

Mémoire de master 1

QUELS SONT LES IMPACTS ET CONCLUSIONS DES EVENEMENTS CLIMATIQUES D'OCTOBRE 2013 A MAI 2014 SUR LA DUNE DE COMBRIT ?



Stages au SIVOM de Combrit du 27/10/13 au 18/05/2014

Benoît Guillot Université de La Rochelle Master SPE

Remerciements

Je tiens à remercier mes deux tuteurs Frédéric Pouget, Virginie Duvat Magnan, mais aussi Cécilia Pignon Musseau pour l'aide et l'accompagnement durant ces 8 semaines de stages durant l'année universitaire, notamment pour le prêt du matériel.

Sans oublier Frédéric Rousseaux, Xavier Bertin et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de l'ensemble des stages ainsi que de ce mémoire.

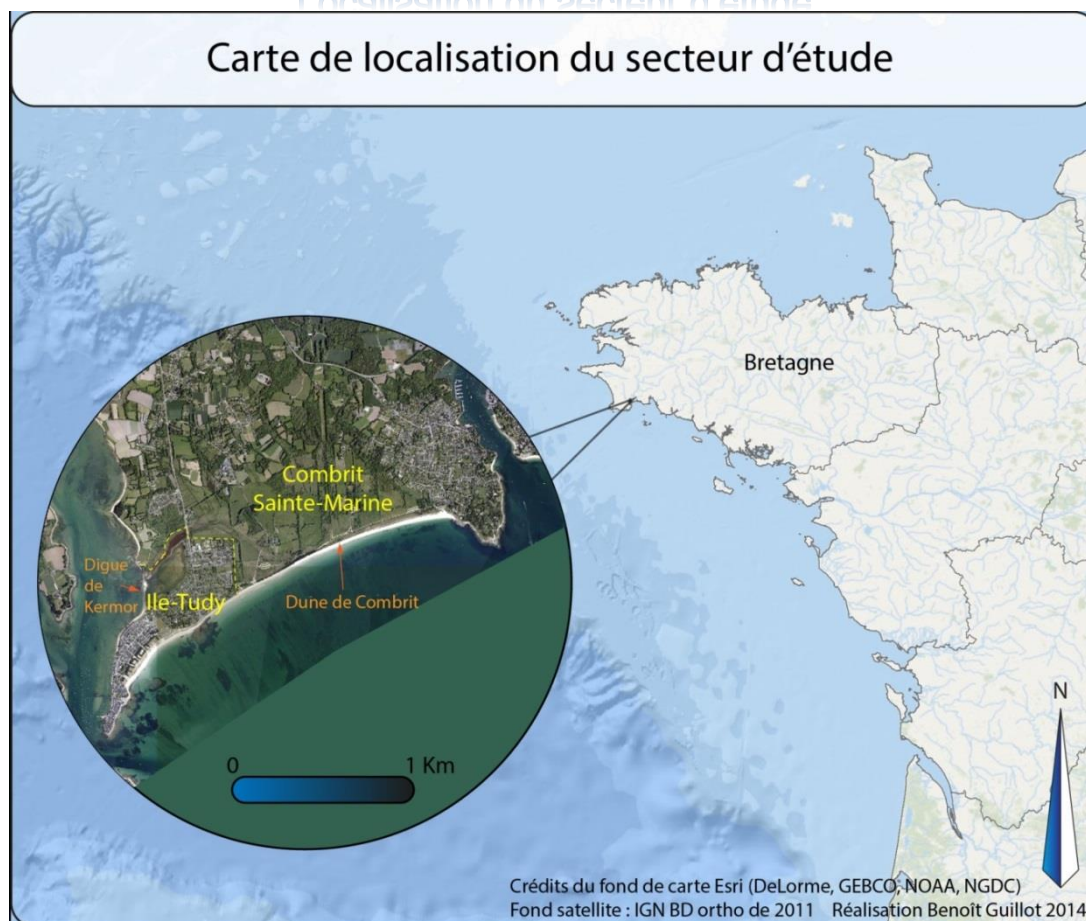
Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe du SIVOM de Combrit-Ile-Tudy, particulièrement Patricia Rolland, qui m'a accueilli tout au long de l'année à travers l'ensemble des stages.

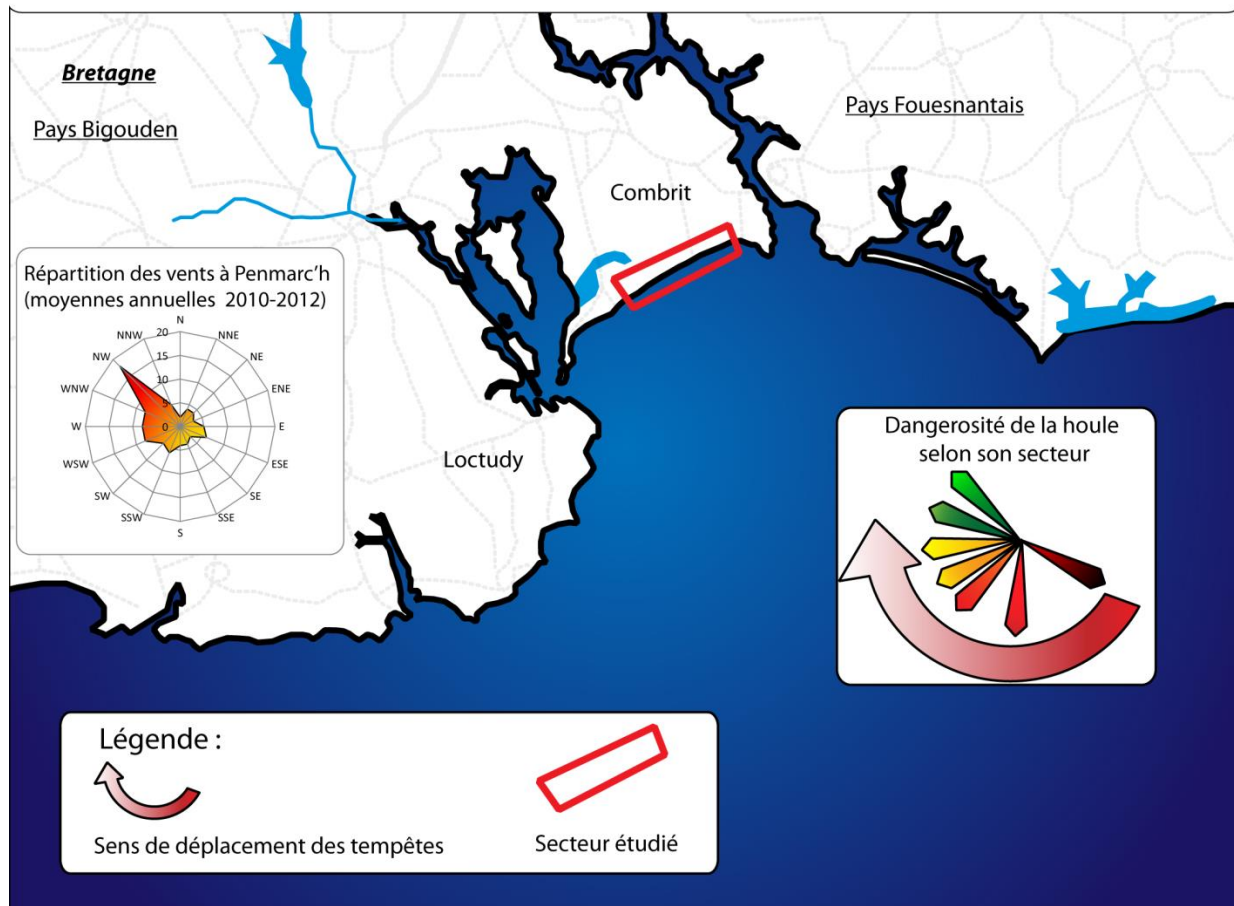
Enfin, afin de réaliser les injections sédimentaires, merci à l'équipe de l'Univers du Peintre de Pleuven, particulièrement Alexandre Boudinet qui a relevé le défi de trouver de la peinture fluorescente en un temps record, tout en s'adaptant au budget serré initial.

Table sommaire

Mémoire de master 1	1
Quels sont les impacts et conclusions des évènements climatiques d'Octobre 2013 à Mai 2014 sur la dune de Combrit ?	1
Remerciements.....	2
Table sommaire	3
Localisation du secteur d'étude.....	4
1) Introduction et contexte	5
2) Etat de l'art.....	8
3) Démarche et méthodologie proposée.....	10
4) Travaux préliminaires nécessaires au déroulement des différents stages	12
Partie I : Evolution de la dune et de la plage d'octobre 2013 à mai 2014	14
I) Observations réalisées durant la tempête Christian.....	15
II) Observations réalisées pour le coup de vent Godehard	19
III) Mesure de la reconstruction du gradin de pied de dune suite à Godehard	22
IV) Observations réalisées durant la tempête Dirk.....	23
V) Observations réalisées de janvier à mars 2014 (Petra, Ulla, Christine)	25
VI) Marquages sédimentaires sur l'ensemble de la cellule sédimentaire	26
Partie II : Evaluations des enjeux urbains et routiers.....	29
I) Présentation de la démarche.....	30
II) Analyse de l'altimétrie de l'ensemble du polder	30
III) Evaluation des risques de submersion des routes.....	31
IV) Evaluation des risques de submersion du bâti	32
V) Modélisation du risque de submersion selon l'altimétrie NGF du terrain	33
Partie III : Trait de côte de référence, bilans et conclusions	35
III.1) Enjeux de relocalisation du trait de côte	36
III.2) Bilans et conclusions	37
Bibliographie	38
Tables.....	39
Table des figurés.....	39
Table des cartes.....	40
Table des matières.....	40
Annexe 1 : Le protocole de sécurité appliqué aux sorties terrain dangereuses (pics des tempêtes) ...	43
Annexe 2 : Affichage pour le public et les visiteurs réalisé	44
Annexe 3 : Cible de repérage pour les MNT réalisés avec le drone	44
Annexe 4 : Evolution de la tâche urbaine sur la commune de l'Île-Tudy.....	45
Annexe 5 : Procédé de réalisation de photographies aériennes.....	45
Annexe 6 : Procédé de réalisation de MNT via un GPS	49
Annexe 7 : Procédé de réalisation d'un lever GPS du trait de côte	49
Annexe 8 : Procédé d'injection de sédiments colorés	49
Annexe 9 : Les coefficients de marées à travers les stages	50
Résumé	51

Localisation du secteur d'étude





1) Introduction et contexte

L'Ile-Tudy est un territoire à l'histoire et à la culture assez marqués. Les Iliens, comme sont appelés ses administrés, ne sont plus insulaires depuis les années 1852-1853. En effet à cette époque, un vaste plan de polderisation a été mis en place afin d'assécher des marais, alors considérés comme insalubres [24] : la digue de Kermor, a été construite à l'Ouest et au sud, le cordon dunaire aménagé afin d'éviter que la mer, lors des tempêtes et des forts coefficients, ne reprenne sa place dans le polder.

Depuis ces aménagements, le polder a changé de vocation. Originellement destiné à l'agriculture [20], il est rapidement passé à partir du milieu du XIX^{ème} (date d'effondrement économique des pêcheries et sardinerie locales) [16, 17, 24], une destination touristique privilégiée des Quimpérois d'abord, puis après les congés payés avec l'essor de l'automobile, de la France ensuite.

Face à une activité agricole de moins en moins rentable (fermeture d'une exploitation de marais salants, abandon des terres agricoles), les terres laissées à l'abandon ont rapidement été cédées à quelques familles locales [20].

Sous les pressions foncières et les demandes en terrain de plus en plus fortes, ces familles ont rapidement fait le choix de revendre une partie des terrains qui, d'années en années prenaient de plus en plus de valeur.

L'attractivité de la commune n'est plus à démontrer, ses plages au sable blanc et décrit comme « fin », sont prises d'assaut par les



Figure 1 : Photo aérienne du Polder de Roscouré ou Polder de Combrit (B. Guillot 2014 120m), on y distingue la dune, dernier rempart de protection des habitations contre les tempêtes.



Carte 1 : Aperçu de la carte de l'Etat Major du secteur au 140 000^{ème} (XIX^{ème}), il est possible d'y voir la flèche / tombolo en direction de la formation rocheuse de l'Ile-Tudy.



plageurs, avec une population qui passe de 700 habitants en hiver à environ 7 000 durant la belle saison (données communales) [24].

Le cordon dunaire de Combrit est à considérer comme un ouvrage de défense. En effet, c'est le dernier rempart contre la submersion marine du polder. Ancienne flèche sableuse revêtant les mêmes caractéristiques qu'un tombolo vers l'Ile-Tudy, le cordon dunaire était jusque dans les années 1850, submergé lors des tempêtes et des marées de vives eaux.

Aujourd'hui, ce cordon dunaire est géré et propriété du SIVOM (Syndicat Intercommunal à Vocation Multiples) de Combrit Ile-Tudy.

De presque 3km de longueur, sa largeur varie en fonction de l'état de fragilité de la dune. Vers l'Est, il est de type « dune bordière » [29] avec une dune grise ainsi qu'une dynamique plage-dune plutôt prononcée. Cette partie de dune présente une morphologie assez large d'une centaine de mètres pour une altimétrie de presque 11m (NGF).

Vers l'Ouest, le cordon dunaire fréquemment soumis aux submersions et surverses (2009, 2010, 2014), a été remblayé dans les années 1996 puis réaménagé en 2011, avec une largeur d'environ 20m pour altimétrie moyenne de 5m (NGF). Ce cordon dunaire dont l'anthropisation a été assez forte, a connu une campagne de plantation de Pins Maritimes, ainsi que de nombreux Cyprès Lambert, dans les années 1960. Depuis 2011, cette partie de la dune est soumise à une importante procédure de réhabilitation, avec le déboisement des Pins et Cyprès, au profit de la replantation de l'Oyat Gourbet.

Entre ces deux types de dunes (ne formant qu'une entité physique), se trouve une dune perchée. Cette partie du cordon dunaire de transition d'une largeur d'environ 60m, pour une altimétrie moyenne de 9m (NGF), dont la façade, exposée à la mer, est une falaise plus ou moins vive en fonction de la violence des tempêtes qui viennent la frapper. Au pied de cette falaise, un gradin se forme régulièrement sous l'action des avalanches sédimentaires gravitaires, mais aussi de la chute de mottes constituées de sable et d'oyat. C'est ce gradin qui est régulièrement mobilisée durant les tempêtes jouant un rôle de réserve sédimentaire tampon.

Avec une prise de recul face à ces divers essais, les conséquences sur le moyen et long terme sont majoritairement des échecs, aucun procédé de défense appliqué au cordon dunaire n'a durablement fonctionné.

En effet, le procédé Cornic est devenu inefficace, conséquence du recul du trait de côte. Le procédé Tri-X, implanté en 2002, a été démonté suite à la tempête de 2003, avec plus de 98% de pertes matérielles. Enfin, les rechargements sédimentaires ponctuels ont du mal à résister aux différentes tempêtes.

D'octobre 2013 à mai 2014, les dégâts causés par les divers événements climatiques ont été de « mémoire d'Ilien » rarement aussi répétés.

Bien que la municipalité ait rapidement et ce dès les années 1980 [8, 9], pris des mesures de protection et de sauvegarde des habitations, par l'intermédiaire de différents plans de prévention des risques, il n'en demeure pas moins que celles construites antérieurement aux normes contre les risques de submersion, demeurent exposées aux aléas climatiques.

Face à ces tous ces événements climatiques, il est possible de se poser la question : quels sont les impacts de ces tempêtes et les différentes solutions envisageables appliquées à la dune de Combrit ?

Figure 2 : Photo aérienne de la digue de



Figure 3 : Les restes du procédé Tri-X en février 2003 (photo Ptolémée)



Figure 4 : Le secteur reboisé en 1990 avec les Cyprès et les Pins à l'Ouest (Photographie B. Guillot 03/2011)



Figure 5 : La dune perchée ou dune de transition entre l'Ouest et l'Est, taillée en falaise plus ou moins vive selon l'intensité des tempêtes (ici en mai 2014 B. Guillot)

Le travail engagé dès le mois d'octobre 2013 s'est inscrit dans la continuité des levers et travaux de recherches déjà effectués sur l'ensemble du cordon dunaire.

Initialement la tâche s'axait autour de la tempête Christian, première de la saison 2013/2014 et surtout d'une série qui n'a pris fin qu'en avril 2014.

Au final, ce travail a permis de mesurer les impacts des différentes tempêtes, coups de vents et événements climatiques importants qui sont passés sur la dune de Combrit d'octobre 2013 à mai 2014, notamment d'un point de vue morphodynamique, mais aussi d'enjeux urbains. Les infrastructures bâties (routes et bâtiments indifférenciés), soumises à l'aléa climatique, ont été prises en compte, avec une mesure du risque de submersion.

Pour parvenir à ce résultat, plusieurs approches ont été engagées à partir des connaissances et informations déjà disponibles dans le monde universitaire et grâce aux ouvrages et références locales existants.



Figure 6 : Aujourd'hui, certaines terres propriété du Conservatoire du Littoral sont utilisées par des agriculteurs, un retour symbolique aux origines du Polder ?

2) Etat de l'art

Les documents les plus anciens retrouvés sur l'ensemble du site d'étude, allant de la rivière de Pont l'Abbé (afin de couvrir le secteur de la digue de Kermor), à la pointe de Sainte-Marine, sont les cartes géographiques, notamment celles de la famille des Cassini (XVIIIème), les cartes marines de Beautemps Beupré (XVIIIème), ou encore les cartes de l'Etat-Major (XIXème siècle). Chacune de ces cartes possède une échelle ainsi qu'une précision différente. Les cartes actuellement les plus exploitables sous logiciel SIG¹ à des fins de géoréférencement sont les cartes marines de Beautemps Beupré, mais aussi celles de l'Etat-Major.

Par la suite, l'IGN² a commencé à réaliser des missions sur le secteur, rendues publiques à partir de 1950, d'abord en noir et blanc, puis en couleur [20].

Un premier travail universitaire de licence a consisté à géoréférencer ces cartes, puis à en dessiner le trait de côte, afin de calculer les tendances d'évolutions de ce dernier [20, 21].

Dans les années suivantes la réalisation de ce travail, une étude menée par A. HENAFF et J. M. BOUFFORT [8], est venue compléter les tendances générales par des détails de la mobilité du trait de côte, grâce à des secteurs et profils témoins. Cette étude reste une référence majeure du savoir scientifique du secteur étudié.

Plusieurs travaux universitaires, dont un réalisé personnellement durant mon cursus de licence, ont permis d'appréhender les formations végétales du polder (travaux de stagiaires au SIVOM de Combrit Ile-Tudy), mais aussi et surtout, de recenser les espèces végétales présentes sur la dune ainsi que de cartographier précisément en très haute résolution leur localisation. S'ajoute à cette étude botanique, une cartographie à résolution identique, de l'acidité pédologique de l'ensemble du cordon dunaire de Combrit Sainte-Marine.

Concernant les mouvements sédimentaires, éoliens et marins, il est possible de travailler à partir de plusieurs références.

Afin d'évaluer les déplacements sédimentaires éoliens, l'ouvrage majeur utilisé lors d'un précédent travail universitaire [21], est celui de R. A. BAGNOLD [2], avec une formule d'évaluation des déplacements sédimentaires reprise par différents autres auteurs afin de l'améliorer notamment B. CARTER [27], qui va considérer l'attraction gravitaire selon un autre coefficient, mais aussi KAWAMURA [30] qui tient compte de l'humidité du substrat sédimentaire.

Ces formules ont notamment été reprises par C. MEUR-FEREC, mais aussi M-H RUZ [25], afin de réaliser un travail d'étude des déplacements éoliens dans le Pas de Calais en 2002.

C'est ce travail qui servira par la suite de base à l'application d'une méthodologie d'observation des déplacements sédimentaires sur la dune de Combrit, ainsi qu'à l'établissement d'un profil de déplacement éolien [21].

Cependant, ce travail reste partiellement inachevé car les différentes équations utilisées pour évaluer les transports sédimentaires n'ont pas été vérifiées à l'aide de pièges à sédiments, comme réalisé dans l'étude de référence [25], mais aussi par différents autres auteurs ayant travaillé sur le sujet [2, 27, 30].

