)	Numérique	-	Linéaire <i>longshore</i> de l'ouvrage inclus dans ZC (en mètres) (cf rapport pour définition de ZC)	Travail SIG	
30	Linéaire LS ZD (m)	Numérique	-	Linéaire <i>longshore</i> de l'ouvrage inclus dans ZD (en mètres) (cf rapport pour définition de ZD)	Travail SIG	
31	Surface interception fluides - Eau (m ²)	Numérique	-	Surface d'interception de l'ouvrage vis-à-vis du courants ou du vent (en m ²) Dans l'eau cette surface sera $CSZA \times (H_{min} + H_{max}) / 2$ Sur la plage on prendra la somme des surfaces exposées des bâtiments aux vents OnShore + CrossShore	Mesure terrain	
32	Distance du TC (m)	Numérique	-	Distance minimale entre l'ouvrage et le trait de côte (limite PMMA) (en mètres)	Analyse SIG	
33	Altitude min (m)	Numérique	-	Altitude minimale du TN sur l'implantation de l'ouvrage (en mètres) - Redondance du champ pour mise en correspondance évidente avec la distance du TC	Mesure terrain	
34	Dénivelé TN (m)	Numérique	-	Ce champ doit permettre de mettre en évidence un dénivelé du terrain engendré par la présence de l'ouvrage si celui-ci est observable. On mesure alors un dénivelé du terrain naturel de part et d'autre de l'ouvrage (en mètres) (avant/arrière ou de coté)	Mesure terrain	
35	Végétalisation	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Degré de végétalisation face à l'ouvrage. Nul : aucune végétation n'est présente devant l'ouvrage Faible : des traces de végétation sont présentes mais d'une faible efficacité (piégage du sable) Modéré : La végétation présente une densité permettant un piégage du sable efficace Fort : Forte densité de végétation. Configuration optimale Très Fort : Forte densité de végétation. Un entretien est visiblement réalisé (riverain ou gestionnaire)	Observation terrain	
36	Tendance du secteur	Texte	Erosion forte Erosion modérée Erosion faible Stabilité Accrétion faible Accrétion modérée Accrétion forte	Tendance évolutive du grand secteur morphologique de l'ouvrage Notation en fonction de la vitesse d'évolution du TC.	Analyse des BDD existantes (Topo/Photos)	
37	Transport éolien	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Capacité de l'ouvrage à intercepter les sédiments transportés par le vent En première approche on propose une évaluation en fonction de la valeur de la case 31 ou [23+24+25+26]: et avec par exemple Nul : si [31] = 0m ² Faible : si $0 < [31] < 20m^2$	Observation terrain	

N°		Nom du champ	Type de données	Choix multiples	Description du champ	Source
N°	N°		NuméroAuto	-	Numéro automatique attribué par Access	
					Modéré : si $20 < [31] < 50m^2$ Fort : si $50 < [31] < 100m^2$ Très fort : si $100 < [31]$	
39	Transport longshore du <i>swash</i>	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort		Capacité de l'ouvrage à perturber le transport sédimentaire lié au transport longshore du <i>swash</i> Proposition de la règle suivante : Nul : si ouvrage est hors de ZD Faible : si ouvrage présent dans ZD Modéré : si ouvrage présent dans ZC Fort : si ouvrage présent dans ZB	Observation terrain
41	Transport longshore des courants	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort		Capacité de l'ouvrage à perturber le transport sédimentaire lié au transport longshore des courants Proposition d'une fonction proportionnelle à la case [23]: et avec par exemple ValeurMax= [Largeur de la DAR] Nul : 0 % de ValeurMax Faible : 0 à 25% de ValeurMax Modéré : 25 à 50% de ValeurMax Fort : 50 à 75% de ValeurMax Très fort : 75 à 100% de ValeurMax	Observation terrain
43	Transport <i>cross-shore</i>	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort		Capacité de l'ouvrage à perturber le transport sédimentaire lié au transport <i>cross-shore</i> Proposition de la règle suivante : Nul : si ouvrage est hors de ZD Faible : si ouvrage présent dans ZD Modéré : si ouvrage présent dans ZC Fort : si ouvrage présent dans ZB ou ZA	Observation terrain
45	Ruissellement	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort		Capacité de l'ouvrage à concentrer les eaux pluviales et à participer au ruissellement En première approche on propose une notation suivant la valeur de la case [31] : Nul : 0 si [31]=0 Faible : si $0 < [30] < 10$ Modéré : si $10 < [30] < 30$ Fort : si $30 < [30] < 50$ Très fort : si $50 < [30]$ + noter les facteurs aggravants: -Présence de gouttières de toit -Rejet devant ou en arrière -Fortes pentes au niveau du rejet -Terrain non absorbant	Observation terrain
47	Blocage morphologique	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort		Capacité de l'ouvrage à bloquer une réponse morphologique de la plage vis-à-vis des forçages marins Notation suivant la position de l'ouvrage et de son linéaire LongShore: case [27]ou[25]ou[29]ou[30]: On peut aussi prendre en considération la nature de ses fondations: l'ouvrage empeche-t-il la mobilité du sable ? Ouvrage sur piloti sur-élevé : Nul à Faible Un ouvrage posé sur le sable : Modéré à Fort Un ouvrage avec des fondations profondes : Fort à Très Fort	Observation terrain
49	Transport anthropique	Texte	Nul Faible Modéré Fort		Capacité de l'ouvrage à participer au transport sédimentaire anthropique (piétinement, activités balnéaires...) Notation suivant une évaluation de l'expert : Nul : si l'ouvrage n'entraîne aucune fréquentation supplémentaire des secteurs limitrophes Faible : si l'ouvrage entraîne une fréquentation légère "non organisée" et non commercialisée Modéré : si l'ouvrage entraîne une fréquentation "organisée" légère (buvette mais pas de terrasse) ou si l'ouvrage permet un passage préférentiel du public Fort : si l'ouvrage entraîne une fréquentation "organisée" intense (buvette et terrasse) ou si l'ouvrage entraîne un passage obligatoire du public	

N°		Nom du champ	Type de données	Choix multiples	Description du champ	Source
N°	N°	NuméroAuto	-	Numéro automatique attribué par Access		
51	Synthèse sur transferts	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Impact moyenné de l'ouvrage sur les transferts sédimentaires Pondération et intensité: Nul = 0 Faible = 1 Modéré = 2 Fort = 3 Très fort = 4 [Note globale]=Somme([ponderation]*[intensite]) et ensuite : Nul : si [NoteGlobale]=0 Faible : si 0<[NoteGlobale]<25% de [NoteMax] Modéré : si 25%<[NoteGlobale]<50% de [NoteMax] Fort : si 50%<[NoteGlobale]<75% de [NoteMax] Très fort : si 75%<[NoteGlobale]<100% de [NoteMax]		
52	Surface interception fluides - Air (m²)	Numérique	-	Surface d'interception de l'air (surface hors d'eau) par l'ouvrage (en m²)		
53	Surface de drainage (m²)	Numérique	-	Surface de l'ouvrage interceptant les eaux de pluie et participant au ruissellement (en m²)		
54	Aléa sub PPRL	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Classe d'aléa dans laquelle est situé l'ouvrage au sein du PPRL communal		SIG
55	Enjeux	Texte	Biens publics Biens privés Personnes	Type d'enjeux (biens et personnes) situés en arrière de l'ouvrage		Observation terrain
56	Distance des enjeux (m)	Numérique	-	Distance minimale séparant les enjeux et l'ouvrage (en mètres) Par exemple : distance entre la clôture et la maison		Mesure terrain
57	Imperméabilité écoulements	Texte	Nul Faible Modéré Fort	Capacité de l'ouvrage à être imperméable aux écoulements de submersion (ex : un grillage sera plus perméable qu'un mur de parpaings) Nul : ouvrage totalement perméable aux écoulements Faible : ouvrage présentant un faible obstacle hydrodynamique aux écoulements. Ceux-ci ne sont saiblement ou quasiment pas modifiés (grillage par exemple) Modéré : ouvrage présentant un obstacle hydrodynamique aux écoulements. Ceux-ci sont modifiés significativement (muret bas par exemple) Fort : ouvrage totalement imperméable aux écoulements		Observation terrain
58	Impact indirect morpho TN	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Le champ doit donner une indication sur le rôle de l'ouvrage sur une hypothétique retenue des terrains. Nul : aucune modification du TN de part et d'autre de l'ouvrage Faible : faible retenue des terrains par l'ouvrage <0.50m Modéré : retenue modérée des terrains par l'ouvrage <1.00m Fort : forte retenue des terrains >1.00m		Mesure de terrain
59	Ouvrage biotechnologique	Oui/Non	-	Précision du caractère biotechnologique ou non de l'ouvrage L'ouvrage a-t-il été conçu en intégrant des espèces végétales dans son fonctionnement ? (Exemple ouvrage du cimetière de Saint Paul)		Observation terrain
60	Végétation	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Degré de végétalisation face à l'ouvrage. Nul : aucune végétation n'est présente devant l'ouvrage Faible : des traces de végétation sont présentes mais d'une faible efficacité (piégage du sable) Modéré : La végétation présente une densité permettant un piégage du sable efficace Fort : Forte densité de végétation. Configuration optimale Très Fort : Forte densité de végétation. Un entretien est visiblement réalisé (riverain ou gestionnaire)		
61	Risque affouillement	Texte	Nul Faible Modéré Fort	Importance de la vulnérabilité de l'ouvrage au risque d'affouillement Dépend principalement de la profondeur de fondation.		Observation terrain

N°		Nom du champ	Type de données	Choix multiples	Description du champ	Source
N°	N°		NuméroAuto	-	Numéro automatique attribué par Access	
62		Risque de structuration	Texte	Nul Faible Modéré Fort	Importance de la vulnérabilité de l'ouvrage au risque de destruction Dépend de la nature et du dimensionnement de l'ouvrage	Observation terrain
63		Risque basculement	Texte	Nul Faible Modéré Fort	Importance de la vulnérabilité de l'ouvrage au risque de basculement Dépend de la géométrie, du poids de l'ouvrage et de ses appuis	Observation terrain
64		Risque d'érosion événementielle après sinistre	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Ce champ permet d'indiquer le niveau de risque du phénomène d'érosion événementielle qui pourrait survenir si l'ouvrage venait à céder: les terrains en arrière pourraient-ils être rapidement érodés? Ce risque peut notamment être important si l'ouvrage a un rôle de retenue des terrains en arrière (cf champ [58])	Observation terrain
65		Evolution du risque de submersion en arrière après sinistre	Texte	Diminution Identique Augmentation Forte augmentation	Caractérisation du niveau de protection de l'ouvrage après le sinistre de celui-ci (ex : un enrochement déstructuré constitue une protection plus efficace qu'un mur effondré)	Observation terrain
66		Incidence sur secteurs limitrophes	Texte	Nulle Diminution Aggravation	Impact de l'ouvrage sur la submersion des terrains limitrophes (aggravation ou diminution de la vulnérabilité)	Observation terrain
67		Synthèse sur submersion	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Impact général de l'ouvrage vis-à-vis de l'aléa submersion marine	
68		Impact global	Texte	Nul Faible Modéré Fort Très fort	Notation globale de l'ouvrage quant à son impact sur l'érosion et la submersion	

Annexe 2

Analyse de la qualité des images historiques

Année	Echelle de la photo	Résolution (taille des pixels)	Format	Colorimétrie	Qualité chromatique	Lisibilité (netteté, interprétation)	Qualité radiométrique (ombres, homogénéité)	Contraste/luminosité	Qualité du calage	Etat de mer au récif (estimation sur l'échelle de Douglas)
1950	1 : 21 000	40 cm	ECW	Panchromatique	-	2/5 Problème d'interprétation lié au noir et blanc	2/5 Mauvaise (raccord fréquents sur le littoral) + ombres portées	2/5 Saturation importante par endroits	2/5 Orthophoto mais gros décalages max de 7/8m dus à la précision des paramètres de calage	2-3 Belle à peu agitée
1966	1 : 8 000	40 cm	JPEG 2000	Panchromatique	-	3/5 Plus nette que 1950	4/5 Quelques ombres, pas de soucis d'homogénéité (pas de mosaïquage)	3/5 Peu de saturation, Forte luminosité et contraste un peu clair sur quelques photos	3/5 Géoréférencement manuel avec décalages locaux max d'environ 2/3m	1-2 Ridée à belle 5-6 Forte à très forte au Nord de St-Gilles - dates différentes
1978	1 : 26 000	50 cm	TIFF	Couleur (n&b à St-Leu)	2/5 Couleurs ternes et trop claires	1/5 Pixellisation assez importante / assez flou	3/5 Quelques ombres, pas de soucis d'homogénéité (pas de mosaïquage)	1/5 Saturation importante sur les plages limitant l'interprétation	3/5 Géoréférencement manuel avec décalages locaux max d'environ 2/3m	2-3 Belle à peu agitée au Sud de St-Paul 3-4 Peu agitée à agitée à St Paul
1989	1 : 20 000	60 cm	JPEG	Couleur	3/5 Couleurs bien marquées, tendance à tirer dans le vert	3/5 Netteté correcte mais léger flou lié au scannage	5/5 Pas d'ombres, pas de soucis d'homogénéité (pas de mosaïquage)	4/5 Bonne luminosité et bons contrastes (un peu sombre par endroit)	3/5 Géoréférencement manuel avec décalages locaux max d'environ 2/3m	2-3 Belle à peu agitée
1997	1 : 32 000	100 cm	ECW	Couleur	3/5 Couleurs bien marquées, tire fortement dans le vert	2/5 Net mais très pixellisé	3/5 Ombres portées, homogénéité correcte	3/5 Pas de saturation / luminosité assez faible	4/5 Orthophoto avec décalages ponctuels <2m	5-6 Forte à très forte
2003	1 : 26 000	50 cm	ECW	Couleur	2/5 Couleurs ternes et trop claires	2/5 Net mais assez pixellisé	3/5 Quelques ombres, raccords propres au niveau des lagons	4/5 Bonne luminosité et bons contrastes (un peu sombre par endroit)	4/5 Orthophoto avec décalages ponctuels <2m	2-3 Belle à peu agitée à St-Leu et Etang-Salé 3-4 Peu agitée à agitée à St-Paul et St-Pierre
2008	-	50 cm	ECW	Couleur	3/5 Couleurs mieux marquées que pour 2003	3/5 Net mais un peu pixellisé	4/5 Peu d'ombres, raccord propres	4/5 Bonne luminosité et bons contrastes	5/5 Orthophoto avec décalages ponctuels <1m	4-5 Agitée à forte 2-3 Belle à peu agitée à St-Pierre
2011	-	20 cm	ECW	Couleur	5/5 Belles couleurs	5/5 Net et facile d'interprétation	3/5 Quelques raccords visibles + présence d'ombres	5/5 Bonne luminosité et bons contrastes	5/5 Orthophoto avec décalages ponctuels <1m	6-7 Très forte à grosse à St-Paul 3-4 Peu agitée à agitée à St-Pierre 2-3 Belle à peu agitée à St-Leu et Etang-Salé
Année	Résolution (taille des pixels) (Coef.1)	Qualité chromatique (Coef.1)	Lisibilité (netteté, interprétation) (Coef.1)	Qualité radiométrique (ombres, homogénéité) (Coef.1)	Contraste/luminosité (Coef.1)	Qualité du calage (Coef.2)	Etat de mer au récif (Coef.3)	NOTE GLOBALE		

1950	4/5	1/5	2/5	2/5	2/5	2/5	4/5	2,7/5
1966	4/5	1/5	3/5	4/5	3/5	3/5	5/5 2/5 au Nord de St-Gilles	3,6/5 2,7/5 au Nord de St-Gilles
1978	3/5	2/5	1/5	3/5	1/5	3/5	4/5 au Sud de St-Paul 3/5 à St Paul	2,8/5 au Sud de St-Paul 2,5/5 à St-Paul
1989	2/5	3/5	3/5	5/5	4/5	3/5	4/5	3,5/5
1997	1/5	3/5	2/5	3/5	3/5	4/5	2/5	2,6/5
2003	3/5	2/5	2/5	3/5	4/5	4/5	4/5 à St-Leu et Etang-Salé 3/5 à St-Paul et St-Pierre	3,4/5 à St-Leu et ES 3,1/5 à St-Paul et St-Pierre
2008	3/5	3/5	3/5	4/5	4/5	5/5	2/5 4/5 à St-Pierre	3,3/5 3,9/5 à St-Pierre
2011	5/5	3/5	3/5	3/5	5/5	5/5	1/5 à St-Paul 3/5 à St-Pierre 4/5 à St-Leu et Etang-Salé	3,2/5 à St-Paul 3,8/5 à St-Pierre 4,1/5 à St-Leu et ES



