

- ☐ Littoral
- ☐ Fluvial
- ☐ Lacustre
- ☐ Désertique

PROJET PILOTE

MISE EN PLACE D'UN EPI EXPERIMENTAL MODULAIRE ET REVERSIBLE EN MODULES GEOCOMPOSITES

COMMUNE DE SAINT JEAN LE THOMAS

Etude d'exécution
29 04 2016



Vue panoramique de la zone des brèches potentielles. (Photo Espace Pur du 15/03/2016)

SOMMAIRE

1	Contexte du projet	3
1.1	Risques et enjeux	3
1.1.1	Les risques liés à l'érosion du trait de côte	3
1.1.1.1	Caractérisation du processus d'érosion	3
1.1.1.2	Caractérisation du risque de brèches	4
1.1.1.3	Caractérisation du risque de submersion	5
1.1.2	Les valeurs écologiques, patrimoniales et naturelles du site	7
1.1.2.1	Valeur patrimoniale	7
1.1.2.2	Faune et Flore	9
1.1.2.3	Activités et usages du site	9
1.2	Historique du projet	10
2	Présentation de la solution	11
2.1	Le projet global de protection	11
2.2	Un projet pilote : un premier épi expérimental	12
2.2.1	Implantation	13
2.2.2	Longueur de l'ouvrage	14
2.3	Les contraintes imposées	14
3	Calcul de la stabilité de l'ouvrage	15
3.1	Données et démarche de calculs	15
3.2	Résultats de l'étude de stabilité	15
4	La solution préconisée suite à l'étude de stabilité	16
4.1	Implantation de l'ouvrage	16
4.2	Dimensionnement de l'ouvrage	17
4.2.1	Longueur de l'ouvrage	17
4.2.2	Hauteur de l'ouvrage	18
4.2.3	Largeur de l'ouvrage	18
4.2.4	Emprise au sol	18
4.3	Caractéristiques techniques	18
4.3.1	Les matériaux :	19
4.3.2	Les coutures :	19
4.3.3	Schémas et plans	21
4.4	Recommandations complémentaires	21
4.5	Synthèse	22
5	Comportement et incidences attendus	24
5.1	Incidence sur les fonds marins	24
5.2	Incidence sur la courantologie et la dynamique sédimentaire	24
5.3	Incidence sur les aléas naturels	25
5.4	Incidence sur le patrimoine naturel	25
5.5	Incidence sur l'activité humaine	26
5.6	Incidences dues à la phase des travaux	26
5.7	Incidences sur la qualité de l'eau	26
6	Démarche opérationnelle	27
6.1	Phases de réalisation	27
6.1.1	Phases de réalisation de l'épi expérimental, réversible et modulaire	27
6.2	Planning de la première phase de réalisation de l'épi expérimental	27
6.3	Protocole des travaux	28
6.3.1.1	Remplissage des modules	28
6.3.1.2	Transport et levage des modules	29
6.3.1.3	Pose des modules sur site	29
7	Aspects réglementaires et autorisations	32
8	Conclusion	32
9	Contacts	33
	Table des Annexes	34

Remarque préliminaire à l'étude :

Le terme employé, lors de précédentes études, pour désigner les modules en géocomposite remplis de sable est Géobag®. Cette appellation ne peut pas être reprise dans ce document car elle correspond à une marque spécifique et déposée. Les caractéristiques techniques de ce produit diffèrent des produits proposés. Le terme générique anglais des sacs remplis de sable est « *sandcontainer* ». Nous utiliserons le terme modules en géocomposite dans ce document.

1 Contexte du projet

La fragilité du cordon dunaire de la commune de Saint Jean Le Thomas engendre des risques d'inondation et de submersion des zones-arrières. La zone de brèches potentielles a été consolidée, en urgence, par apports de sable, à deux reprises début 2016.

Suite aux résultats de l'étude du Professeur Levoy (étude CIRCLE), il a été convenu de réaliser un projet mettant en œuvre des épis de manière à pérenniser la protection du trait de côte. Ce document porte sur la réalisation du premier épi à caractère expérimental car modulaire et réversible.