En plus des déplacements éoliens il est nécessaire d'aborder la thématique des déplacements marins ou hydrologiques. L'étude de référence sur le secteur [8], semble porter des conclusions quant aux déplacements hydrosédimentaires d'une façon surprenante, parfois contraire à certaines observations réalisées sur le site d'étude [21], mais aussi par certains organismes [10, 22].

De ce fait afin de pallier le manque de certitude quant à ce mécanisme fondamental pour la compréhension du fonctionnement du site, il est possible d'observer et de s'inspirer des travaux de X. BERTIN [3]. En effet ce dernier a injecté dans un fonctionnement hydrosédimentaire des sédiments

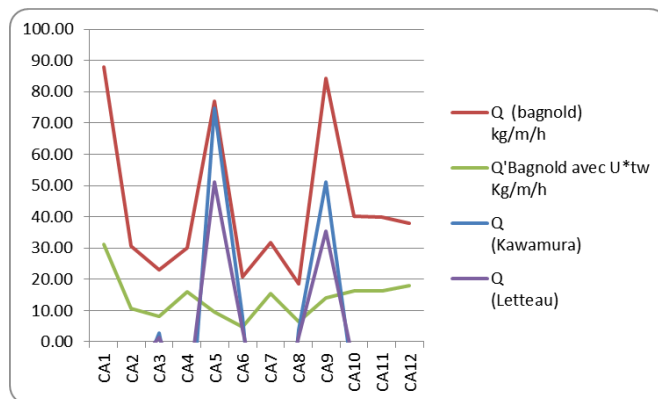


Figure 7 : Graphique comparatif des quantités sédimentaires déplacées selon les différentes formules des auteurs appliquées à la dune de Combrit lors d'une tempête en janvier 2013 (B. Guillot)

¹ SIG : Système d'Information Géographique

² IGN : Institut Géographique National

colorés en différentes couleurs, afin de mesurer et de quantifier les déplacements, sur le secteur sud de l'île d'Oléron.

En termes de topographie et de nivellement, l'outil de référence numérique local est le LIDAR³ faisant partie du projet LITTO 3D développé par l'IGN. Il permet d'obtenir un modèle numérique de terrain à l'échelle nationale, avec une précision altimétrique cohérente dans le cadre de levés réalisés sur un substrat sableux fortement mobile. De plus, le LIDAR du secteur a été réalisé en 2012, ce qui permet d'avoir un aperçu précis des travaux réalisés sur une partie du cordon dunaire.

Enfin, il est possible d'utiliser les nouvelles technologies que sont les plateformes aéroportées multirotors légères (appelées communément drones). Ces drones permettent d'embarquer du matériel de faible masse allant d'un capteur photo, vidéo, voire en l'état actuel des recherches menées aux Etats Unis (Californie), d'embarquer des LIDAR ultra légers (< 4kg).

Les capacités d'évolution de cette technologie sont énormes. L'utilisation des drones est en train de complètement changer les méthodes de réalisations des modèles numériques de terrain (MNT), avec comme travail de référence, la méthodologie mise au point par les « Licences Universitaires Professionnelles SIG de La Rochelle » [14]. Cette méthodologie peut encore être perfectionnée, notamment par l'utilisation de capteurs altimétriques embarqués, ainsi que des stabilisateurs gyroscopiques de caméras.

Cependant, l'utilisation de cette dernière technologie nécessitera une mise en conformité avec la loi du 11 avril 2012 publiée au Journal Officiel le 10 mai 2012, lorsque l'utilisation qui en est actuellement faite ne sera plus personnelle, mais deviendra expérimentale ou professionnelle.

Cette mise en conformité passera par la nécessité d'un pilote titulaire minimum du théorique BPL⁴ ou du PPL⁵, avec Manuel d'Activités Particulières (MAP) homologué par la DGAC⁶.

³ Lidar : Light Detection And Ranging

⁴ BBL : Basic Pilote License, Licence de pilote basique (ULM)

⁵ PPL : Private Pilote License, Licence de pilote privé (avion privé)

⁶ DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

3) Démarche et méthodologie proposée

Au regard des informations récoltées à travers la recherche d'ouvrages de références exposées au point précédent, il est possible de répondre à la problématique de recherche selon plusieurs méthodologies et angles de travail.

3.A) Méthodologies proposées pour les travaux de terrain

Afin de mesurer au mieux l'évolution du cordon dunaire plusieurs méthodologies peuvent être appliquées en utilisant un GPS différentiel.

Ces méthodologies permettent de mesurer l'évolution aussi bien en évolution longitudinale du trait de côte, qu'en évolution verticale afin d'évaluer les quantités sédimentaires perdues ou gagnées.

La méthodologie suivante a été appliquée pour l'ensemble des tempêtes et événements climatiques observés sur le cordon dunaire, lorsque les conditions étaient favorables.

Afin de mesurer le recul ou l'avancée du trait de côte, il est possible de relever au GPS différentiel la position du pied de dune.

La limite de cette dernière a été définie [26] en prenant :

- Le pied des falaises vives et actives
- Ou, si c'est le cas le pied des gradins
- Ou, si aucune des solutions précédentes n'était applicable : la limite végétale

Afin de mesurer les quantités sédimentaires perdues ou gagnées par secteur, il est possible d'effectuer le levé d'un nuage de points sur site qui sera ensuite retraité (outil IDW sous Arcgis), afin d'être transformé en MNT.

Deux méthodes proposées [26], ont permis de réaliser ces MNT soit en prenant un nuage de point en suivant un quadrillage fictif, soit en prenant un point altimétrique à chaque rupture de pente.

C'est essentiellement la seconde méthode qui a été exploitée durant les stages.

Cette méthode permet d'avoir après un double traitement (TIN puis IDW), une représentation plus conforme à la réalité qu'un nuage de point effectué en prenant un quadrillage fictif.

Cette méthode de mesure des quantités sédimentaires gagnées ou perdues nécessite une comparaison de MNT. De ce fait il a été décidé de réaliser un MNT avant et après chaque événement climatique. La comparaison se fait dans un second temps avec l'outil « comparaison de MNT », sous un SIG (Arcgis).

Afin de mesurer précisément les pertes sédimentaires sur l'ensemble du trait de côte (exemple carte 7), des profils en travers ponctuels permettent après un croisement avec les données de proximité du trait de côte observé avec le trait de côte de référence, d'obtenir des quantités précises (précision au m³). Ces quantités sédimentaires sont calculées à partir de la pénétration du trait de côte ou éloignement de ce dernier par rapport au trait de côte de référence, croisé avec la longueur des tronçons, puis croisés avec la différence altimétrique entre les profils en travers ponctuels.

Si possible, aux différents pics des tempêtes, il est possible de prévoir des sorties sur le terrain afin d'observer les hauteurs des houles et les niveaux atteints par ces dernières sur la dune.

Des mesures éoliennes sont aussi réalisables afin de pouvoir vérifier et améliorer le modèle de déplacement éolien obtenu durant le stage de décembre 2012 à janvier 2013 au SIVOM de Combrit. Cette méthodologie a été mise en place en janvier 2013 sur le secteur de Combrit [21].

Afin de comprendre la dérive sédimentaire qui impacte le secteur, [méthodologie décrite en annexe 8], une méthodologie simplifiée vis-à-vis de celle expérimentée sur l'île d'Oléron [3], peut-être mise en place.

Enfin, afin de pouvoir travailler avec des images aériennes récentes et avoir une vue aériennes des chantiers, une nouvelle méthodologie exploitant un drone a permis de prendre des photographies aériennes précises (cf 3.C).

3.B) Méthodologie de mesures SIG

Lorsque les données IGN (LIDAR Litto3D) ont été rendues disponibles par le Conseil Général du Finistère, il a été possible de pouvoir les exploiter sous un SIG.

Les données mises à dispositions sont :

- Le LIDAR (IGN Litto 3D)
- La BD Ortho (IGN, orthophotographies)
- La BD Topo (IGN, informations vectorielles de type « routes » et « bâti »)

Après un travail de statistiques zonales, croisant les données vectorielles avec les données LIDAR, il est possible d'obtenir les points les plus exposés à la submersion marine du polder.

De plus, les levés LIDAR ont aussi permis de modéliser une submersion marine à plusieurs niveaux d'altimétries NGF dans le Polder.

Les travaux réalisés sous SIG permettent aussi de géoréférencer des photographies IGN historiques (remontant jusque dans les années 1950), mais aussi les photographies personnelles prises par drone.

Le géoréférencement de ces images raster s'est fait en ordre 1 pour les photographies IGN, et d'ordre 2 avec Spline, ou d'ordre 3 pour les photographies personnelles.

3.C) Méthodologie expérimentale de mesure via l'usage d'un drone

Un drone personnel a été utilisé pour réaliser à partir d'avril 2014 des expérimentations de différents types.

Ces expérimentations vont de la réalisation de modèles numériques de terrain (MNT) [19], plus précis que ceux réalisés par GPS différentiel, géoréférencés, donc exploitables sous SIG, à la prise d'images aériennes plus récentes.

Concernant les images aériennes, elles sont exploitables sous un SIG après un travail minutieux de géoférencement.

L'intérêt de cette dernière expérimentation est de remettre à jour les images de la BD Ortho IGN datant de 2010.

Concernant la réalisation de MNT et MNS⁷ à partir d'un drone plusieurs méthodes sont applicables.

- Une méthode sans stabilisateur de caméra, qui donne des résultats moins précis mais rajoute du temps de vol.
- Une méthode avec stabilisateur électronique de caméra, onéreuse, mais qui donne d'excellents résultats. Cependant dans des conditions météorologiques techniques la durée de vie de la carte de stabilisation est presque divisée par deux. Une fois le stabilisateur de caméra monté sur un circuit d'alimentation électrique séparé, le temps de vol du drone est moins impacté qu'en montage direct, avec alors un risque accru de défaillance système.
- Une méthode par stabilisation mécanique expérimentale qui permet de sortir dans des conditions météorologiques techniques, sans avoir les contraintes de l'électronique, mais avec une stabilisation légèrement moins précise que l'électronique. Cette méthode ne nécessite pas d'alimentation électrique.

De plus, afin d'améliorer la mise en application du vol, mais aussi afin de respecter la législation

- L'utilisation d'outils de mesures embarqués tels que les variomètres ou altimètres est fortement recommandée. Ils permettent d'avoir un retour altimétrique aidant à travailler d'une façon plus ou moins précise selon l'utilisation ou non de ces instruments. Ces instruments consomment peu de courant et permettent d'exploiter les performances du drone au maximum, en autonomie de batterie, tout comme en limite plafond altimétrique.
- L'utilisation d'un retour vidéo permet aussi de cibler particulièrement l'objet ou secteur étudié. Son utilisation facultative et onéreuse permet de gagner du temps dans les vols et économiser des batteries si le circuit d'alimentation de l'émetteur radio vidéo est monté sur un circuit d'alimentation électrique séparé.
- L'utilisation d'antennes de type Champignon qui permettent d'envoyer un signal radio plus précis et plus important que les traditionnelles antennes droites.

⁷ MNS : Modèle Numérique de Surface

3.D) Synthèse des différentes méthodes

Tout ce qui concerne la vulnérabilité sera couvert par l'analyse de « l'état de santé », du cordon dunaire (ouvrage de défense le plus sensible), grâce aux levés GPS qui permettent de réaliser des MNT, mais aussi de mesurer l'évolution du trait de côte, à la fois longitudinalement (levé linéaire du trait de côte), et verticalement (profil en travers).

Le croisement de ces deux derniers levés permet d'obtenir des bilans sédimentaires assez précis.

La méthode expérimentale par drone permet de constituer une démarche d'analyse par modélisation 3D utilisant un photo-croisement, avec la constitution d'images aériennes précises.

Cette méthode risque de venir remplacer les traditionnels MNT réalisés, beaucoup moins précis.

Enfin, la vulnérabilité passe aussi par l'analyse de l'urbain et du bâti avec le croisement des données IGN, afin de comprendre, en cas de submersion marine du polder (modélisation de submersion), quels seraient les ouvrages les premiers touchés, les conséquences envisageables sur les populations ou encore les secours possibles.

4) Travaux préliminaires nécessaires au déroulement des différents stages

4.A) Bornes et profils altimétriques

Afin de pouvoir travailler efficacement sur l'évolution morphologique de l'ensemble du cordon dunaire tout au long de l'année, il a été nécessaire d'implanter plusieurs bornes altimétriques de références.

Ces bornes sont constituées de pieux d'environ 15cm de diamètre. Elles sont implantées par paires pour un contrôle de leur altimétrie et une vérification que ces dernières n'ont pas été touchées ou dégradées.

Elles permettent de matérialiser sur le cordon dunaire les profils

témoins et venir compléter l'ensemble des bornes OGE déjà existantes mais qui ne couvrent pas l'ensemble du cordon dunaire.

Ces bornes offrent aussi l'opportunité de faire du nivellement topographique direct et de partir de points connus.

Elles ont été implantées durant le premier stage de la Toussaint 2013 et nivelées avec un GPS différentiel de précision $\leq 10\text{cm}$, regroupé avec le LIDAR du secteur.



Figure 8 : une borne personnelle implantée sur le secteur 5 (photo B. Guillot)

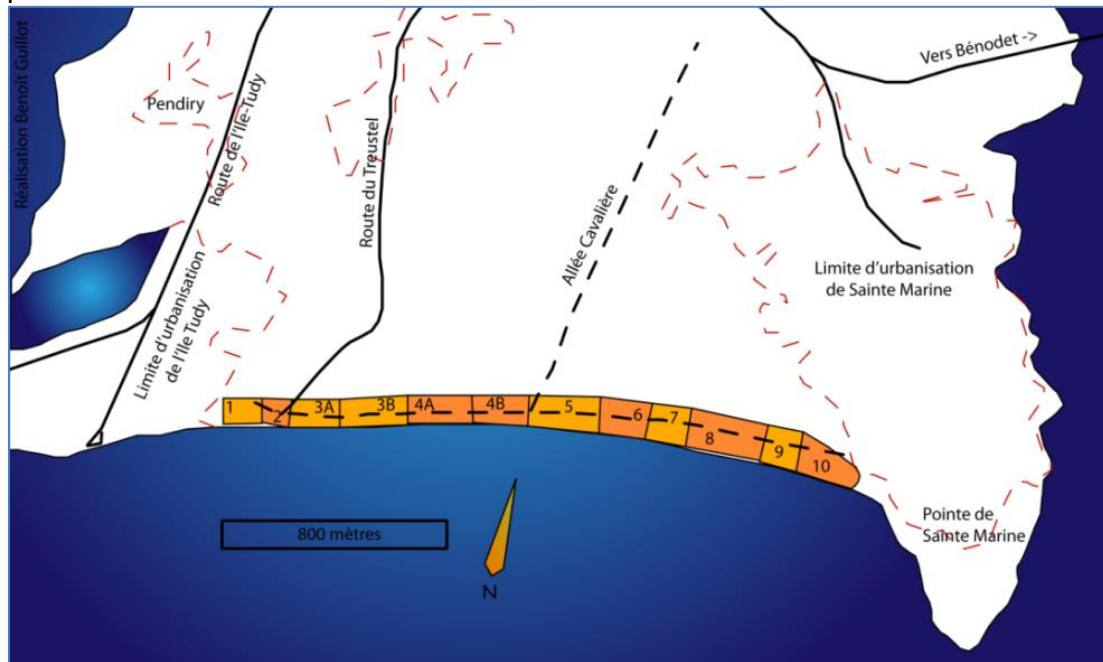
4.B) Désignation des secteurs

Une partie du cordon dunaire a été divisée en différents secteurs.

Les secteurs de 1 à 4b ont été numérotés par le SIVOM de Combrit Ile-Tudy pour réaliser l'ensemble des travaux de réaménagement du cordon dunaire. Les secteurs de 5 à 9 ont été numérotés d'une façon personnelle, en tenant compte des entités et secteurs physiques afin de pouvoir continuer le précédent découpage.

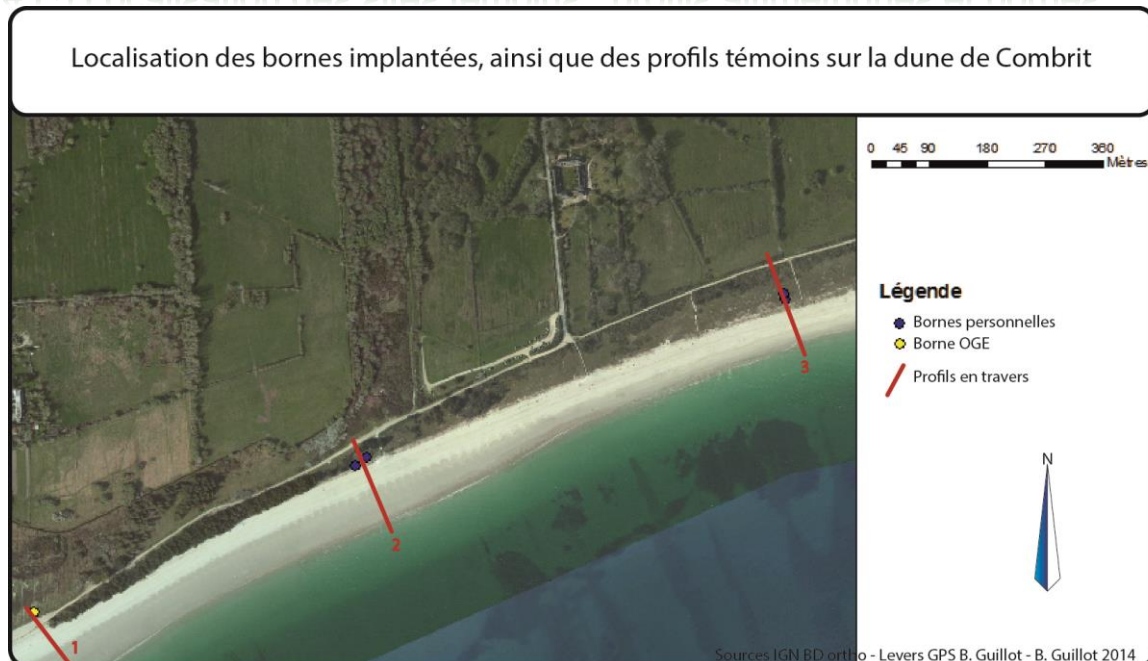
Ce découpage suit la répartition géographique des accès piétons à la plage.

Ils sont répartis comme le montre la carte suivante :



Carte 2 : Carte de présentation du découpage de l'ensemble de la dune de Combrit en secteurs, réalisation B. Guillot basé sur le fond de carte OSM⁸

4.C) Localisation des sites témoins : profils altimétriques et bornes



Carte 3 : Carte de présentation de l'implantation des profils altimétriques témoins, permettant d'assurer le suivi de l'évolution morphologique de la dune et de la plage.

⁸ OSM : Open Street Maps

Partie I : Evolution de la dune et de la plage d'octobre 2013 à mai 2014



Figure 9 : Le drone "Wallee" en train d'observer la tête d'enrochement attaquée par la réflexion des énergies marines (Photo B. Guillot 25m mai 2014)

I) Observations réalisées durant la tempête Christian

I.1) Travail de terrain

I.1.A Sortie préliminaire (nuit de samedi 26/10/13 à dimanche 27/10/13), réalisation de profils en travers

Lors de la première sortie, il a été constaté et relevé une température de 14°C, avec un vent moyen de 18 nœuds et des rafales à 28 nœuds. Le vent était de secteur Sud-Sud-Ouest.

La houle atteignait une hauteur moyenne observée de 1,10m avec une période de 5 secondes et une hauteur maximale de 1m50, de secteur Sud.

La morphologie de la dune présentait un profil topographique de type estival (cf. profil altimétrique de novembre 2011 p37), sur tous les secteurs Ouest jusqu'à l'allée cavalière. A partir de cette dernière, il a été constaté un profil topographique hivernal (type plage encaissée avec fossé de déferlement) et une micro falaise de plage d'une hauteur de 50cm, croissante jusqu'à plus de 1m50 sur le secteur de la pointe de Sainte Marine.

Il n'a pas été observé de régression sédimentaire sur le pied de dune.

Il est à noter que ce sont essentiellement les stocks sédimentaires accumulés en gradin depuis novembre 2012 qui ont été mobilisés.

I.1.B Sortie GPS (27/10 10H-12H30 et 15H-19H)

Cette sortie était destinée à prendre des points GPS sur les parties « fixes » de la dune qui ne bougent (selon les observations) presque pas, même durant les tempêtes, ces points permettront, une fois post traités ; de croiser les données avec le LIDAR.