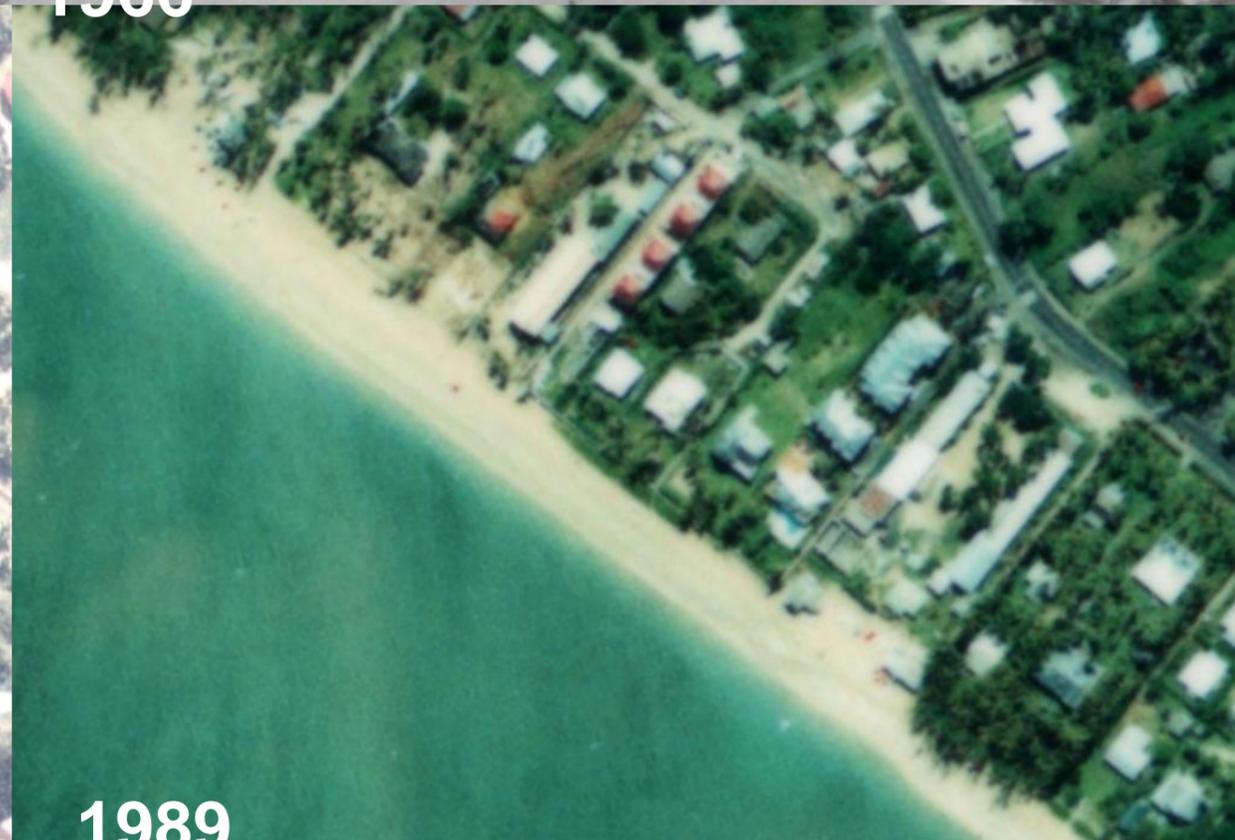
1950



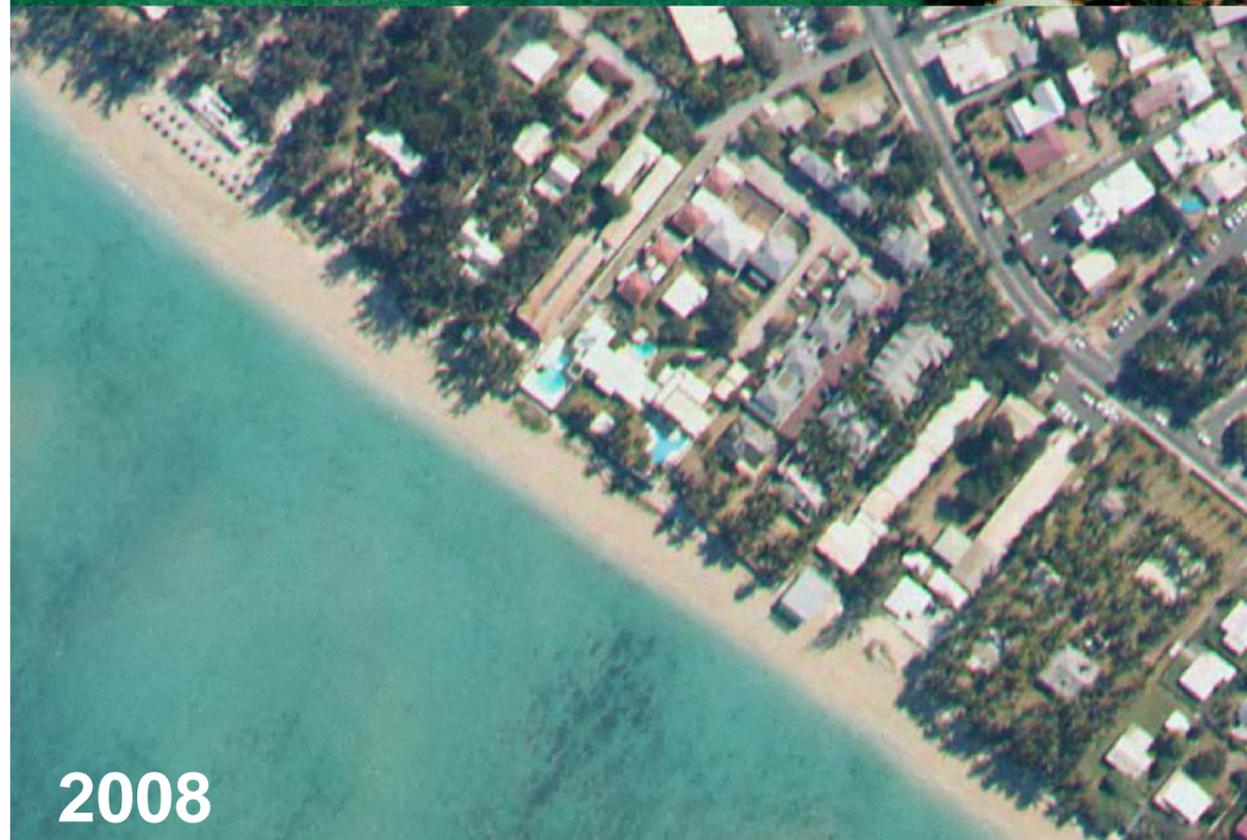
1966



1978



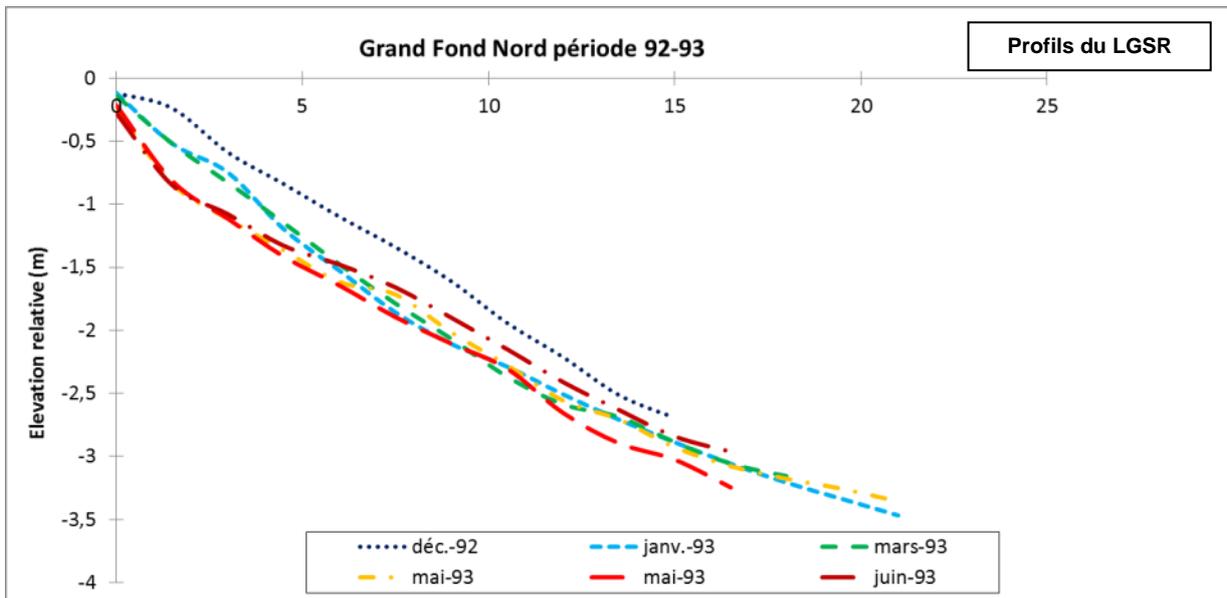
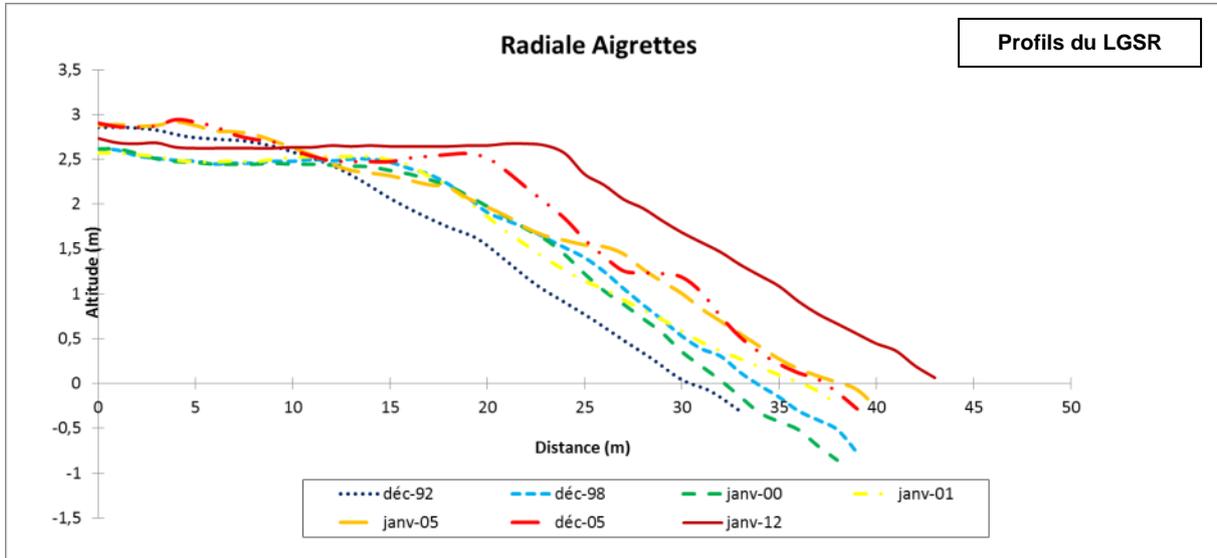
1989

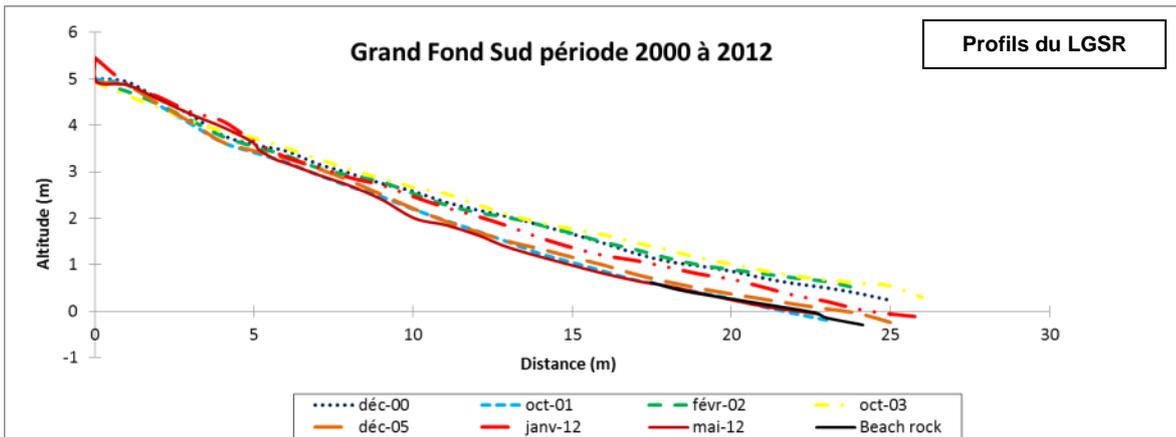
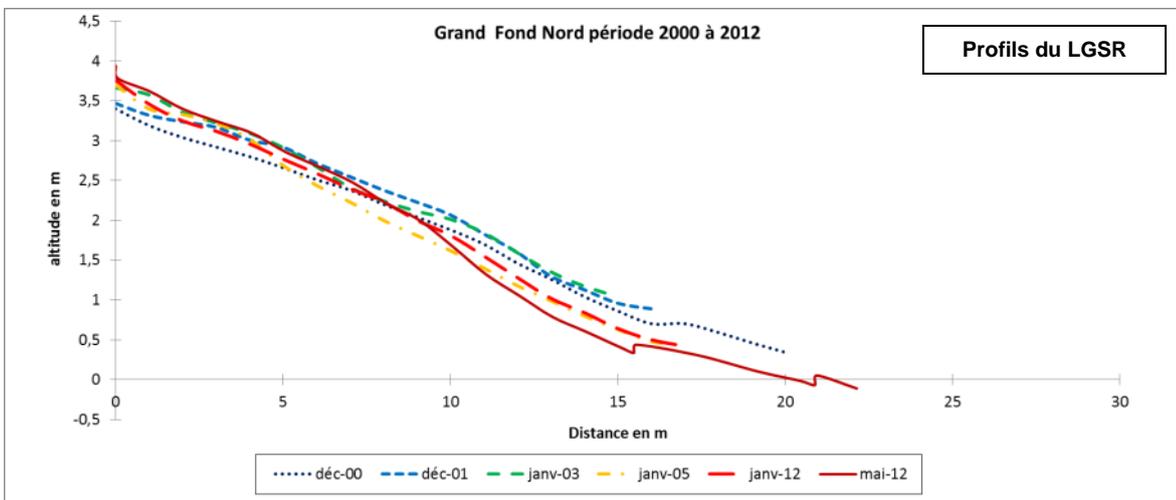
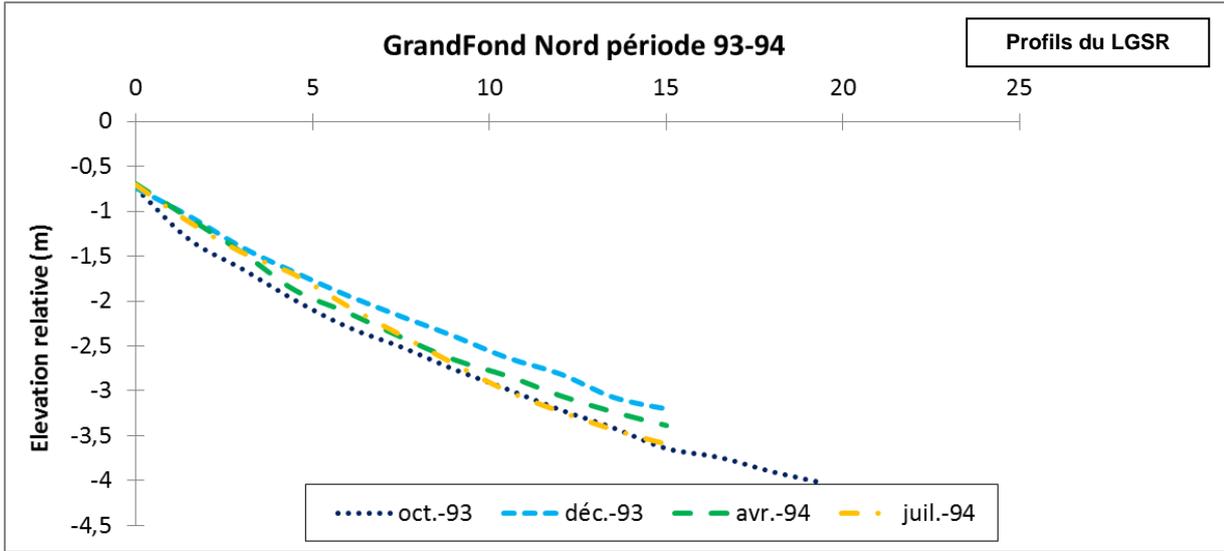


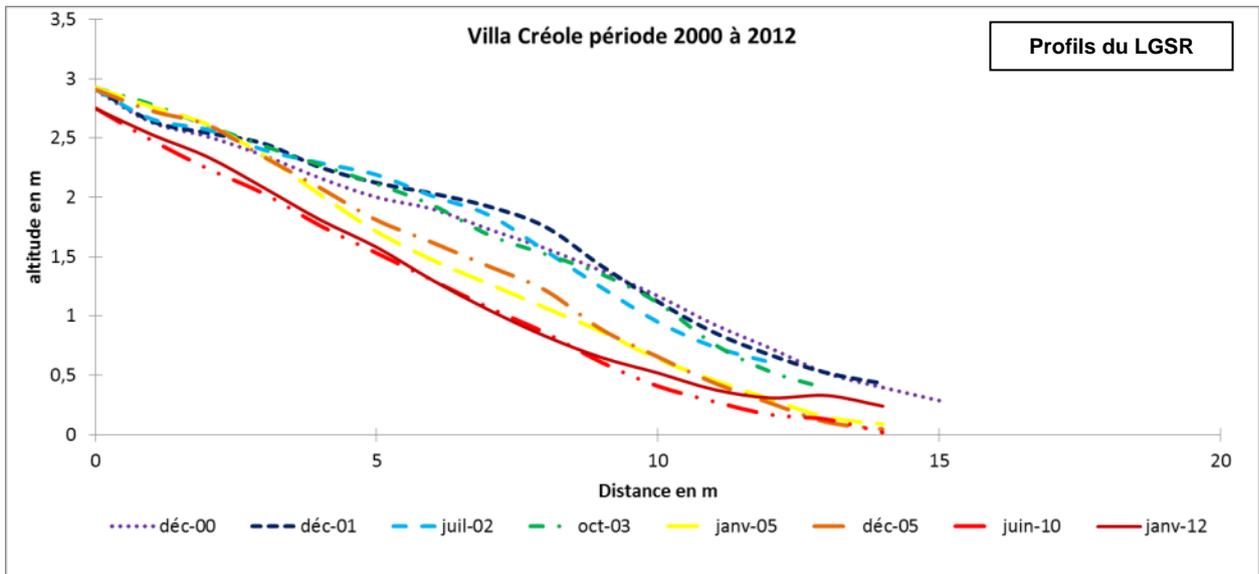
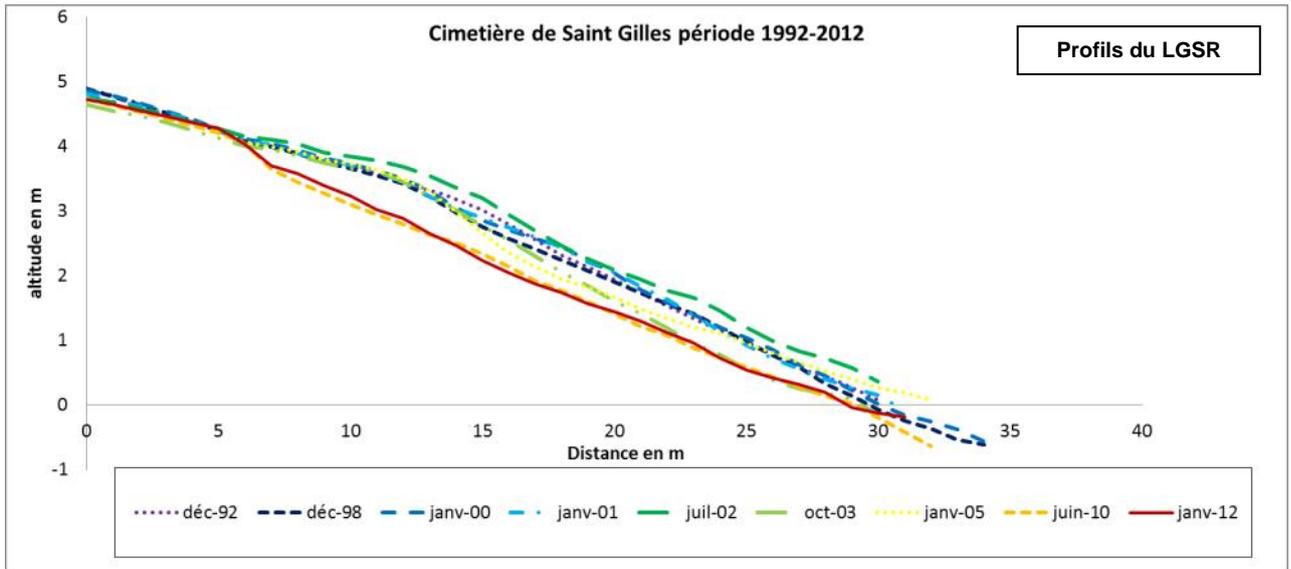
Annexe 1