Le vent était soutenu avec une moyenne de 20 nœuds et des rafales à 30 nœuds. La température atteignait 14°C. Les hauteurs de houles étaient variables selon l'état de la marée, avec 1m50 moyens observés à 10H et 80cm observés à 16H.

Les précipitations s'avéraient importantes avec 3.5mm relevés sur la commune de l'Ile-Tudy.

Durant cette sortie, il a été possible d'observer la réfraction des houles dans la baie de Combrit (cf. schéma visible en I.2.b).



Figure 10 : Première mesure éolienne test de moins d'une minute durant le pic de la tempête afin de calibrer les anémomètres (photo B. Guillot)

I.1.C Sortie d'observation n°3 de pic de tempête (27/10 21H30-24H puis le 28/10 2H-3H)

Cette sortie était destinée à observer l'évolution du vent durant la tempête sur des secteurs stratégiques de la dune.⁹

Au préalable de cette sortie, un protocole de sécurité a été mis en place afin de pouvoir mener la sortie terrain sans encombre (annexe 1).

A l'aide de deux anémomètres, le premier sur une station, et le second sur une perche à 4m d'altitude, il a été réalisé une série de relevés enregistrant les moyennes ainsi que les valeurs maximales (en suivant le protocole décrit en [13]).

Cette sortie a permis de comparer les données observées avec celles relevées lors de la sortie nocturne de décembre à janvier 2013.



Figure 11 : Observation de la déflation durant la tempête Christian (photo B. Guillot)

La sortie s'est soldée par un retour prématuré conséquence de la présence à proximité de Concarneau d'un orage (les perches des anémomètres étaient en métal).

Il n'a pas été utile d'utiliser le matériel GPS pour cette sortie.

⁹ Sont désignés comme stratégiques les secteurs observés morphologiquement depuis novembre 2012, comprenant les secteurs 3a et 3b, ainsi que les secteurs 6 et 8.

Plusieurs phénomènes ont pu être observés, du transport éolien par saltation important (et presque continu), à un début d'attaque par la houle des pieds des accès à la plage.

A la marée haute, il a été remarqué que les vagues allaient au-delà de la laisse de mer précédente.

Au pic de la tempête, la mer avait déjà commencé à redescendre et les attaques sur la dune s'avéraient nettement moins importantes.

I.1.D Sortie n°4 GPS post tempête

Cette sortie était destinée à effectuer les levés topographiques du profil 1 et 2 (la marée permettait encore de travailler sur l'estran, cf. annexe 9), ainsi que le lever du linéaire de la micro falaise de plage afin de pouvoir observer l'évolution de cette dernière.

Les conditions atmosphériques étaient changeantes avec une augmentation du vent de 5 à 15 nœuds (établis) à 10H24 de secteur SSO, une température de l'air de 16°C, et une hauteur moyenne des vagues de 80cm.

I.1.E Sorties GPS n°5 et 6 31/10/13 de 8H à 11H30 et de 14H à 16H

Ces sorties étaient destinées à terminer les levés post tempête de l'ensemble des profils, mais aussi l'implantation et le nivellement des bornes sur la dune.

Cette implantation a débuté en février 2013, notamment sur le secteur 8, afin de pouvoir travailler avec une lunette topographique et d'effectuer un nivellement direct de suivi de la morphologie de la dune et de la plage durant les saisons.

Les conditions étaient relativement stables avec une moyenne de 15°C et un vent ne dépassant pas 6 nœuds.



Figure 12 : Aperçu du banc de sable qui s'est construit devant le fossé de déferlement, visible sur le MNT du secteur 2 réalisé durant la Toussaint (photo B. Guillot)

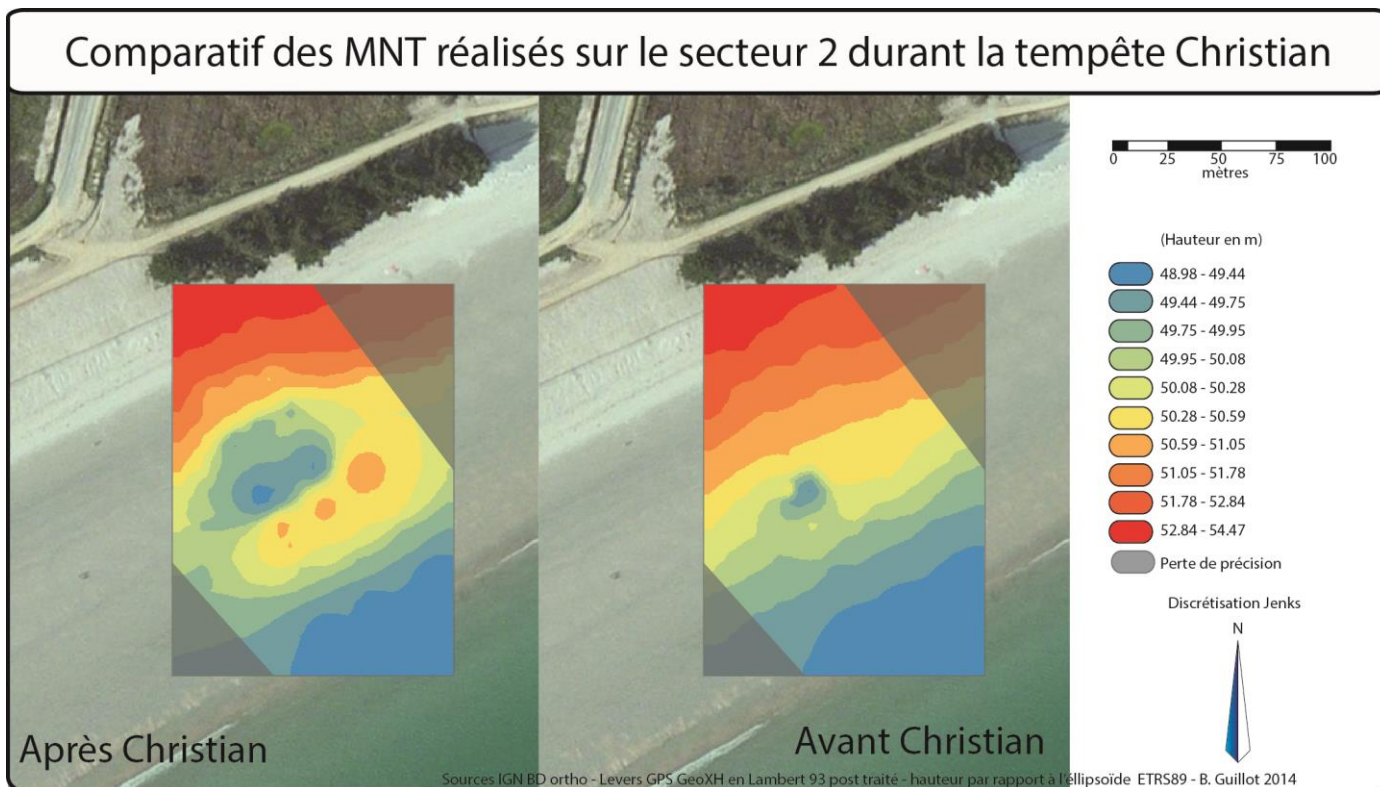


Figure 13 : Photographie du polder, avec une borne NGF au premier plan, ainsi que la vision de la nappe phréatique à un niveau de +50cm NGF (photo B. Guillot)

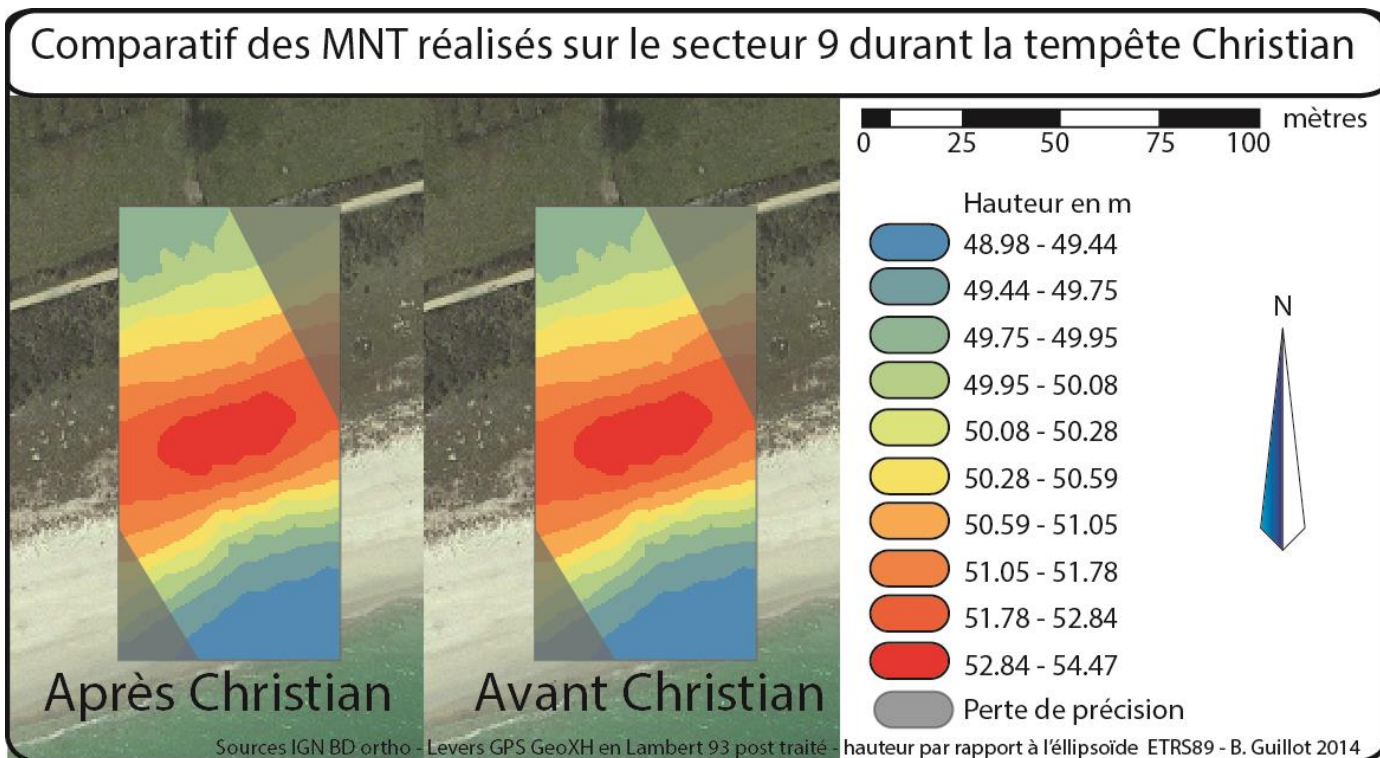
I.2) Modifications sédimentaires constatées

I.2.A Modélisation des modifications altimétriques

Ces modélisations ont été réalisées à l'aide d'un SIG (Arcgis), à partir des points altimétriques levés au GPS Geo XH (Trimble), corrigés différentiellement [méthodologie décrite en annexe 6].



Carte 5 MNT de présentation des impacts de la tempête Christian sur le secteur 2



Carte 4 MNT de présentation des impacts de Christian sur le secteur 9

I.2.B Commentaires des modifications altimétriques des MNT

En observant les deux planches de MNT, il est possible de remarquer que les modifications ont été plus importantes sur le secteur 2 (carte 3), que sur le secteur 9 (carte 4).

En effet pour ce secteur, le comparatif entre les 2 MNT réalisés semble identique.

Cependant, pour le secteur 2 (carte 3), il est possible de remarquer une nette évolution en pied de dune avec l'accentuation (par creusement) du fossé de déferlement [27] (causé par le déferlement des houles), ainsi que l'apparition du bourrelet d'accrétion, constitué d'une accumulation des sédiments arrachés dans le fossé de déferlement. Cette situation morphologique (bourrelet et fossé de déferlement) était visible presque uniformément sur l'ensemble du trait de côte avec l'apparition d'accumulations rocheuses.

Avant la tempête Christian, ce fossé n'était qu'au stade embryonnaire.



Figure 14 : Aperçu visuel du MNT réalisé après Christian, les enrochements (fossé de déferlement), laissent place à un bourrelet d'accrétion vers la mer (photo B. Guillot)

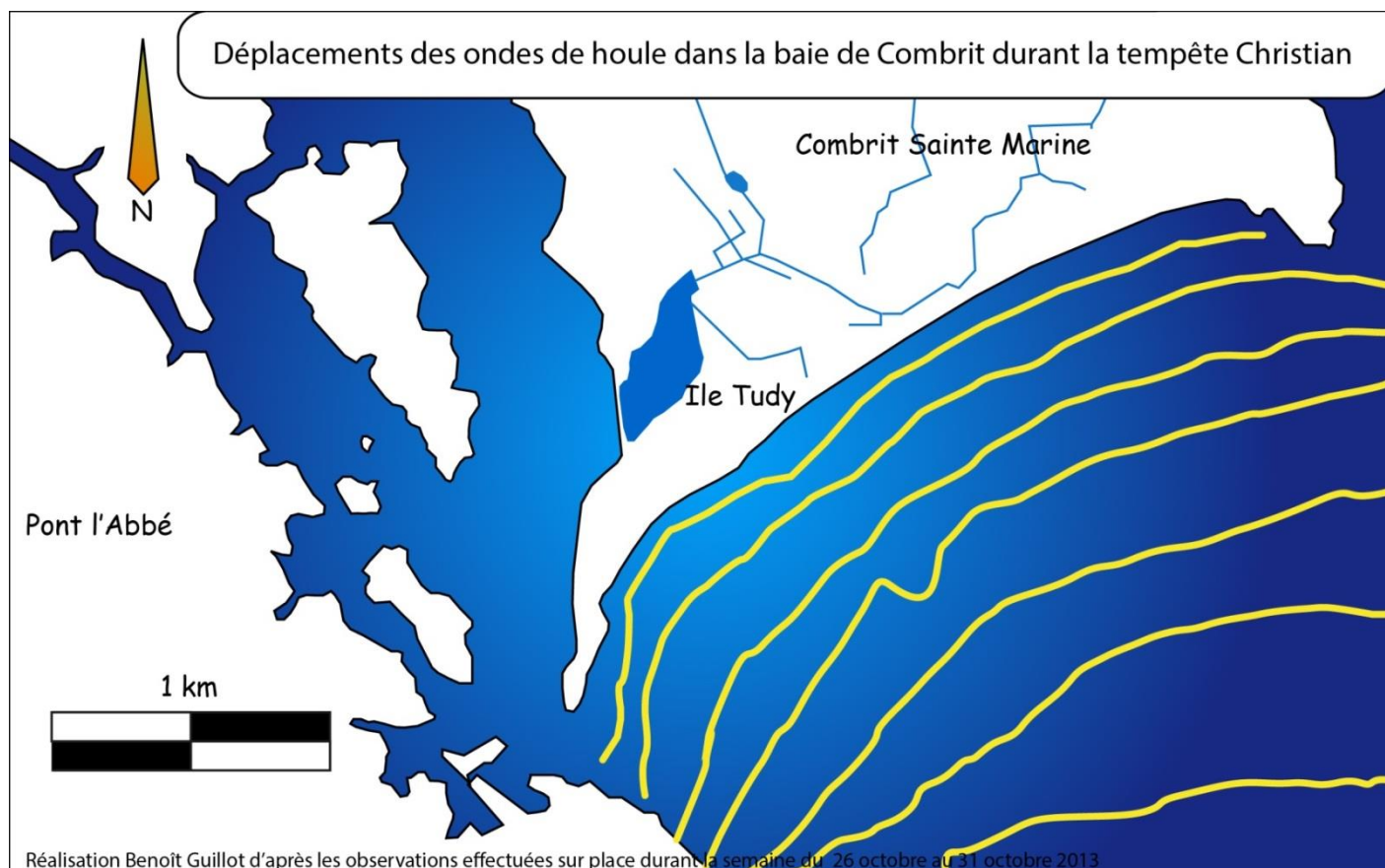
I.2.C Observations des houles dans la baie de Combrit durant la tempête Christian

En déplacement sur la pointe de Combrit, il était possible de pouvoir observer les ondes de houles traverser l'ensemble de la baie de Combrit.

Il était alors possible de pouvoir observer une houle de secteur Sud-Ouest venant frapper l'ensemble du trait de côte, de la pointe de l'Ile-Tudy à celle de Combrit.

Ces déplacements dans la baie ne sont pas uniformes, impactés par la topographie et la bathymétrie locale.

Ces observations ont été reproduites sur la carte ci-dessous :



I.3) Discussion autour des processus mécaniques

Les modifications sédimentaires constatées ne sont pas forcément importantes.

Le coefficient de marée n'étant pas très élevé, il n'a pas été constaté une attaque prononcée du pied de dune, le gradin étant resté presque inchangé.

Cependant, il a pu être constaté la formation d'un fossé là où les vagues déferlaient durant la période d'observation (sortie n°3).

Ce fossé avait été décrit par B. Carter [23] comme étant le résultat de l'action mécanique répétée du déferlement des vagues sur une partie de l'estran, notion traduite par « fossé de déferlement ».

Aussi, l'ensemble de la micro falaise présente sur la zone supratidale à partir de l'allée cavalière et jusqu'à la pointe de Sainte Marine, a sensiblement reculé vers la dune (environ 50 cm).

Enfin, il a pu être observé la construction sous l'action de la déflation, des formes ondulatoires de la pointe de Sainte Marine.

II) Observations réalisées pour le coup de vent Godehard

II.1) Travail de terrain réalisé post évènement

Les observations de ce coup de vent (du 03 au 04/11/13) ont été essentiellement effectuées post évènement, avec plusieurs profils en travers et un trait de côte réalisé durant le week-end du 7 et 8 décembre 2013.

Les houles étaient alors faibles (50 cm, 3 secondes de période), et l'ensemble du cordon dunaire, sous l'action de la déflation éolienne et des micros avalanches sableuses, avait alors déjà retrouvé un gradin assez consistant d'environ 3 000 m³ des secteurs 0 à 4b.

Il a cependant été observé une perte sédimentaire importante sur le secteur de la pointe de Sainte Marine chiffrée à plus de 6 000 m³, avec une déconstruction du profil dunaire de novembre significative.



Figure 15 : Aperçu d'une importante modification du profil de plage sur la pointe de Sainte Marine (photo B. Guillot)



Etat de la dune après le passage de Godehard.
Une micro falaise est taillée sur l'ensemble du cordon dunaire avec une perte totale estimée à 5 000 m³ (cf. II.2.A) sur l'ensemble des secteurs allant de 1 (tête d'enrochements) à 4b.

Photo datant du 05/11/2013
P. Rolland



Etat de la dune lors du travail terrain lors des 7 et 8 décembre 2013.

Il est possible d'observer la micro falaise témoignant du passage de Godehard, mais aussi la reconstitution naturelle d'un gradin de pied de dune, constitué de sédiments fins, conséquence d'une déflation importante, ainsi que de micro avalanches sédimentaires.

Photo datant du 07/12/13
B. Guillot

II.2) Estimation des pertes sédimentaires suite à Godehard

Deux estimations des pertes sédimentaires ont été réalisées afin de pouvoir mettre en évidence l'impact direct de Godehard, et la reconstitution naturelle du gradin venant reformer un profil dunaire proche de la situation initiale¹⁰.

II.2.A Estimation de l'impact direct de Godehard

Cette évaluation a été réalisée à partir du profil de trait de côte de décembre 2011¹¹ et du trait de côte du 7 décembre 2013.

De plus, il était nécessaire d'analyser les profils altimétriques afin de pouvoir mesurer les quantités sédimentaires perdues ou gagnées sur des tronçons d'environ 13m.

Sur l'ensemble des secteurs de 1 à 4b, avec une méthode de calcul de proximité sur un outil SIG, il est possible d'estimer le recul du trait de côte à 2,50m.

Le volume sédimentaire total perdu sur ces secteurs est d'environ 5 000 m³ sans les accès à la plage.