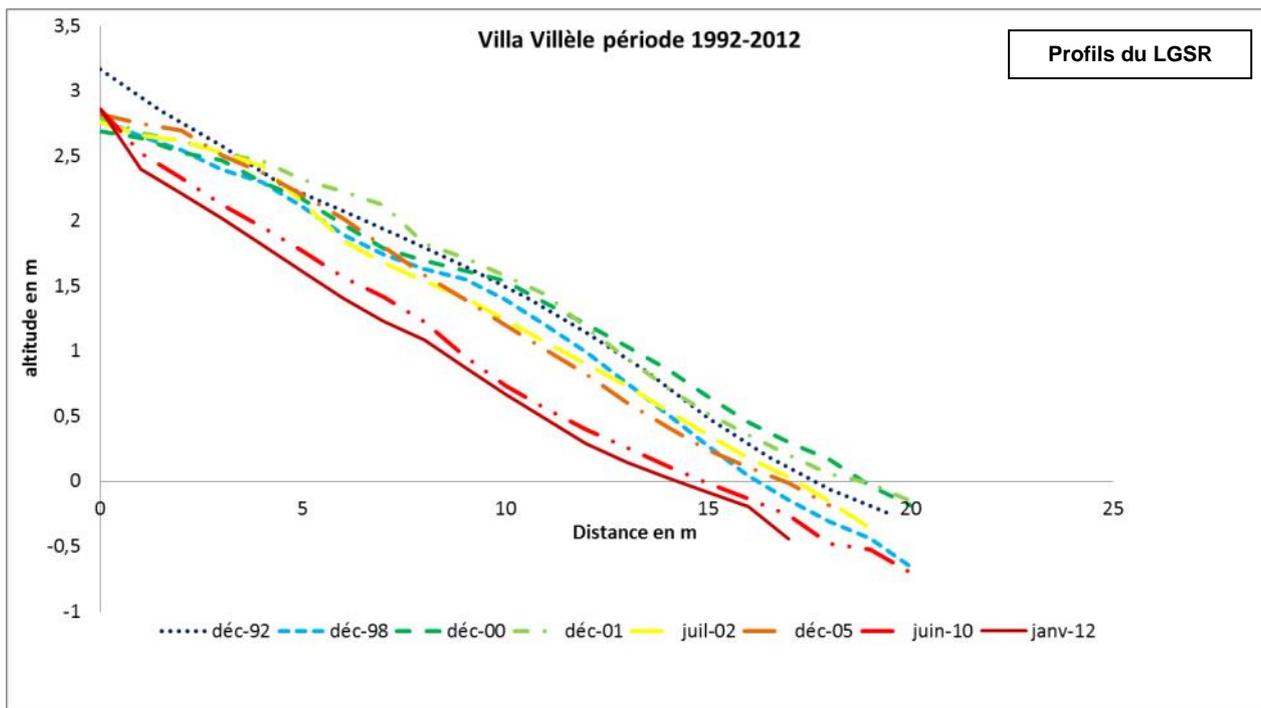
Evolution des profils du LGSR

Secteur Grand Fond:

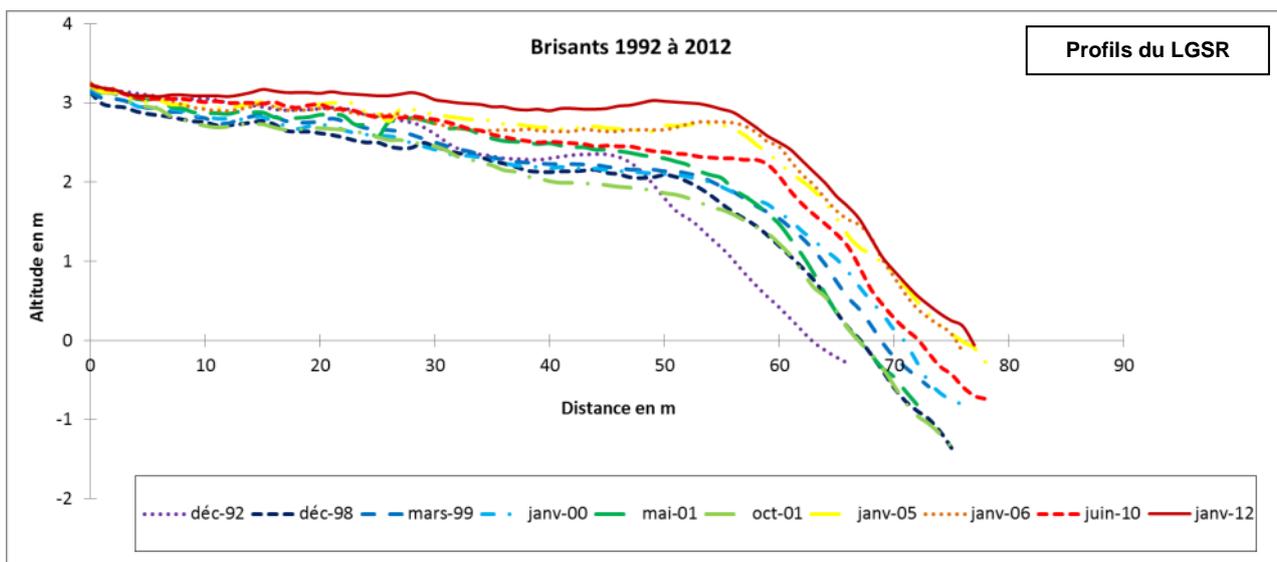


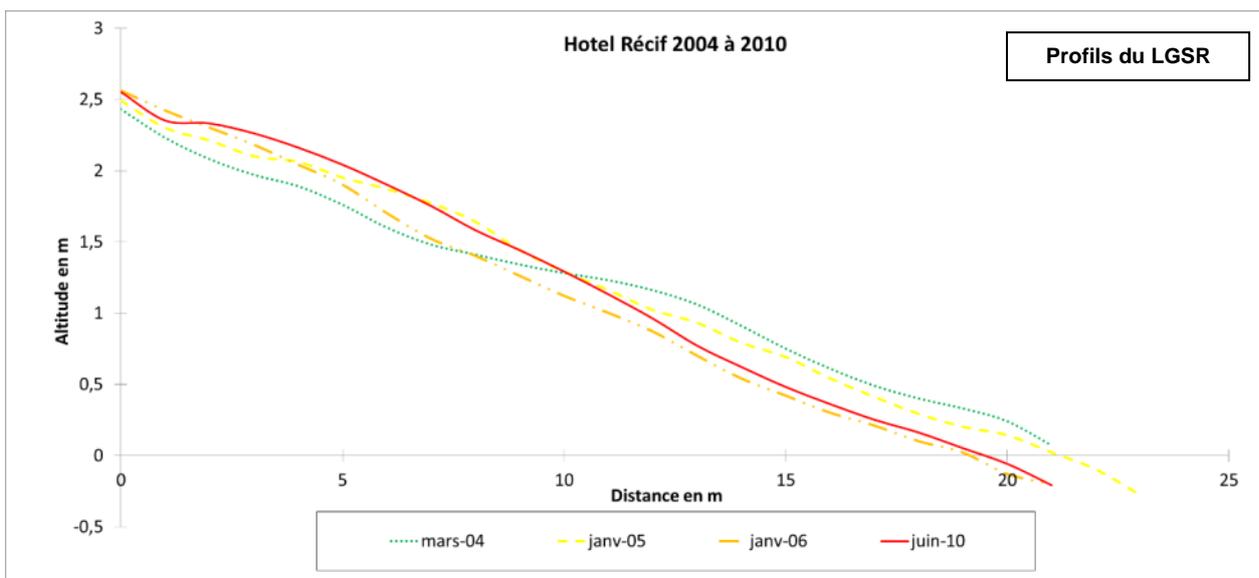
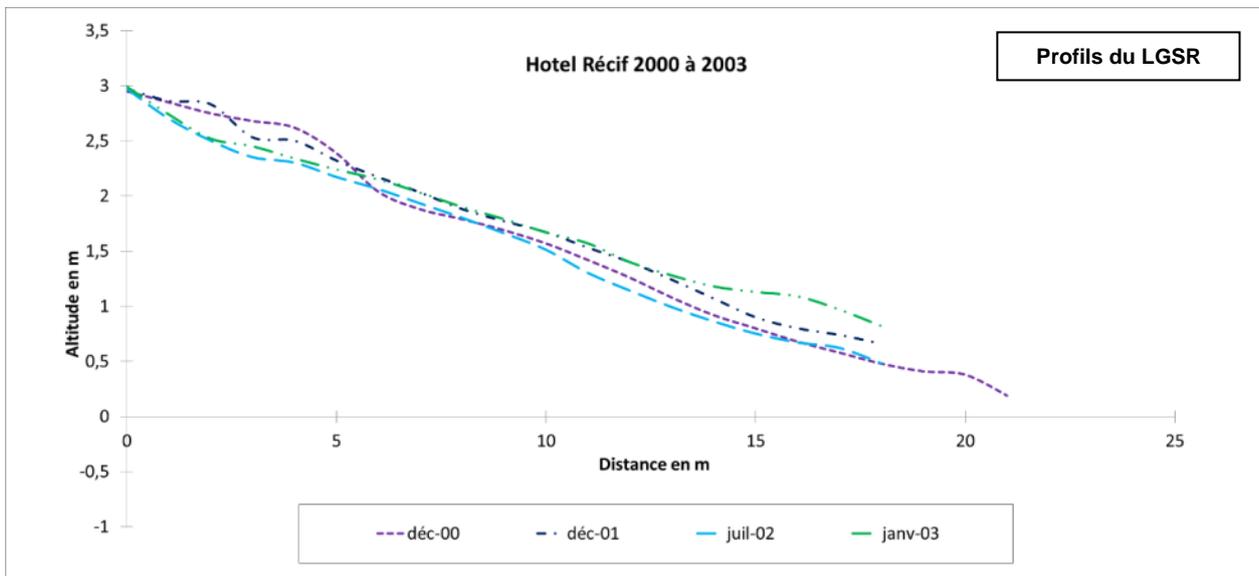
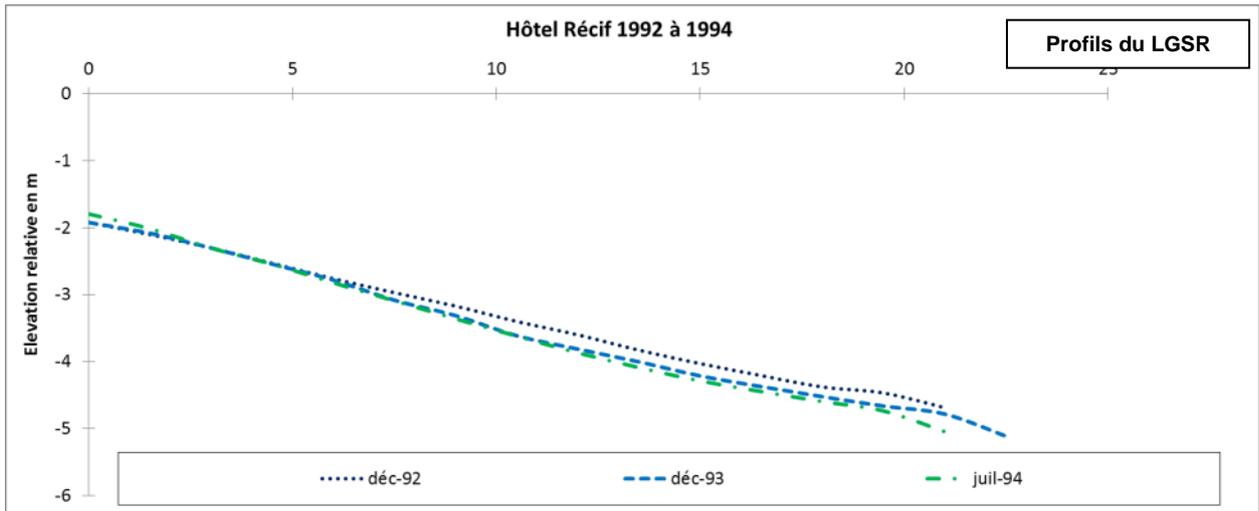


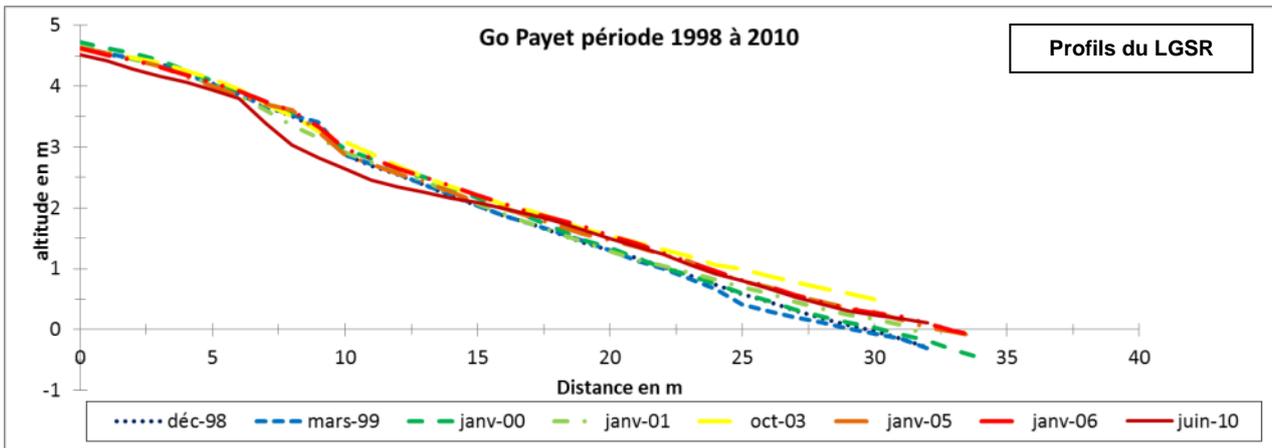
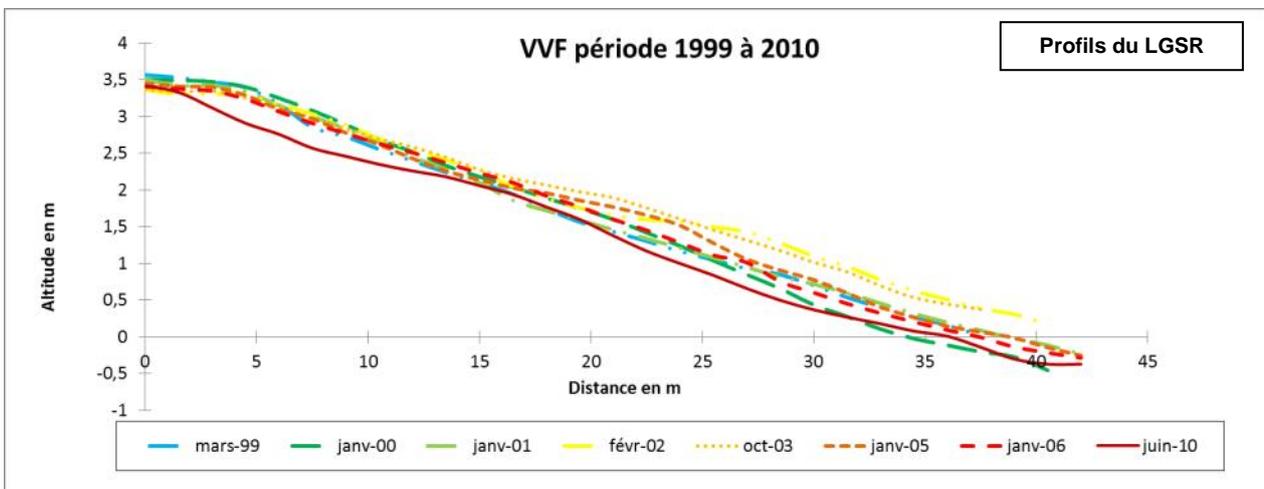
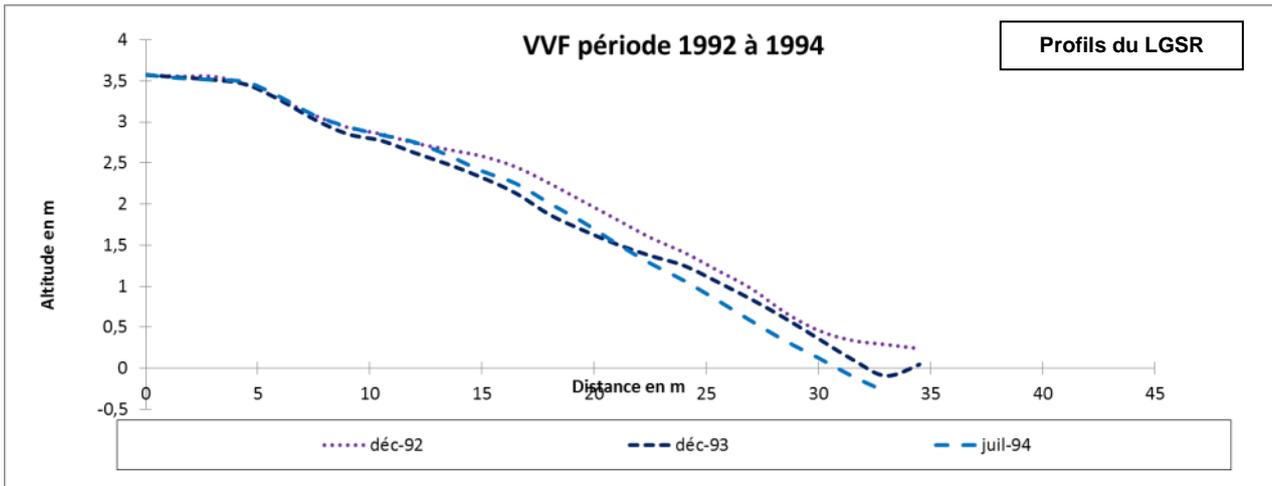


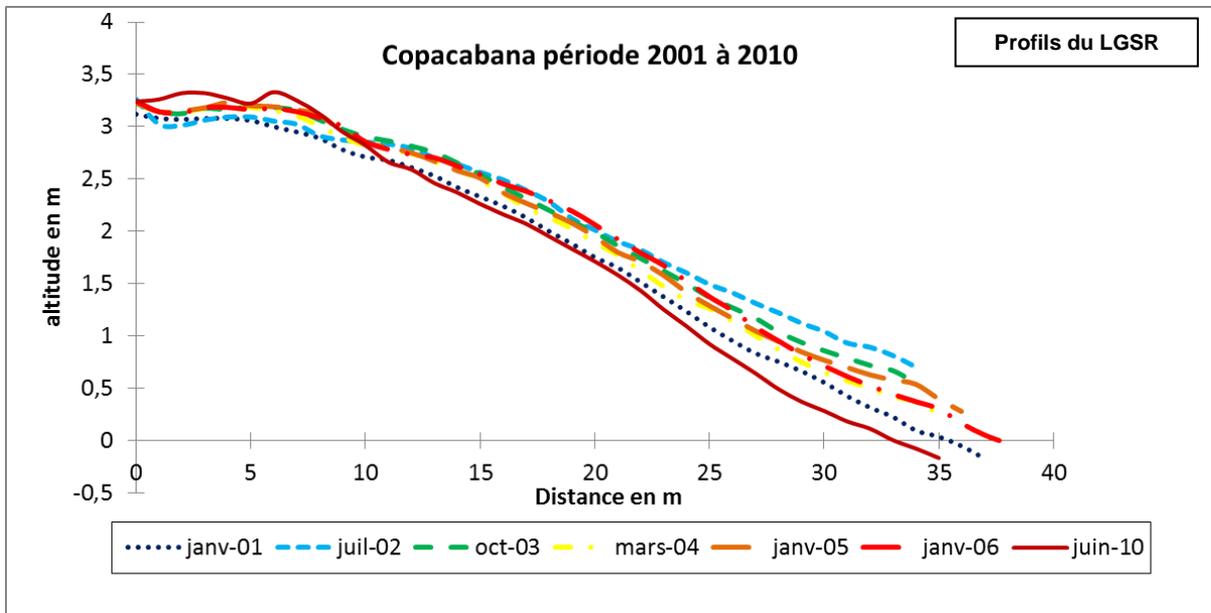
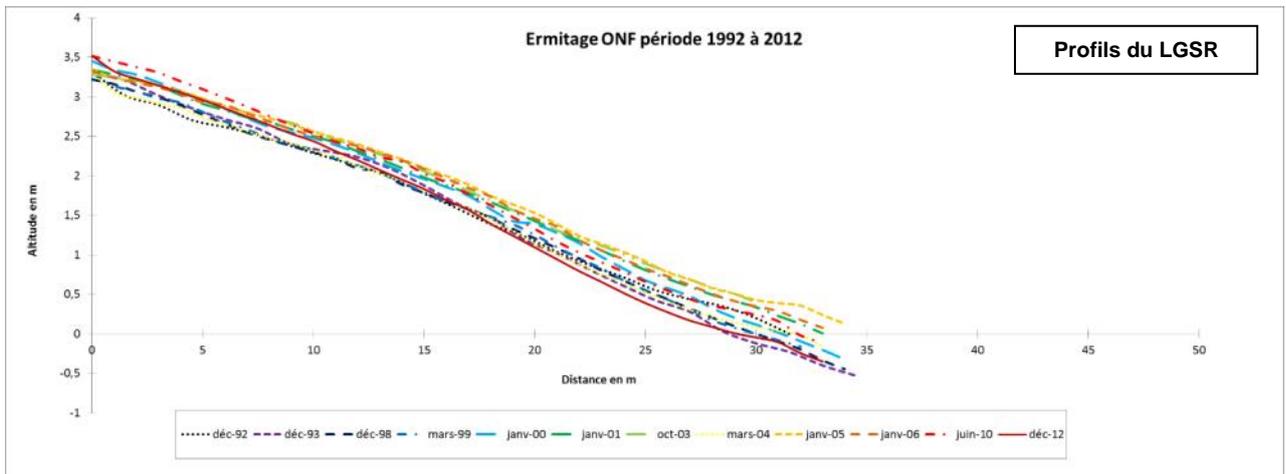
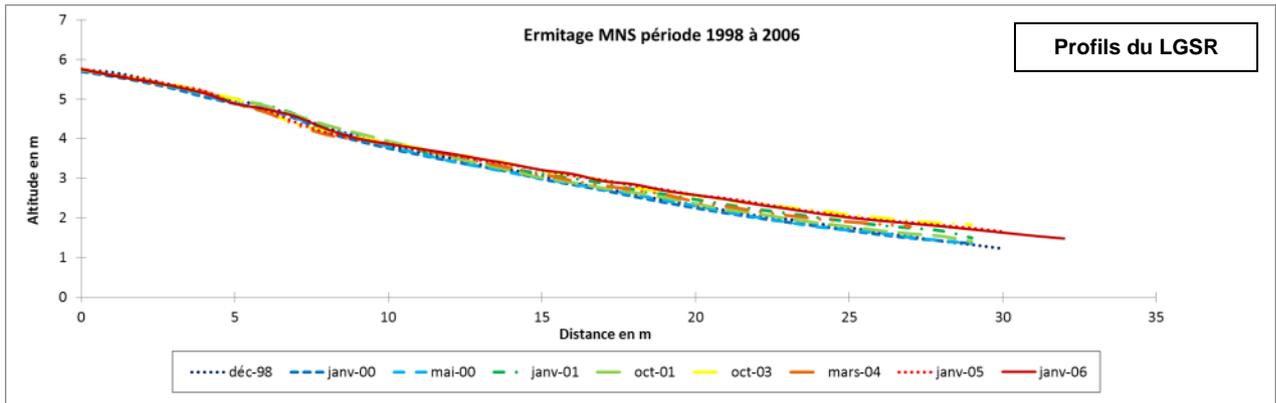