¹⁰ Situation au 26/10/13

¹¹ Profil réalisé suite à l'ensemble des travaux de réaménagement et de revégétalisation des secteurs 1, 3A et 3B



Carte 7 : Aperçu de la première évaluation des pertes sédimentaires durant le coup de vent Godehard

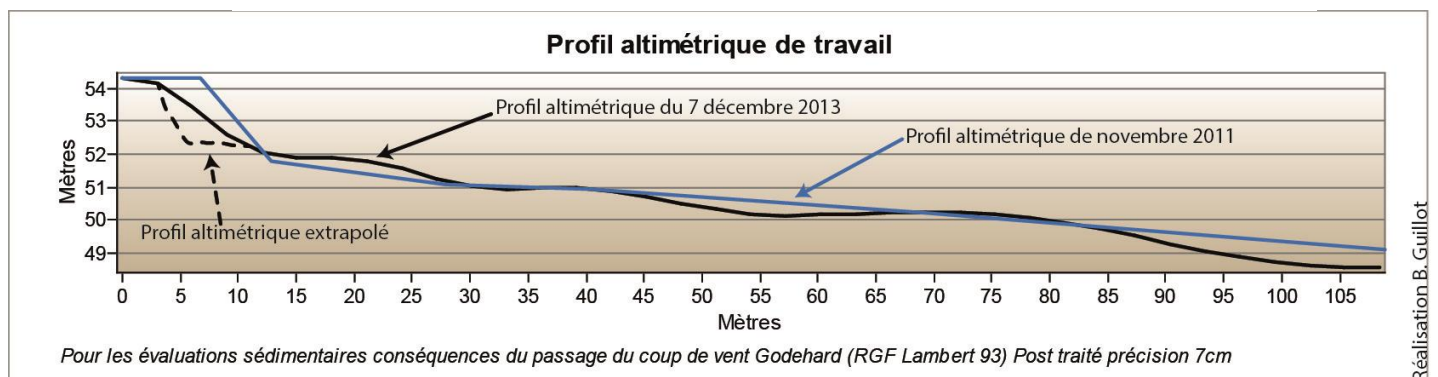


Figure 16 : profil altimétrique réalisé durant la tempête Christian (B. Guillot profil 1 secteur 3B cf carte3)

II.2.B Discussion autour des déconstructions liées à Godehard

Les profils altimétriques montrent deux fossés creusés par le déferlement des houles à proximité du pied de dune.

Les deux fossés sont les témoins d'une activité hydromorphosédimentaire vive liée aux deux événements climatiques importants Christian et Godehard.

Ce décalage entre les deux fossés de déferlements est la conséquence probable de la différence entre les coefficients des marées qu'il y avait entre la tempête Christian (52) et le coup de vent Godehard (99 [données SHOM, annexe9]).

Il est donc probable qu'avec la présence d'un fort coefficient et d'une houle supérieure à 1 mètre durant le coup de vent Godehard, ce soit le jet de rive qui soit venu attaquer l'ensemble du cordon dunaire, conséquence d'un point de déferlement de houle proche de la côte.

La forte déconstruction survenue à la pointe de Sainte Marine, avec une perte de plus de 6 000 m³ peut être expliquée par le fait que la dérive hydrosédimentaire était, durant ces deux événements, liée à la houle de secteur Sud-Ouest à Sud-Sud-Ouest.

Combinée à un transport sédimentaire hydraulique important (jet de rive / nappe de retrait) et la présence de la pointe rocheuse, c'est l'ensemble des masses sédimentaires situées jusqu'au point de déferlement qui ont pu être arrachées, provoquant la perte sédimentaire observée.

III) Mesure de la reconstruction du gradin de pied de dune suite à Godehard

III.1) Travail terrain et observations

Lors du travail terrain du 7 décembre 2013, il a pu être constaté que le profil dunaire avait presque retrouvé une situation d'équilibre, avec la présence d'un profil similaire à celui de référence de novembre 2011.

Il a pu aussi être relevé des traces d'une micro falaise dunaire encore bien visible, et des traces d'écoulements sédimentaires en forme de langues.

La granulométrie constituant ce gradin était faible ($< 1\text{mm}$).

En prenant l'implantation de la micro falaise (profil extrapolé), ainsi que de la semelle du gradin au pied de ce dernier, il a été possible d'évaluer les quantités sédimentaires et donc de remettre à jour les évaluations sédimentaires précédemment calculées.

Remise à jour des pertes sédimentaires en m3 sur l'ensemble des secteurs 0 à 4B



Carte 8 : Aperçu de la remise à jour de l'évaluation des pertes sédimentaires sur l'ensemble de la dune de Combrit, ici ce sont les secteurs 1, 2A et 2B.

III.2) Discussion autour de la reconstruction

La reconstruction du gradin suite à la tempête Godehard peut être expliquée par la présence d'un vent fort (supérieur à 25 nœuds), sur plusieurs jours après le passage du coup de vent.

Avec des coefficients de marées en baisse, les surfaces soumises à la déflation étaient plus importantes, ce qui laissa un transport au pied de la dune, des sédiments envolés de la zone supratidale non recouverte à marée haute.

Est venu aussi s'ajouter à cette déflation un phénomène d'avalanches sédimentaires.

Ces avalanches se produisent lorsque la micro falaise soumise au vent et à la gravité s'effondre sur elle-même en créant des micros avalanches de quelques centaines à quelques dizaines de centimètres.

Répétées sur le long terme ces micros avalanches ont pu activement participer au phénomène de reconstruction du gradin de pied de dune, notamment par une tentative de retour à un profil d'équilibre.

IV) Observations réalisées durant la tempête Dirk

La tempête Dirk s'est déroulée du 21 au 27 décembre 2013 selon Météo France.

Les observations sur le terrain se sont déroulées à partir du 26 décembre 2013.

Les coefficients de marée sont faibles (44), le vent soutenu, enregistré à plus de 40 nœuds durant la tempête (le 23 décembre), de secteur Sud-Sud-Ouest, est retombé à 15 nœuds de secteur Ouest-Nord-Ouest dès la première sortie terrain. Selon les données du Sémaphore de Penmarc'h (via un répondeur vocal), des vagues de plus de 9m étaient attendues dans la nuit à la pointe du même nom. Lors du premier terrain, la houle de secteur Ouest arrivait à passer la pointe de Loctudy pour rentrer dans la baie avec une hauteur observée de 2m.

IV.1) Travail de terrain

Un premier travail de lever du trait de côte et d'observations des évolutions morphologiques a été réalisé le 26 décembre à partir de 12h.

Durant ce travail de terrain un lever GPS du trait de côte ainsi que diverses observations ont été réalisés.

Elles ont été complétées par plusieurs autres sorties terrain tout au long de la semaine afin d'effectuer des profils en travers et des MNT.

Les observations effectuées durant l'ensemble des sorties terrain montrent de nettes traces de déflation, ainsi qu'un transport marin important, sur l'ensemble du trait de côte.

Il est possible de constater la présence d'un fossé de déferlement tout au long de la plage.

Ce fossé laisse apparaître des pierres, cailloux, et morceaux de tétrapodes utilisés durant la seconde guerre mondiale contre les chars d'assauts.

Un banc de sable précède ce fossé.

Ce banc de sable s'étend presque uniformément sur l'ensemble de la plage des secteurs 1 à 10.

Sur l'ensemble du secteur 10 la situation n'est plus identique à celle des 7 et 8 décembre 2013.

Il est à noter un recul de la micro falaise de la plage vers la dune et l'implantation de cette dernière sur la dune avec la disparition du gradin de pied de dune.

Les ondulations qui étaient présentes sur ce secteur ont fortement diminuées à la fois en épaisseur, mais aussi en consistance avec visuellement d'importantes pertes sédimentaires.

Le profil de la plage observé sur l'ensemble des secteurs est assez encaissé.

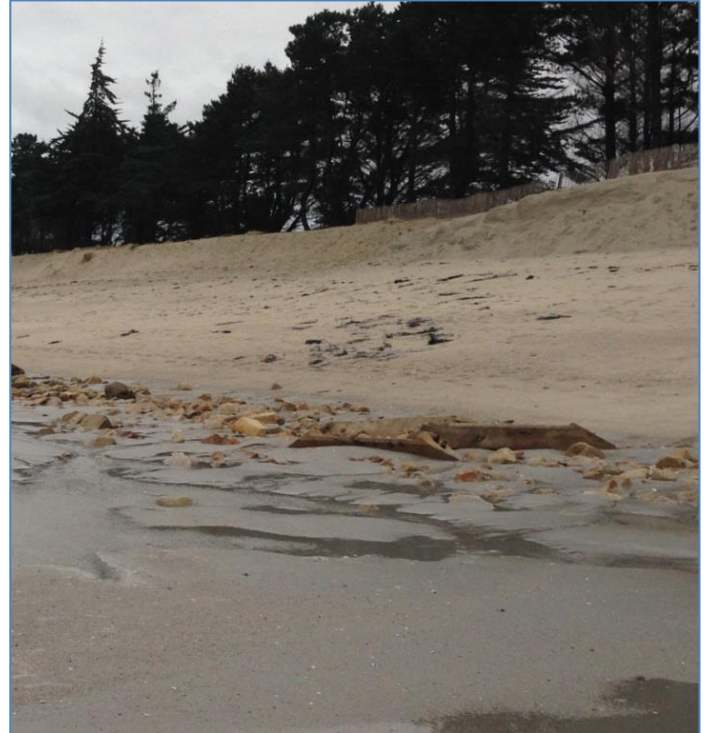


Figure 17 : Photographie du fossé de déferlement et des cailloux ainsi que des vestiges de défenses de la Seconde Guerre Mondiale découverts (Photo B. Guillot)



Figure 18 : Le fossé de déferlement selon un autre angle de vision (photo B. Guillot)

IV.2) Estimations des pertes sédimentaires

Grâce au croisement des données terrain, profils altimétrique et profil longitudinal du trait de côte, il est possible de chiffrer les pertes sédimentaires par tronçon d'environ 5m de longueur.

Il est donc probable que le trait de côte à en moyenne reculé de 2,75m, avec une perte occasionnée de 3 000 m³ de sédiments des secteurs 1 à 4b.

IV.3) Discussion autour des processus mécaniques

Avec l'aide des observations et des mesures réalisées sur le terrain durant les sorties terrain, ainsi que du traitement réalisé suite à ces sorties, il est possible de penser que la majorité des transports sédimentaires sont la conséquence des assauts répétés des énergies marines, avec une attaque du haut de plage et l'apparition d'un fossé de déferlement encore plus important que durant les observations des 7 et 8 décembre.

Il est plausible que les énergies marines résultants de la tempête Dirk ont été plus importantes que durant la tempête Christian et le coup de vent Godehard.

Cependant, les faibles coefficients de marées ont fait en sorte que ces énergies se sont essentiellement localisées en haut de plage, et non en pied de dune comme durant le dernier coup de vent du 7 décembre.



Figure 19 : Photographie de la dune après le passage de Godehard avec des signes de déflation assez visibles (photo B. Guillot)

La déflation éolienne sur l'ensemble du haut de plage ainsi que sur le cordon dunaire n'est pas à négliger avec un transport important de sédiments sur plusieurs centimètres d'épaisseur sur l'ensemble des secteurs allant de 2 à 5.

En observant les formes sédimentaires, il est possible que ce soit une déflation de secteur Sud-Sud-Ouest qui ait été la cause principale de l'ensemble des transports.

V) Observations réalisées de janvier à mars 2014 (Petra, Ulla, Christine)

Ces tempêtes se sont déroulées durant une période universitaire soutenue avec peu de déplacements sur le terrain, seuls des bilans seront exposés.

V.1) Travail terrain du 02/03/14

Des déplacements ont permis de travailler sur les tempêtes Petra et Ulla passées en février et d'anticiper le passage de la tempête Christine aux 03 et 04 mars 2014.

Un premier lever GPS du trait de côte a été réalisé le dimanche 02 mars à mi marée montante, par fort coefficient de marée, en tenue de survie protocolaire (annexe 1).

Ce trait de côte a permis de faire le point et de numériser la situation « actuelle » (en date du 02/03/14), afin d'étudier les impacts des précédentes tempêtes.



Figure 20 : La falaise visible presque tout le long du trait de côte (photo B. Guillot)

Durant cette sortie terrain il a été observé à l'œil nu un net recul du trait de côte avec l'ensemble de la dune taillée en falaise. Les pertes sédimentaires surtout sur les secteurs 3b à 4b sont importantes.

Le profil topographique de la plage est encaissé avec toujours la présence du fossé de déferlement.

V.2) Travail terrain du 04/03 et 05/03

Deux sorties terrain ont été nécessaires pour compléter les données, l'une pour réaliser le trait de côte à marée basse (04/03/14) et l'autre pour réaliser et remettre à jour les MNT (05/03/14).

Des surverses récentes et anciennes ont été observées et photographiées afin de les cartographier.

V.3) Conséquences des tempêtes Petra et Ulla

Les conséquences de ces deux tempêtes ont été essentiellement observées sur les stocks sédimentaires perdus à travers ces deux épisodes, soit plus de 10 000 m³.

Certains secteurs qui étaient stables depuis plusieurs années ont été fortement attaqués, notamment les secteurs allant de 3B à 4B, avec la présence d'une falaise vive et le recul moyen sur ces secteurs de la falaise de 5m avec des maxima à plus de 8m.

Une borne OGE implantée il y a une dizaine d'années et qui servait de repère, a été retrouvée sur la plage après la tempête Ulla.

Dans la nuit du 4 au 5 février 2014, une partie des populations du polder a été évacuée suite à un arrêté municipal pris pour protéger les populations d'une potentielle submersion.

Des surverses sur l'ensemble du trait de côte, des enrochements du Teven à la pointe de Ste Marine ont été observées et photographiées par des témoins présents sur place.

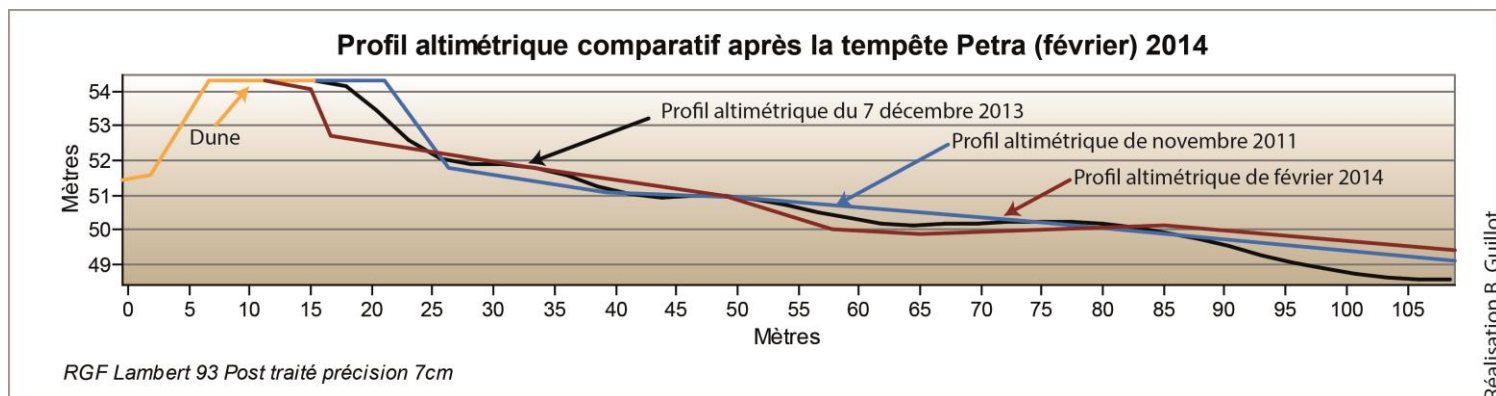


Figure 21 Profil altimétrique comparatif après la tempête Petra (B. Guillot profil 1 secteur 3B cf carte3)

VI) Marquages sédimentaires sur l'ensemble de la cellule sédimentaire

VI.1) Raisons de mise en place du procédé

Afin de pouvoir préciser les observations des déplacements sédimentaires réalisées sur la cellule sédimentaire du Treustel (en [8] et [13]), un protocole simplifié similaire à celui réalisé sur l'île d'Oléron [3] a été mis en place le 30 avril 2014 à partir de 11h (marée basse à 12h20) et achevé à 14h.

110 Kg de sédiments colorés de différentes couleurs ont été injectés en 15 plots sur l'estran de l'ensemble de la cellule sédimentaire allant de la pointe Est de la plage du Maracana (commune de l'île-Tudy), jusqu'à la pointe Ouest de la grande plage (Treustel, commune de Combrit Sainte-Marine).

Entre 5 et 10 Kg de sables colorés étaient en moyenne déposés sur chaque plot.

Les couleurs allaient rouge (travail initial de jour), mais aussi jaune et vert fluo (pour un travail plus précis de nuit avec une lampe équipée de LEDS violettes).

Malgré les coefficients de marée descendants (90) un faible coup de vent annoncé pour le 1^{er} Mai, est venu perturber le procédé avec une houle de 50cm régulière (supérieure aux situations stables de 10cm).

A la marée basse suivante (0h30), une unique et ultime série d'observations permet de mesurer les restes visibles du procédé, déjà fortement dilués. Les mesures éoliennes (personnelles) ont mis en évidence une sous-évaluation météorologique du coup de vent (de 5 à 8 nœuds supérieurs aux prévisions Windguru et Météo France de secteur Sud-Ouest).

VI.2) Méthodologie

Un premier travail préliminaire durant le stage du mois de mars a été nécessaire pour colorer avec les peintures 150 kg de sable prélevés sur le cordon dunaire.

Initialement, le procédé de marquage devait être réalisé durant le stage 02 au 07 mars 2014, cependant, les conditions météorologiques défavorables durant cette période n'ont pas permis de mettre en place le procédé.

Après avoir injecté à la marée basse du 30 avril 2014 à 12H20, sur l'ensemble de la cellule sédimentaire de la pointe de l'île-Tudy à la pointe de St-Marine, les 15 plots de 5 et de 10 kg (soit un total de 110 kg), un ultime relevé durant la nuit du 30 avril au 1^{er} mai 2014 a été réalisé de 23h à 0h15 (la marée basse étant à 0h20) sur l'ensemble des plots.

A l'aide du GPS différentiel, les premiers plots de sables colorés rouge ont été relevés à la lampe torche Q5, les autres plots colorés fluorescents ont été repérés à la lampe à LEDS violettes.

Des échantillons sédimentaires ont été réalisés (5 par tâche), afin de pouvoir mesurer la dispersion du plot initial, la densité de recouvrement par le sable coloré et évaluer les pertes, ou ce qui n'a pas été vu par l'opérateur.

4 plots sont considérés comme perdus, aucune trace des injections réalisées n'a été retrouvée.



Figure 22 : Durant une semaine 150 Kg de sables ont été colorés avec de la peinture puis séchés au soleil sur des bâches plastifiées (B. Guillot)



Figure 24 : Aperçu de la réaction du sable peint en fluorescent avec la lampe à LEDs violettes

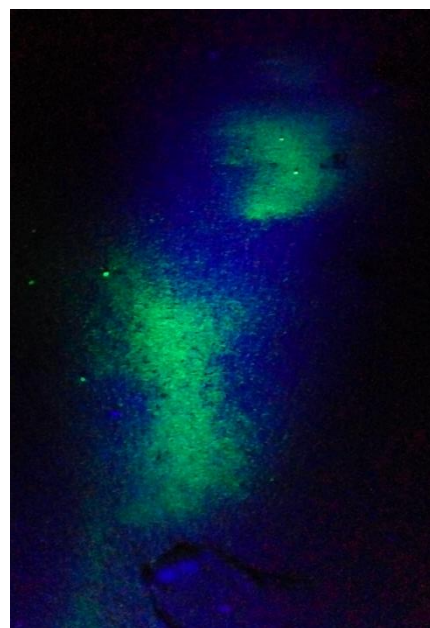


Figure 23 : Aperçu des trainées fluorescentes visibles lors du terrain réalisé entre le 30 avril et le 1^{er} mai (B. Guillot). Les couleurs ont été renforcées.

Il n'a pas été réalisé de quadrillage du sol comme mentionné dans l'expérimentation menée sur l'île d'Oléron [3], en effet les quantités sédimentaires injectées étaient moindres et la zone à couvrir par l'expérimentation plus importante.

De plus, la mise en place de ce procédé n'était qu'expérimentale. Un procédé plus complexe et plus précis pourrait être instauré avec des quantités sédimentaires injectées plus importantes (donc aussi plus coûteuses).