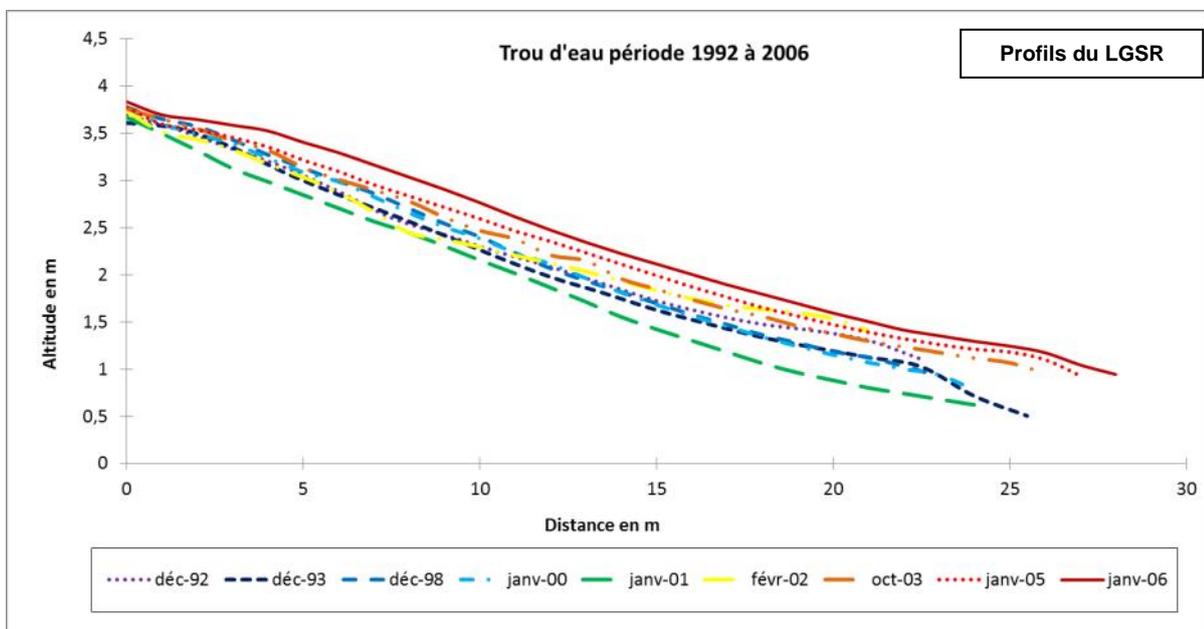
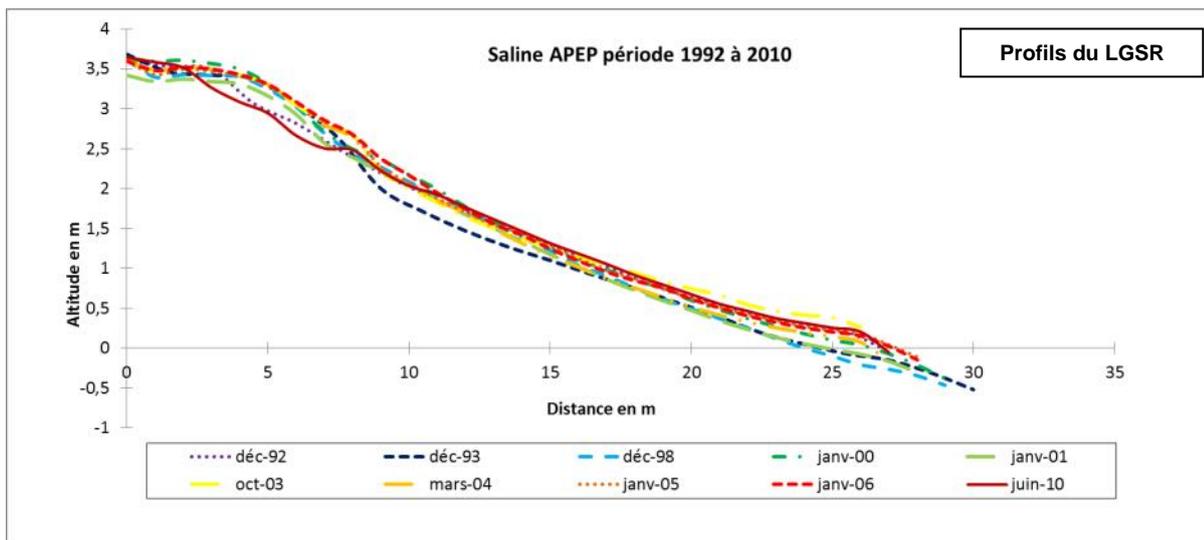
Secteur Ermitage/Saline:



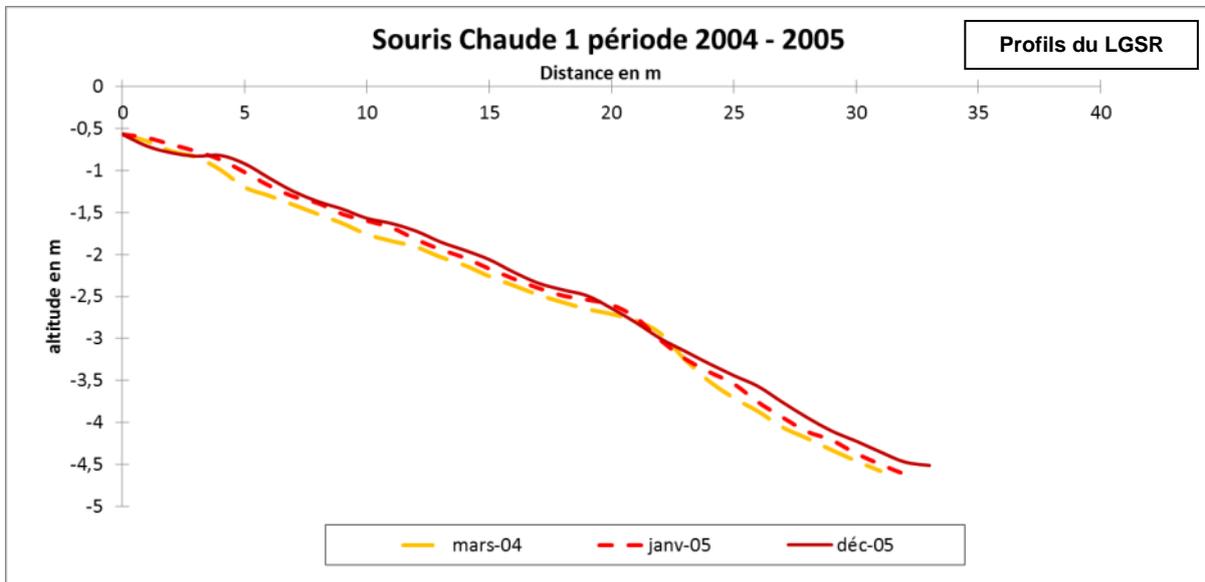
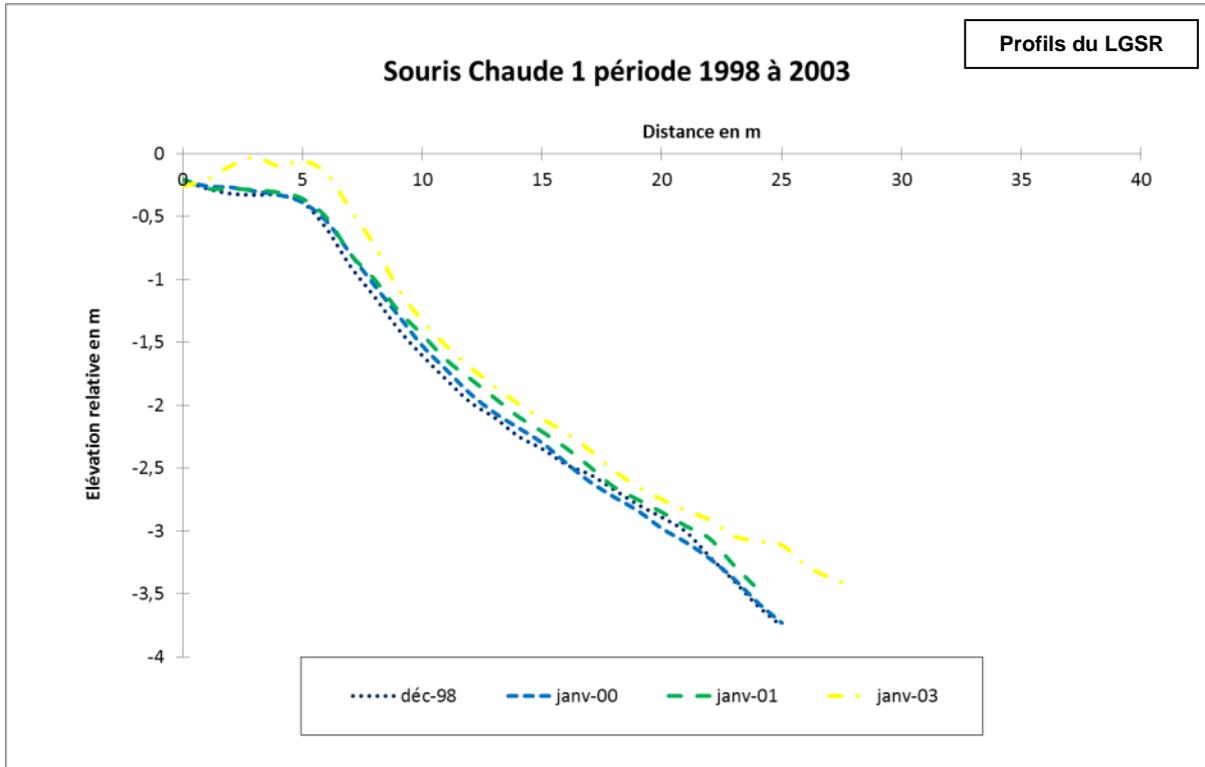


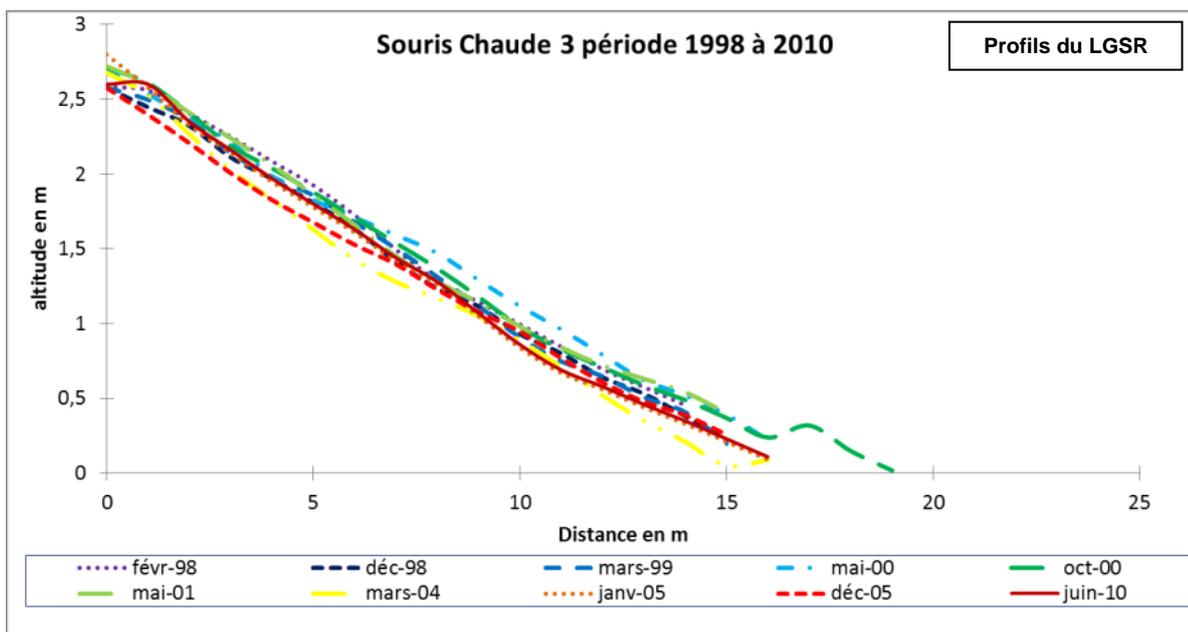
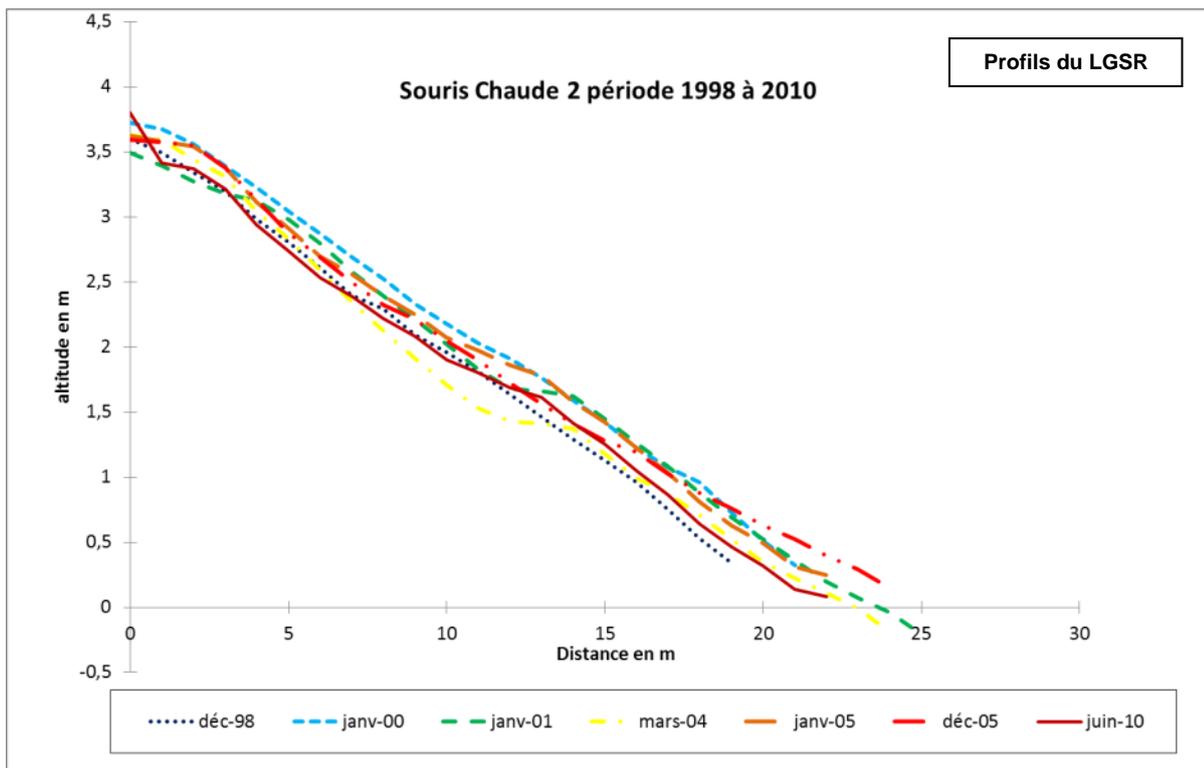