Un travail sous SIG a permis ensuite de tracer les tendances des polygones relevés durant la nuit du 30 avril au 1^{er} mai 2014

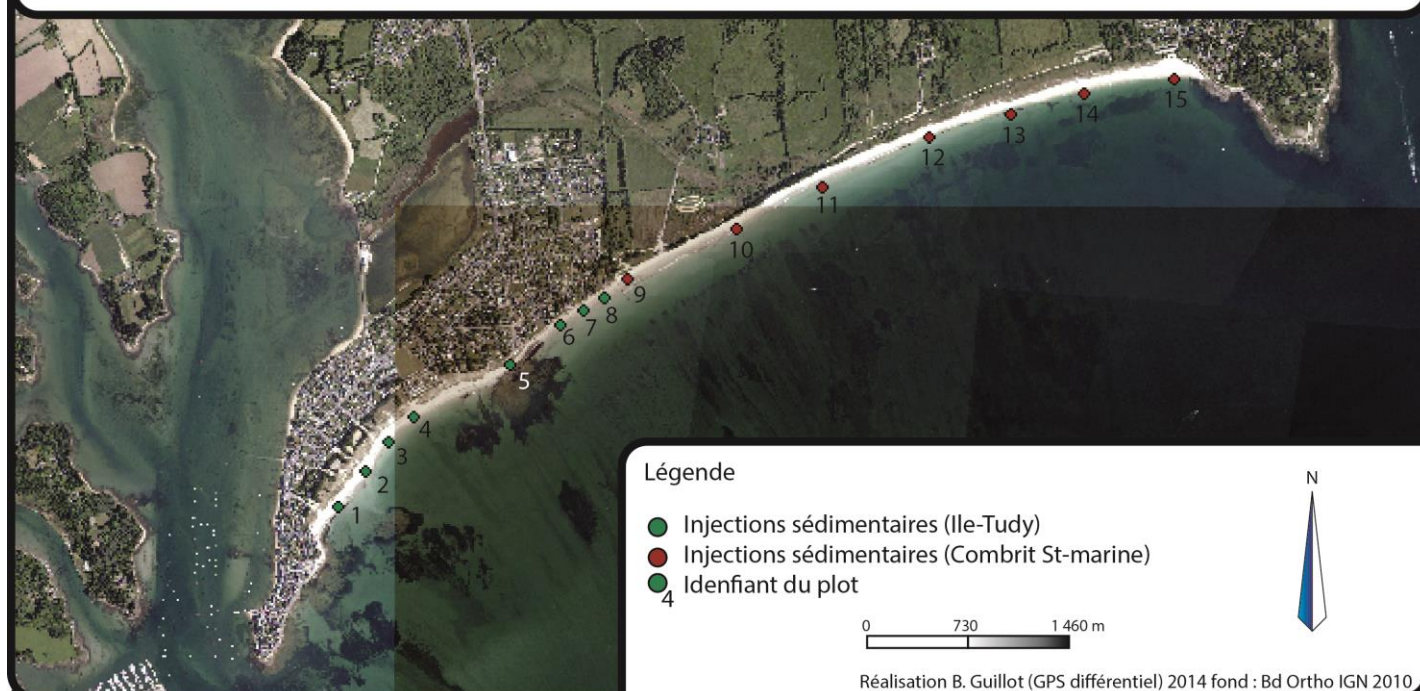
VI.3) Résultats

Le tableau suivant montre les résultats numériques de l'expérimentation par plot, (les détails des titres des colonnes sont en annexe 8).

ID plot	Qté init kg	Qté théo g/m ²	Qté relevée g/m ²	surface m ²	perte (kg)	perte %
1	5	15.97444089	12.78	313	1	20
2	5	76.92307692	46.15	65	2	40
3	5	11.13585746	4.45	449	3	60
4	5	0	0.00	0	5	100
5	5	51.02040816	30.61	98	2	40
6	5	18.51851852	7.41	270	3	60
7	5	0	0.00	0	5	100
8	5	63.29113924	25.32	79	3	60
9	10	68.96551724	27.59	145	6	60
10	10	47.61904762	23.81	210	5	50
11	10	45.24886878	31.67	221	3	30
12	10	24.15458937	16.91	414	3	30
13	10	0	0.00	0	10	100
14	10	9.794319295	5.88	1021	4	40
15	10	0	0.00	0	10	100

Figure 25 Tableau de présentation des résultats des injections (format numérique)

Carte de localisation des plots de sables colorés sur l'ensemble de la cellule sédimentaire de Combrit Ile-Tudy



Carte 9 : Localisation des plots de sables colorés

VI.4) Bilan et discussion

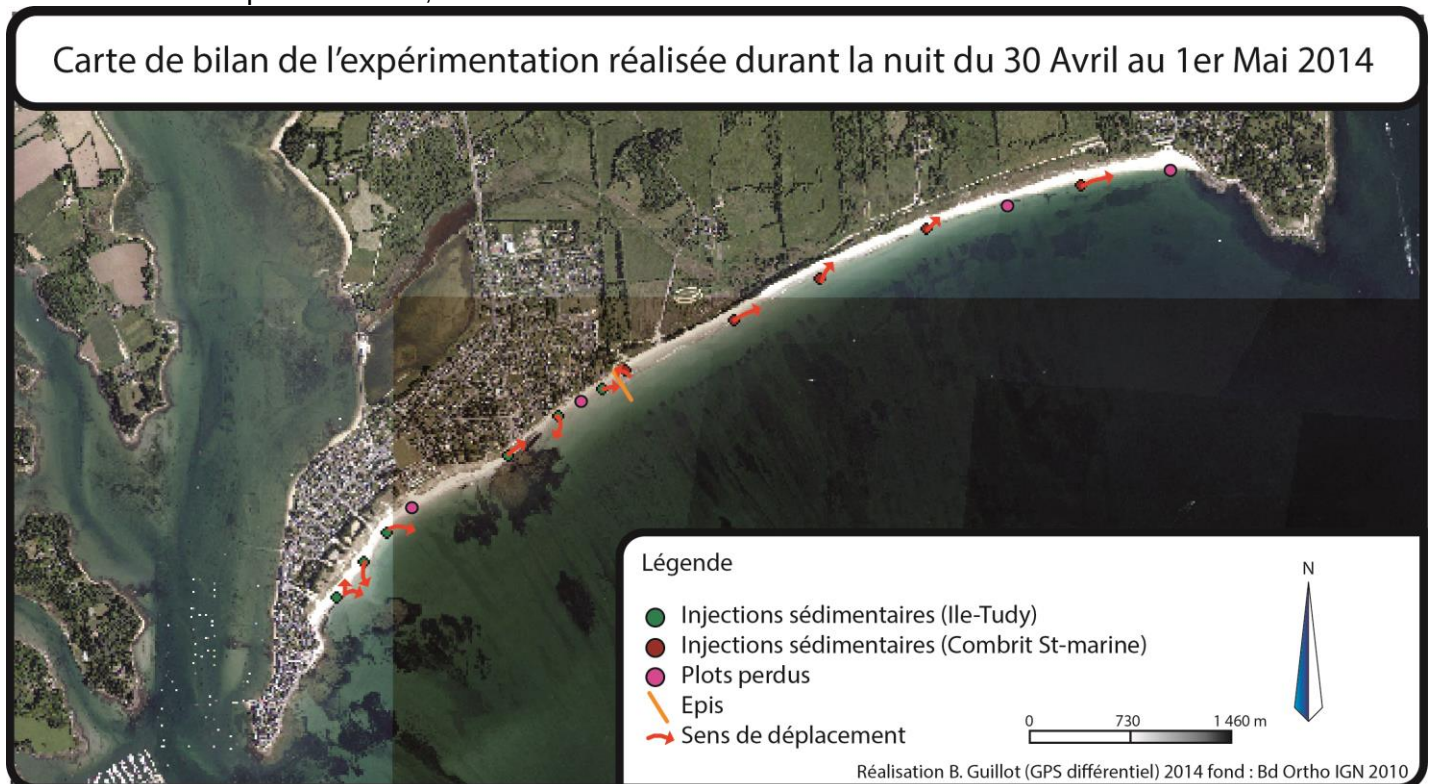
Les conclusions qu'il est possible de tirer de la mise en place d'un tel procédé sont d'augmenter la quantité sédimentaire injectée, ce qui aura aussi pour conséquence d'augmenter le prix de revient de l'expérimentation, avec une peinture fluorescente assez onéreuse par litre.

Il ne faut pas oublier non plus que cet investissement est à considérer comme consommable, le sable coloré une fois dilué dans la masse sédimentaire de plage est quasiment impossible à récupérer.

La conjonction du phénomène météorologique observé durant la nuit du 30 avril au 1^{er} mai 2014 avec les faibles quantités sédimentaires déposées par plot sur l'ensemble de la cellule n'ont pas permis un travail sur plusieurs semaines. A la 3^{ème} marée basse du 1^{er} mai à 13H20, il ne restait plus rien du procédé mis en place que ce soit en surface ou en profondeur autour des points d'injections.

Il est donc nécessaire d'augmenter par 4, voire par 5 les quantités sédimentaires à injecter (et donc aussi les peintures), afin de pouvoir couvrir l'ensemble de la cellule et étudier sur plusieurs jours (et non une seule marée), les déplacements sédimentaires.

Cependant, la forme de déplacement des plots permet de mettre en évidence la dérive sédimentaire au moment de l'expérimentation, comme le montre les schémas suivants :



En prenant la globalité [Carte 10](#) Carte de bilan de l'expérimentation réalisée durant la nuit du 30 Avril au 1 er Mai 2014 d'orientation des déplacements sédimentaires (du Sud-Sud-Ouest ver l'Est-Nord-Est), le schéma est concordant avec les observations menées durant la tempête de janvier 2013 [13].

Un travail poussé sur plusieurs jours, (avec un budget prévisible TTC de 600€), voire plusieurs semaines pourrait permettre de réellement comprendre le comportement des déplacements des sédiments sur l'ensemble de la cellule, afin d'anticiper les pertes qui sont causées par les tempêtes, pour ne plus forcément aller transporter des quantités sédimentaires du secteur du Maracana vers le secteur du Treustel, mais d'aller récupérer les sédiments déplacés du Treustel vers la pointe de Sainte Marine.

Cette action pourrait permettre de ne pas fragiliser la cellule de Maracana dont les stocks sédimentaires peuvent sous la charge des prélèvements répétés de plusieurs milliers de m³ se retrouver en déficit et poser de graves problèmes. En effet lors des prélèvements sédimentaires le pied de dune peut se retrouver attaqué par les engins de transport parfois sur une dizaine de mètres.

Il est aussi important de rappeler qu'une étude technique plus poussée sur les prélèvements sédimentaires de la cellule du Maracana devrait être réalisée afin d'établir un bilan et un état de santé de cette cellule, aucune étude technique n'ayant été effectuée depuis les prélèvements sédimentaires sur ce secteur.

Partie II : Evaluations des enjeux urbains et routiers



Figure 26 : Photographie aérienne d'aperçu des étangs d'eau douce et d'eau salée de Kermor, ainsi que de la digue de Kermor (photographie B. Guillot, [120m])

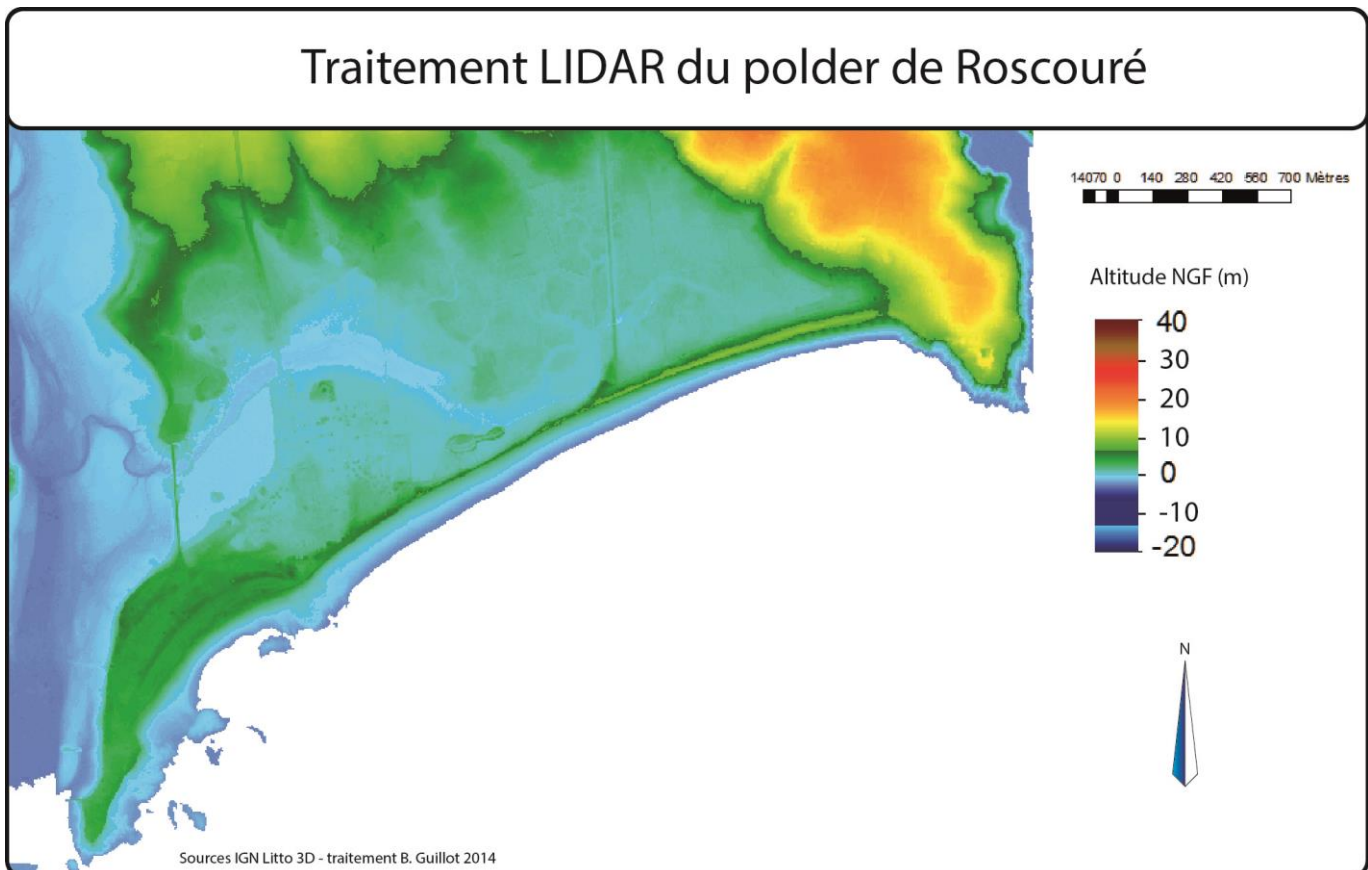
I) Présentation de la démarche

Etudier les enjeux urbains et routiers permet de mettre en évidence la fragilité de l'ensemble des installations situées dans le polder.

A l'aide d'outils SIG, tels que le LIDAR¹², croisé à la BD Topo IGN¹³, mais aussi la BD ortho IGN, ainsi que d'un travail de terrain, il est possible d'établir des cartes de vulnérabilité, avec des précisions altimétriques de moins de 10 cm.

II) Analyse de l'altimétrie de l'ensemble du polder

L'altimétrie est issue d'un traitement de l'image LIDAR.



Carte 11 : Carte de présentation de l'altimétrie générale du Polder

Discussion autour de l'altimétrie du Polder

Le polder de Roscouré est assez clairement identifiable sur la carte ci-dessus avec des altimétries faibles ne dépassant pas 10m NGF¹⁴,

La pointe de l'Île-Tudy ou île historique se distingue assez bien de l'ensemble du polder avec une altimétrie moyenne supérieure à 5m NGF.

L'ensemble du cordon dunaire quant à lui, a une altimétrie qui varie entre 3 et 9m NGF, avec la présence d'une dualité Est Ouest assez marquée, notamment l'épaisseur ou étalement Nord / Sud du cordon.

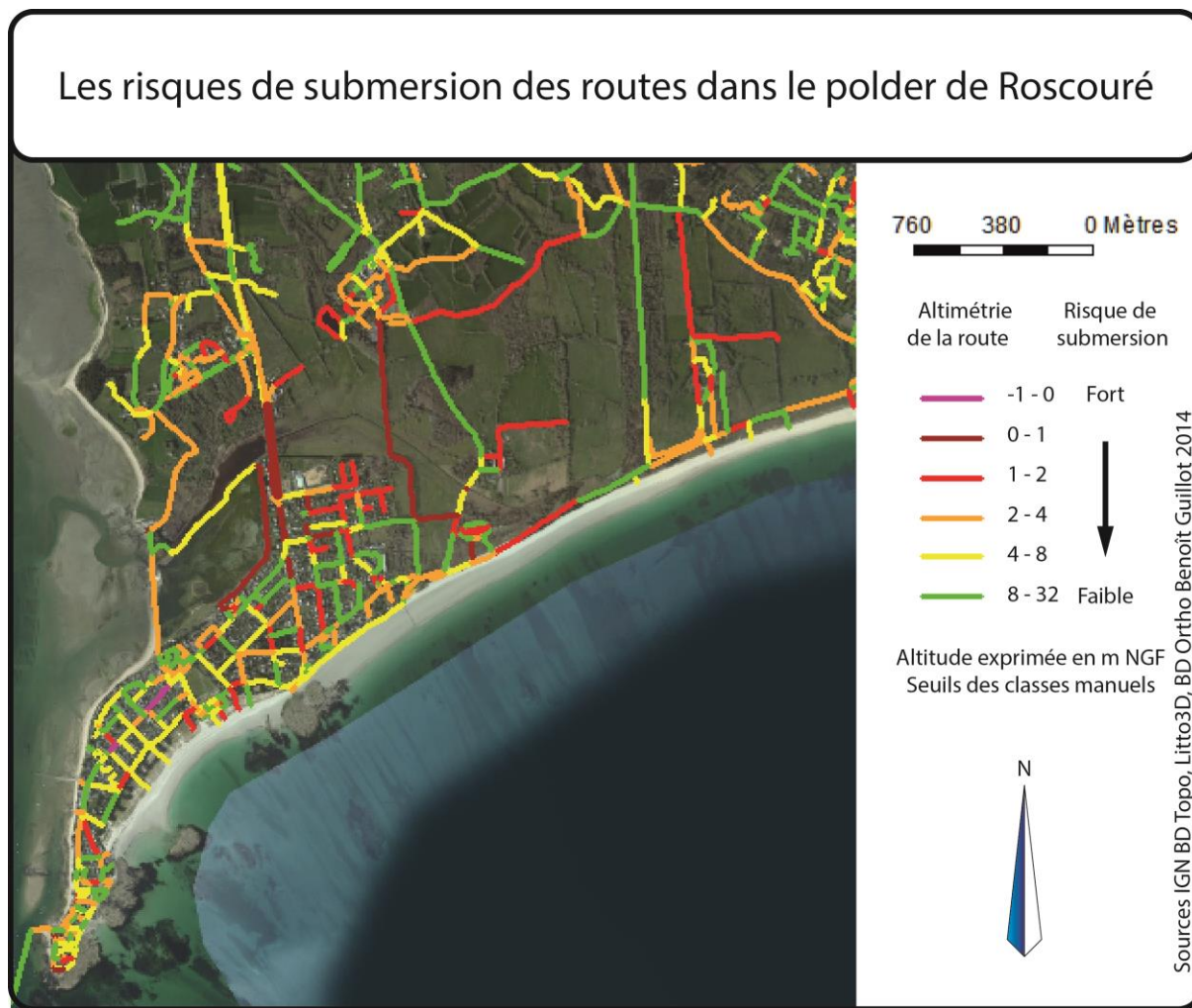
¹² LIDAR : light detection and ranging), est un outil de mesure laser précis aéroporté, il fait partie du programme Litto3D : Institut Géographique National (IGN) et le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM).

¹³ BD Topo : Base de données Topographique faisant partie du Référentiel géographique à Grande Echelle distribué par l'IGN

¹⁴ NGF : Nivellement Général de la France, est une référence altimétrique

III) Evaluation des risques de submersion des routes

Les risques routiers peuvent être analysés en croisant les données BD Topo, avec les données LIDAR



Carte 12 : Carte de localisation des infrastructures routières les plus sensibles dans le polder de Combrit.

Discussion autour du risque de submersion des routes

Les routes sont des ouvrages stratégiques notamment pour l'accès des secours ou l'évacuation des populations en cas de sinistre.