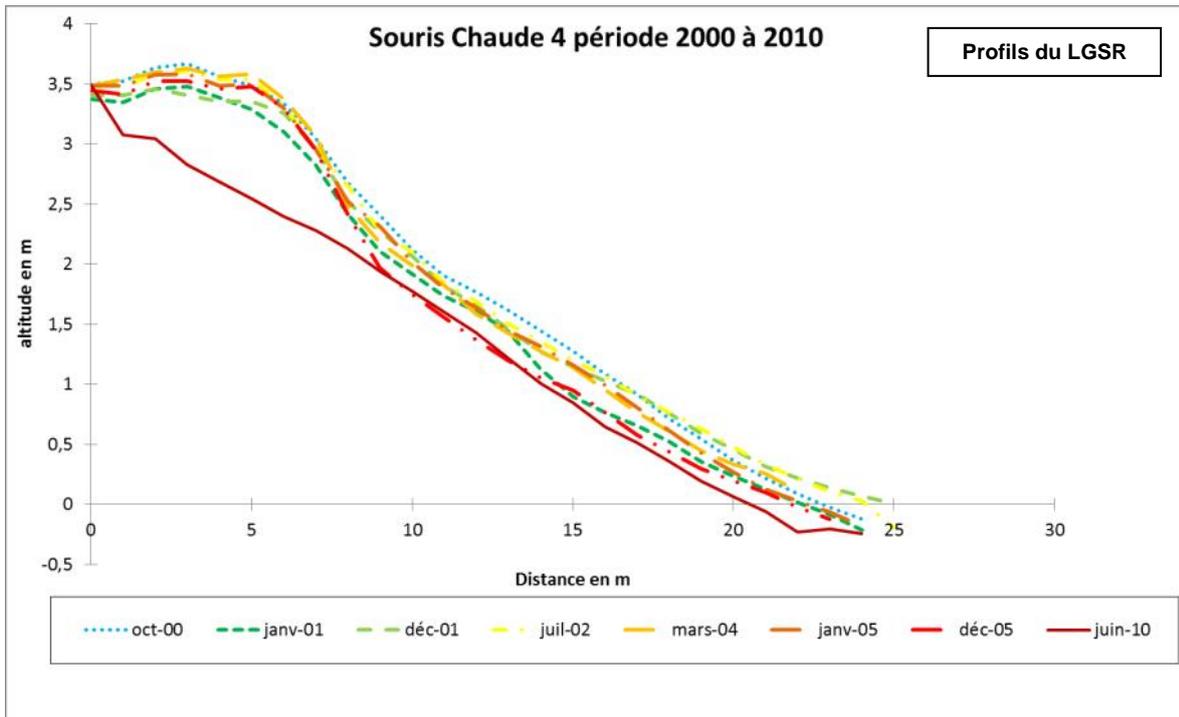
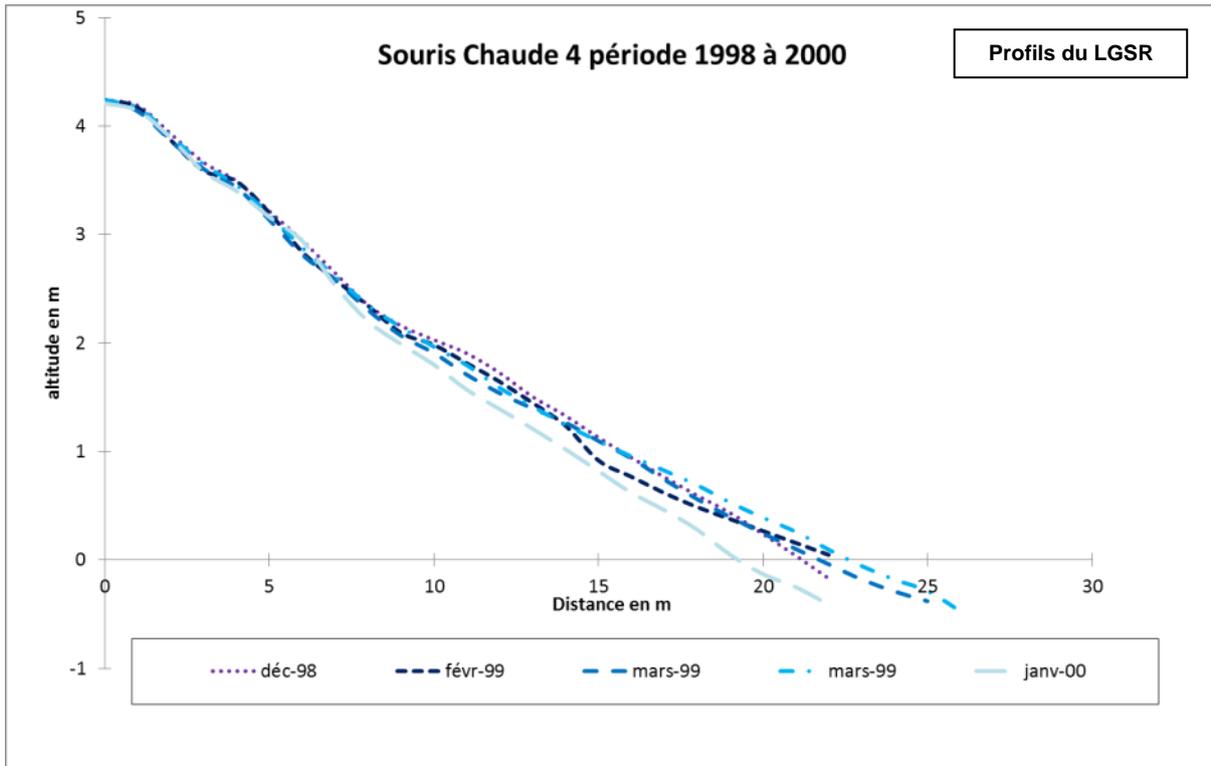




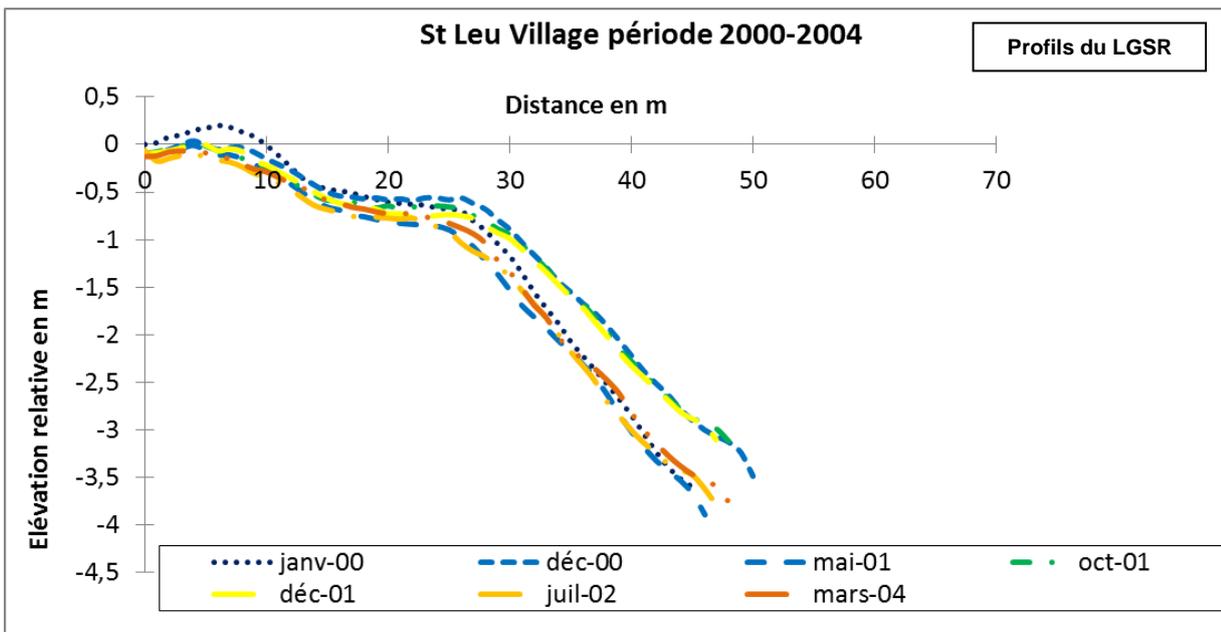
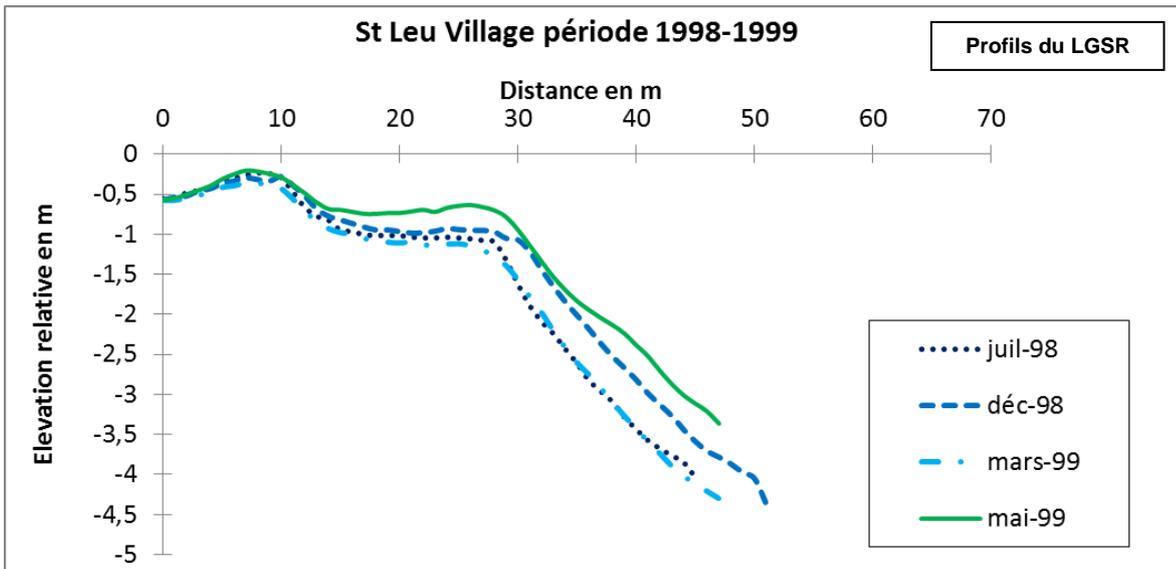
Secteur Souris Chaude:

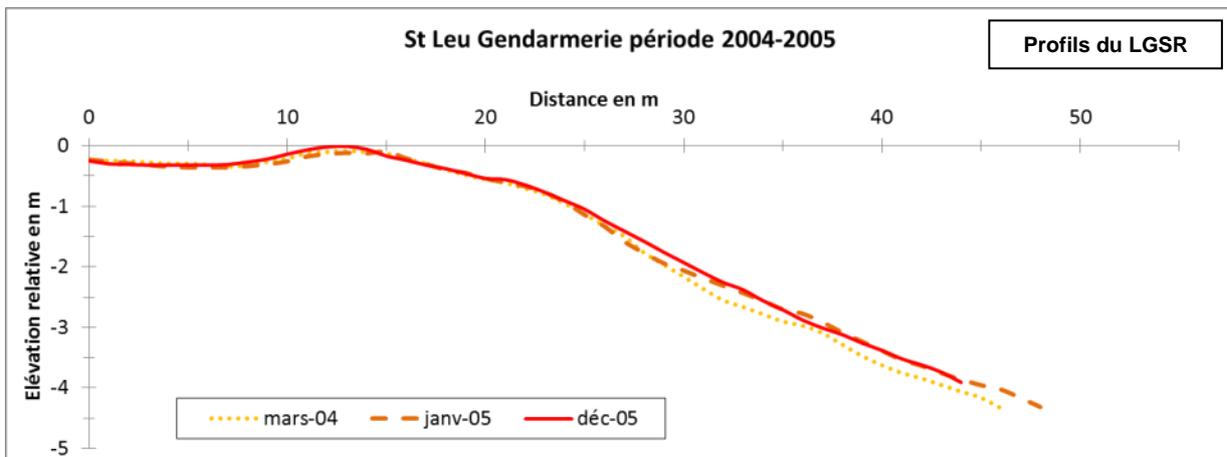
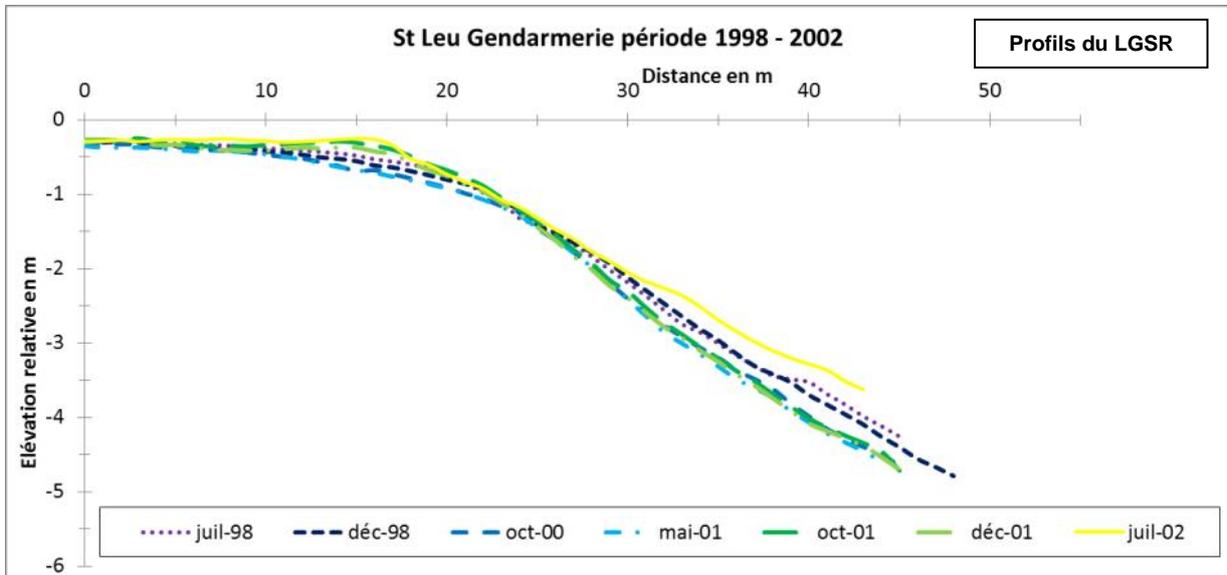
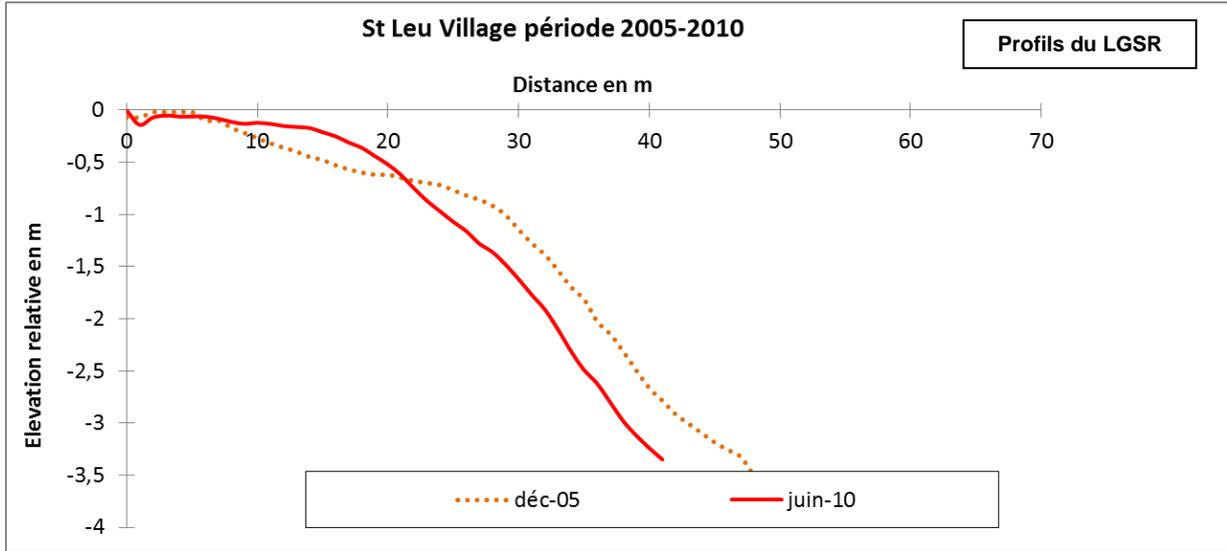


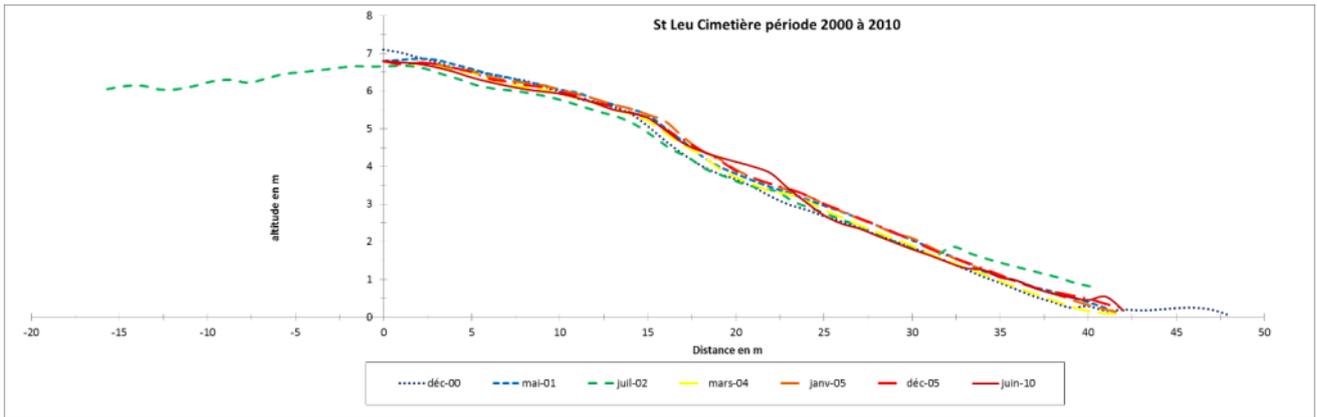




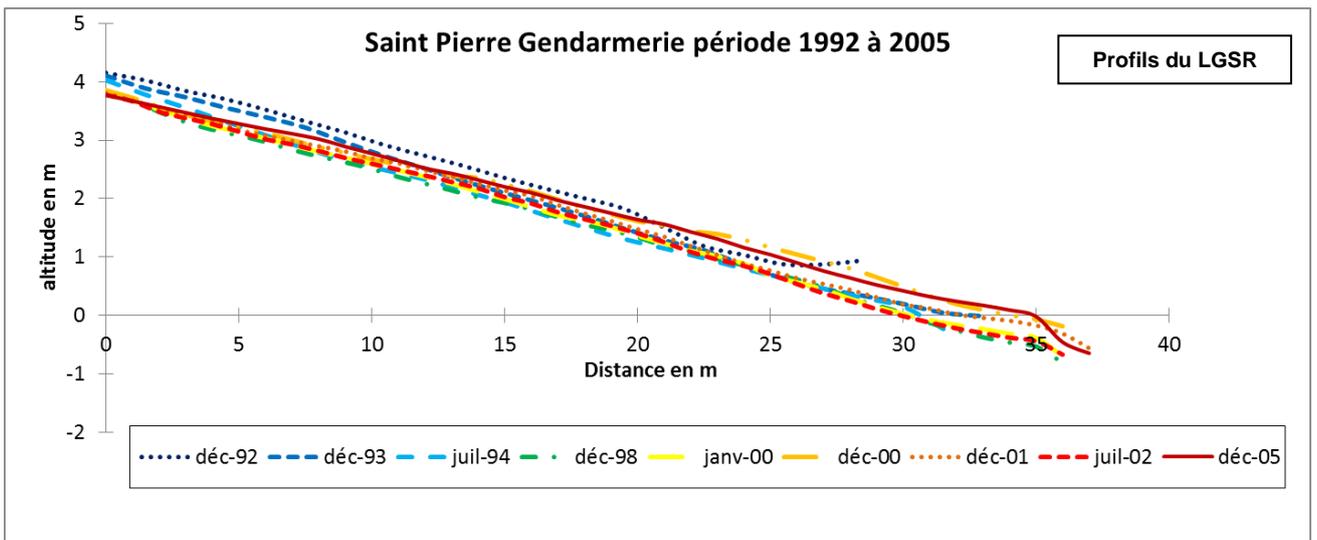
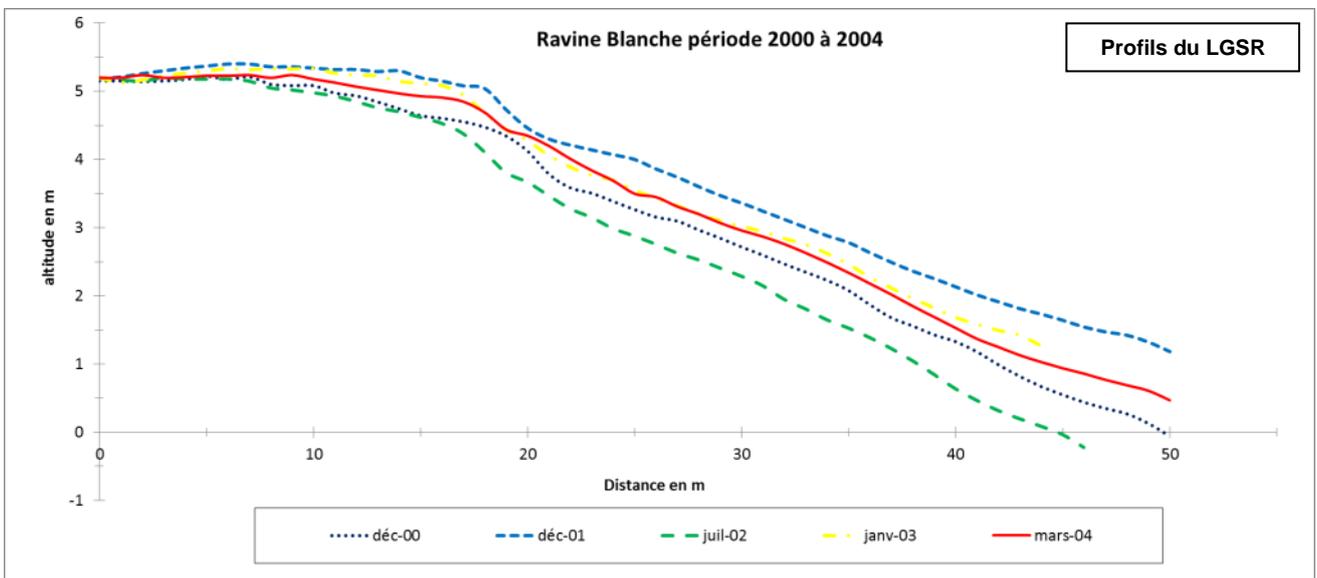
Secteur Saint Leu:

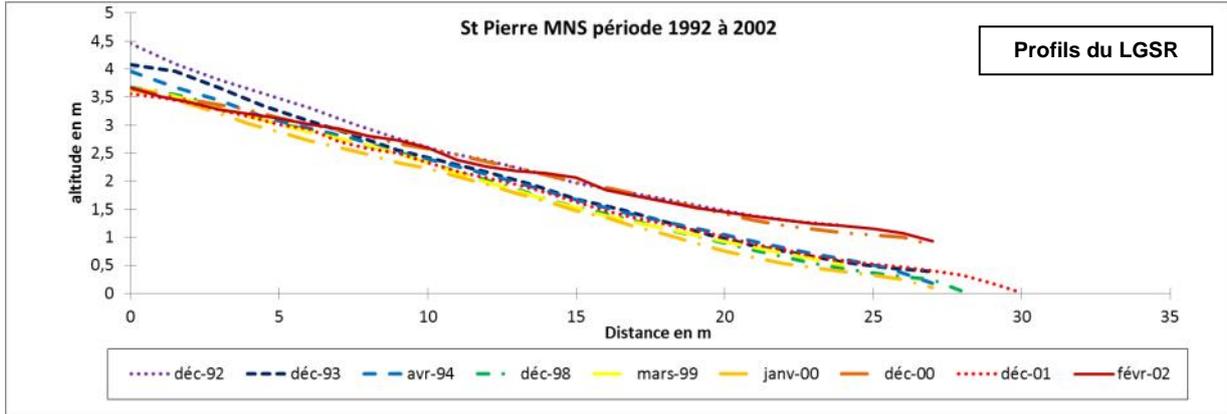






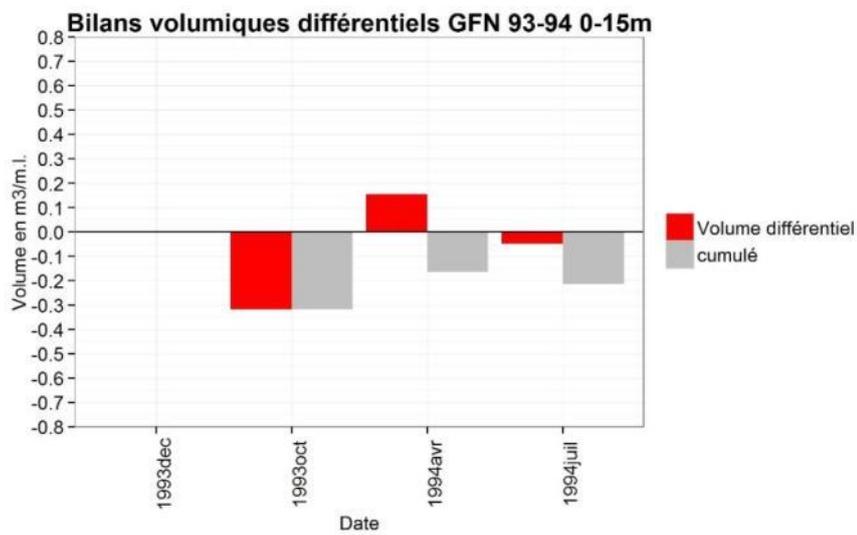
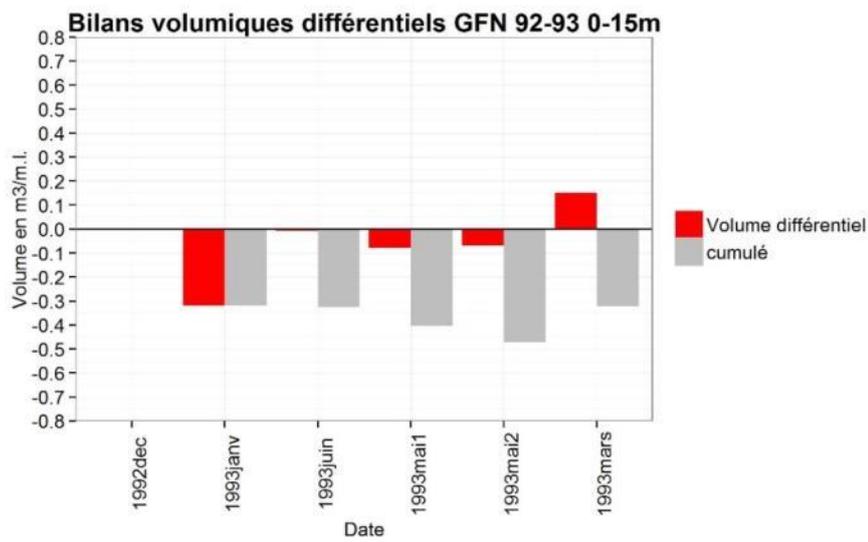
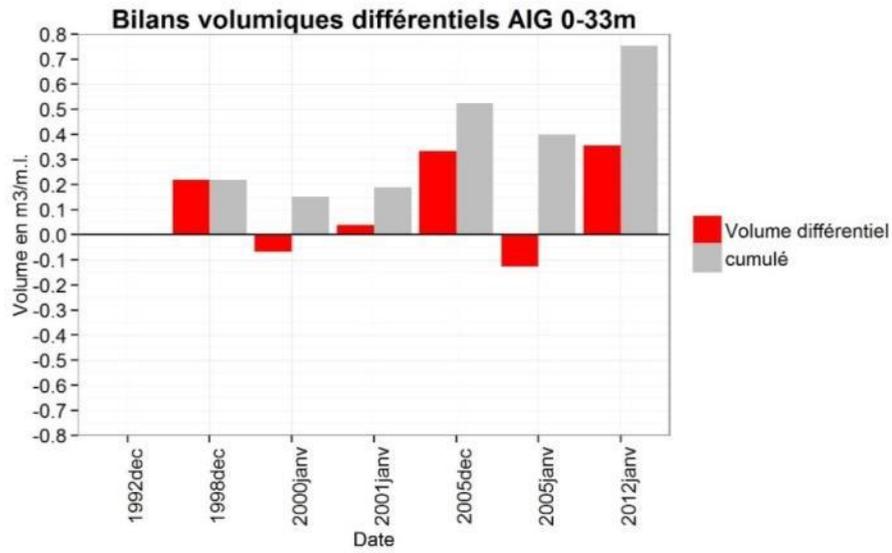
Secteur Saint Pierre:

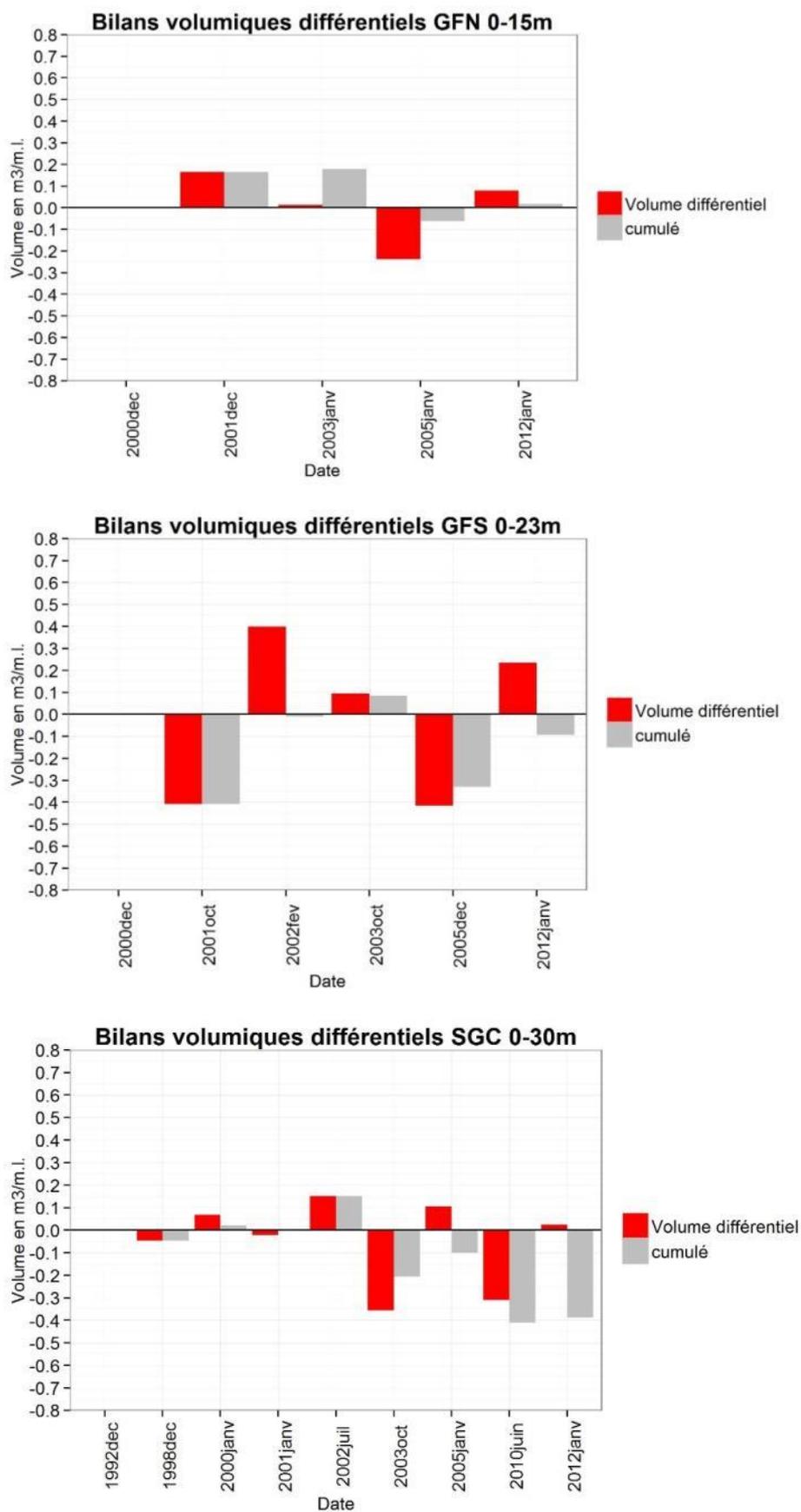


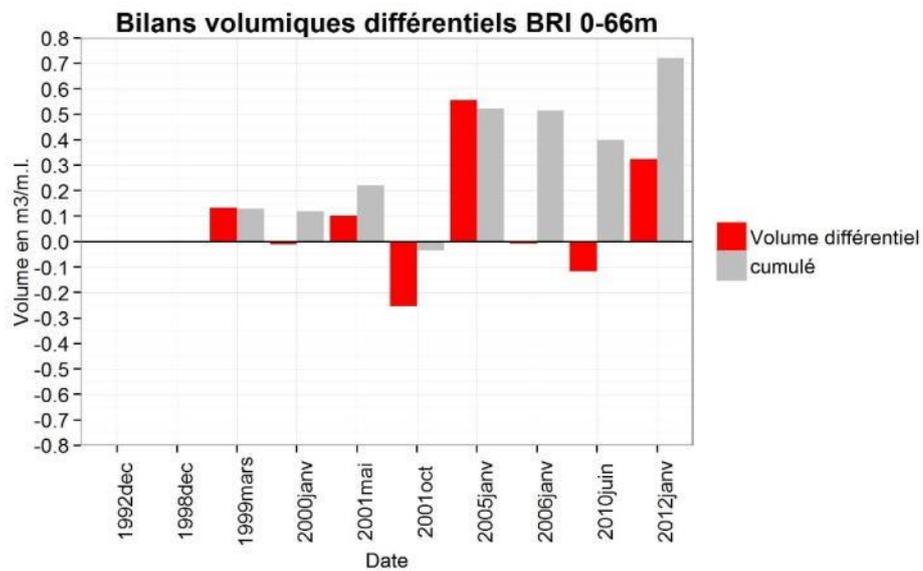
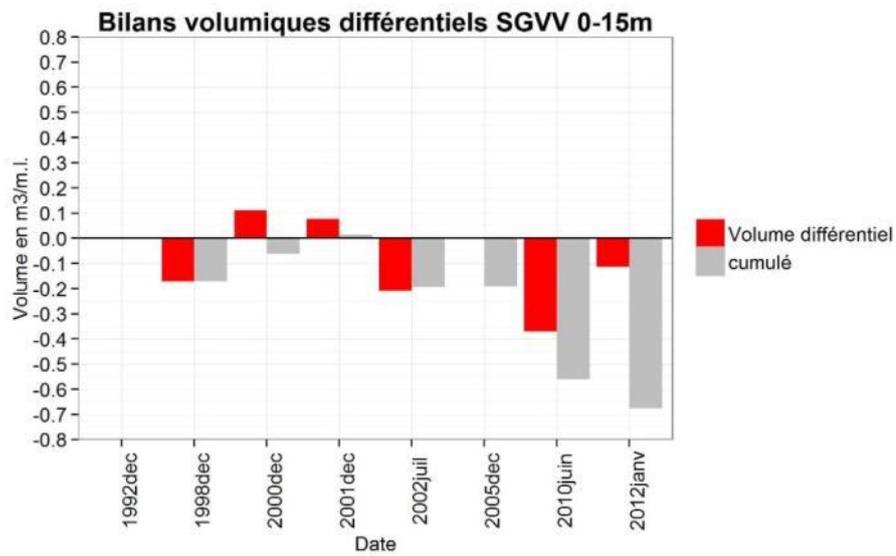
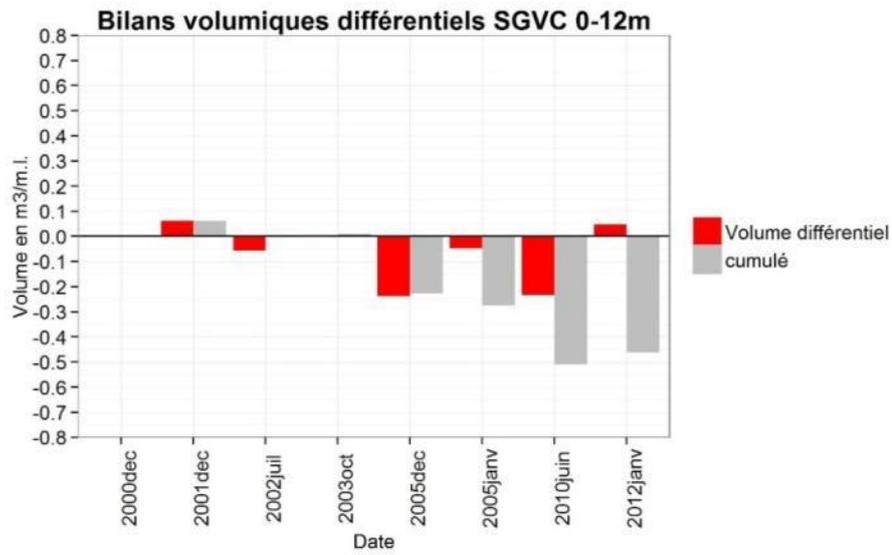


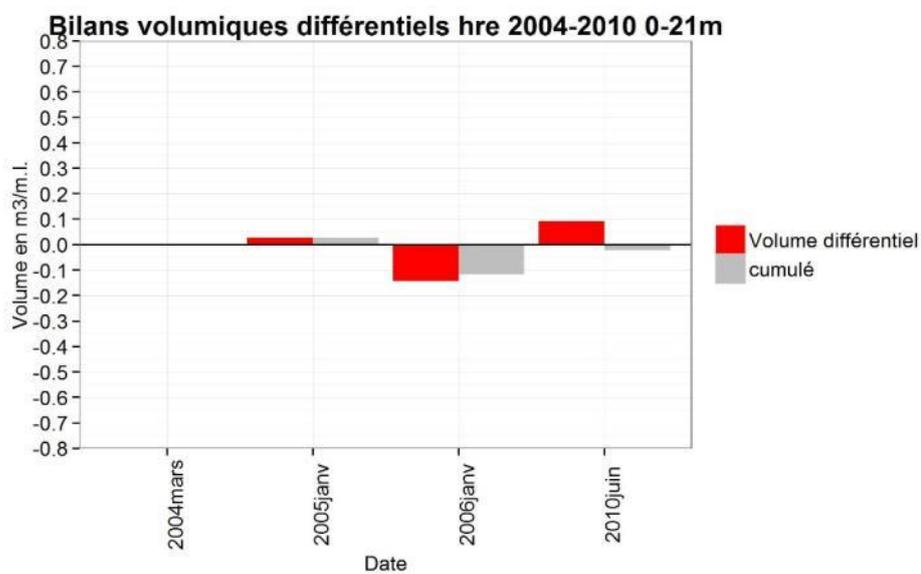
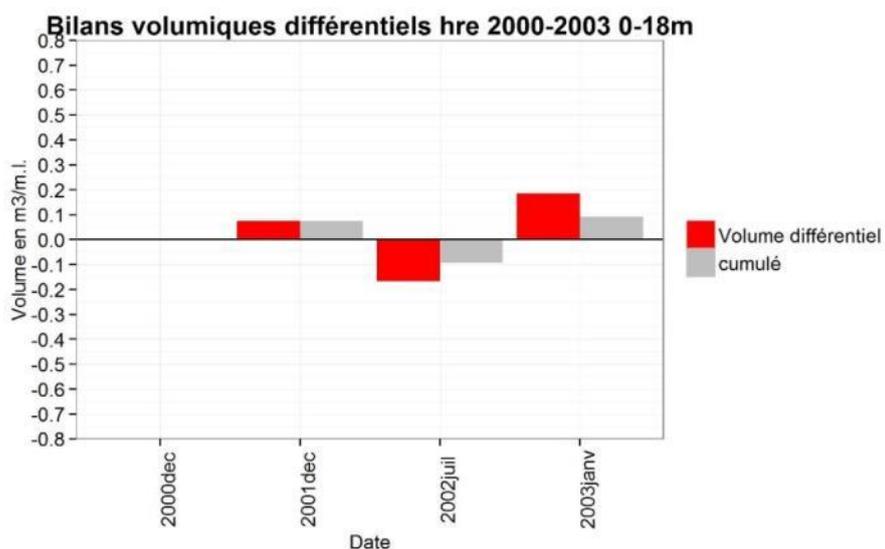
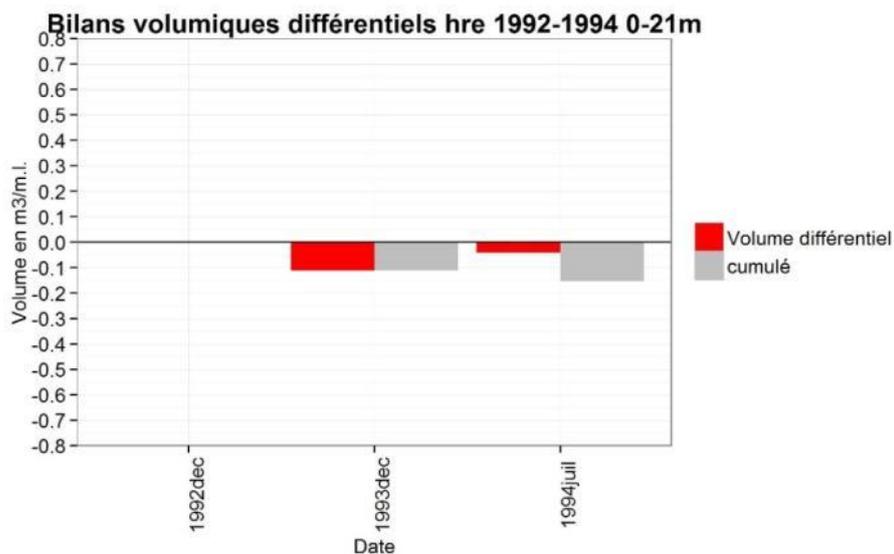
Annexe 2