Malgré l'apparente connexion de l'Île-Tudy avec la terre la réalité est sensiblement différente, avec seulement 3 accès routiers possibles, dont un non praticable à l'aide d'un véhicule motorisé, uniquement de façon pédestre ou cyclable.

Il est aussi à noter le fait que sur les deux accès restants, un seul permet réellement une pleine mobilité des véhicules de secours à double sens (D144), l'autre empruntant la digue qui peut se retrouver endommagée ou submergée via la voie d'accès « le Haffond ».

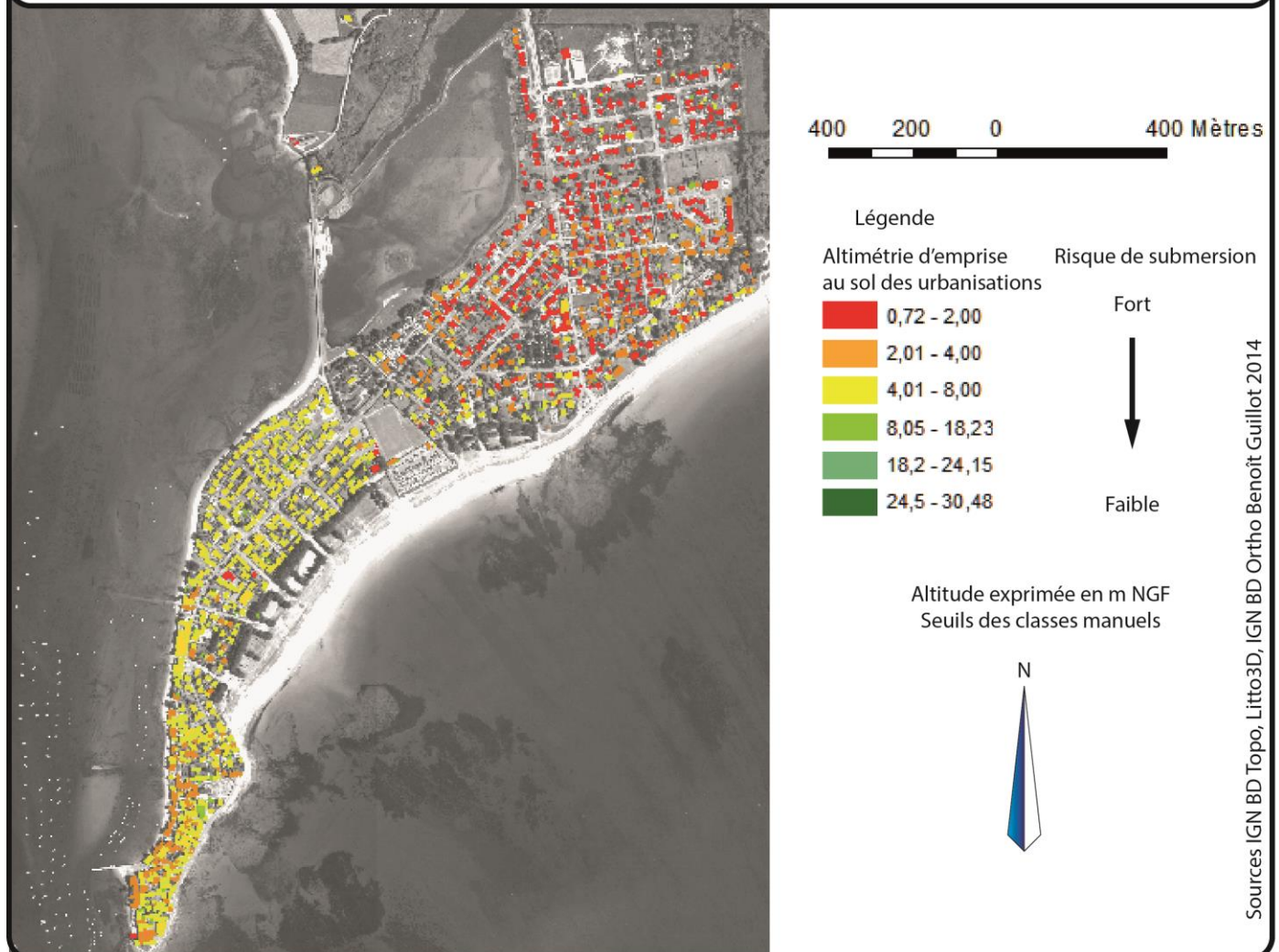
Quant à la vulnérabilité de la route principale d'accès à la commune, elle est forte avec une altimétrie de la chaussée comprise entre 0,9 à 1,1 m NGF au point le plus bas.

Enfin, la majorité des routes présentes dans le quartier de Beg ar Fry, quartier le plus récent de la commune, sont elles aussi soumises à un risque fort de submersion.

IV) Evaluation des risques de submersion du bâti

Les risques de submersion du bâti peuvent être analysés en croisant les données de la BD Topo avec les données LIDAR.

Le risque de submersion des habitations sur la commune de l'Île-Tudy



Carte 13 : Carte de présentation des urbanisations inondables sur la commune de l'Île-Tudy, en fonction de l'altimétrie NGF du terrain urbanisé

Discussion autour du risque de submersion des urbanisations

Les urbanisations sont assez présentes sur la commune de l'Île-Tudy avec plus de 1 395 bâtiments, et une densité de 11 bâtiments / hectare.

L'évolution de la tâche urbaine¹⁵ montre qu'historiquement c'était l'ensemble de la pointe de l'Île qui était habitée, avec un délaissement du Polder.

Ce n'est qu'à partir des années 1970 que l'urbanisation s'est progressivement étendue dans des zones dont l'altimétrie des terrains était inférieure à 5m NGF.

¹⁵ CF Carte en annexe 3 jointe « Evolution de l'urbanisation sur la commune de l'Île-Tudy »

V) Modélisation du risque de submersion selon l'altimétrie NGF du terrain

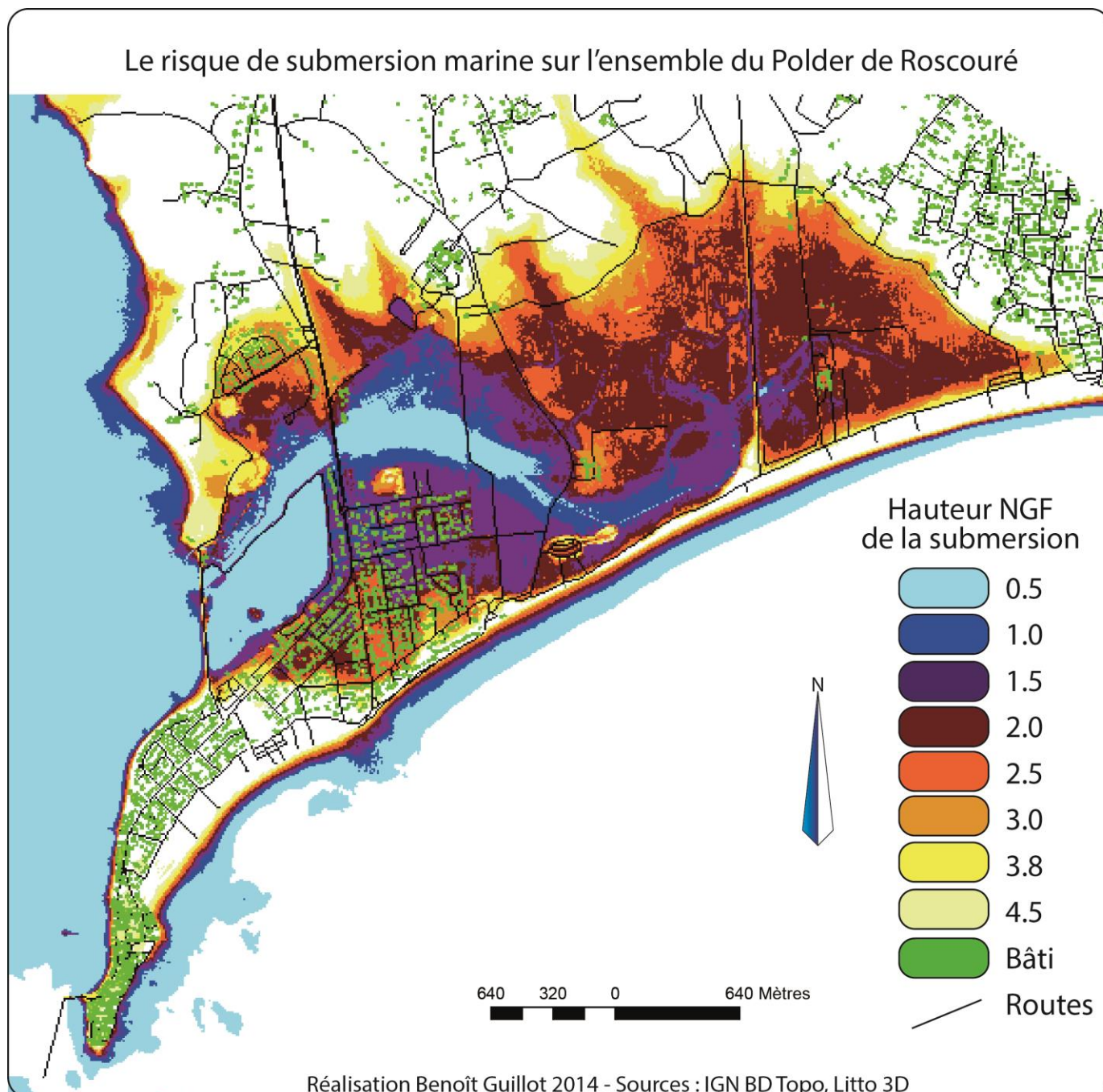
Grâce à l'autorisation d'utilisation du LIDAR il a été possible de modéliser l'étendue des inondations dans le polder selon l'altimétrie NGF de l'inondation.

La modélisation ne tient pas compte d'une potentielle rupture du cordon dunaire ou de la digue de Kermor. Cette modélisation simule juste un remplissage du polder par la mer, à l'image d'une bassine remplie d'eau.

Il a donc été choisi de modéliser les inondations dont les altimétries vont de 0,5 m NGF (inondation constatées par remontée de la nappe phréatique durant l'hiver 2012, et l'hiver 2013), puis tous les 0,5m NGF jusqu'à 3,8m NGF (côte de référence de la zone inondable), et une côte à 4,8m NGF moins probable.

V.1) A l'échelle du Polder

Ce travail a d'abord été réalisé pour l'ensemble du Polder de Roscouré :

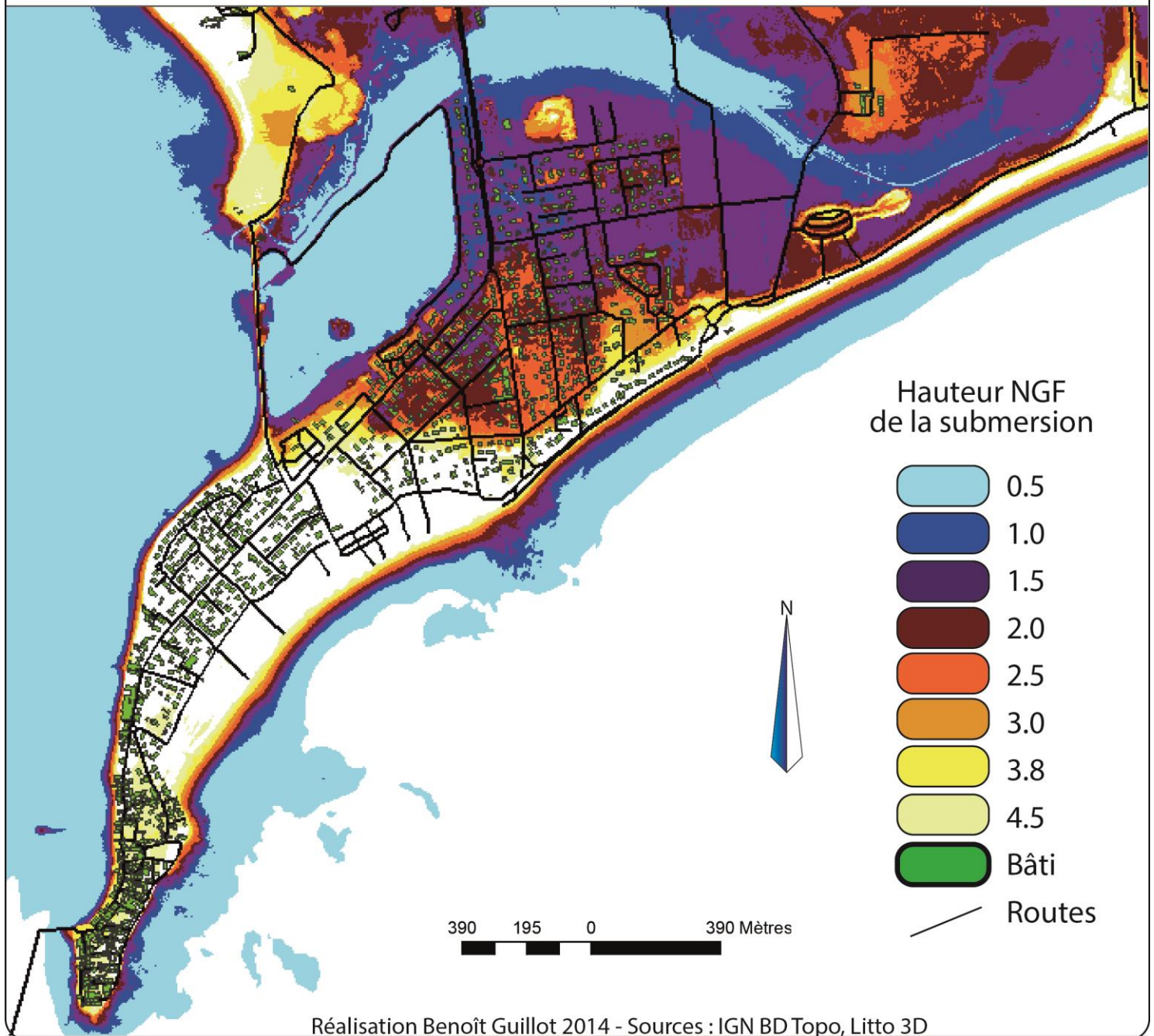


Carte 14 : le risque de submersion marine sur l'ensemble du Polder de Roscouré

V.2) A l'échelle de l'Ile-Tudy

Un focus du précédent travail a ensuite été réalisé sur la commune de l'Ile-Tudy, la plus concernée en cas de risque de submersion.

Le risque de submersion marine focus sur l'Ile-Tudy



Carte 15 : Focus sur le risque de submersion sur la commune de l'Ile-Tudy

V.3) Discussions autour des résultats

Le quartier de Beg Ar Fry sur l'Ile-Tudy est le plus concerné par un potentiel risque de submersion, tout comme les principaux axes routiers. En cas d'inondation si la digue de Kermor ne se rompt pas, ce sera le seul moyen de pouvoir joindre l'Ile-tudy par la terre, avec l'ensemble des problèmes évoqués en point III.

Seule la modélisation d'inondation à la côte 0,5m NGF a pu être vérifiée, en janvier et février 2014, avec l'observation via des photos aériennes (Landsat8) de l'étendue de la nappe dans le polder, à proximité de la D144.

La modélisation permet aussi de mettre en évidence le fait qu'une grande majorité d'urbanisations, sont durant les marées hautes sous le niveau de la mer, cette dernière pouvant monter jusqu'à 2.5m NGF.

Partie III : Trait de côte de référence, bilans et conclusions



Figure 27 : Le drone "Wallee" en train de prendre des photos azimutales du trait de côte afin de pouvoir post géoréférencement en dessiner la limite (photo B. Guillot 145m mai 2014)

III.1) Enjeux de relocalisation du trait de côte

Suite aux différents évènements qui ont impacté l'ensemble du secteur de Combrit durant la saison « hivernale¹⁶ » de 2013 à 2014, le dessin du trait de côte a évolué.

Le constat réalisé presque systématiquement après les tempêtes était que les rechargements sédimentaires à 3 000 ou 5 000 m³ ne suffisaient pas à maintenir et protéger efficacement le cordon dunaire.

Les rechargements sédimentaires réalisés vers la mer, en avant de la limite du trait de côte, ne tenaient pas sous la conjonction des houles, d'un fort coefficient de marée, et d'une dépression, ce qui semble logique, la mer voulant revenir au point ou ligne d'érosion précédemment atteinte (notamment en octobre 2011).

Accepter le trait de côte tel qu'il a été défini en février / mars 2014 suite à la succession de tempêtes peut permettre de calibrer plus précisément les rechargements sédimentaires à réaliser et surtout probablement repenser le schéma de confortement à court moyen et long terme.

En effet il est possible de pointer du doigt, grâce aux évènements de cet hiver 2013-2014, plusieurs faiblesses dans l'actuel schéma :

- Les prélèvements sédimentaires sur le secteur du Maracana risquent de ne pas être durables sous la pression d'un enchaînement de tempêtes prononcé, mettant en péril la stabilité sédimentaire de ce secteur, dont l'altimétrie est basse, avec en première ligne urbaine, une dominante de maisons de plain-pied. Il est aussi important de préciser que l'étude de référence préconisait un prélèvement total conseillé, de 8 000 m³. Il me semble important de rappeler que durant l'enchaînement consécutif des tempêtes, le trait de côte du Maracana a reculé en moyenne d'1m50 (lever GPS réalisés sur le secteur), avec l'envahissement des dunes de l'Île-Tudy par la mer.

- L'altimétrie du cordon dunaire des secteurs 2 à 4A est faible et risque de ne pas résister aux tempêtes (cf. observations et mesures réalisées durant la saison hivernale 2013/2014), lors des situations d'une plage en profil topographique hivernal encaissé.

- En cas de brèche dans le cordon dunaire, la saturation de la nappe phréatique observée d'octobre 2013 à avril 2014 peut poser des problèmes, avec une inondation qui sera difficilement compensée par infiltration et donc probablement des conséquences plus importantes sur la rapidité de montée des eaux, mais aussi sur la zone couverte par l'inondation.

Face à ce dernier point, un travail de régulation plus approfondi des vannes de l'étang d'eau douce pourrait être pertinent.

¹⁶ « Hivernale » est ici à interpréter comme étant la saison avec le plus fort risque de tempêtes de l'automne 2013 au printemps 2014.

III.2) Bilans et conclusions

En termes de bilan méthodologique, il est possible de comparer les différentes méthodes employées durant le stage.

La méthode de réalisation des MNT avec un GPS différentiel est une méthode basique qui s'est retrouvée dépassée par l'utilisation d'un drone avec la réalisation de MNT par modélisation 3D issue d'un photo-croisement.

L'utilisation du drone a permis de mettre en place un protocole de travail qui, combiné avec des instruments de vols techniques, donne des résultats probants et satisfaisants.

Il reste cependant des améliorations à réaliser via le capteur utilisé et notamment l'objectif de ce capteur.

La méthode d'injection sédimentaire colorée s'avère coûteuse, mais donne des tendances quant aux déplacements sédimentaires. Elle n'est pas entièrement achevée car un comparatif en période de déplacement sédimentaire important doit encore être effectué.

Les levés GPS ponctuels du trait de côte accomplis tout au long du stage permettent de voir l'évolution longitudinale du trait de côte, la méthodologie de travail n'a pas changé durant le stage. Elle prend un peu de temps à être réalisée, mais donne néanmoins des résultats concrets et relativement précis selon le GPS choisi.

En termes de bilan morphologique, le secteur du Treustel a certes subi des attaques durant la saison hivernale 2013-2014. Cependant les dégâts ne sont pas aussi importants que sur certains autres secteurs littoraux.

La dune a, durant ces événements, probablement grâce aux rechargements sédimentaires, pleinement joué son rôle de tampon / réserve sédimentaire.

Il est aussi possible d'observer que les tempêtes de secteur Ouest qui étaient les plus fréquentes ont moins impacté le secteur du Treustel abrité par la pointe de Loctudy.

Cependant, lors des rares tempêtes de Sud-est (Petra et Ulla) d'intensité moyenne, les conséquences se sont révélées souvent plus désastreuses que lors des tempêtes d'Ouest plus violentes.

Au début du mois de mars la situation topographique et morphologique se montre comparable à celle atteinte en octobre 2012, lorsqu'une tempête de violence modérée de secteur Sud-Est avait frappé le secteur de Combrit, provoquant plus de 5 000 m³ de déconstruction sédimentaire sur les secteurs 1 à 4B.

Pourtant, les conséquences de cette tempête sur les autres secteurs ont été beaucoup plus faibles (de l'ordre de 1 500 m³ de déconstruction), qu'au début du mois de mars 2014 avec plus de 8 000 m³ de sédiments déconstruits des secteurs 4B à 9.

Par rapport à ce vécu, il est donc légitime de se poser la question, qu'est-ce qu'il se passerait en cas de violente tempête de secteur Sud-Est sur un cordon dunaire affaibli comme en mars 2014 ?

Bibliographie

1. N. ANWAR MAUN, The biology of coastal sand dunes, Oxford University press, 2009, 265p.
2. R A. BAGNOLD, The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, 1941, London, Methuen, 265p.
3. X. BERTIN, A. DESHOULLIERES, J. ALLARD, E. CHAUMILLION, A new fluorescent tracers experiment improves understanding of sediment dynamics along the Arcay Sandspit (France), Springer-Verlag, 2007, 7p.
4. M. ARCHAMBAULT, R. L'HENAFF, J R. VANEY, Documents et méthode pour le commentaire de carte, géographie et géologie, principes généraux, et reliefs structuraux, Paris Masson, 1967.
5. T. BAKKER, T. W. M. BAKKER, P D. JONGERUS, J. A. KLIJN, Coastal dunes, ecology and conservation, Springer, 2004 371p.
6. Y. BATTIAU-QUENEY, Le relief de la France Coupes et croquis. , Masson, Collection «Géographie», Paris, 1993, 252p.
7. G. BELTRANDO, 2011. Les climats : processus, variabilité et risques. Armand Colin, Coll. U, 270p. (2ème édition), 286p.
8. J.M. BOUFFORT, J.P. FERRAND, E. LE CORNEC, A. HENAFF, Défense côtière du polder de Combrit, schéma de confortement à court, moyen et long terme du cordon dunaire, Avril 2011, 46p.
9. A. BREUT, F. GUERIN, H. KERVEILLANT et al, Ar Bannour, Plan de prévention des Risques Combrit Sainte-marine Ile-Tudy, Hors série 1996, 60p.
10. L. DAVID, G. BARBEAU et al, Etude diagnostique de référence côtière site du polder de Combrit (communes de Combrit et de l'Ile-Tudy), révision de juin 2004, 89p.
11. DDTM 29, Egis Eau, Plan de prévention des Risques Naturels et littoraux, Phase 1 : Analyse préalable du site 2013 264p.
12. DDTM 29, Egis Eau, Plan de prévention des Risques Naturels et littoraux, Cahier des cartes de synthèse, 2013
13. DDTM 29, Egis Eau, Plan de prévention des Risques Naturels et littoraux, Cahier des annexes 2013, 44p.
14. M. DERRUAU, Les formes du relief terrestre, ARMAND COLIN, 2010, 8^{ème} édition 239p.
15. DREAL, Directive des inondations, bassin Loire Bretagne, territoire à risque important d'inondation, T.R.I Quimper, Littoral Sud Finistère, octobre 2013, 44p.
16. S. DUIGOU, L'Ile-Tudy, L'âge d'or des capitaines, Editions Ressac, 2000, 56p.
17. S. DUIGOU, Secrète rivière de Pont l'Abbé, Editions Ressac, 1994, 31p.
- A. FITTER, M. CUISIN, Les fleurs sauvages, la vie des plantes et l'identification des espèces, Delachaux et Niestlé, 1988, 320p.
18. R. FITTER, A. FITTER, M. BLAMEY, Guide des fleurs sauvages 7ème édition revue et corrigée, DELACHAUX ET NIESTLÉ 352p.
19. G. GREENBERG, A Grain of sand, nature's secret wonder, Voyageur Press, 2008, 112p.
20. B. GUILLOT, *Inventaire floral et PH de la dune de Combrit*, Rapport de stage de Licence en Géographie, Université de Rennes (Dir L. LE DU BLAYO), 2012, 83p.
21. B. GUILLOT, *Travaux sédimentaires et éoliens sur la dune de Combrit*, Rapport de stage de Licence en Géographie, Université de Rennes (Dir H. REGNAULT), 2013, 42p.
22. B. HALLEGOUET, P. GUENNOC, A. BOUROULLEC, Résultats du suivi d'un nouveau système de protection souple des littoraux sableux : Le procédé Cornic à Combrit, BRGM, 1989, 78p.
23. C. LALLIER, S. LE FUR, M. LIEVRE, F. MERZEAU, L. ROUSSEAU, Tuto Projet MNS, Mise au point d'une méthodologie pour réaliser des Modèles Numériques de Surface à l'aide de données aériennes acquises par drones, 2014, 6p.
24. J.B. MARCHAND, D. BARGAIN, C. GILAIN et al, L'Ile-Tudy de 1800 à nos jours, l'Ile Aux Idées, 2007, 286p.
25. C. MEUR-FEREC, M-H. RUZ, Transports éoliens réels et théoriques en haut de plage et sommet de dune (Wissant, Pas-de-Calais, France), Géomorphologie : relief, processus, environnement. Octobre-décembre, vol. 8, n°4. pp. 321-334.
26. J. MUSEREAU, *Approche de la gestion des cordons littoraux : Mise au point et application d'un indice d'érosion (Zone des Pertuis Charentais, France)*, Thèse de Doctorat en géographie, Rennes laboratoire COSTEL, 2009, 306 p. (dir H. REGNAULT).
27. K. F. NORDSTROM, R. PSUTY, B. CARTER, Coastal Dunes : Form and process. WILEY 1990 392p.
28. R. PASKOFF : les Littoraux, Impacts des aménagements sur leur évolution, Armand et Colin 7^{ème} édition, 2012, 260p.
29. R. PASKOFF : Côtes en danger, L'harmattan, 2004, 250p.

30. O. H. PILKEY, W. J. NEAL, J. T. KELLEY, J. ANDREW, G. COOPER, The world's beaches, a global guide to the science of the shoreline, University of California Press, 2011, 283P.
31. D. POIDEVIN, La carte moyen d'action, Paris Ellipses, 1999 200p
32. P. J SALOU, P. TREVETTEN, P. LE DUGOU, L'érosion Marine dans le Pays Bigouden Sud : Bilan des solutions juridiques, U.B.O Brest (direction Mr Le Roy), 1996, 21p.
33. M. WELLAND, Sand, the never ending story, University of California Press Berkley Los Angeles, 2009, 343p.
34. K. ZHANG, B C. DOUGLAS, S P. LEATHERMAN, Beach erosion potential for severe nor'easters. Journal of coastal research, Vol 17, n°2, pp. 309-321.

Tables

Table des figurés

Figure 1 : Photo aérienne du Polder de Roscouré ou Polder de Combrit (B. Guillot 2014 120m), on y distingue la dune, dernier rempart de protection des habitations contre les tempêtes.	5
Figure 2 : Photo aérienne de la digue de Kermor (B. Guillot 2014) aménagée en 1852 – 1853 sur la commune de l'Ile-Tudy	6
Figure 3 : Les restes du procédé Tri-X en février 2003 (photo Ptolémée)	6
Figure 4 : Le secteur reboisé en 1990 avec les Cyprès et les Pins à l'Ouest (Photographie B. Guillot 03/2011).....	6
Figure 5 : La dune perchée ou dune de transition entre l'Ouest et l'Est, taillée en falaise plus ou moins vive selon l'intensité des tempêtes (ici en mai 2014 B. Guillot)	6
Figure 6 : Aujourd'hui, certaines terres propriété du Conservatoire du Littoral sont utilisées par des agriculteurs, un retour symbolique aux origines du Polder ?	7
Figure 7 : Graphique comparatif des quantités sédimentaires déplacées selon les différentes formules des auteurs appliquées à la dune de Combrit lors d'une tempête en janvier 2013 (B. Guillot)	8
Figure 8 : une borne personnelle implantée sur le secteur 5 (photo B. Guillot)	12
Figure 9 : Le drone "Wallee" en train d'observer la tête d'enrochement attaquée par la réfraction des énergies marines (Photo B. Guillot 25m mai 2014).....	14
Figure 10 : Première mesure éolienne test de moins d'une minute durant le pic de la tempête afin de calibrer les anémomètres (photo B. Guillot)	15
Figure 11 : Observation de la déflation durant la tempête Christian (photo B. Guillot)	15
Figure 12 : Aperçu du banc de sable qui s'est construit devant le fossé de déferlement, visible sur le MNT du secteur 2 réalisé durant la Toussaint (photo B. Guillot)	16
Figure 13 : Photographie du polder, avec une borne NGF au premier plan, ainsi que la vision de la nappe phréatique à un niveau de +50cm NGF (photo B. Guillot).....	16
Figure 14 : Aperçu visuel du MNT réalisé après Christian, les enrochements (fossé de déferlement), laissent place à un bourrelet d'accrétion vers la mer (photo B. Guillot)	18
Figure 15 : Aperçu d'une importante modification du profil de plage sur la pointe de Sainte Marine (photo B. Guillot)	19
Figure 16 : profil altimétrique réalisé durant la tempête Christian (B. Guillot profil 1 secteur 3B cf carte3)	21
Figure 17 : Photographie du fossé de déferlement et des cailloux ainsi que des vestiges de défenses de la Seconde Guerre Mondiale découverts (Photo B. Guillot)	23
Figure 18 : Le fossé de déferlement selon un autre angle de vision (photo B. Guillot)	23
Figure 19 : Photographie de la dune après le passage de Godehard avec des signes de déflation assez visibles (photo B. Guillot)	24
Figure 20 : La falaise visible presque tout le long du trait de côte (photo B. Guillot)	25
Figure 21 Profil altimétrique comparatif après la tempête Petra (B. Guillot profil 1 secteur 3B cf carte3) ..	25
Figure 22 : Durant une semaine 150 Kg de sables ont été colorés avec de la peinture puis séchés au soleil sur des bâches plastifiées (B. Guillot).....	26
Figure 23 : Aperçu des traînées fluorescentes visibles lors du terrain réalisé entre le 30 avril et le 1er mai (B. Guillot). Les couleurs ont été renforcées.	26
Figure 24 : Aperçu de la réaction du sable peint en fluorescent avec la lampe à LEDs violettes	26
Figure 25 Tableau de présentation des résultats des injections (format numérique).....	27
Figure 26 : Photographie aérienne d'aperçu des étangs d'eau douce et d'eau salée de Kermor, ainsi que de la digue de Kermor (photographie B. Guillot, [120m])	29

Figure 27 : Le drone "Wallee" en train de prendre des photos azimutales du trait de côte afin de pouvoir post géoréférencement en dessiner la limite (photo B. Guillot 145m mai 2014).....	35
Figure 28 : Carte d'évolution de l'urbanisation sur la commune de l'Ile-Tudy, B. Guillot.....	45
Figure 29 : Photographie montage de schématisation d'un vol de multirotor (image de fond B. Guillot vol à 80m F550 du 22/04/14)	45

Table des cartes

Carte 1 : Aperçu de la carte de l'Etat Major du secteur au 140 000 ^{ème} (XIXème), il est possible d'y voir la flèche / tombolo en direction de la formation rocheuse de l'Ile-Tudy.....	5
Carte 2 : Carte de présentation du découpage de l'ensemble de la dune de Combrit en secteurs, réalisation B. Guillot basé sur le fond de carte OSM.....	13
Carte 3 : Carte de présentation de l'implantation des profils altimétriques témoins, permettant d'assurer le suivi de l'évolution morphologique de la dune et de la plage.....	13
Carte 4 MNT de présentation des impacts de Christian sur le secteur 9.....	17
Carte 5 MNT de présentation des impacts de la tempête Christian sur le secteur 2	17
Carte 6 Schéma de déplacement des houles dans la baie de Combrit durant la tempête Christian.....	18
Carte 7 : Aperçu de la première évaluation des pertes sédimentaires durant le coup de vent Godehard.....	21
Carte 8 : Aperçu de la remise à jour de l'évaluation des pertes sédimentaires sur l'ensemble de la dune de Combrit, ici ce sont les secteurs 1, 2A et 2B.....	22
Carte 9 : Localisation des plots de sables colorés	27
Carte 10 Carte de bilan de l'expérimentation réalisée durant la nuit du 30 Avril au 1 ^{er} Mai 2014	28
Carte 11 : Carte de présentation de l'altimétrie générale du Polder	30
Carte 12 : Carte de localisation des infrastructures routières les plus sensibles dans le polder de Combrit.....	31
Carte 13 : Carte de présentation des urbanisations inondables sur la commune de l'Ile-Tudy, en fonction de l'altimétrie NGF du terrain urbanisé	32
Carte 14 : le risque de submersion marine sur l'ensemble du Polder de Roscouré.....	33
Carte 15 : Focus sur le risque de submersion sur la commune de l'Ile-Tudy	34

Table des matières

Mémoire de master 1	1
Quels sont les impacts et conclusions des événements climatiques d'Octobre 2013 à Mai 2014 sur la dune de Combrit ?.....	1
Remerciements.....	2
Table sommaire	3
Localisation du secteur d'étude.....	4
1) Introduction et contexte	5
2) Etat de l'art.....	8
3) Démarche et méthodologie proposée.....	10
3.A) Méthodologies proposées pour les travaux de terrain.....	10
3.B) Méthodologie de mesures SIG	11
3.C) Méthodologie expérimentale de mesure via l'usage d'un drone	11
3.D) Synthèse des différentes méthodes	12
4) Travaux préliminaires nécessaires au déroulement des différents stages	12
4.A) Bornes et profils altimétriques	12
4.B) Désignation des secteurs	12
4.C) Localisation des sites témoins : profils altimétriques et bornes.....	13
Partie I : Evolution de la dune et de la plage d'octobre 2013 à mai 2014	14
I) Observations réalisées durant la tempête Christian.....	15

I.1) Travail de terrain.....	15
I.1.A Sortie préliminaire (nuit de samedi 26/10/13 à dimanche 27/10/13), réalisation de profils en travers	15
I.1.B Sortie GPS (27/10 10H-12H30 et 15H-19H).....	15
I.1.C Sortie d'observation n°3 de pic de tempête (27/10 21H30-24H puis le 28/10 2H-3H).....	15
I.1.D Sortie n°4 GPS post tempête	16
I.1.E Sorties GPS n°5 et 6 31/10/13 de 8H à 11H30 et de 14H à 16H	16
I.2) Modifications sédimentaires constatées.....	17
I.2.A Modélisation des modifications altimétriques.....	17
I.2.B Commentaires des modifications altimétriques des MNT	18
I.2.C Observations des houles dans la baie de Combrit durant la tempête Christian	18
I.3) Discussion autour des processus mécaniques	19
II) Observations réalisées pour le coup de vent Godehard	19
II.1) Travail de terrain réalisé post évènement	19
II.2) Estimation des pertes sédimentaires suite à Godehard	20
II.2.A Estimation de l'impact direct de Godehard	20
II.2.B Discussion autour des déconstructions liées à Godehard	21
III) Mesure de la reconstruction du gradin de pied de dune suite à Godehard	22
III.1) Travail terrain et observations.....	22
III.2) Discussion autour de la reconstruction	22
IV) Observations réalisées durant la tempête Dirk.....	23
IV.1) Travail de terrain	23
IV.2) Estimations des pertes sédimentaires	24
IV.3) Discussion autour des processus mécaniques	24
V) Observations réalisées de janvier à mars 2014 (Petra, Ulla, Christine)	25
V.1) Travail terrain du 02/03/14.....	25
V.2) Travail terrain du 04/03 et 05/03.....	25
V.3) Conséquences des tempêtes Petra et Ulla.....	25
VI) Marquages sédimentaires sur l'ensemble de la cellule sédimentaire	26
VI.1) Raisons de mise en place du procédé.....	26
VI.2) Méthodologie.....	26
VI.3) Résultats	27
VI.4) Bilan et discussion.....	28
Partie II : Evaluations des enjeux urbains et routiers.....	29
I) Présentation de la démarche.....	30
II) Analyse de l'altimétrie de l'ensemble du polder	30
Discussion autour de l'altimétrie du Polder	30
III) Evaluation des risques de submersion des routes.....	31
Discussion autour du risque de submersion des routes	31
IV) Evaluation des risques de submersion du bâti	32
Discussion autour du risque de submersion des urbanisations	32
V) Modélisation du risque de submersion selon l'altimétrie NGF du terrain	33
V.1) A l'échelle du Polder.....	33

V.2) A l'échelle de l'Île-Tudy.....	34
V.3) Discussions autour des résultats	34
Partie III : Trait de côte de référence, bilans et conclusions	35
III.1) Enjeux de relocalisation du trait de côte	36
III.2) Bilans et conclusions	37
Bibliographie	38
Tables.....	39
Table des figurés.....	39
Table des cartes.....	40
Table des matières.....	40
Annexe 1 : Le protocole de sécurité appliqué aux sorties terrain dangereuses (pics des tempêtes) ...	43
Annexe 2 : Affichage pour le public et les visiteurs réalisé	44
Annexe 3 : Cible de repérage pour les MNT réalisés avec le drone	44
Annexe 4 : Evolution de la tâche urbaine sur la commune de l'Île-Tudy.....	45
Annexe 5 : Procédé de réalisation de photographies aériennes.....	45
Matériel volant	45
Procédé de réalisation des photographies	45
Photographies de mise à jour des orthophotographie IGN	45
Photographies de réalisation des MNT	46
Annexe 6 : Procédé de réalisation de MNT via un GPS	49
Annexe 7 : Procédé de réalisation d'un lever GPS du trait de côte	49
Annexe 8 : Procédé d'injection de sédiments colorés	49
Annexe 9 : Les coefficients de marées à travers les stages	50
Résumé	51
Abstract	51

Annexe 1 : Le protocole de sécurité appliqué aux sorties terrain dangereuses (pics des tempêtes)

La tempête prévue était relativement importante avec des rafales à plus de 50 nœuds et des vagues annoncées au large à plus de 9m.

Afin de pouvoir travailler dans des conditions de sécurité améliorées, un protocole a été mis en place.

L'équipement vestimentaire était de type « combinaison sèche » (NPX Lucifer), ce qui permettait de rester habillé en textile technique, de type polaire, lycra, sous la combinaison.

Cet équipement permet de rester au sec en cas de chute dans l'eau.

Un gilet d'aide à la flottaison a été ajouté, ainsi qu'un casque.

Une pochette étanche contenait un téléphone cellulaire avec service de géolocalisation activé et le numéro du poste de la SNSM de Bénodet sauvegardé dans les favoris.

La pochette était entreposée dans la capuche ce qui permettait un accès facile et rapide à cette dernière.

Plusieurs lampes clignotantes (waterproof), étaient disposées sur les perches ce qui permettait de repérer aisément le matériel dans l'obscurité.

Des lampes puissantes de classe « laser Q5 » waterproof éclairant à plus de 50m ont aussi été utilisées afin de voir au loin (notamment pour observer les houles et les hauteurs de vagues).

Des lampes de secours étanches clignotantes et non clignotantes étaient gardées en réserve dans une pochette de la combinaison en cas de chute dans l'eau.

Si le vent ne permettait pas de tenir debout ou si les rafales ne permettaient pas ou plus de rester sans trop d'efforts debout, il était prévu d'annuler ou de mettre fin à la sortie terrain.

Dès lors, si l'un des paramètres de sécurité était venu à faire défaut ou s'il y avait eu mise en danger immédiate du matériel, ou humaine, la sortie aurait été abordée ou annulée.

Annexe 2 : Affichage pour le public et les visiteurs réalisé



Plageurs, visiteurs, promeneurs, curieux,

En ce moment, une expérience scientifique de déplacement de sable est en cours de réalisation.

Si vous trouvez des zones sableuses de couleurs étranges ou suspectes, merci de ne pas y toucher et de vous en éloigner.

L'expérimentation devrait durer plusieurs semaines et permettra de mettre en évidence les mouvements sédimentaires sur l'ensemble du site.