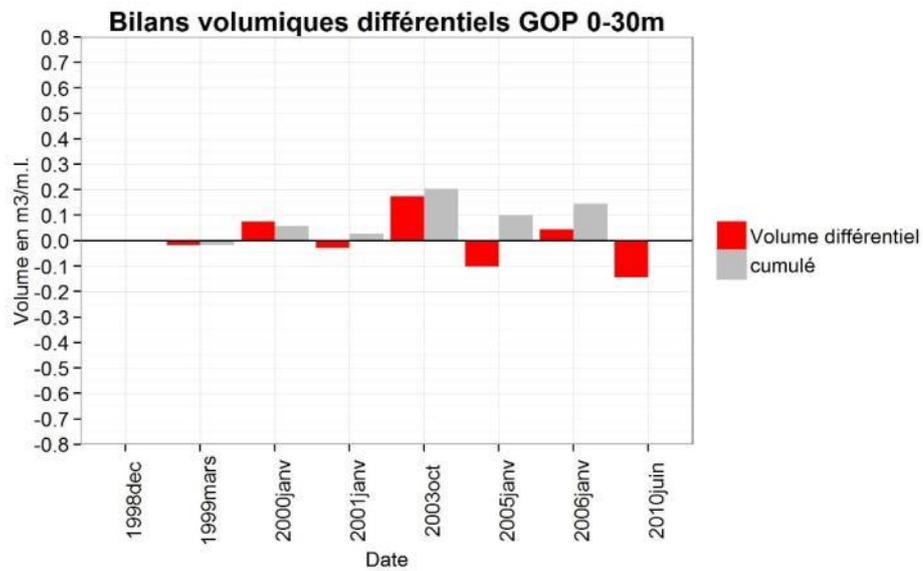
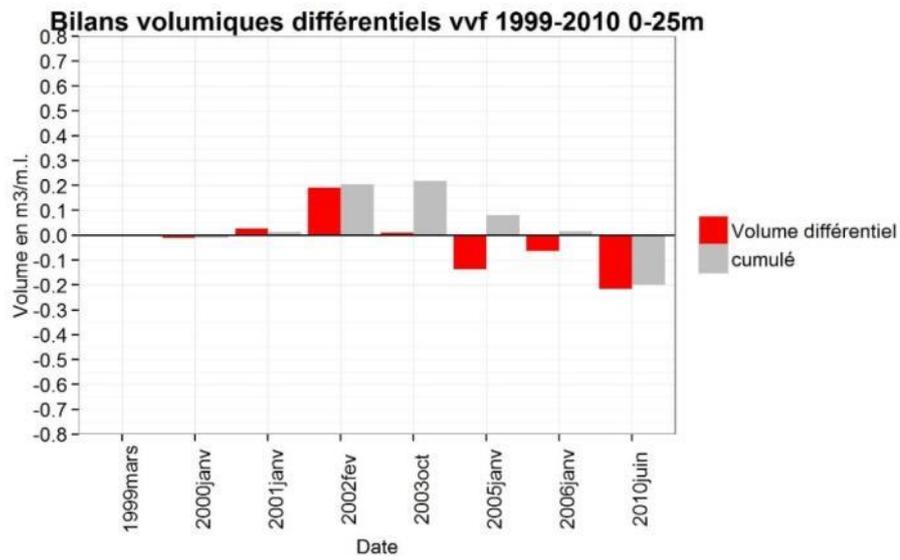
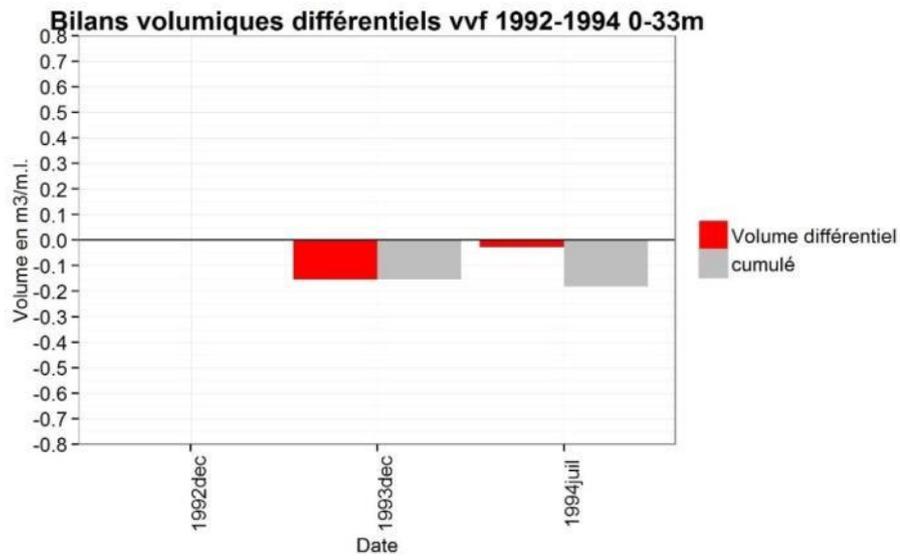
Bilans volumiques sur les profils suivis par le LGSR

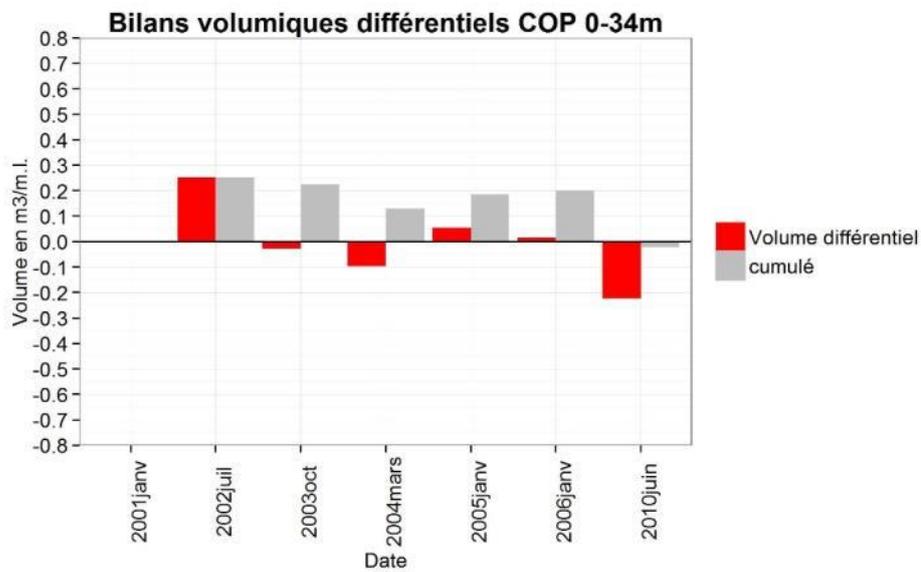
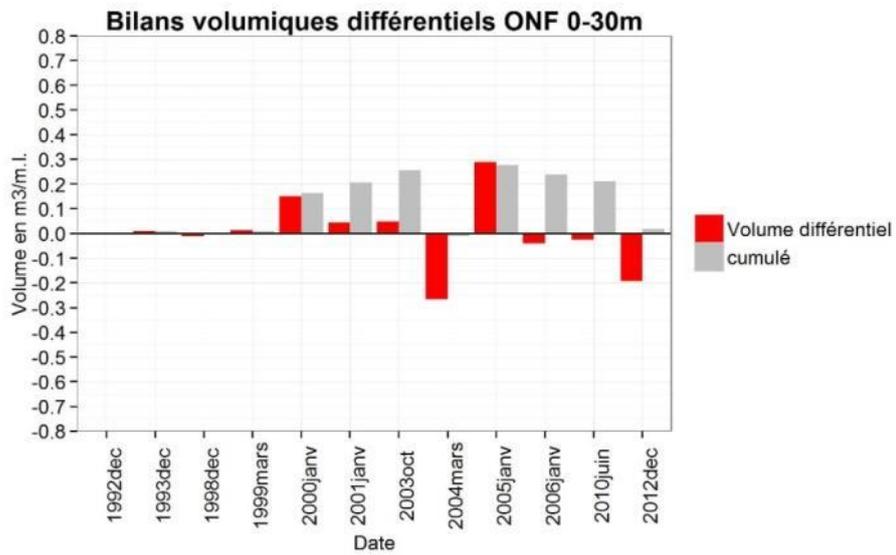
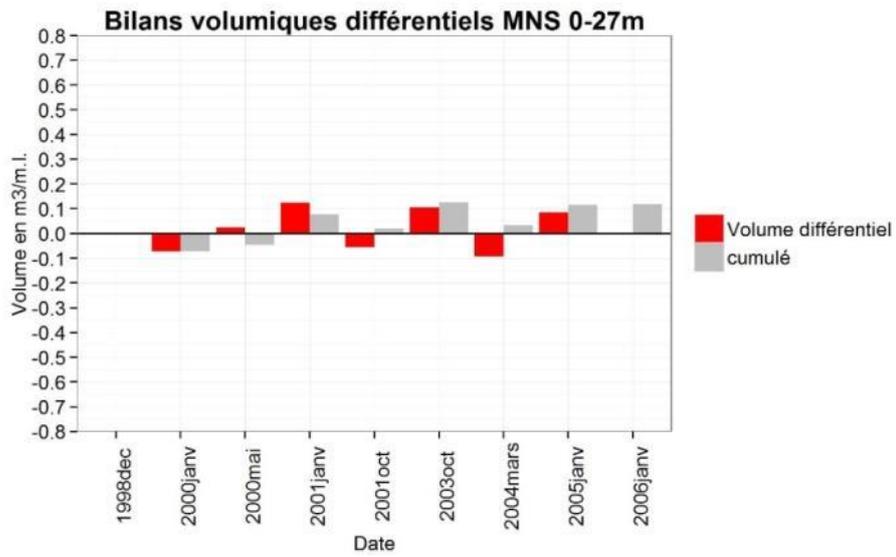


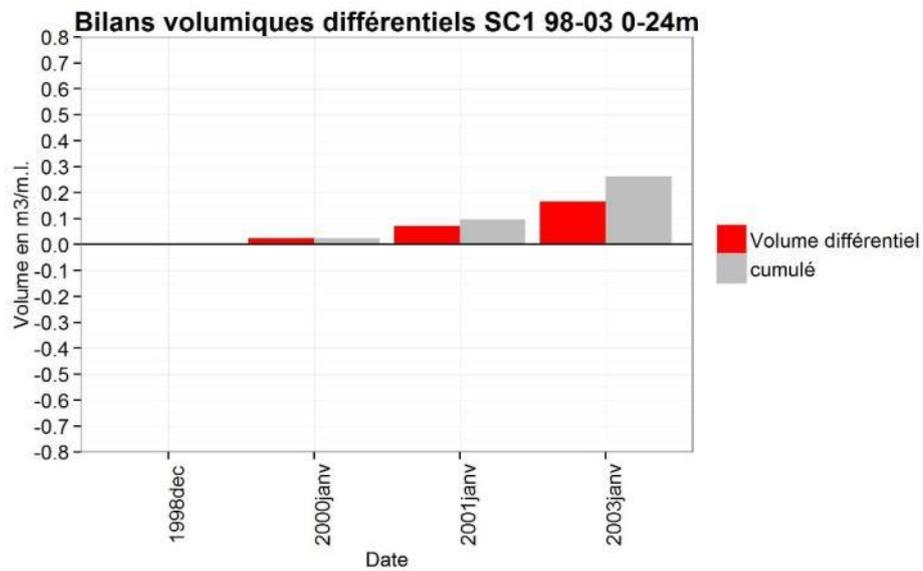
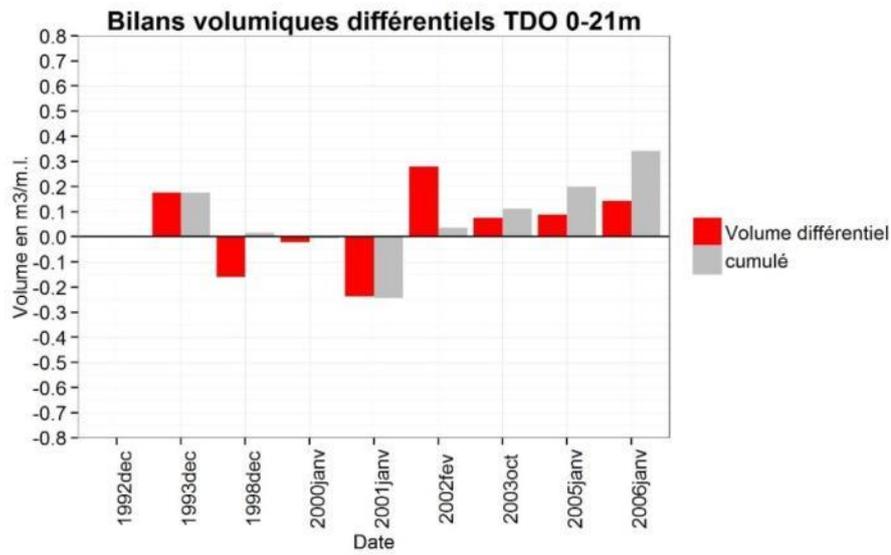
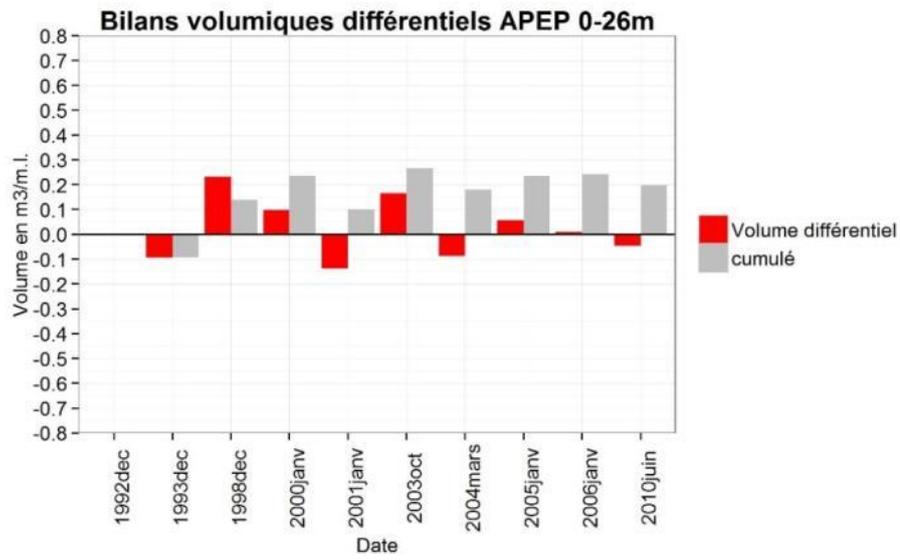


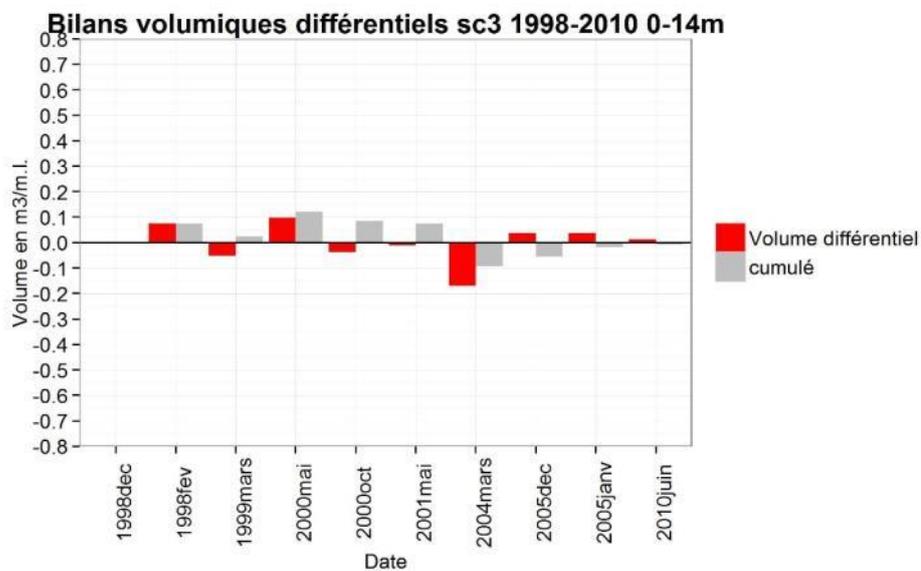
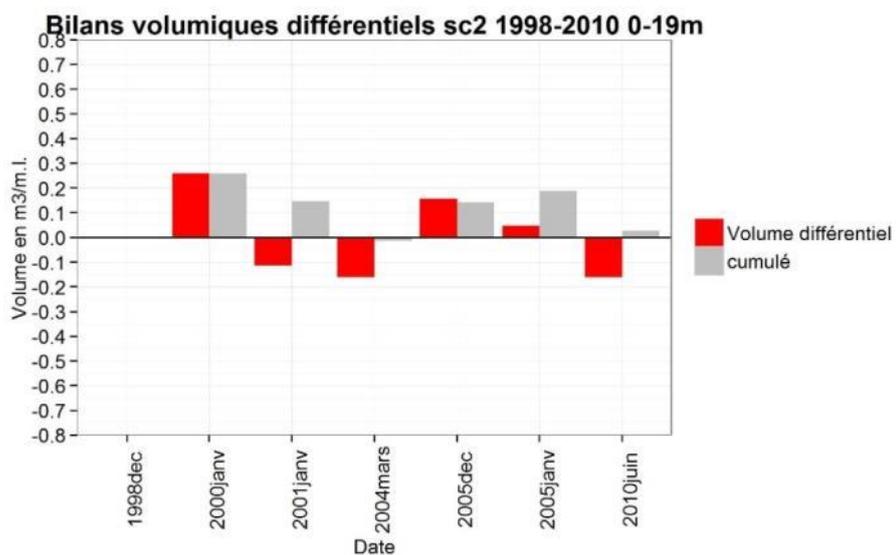
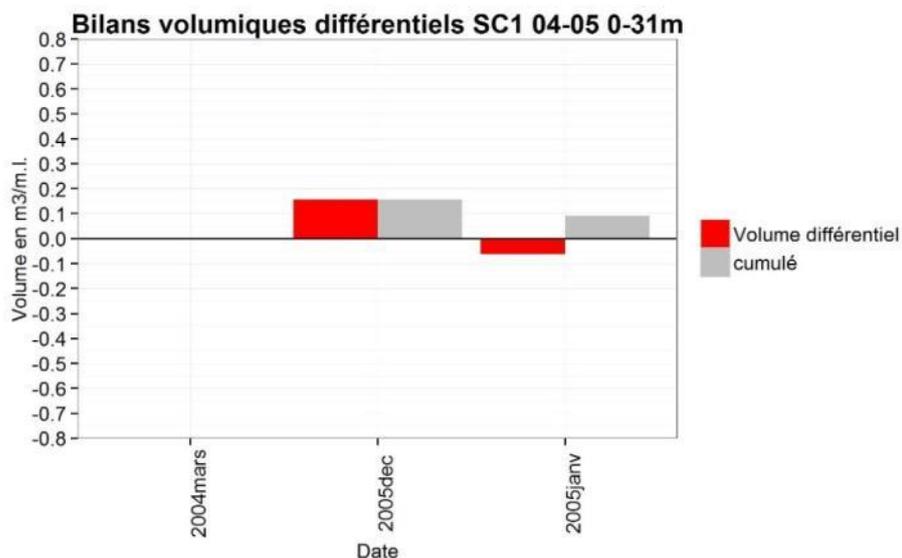