Les résultats seront disponibles (mi juin 2014) au SIVOM de Combrit Ile-Tudy : 02.98.56.45.04

Annexe 3 : Cible de repérage pour les MNT réalisés avec le drone

Modélisation 3D



Merci de ne pas toucher à ce point.
Expérimentation scientifique en cours



Annexe 4 : Evolution de la tâche urbaine sur la commune de l'Ile-Tudy

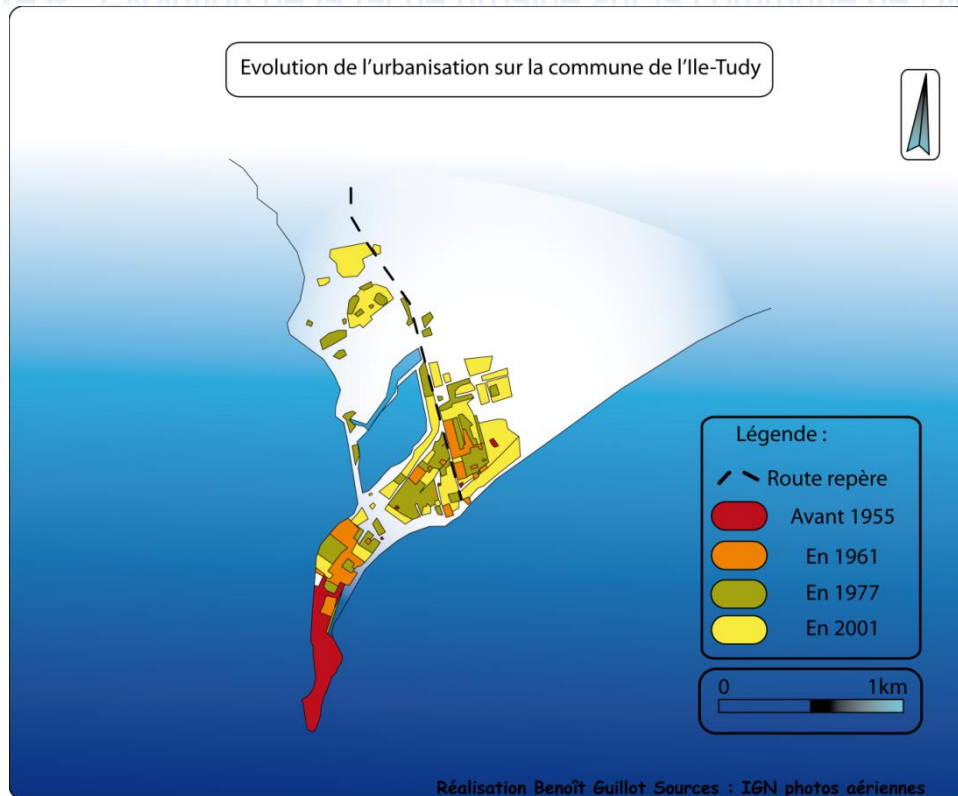


Figure 28 : Carte d'évolution de l'urbanisation sur la commune de l'Ile-Tudy, B. Guillot

Annexe 5 : Procédé de réalisation de photographies aériennes

Matériel volant

- Multirotor (drone) de type Hexacopter, F550
- Radiocommande de type Turnigy 9XR
- Capteur de type Gopro Hero 3
- Transmetteur 2.4Ghz D8r II+
- Capacité de transport hors organes vitaux 1.5 Kg
- Autonomie 13 minutes en 2x 2200 mah et 25 minutes en 2x 4000 mah
- Stabilisateur Tarot 2D (circuit séparé)
- Gopro Hero 3

Autres (télémétrie embarquée) :

- Capteur de pression Frsky
- Variomètre (1m) Frsky
- Thermomètre Frsky
- Puissance batterie et consommation Frsky
- Retours vidéo en temps réel écran 7"



Figure 29 : Photographie montage de schématisation d'un vol de multirotor (image de fond B. Guillot vol à 80m F550 du 22/04/14)

Procédé de réalisation des photographies

Photographies de mise à jour des orthophotographie IGN

Ces photographies sont réalisées à différentes altitudes de 80m pour une précision de 20 cm, de 20m pour une précision de 5cm.

A noter que l'altitude ici n'est pas exprimée en NGF mais à partir du point de décollage du multirotor.

Un travail de correction de la lentille fisheye (œil de poisson) est nécessaire afin de pré-corriger l'image obtenue.

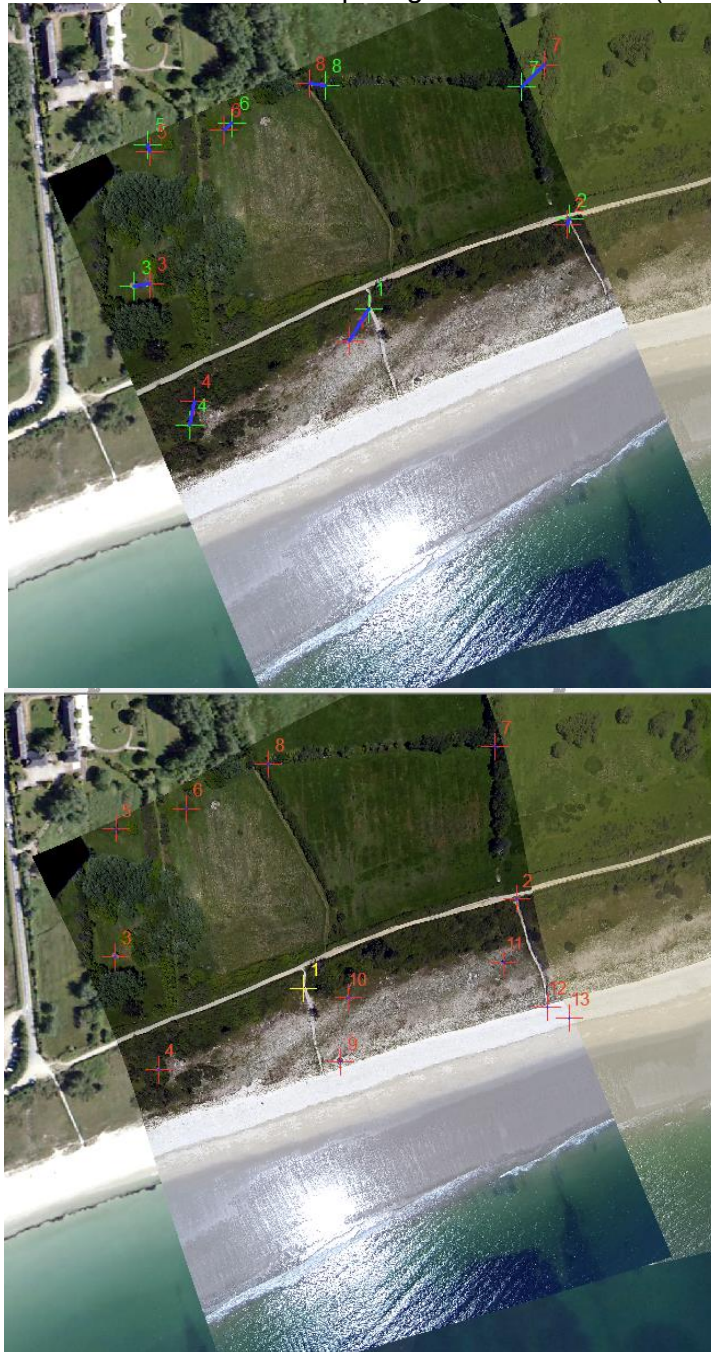
Un dernier travail de géoréférencement d'ordre 3 est nécessaire afin de rendre les photographies les plus proches de la réalité terrain.

A vitesse modéré du multirator (80% avec une courbe des gaz exponentielle), le recouvrement des photographies aériennes est de 30% sur l'axe X. Pour l'axe des Y le calage se fait avec l'écran de retours vidéo.

Ensuite sous un SIG (ici ArcGIS)

Un géoréférencement est effectué d'ordre 2 (avec spline) ou 3 selon l'état de la photographie.

Ici une photo aérienne réalisée secteur 7 avant et après géoréférencement (ici d'ordre 2 avec spline).



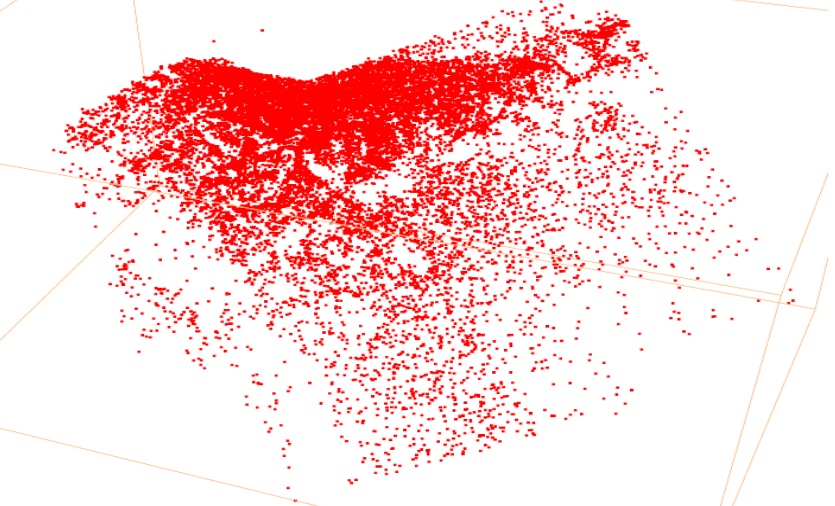
Photographies de réalisation des MNT

Plusieurs séries de sorties terrain ont permis d'améliorer la méthodologie mise en place par les étudiants de LUPSIG.

La méthodologie a notamment permis de réaliser plusieurs MNT.

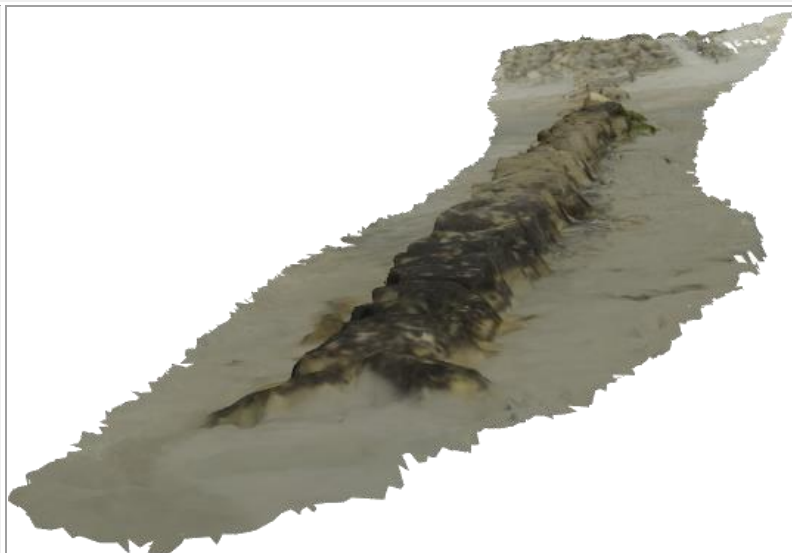
- Un sur l'épi
- Un sur l'enrochement
- Un sur les secteurs 2, et 3A
- Et un sur les 8, 9.

Ci-dessous captures d'écran des modèles numériques de terrain obtenus, tous les MNT sont expérimentaux.

Nom du projet	Image d'aperçu
MNT d'une brèche dunaire • Nuage dense : élevé • Mesh : Très élevé • Texture : 16384	
MNT Tête d'épi • Nuage dense : élevé • Mesh : Très élevé • Texture : 8192	
Nuage de points MNT tête d'épi	

Epi rocheux moyenne définition
(stabilisateur défaillant).

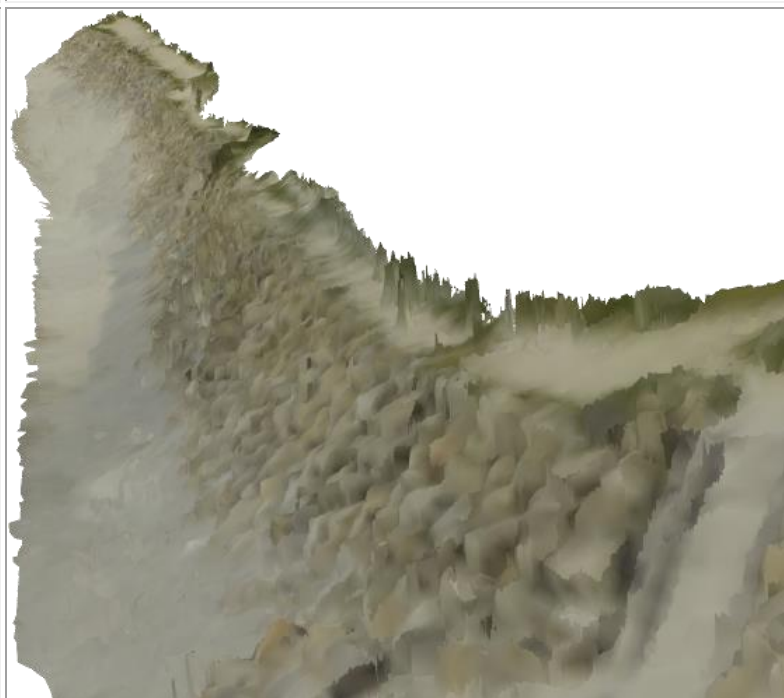
- Nuage dense : élevé
- Mesh : Très élevé
- Texture : 16384



Projet enrochements :

Ce projet est un test qui permet sans stabilisateur avec uniquement un vol de frontal à l'enrochement de connaître les limites possibles. Un vol azimuthal aurait pu venir combler les vides et caller le dessus de l'enrochement (stabilisateur défaillant).

- Alignement : Moyen
- Nuage dense : Haut
- Mesh : Elevé
- Texture : 4096



MNT dune attaquée

Ce MNT était destiné à tester la réactivité du logiciel face à des groupements végétaux de type Oyat, ou des arbres (stabilisateur défaillant).

- Alignement : Moyen
- Nuage dense : Haut
- Mesh : Elevé
- Texture : 8192



Annexe 6 : Procédé de réalisation de MNT via un GPS

GPS de type différentiel de marque Trimble GeoXh

Un quadrillage du secteur est réalisé notamment en mettant l'accent sur les secteurs de ruptures de pentes topographiques, à marée basse.

Les données sont post traitées avec la station la plus proche Concarneau.

La précision en Z finale du GPS est comprise entre 8 et 13 cm NGF.

Les MNT sont réalisés sous un SIG avec une méthode de type IDW :

« Uses the measured values surrounding the prediction location to predict a value for any unsampled location, based on the assumption that things that are close to one another are more alike than those that are farther apart. » (Informations de l'outil ArcGis)

Annexe 7 : Procédé de réalisation d'un lever GPS du trait de côte

Un lever du trait de côte est réalisé en prenant le point haut d'un falaise ou micro falaise si c'est le cas, ou prenant une limite morphologique définie comme le pied d'une entité physique clairement définie, ou une limite végétale (plantes pionnières) si aucune des deux autres méthodes ne peut être mise en œuvre.

Annexe 8 : Procédé d'injection de sédiments colorés

« **ID plot** » est l'identifiant de travail utilisé pour nommer le plot

« **Qté init Kg** » est le poids sédimentaire injectée

« **Qté théo g/m²** » est le poids par rapport à la surface relevée durant la nuit de travail

« **Qté relevée g/m²** » est le poids moyen des 5 échantillons par rapport à la surface relevée durant la nuit de travail

« **Surface m²** » est la surface relevée (calculée sous SIG), ou emprise au sol de la tâche des injections sédimentaires visibles.

« **Perte Kg** » est la perte (arrondie à l'entier) évaluée en croisant les données théoriques et les données relevées rapportées à la surface en m²

« **Perte %** » est la « **Perte Kg** » par rapport à la quantité initiale injectée

Annexe 9 : Les coefficients de marées à travers les stages

Historique des coefficients de marées, des heures durant la période de stage (port de référence Loctudy).

Données fournies par le SHOM (autorisation de reproduction n°36-2011)

Date		Coeff.	Heure
26-oct-13	BM		02h50
	PM	40	08h50
	BM		15h28
	PM	36	21h31
	PM		
27-oct-13	BM		03h50
	PM	33	10h01
	BM		16h42
	PM	31	22h57
	PM		
28-oct-13	BM		05h12
	PM	33	11h28
	BM		18h01
	PM		
	PM		
29-oct-13	BM		06h24
	PM	35	00h25
	BM		19h02
	PM	40	12h45
	PM		
30-oct-13	BM		07h19
	PM	46	01h23
	BM		19h50
	PM	52	13h38
	PM		
31-oct-13	BM		08h06
	PM	58	02h06
	BM		20h32
	PM	65	14h20
	PM		
07-déc-13	BM		01h21
	PM	89	07h33
	BM		13h51
	PM	84	20h02
	PM		
08-déc-13	BM		02h15
	PM	78	08h29
	BM		13h51
	PM	72	21h02
	PM		
26-déc-13	BM		05h21
	PM	44	11h25
	BM		17h59
	PM		
	PM		
27-déc-13	BM		06h29
	PM	43	00h14
	BM		19h07
	PM	45	12h40
	PM		
28-déc-13	BM		07h36
	PM	48	01h29
	BM		20h10
	PM	52	13h55
29-déc-13	BM		08h37
	PM	57	02h32
	BM		21h07
	PM	64	14h58
30-déc-13	BM		09h33
	PM	70	03h26
	BM		21h59
	PM	77	15h52
31-déc-13	BM		10h26
	PM	84	04h15
	BM		22h50
	PM	90	16h42
02-mars-14	BM		12h22
	PM	114	06h10
	BM		
	PM	115	18h29
03-mars-14	BM		00h42
	PM	114	06h51
	BM		13h05
	PM	112	19h08
04-mars-14	BM		01h25
	PM	108	07h30
	BM		13h47
	PM	102	19h44
05-mars-14	BM		02h08
	PM	96	08h08
	BM		14h28
	PM	89	20h21
06-mars-14	BM		02h52
	PM	80	08h46
	BM		15h11
	PM	72	20h59
07-mars-14	BM		03h37
	PM	64	09h29
	BM		15h56
	PM	56	21h45
23-avr-14	BM		05h54
	PM	53	12h23
	BM		18h30
	PM		
24-avr-14	BM		07h12
	PM	54	00h59
	BM		19h46
	PM	58	13h45
25-avr-14	BM		08h22
	PM	63	02h11
	BM		20h50
	PM	69	14h48
26-avr-14	BM		09h20
	PM	75	03h10
	BM		21h45
	PM	81	15h39
27-avr-14	BM		10h10
	PM	86	04h00
	BM		22h34
	PM	91	16h23
28-avr-14	BM		10h55
	PM	94	04h45
	BM		23h19
	PM	97	17h04

Résumé

La dune de Combrit située dans le Finistère sud a subi plusieurs tempêtes durant la période estivale d'octobre 2013 à avril 2014. Durant ces épisodes, les évolutions ont été plus ou moins visibles selon les conditions physiques de l'évènement.

Un travail a été engagé à partir d'octobre 2013 afin d'effectuer un suivi de cette dune à travers différentes méthodes et démarches.

Plusieurs veillées nocturnes ont permis de vérifier le modèle de déplacement éolien réalisé durant un précédent stage, mais aussi de comprendre les mécanismes en jeu durant les évènements.

D'autres démarches s'étendent de la réalisation de levés GPS, levés longitudinaux afin d'observer l'évolution du tracé du trait de côte, mais aussi verticaux avec la réalisation de modèles numériques de terrain.

Une injection de sables colorés a aussi été réalisée afin de pouvoir observer la dérive sédimentaire du site.

Enfin, un travail à partir de multiréacteur (drone) a été réalisé pour pouvoir remettre à jour les photographies aériennes, mais aussi réaliser des modèles numériques de surfaces précis.

Abstract

The coastal dune of Combrit located in the south Finistère (France) was under several storms during the storm period from october 2013 to april 2014. During those events, the physical evolutions where differently visible consequently of the physical conditions of the event.

A work was started at the beggining of october 2013 to realise a surveillance of the coastal dune, with differents methods and realisation.

Several night have been necessary during the peaks of the storms to understand the physical processes in action during them. Others actions have been to realise modelisation of the coastline and numerical model of the surface with a differential GPS.

An injection of painted sediment was realise during a calm period to understand the « normal » sand movements on the sector.

A final process was to use a drone for taking actual photography of the sector and realising numerical model of surface by photomodelisation.

Mots clefs

SIG, dune, littoral, trait de côte, drone, GPS différentiel, photogrammétrie, modélisation

Keywords

SIG, dune, littoral, coastline, drone, differential GPS, photogrammetry, predictive models