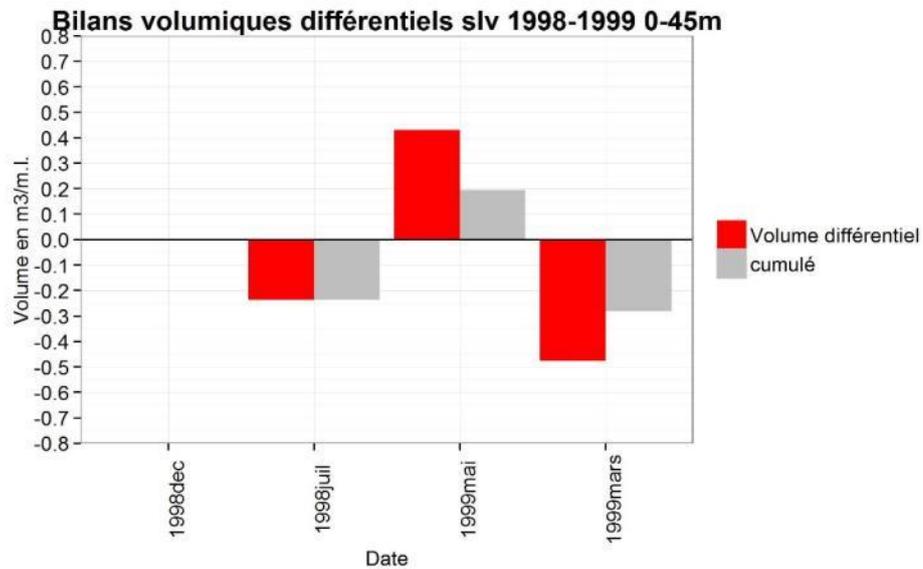
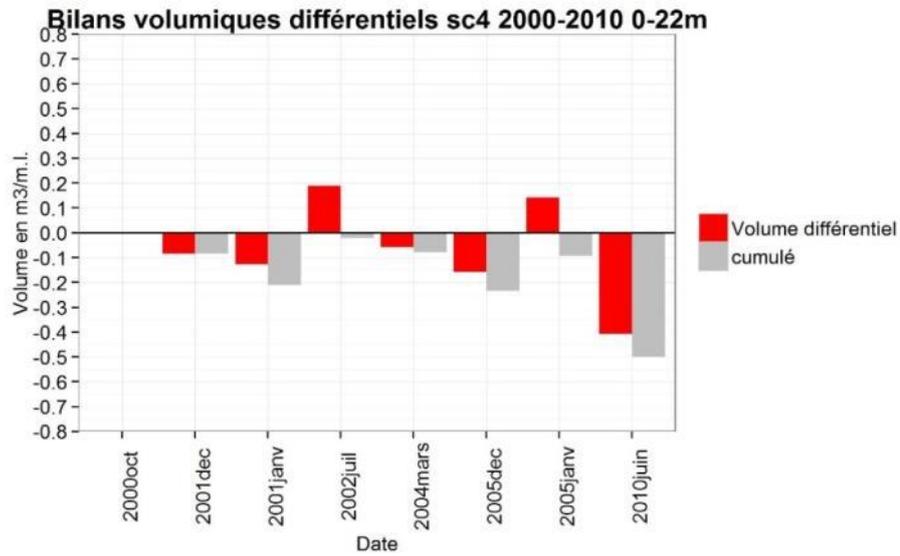
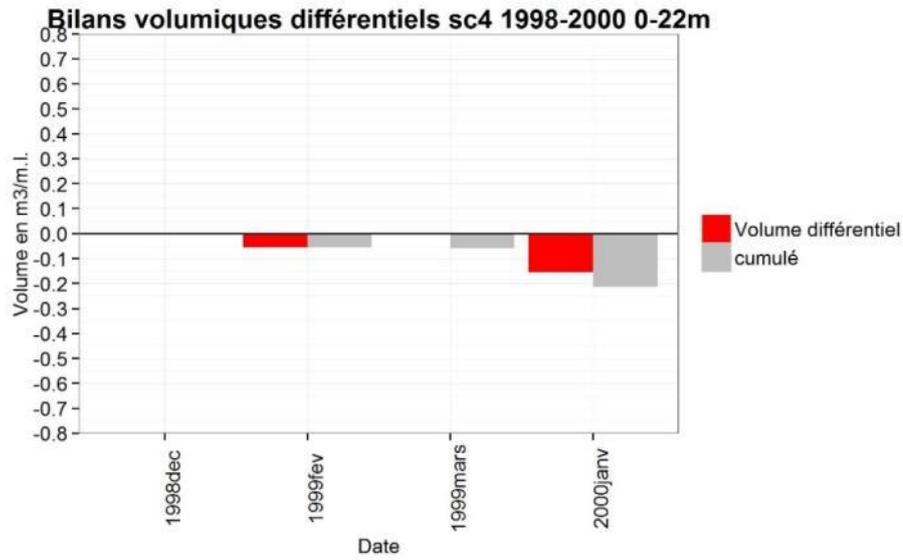


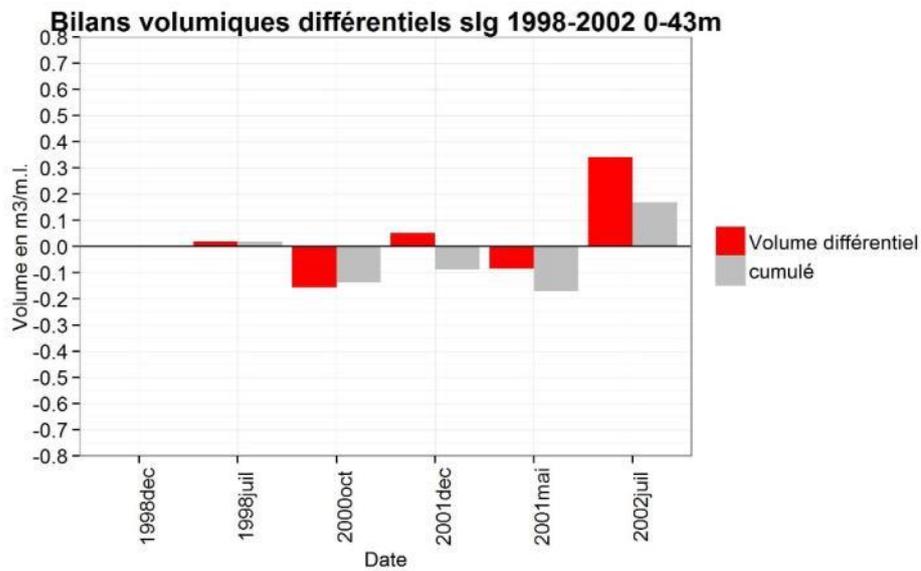
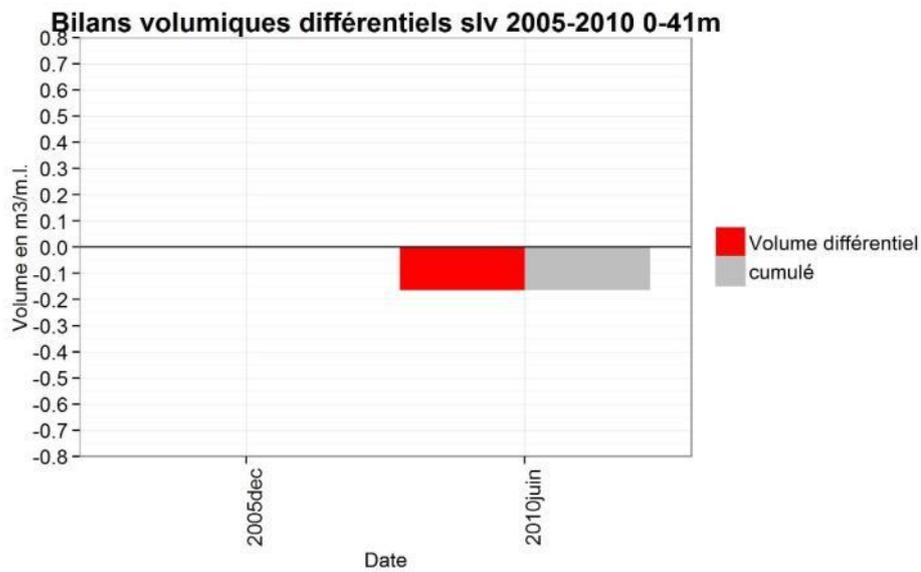
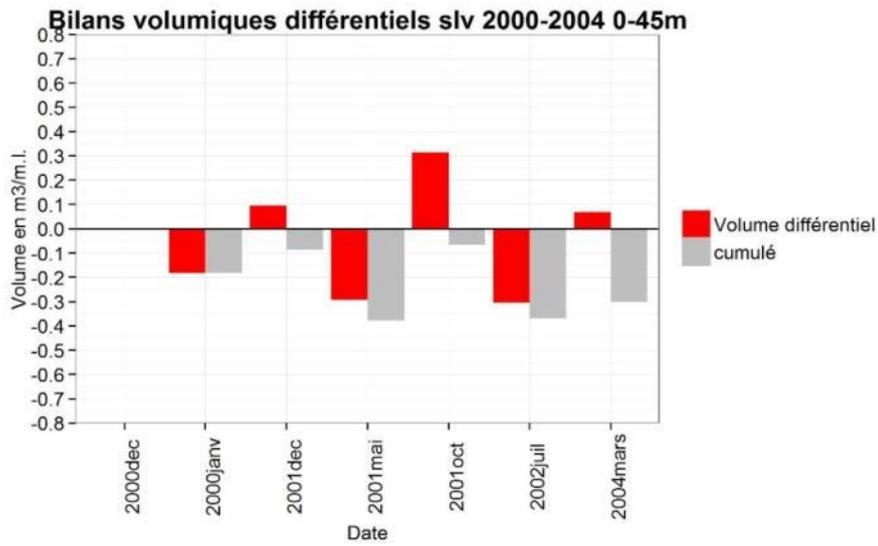


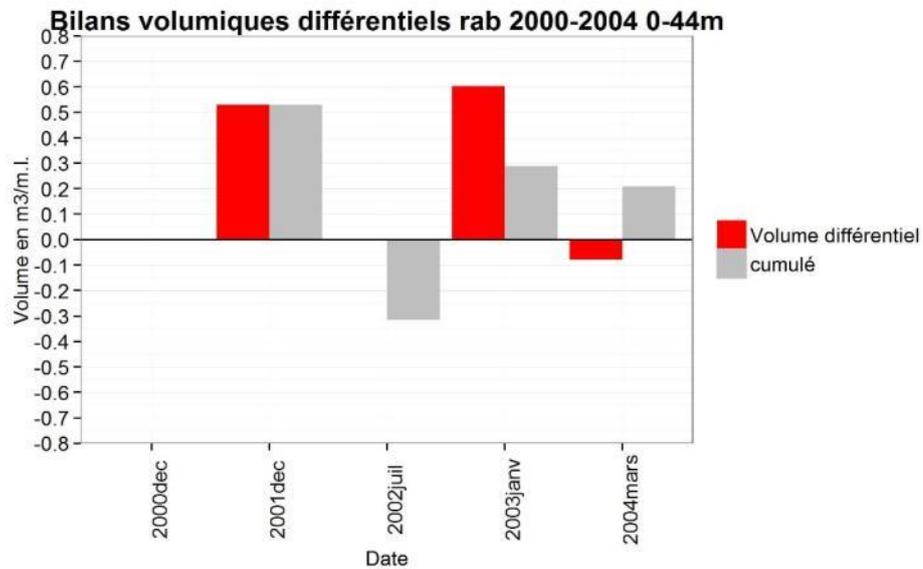
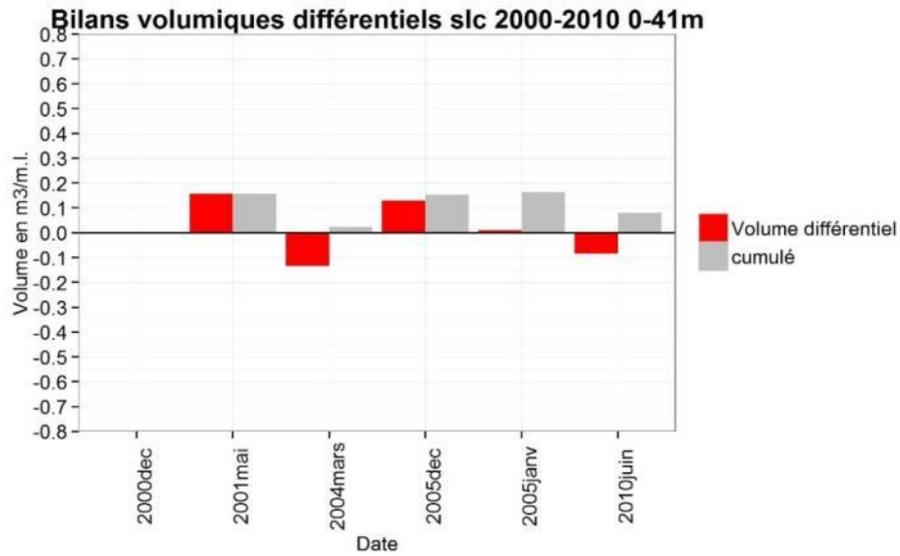
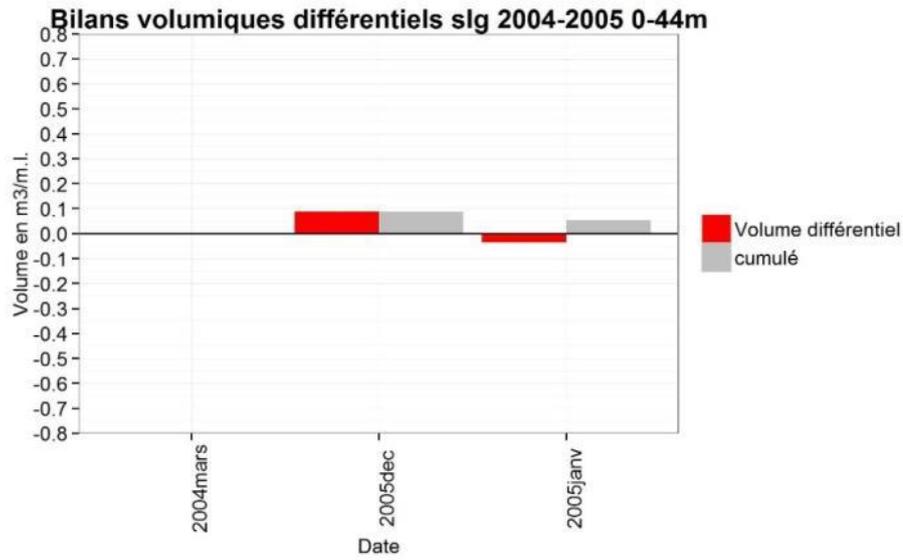


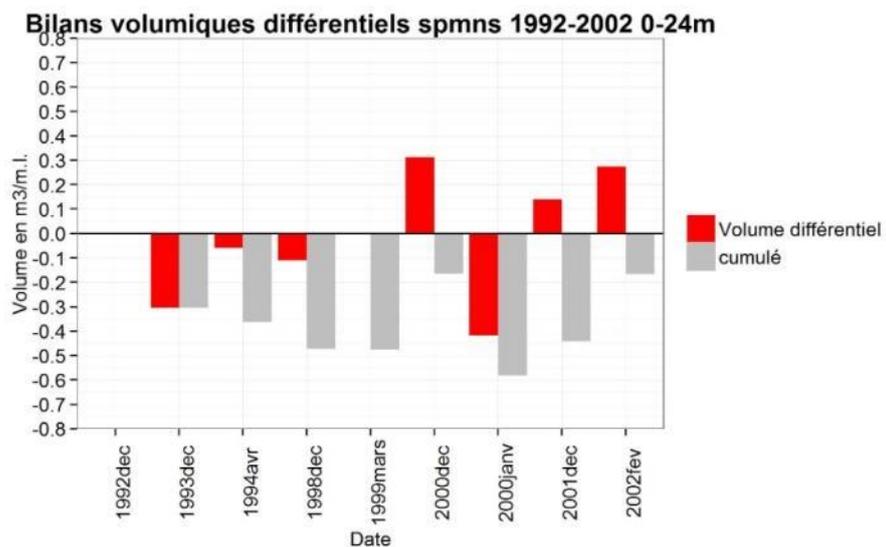
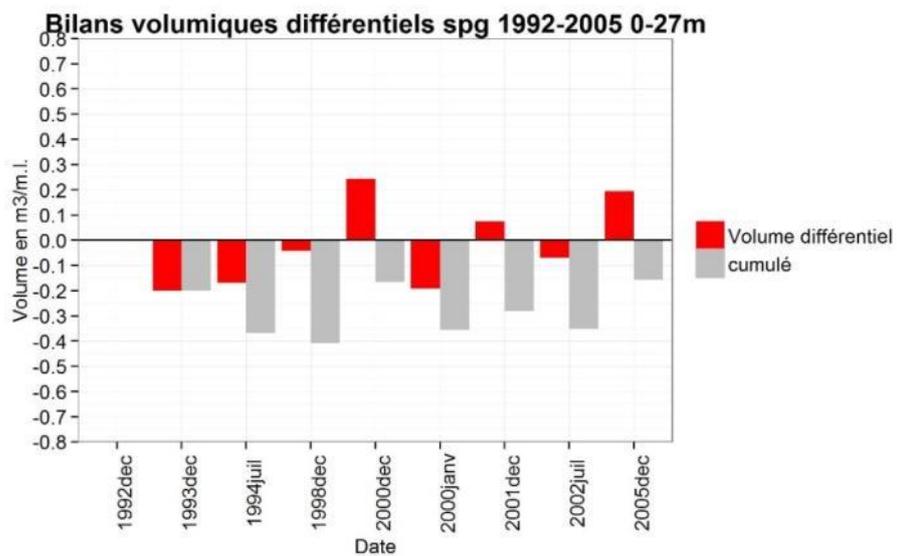














Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 régionale de La Réunion
5 rue Saint-Anne
CS 5101697404 Saint Denis Cedex
Tél. : 02 62 21 22 14