1.1 Risques et enjeux

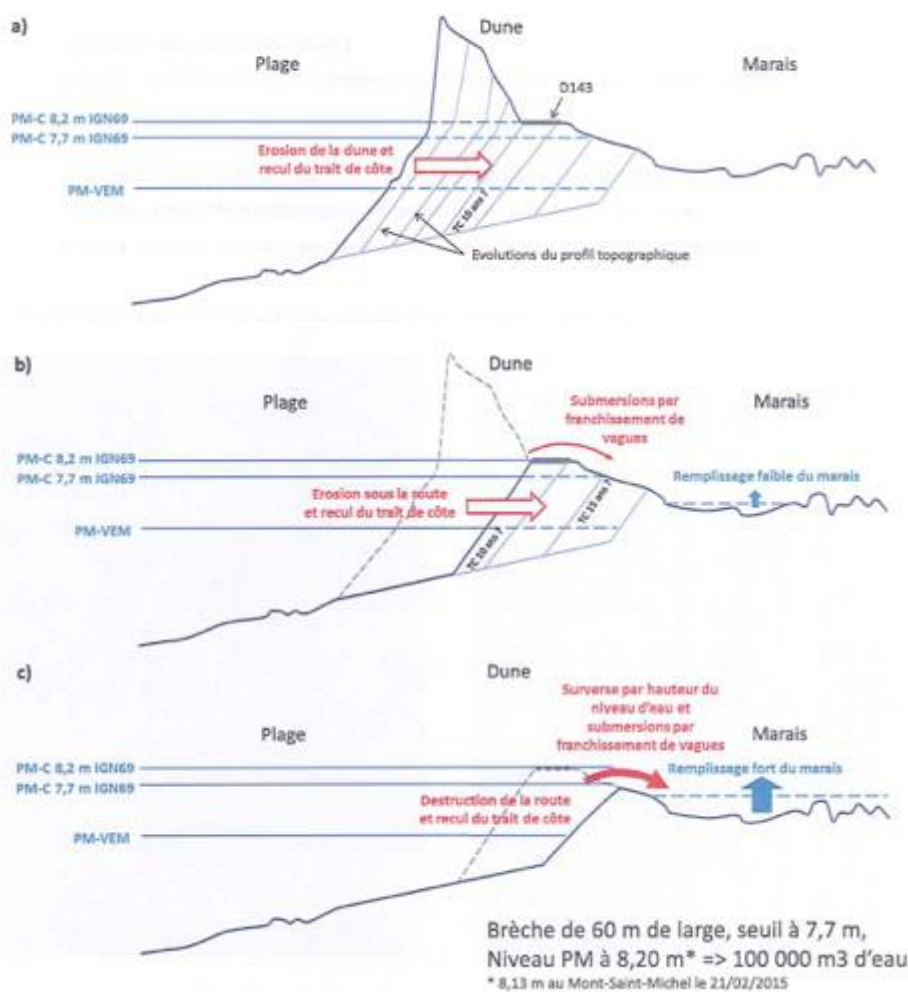
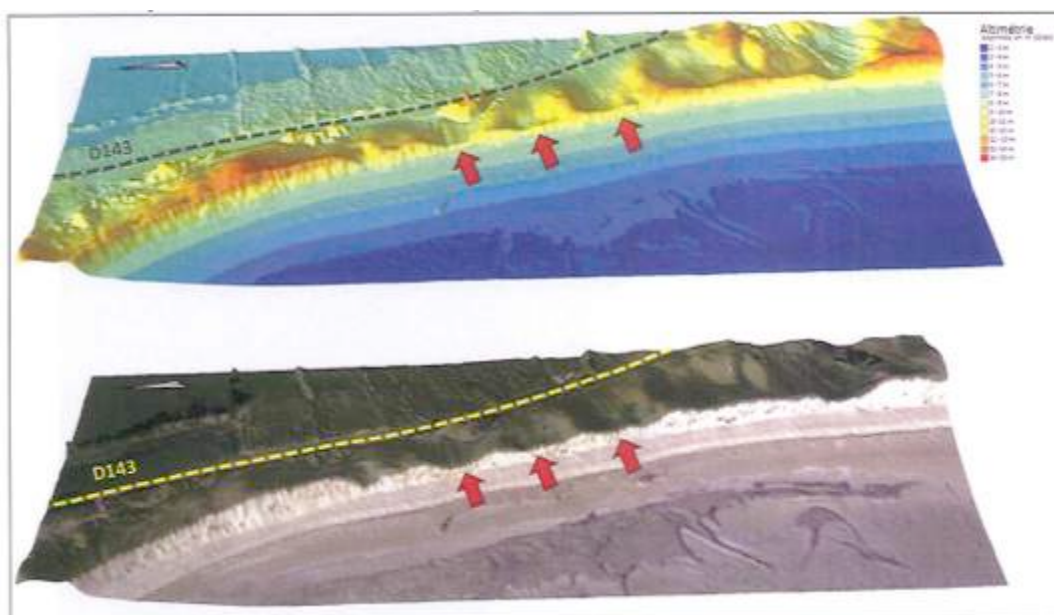
1.1.1 Les risques liés à l'érosion du trait de côte

1.1.1.1 Caractérisation du processus d'érosion

Extrait de l'étude CIRCLE, avril 2015,
F. Levoy. Evolution historique et future
du trait de côte : modèle numérique.



1.1.1.2 Caractérisation du risque de brèches



1.1.1.3 Caractérisation du risque de submersion

Terrains sous la cote 7,70 m IGN 69

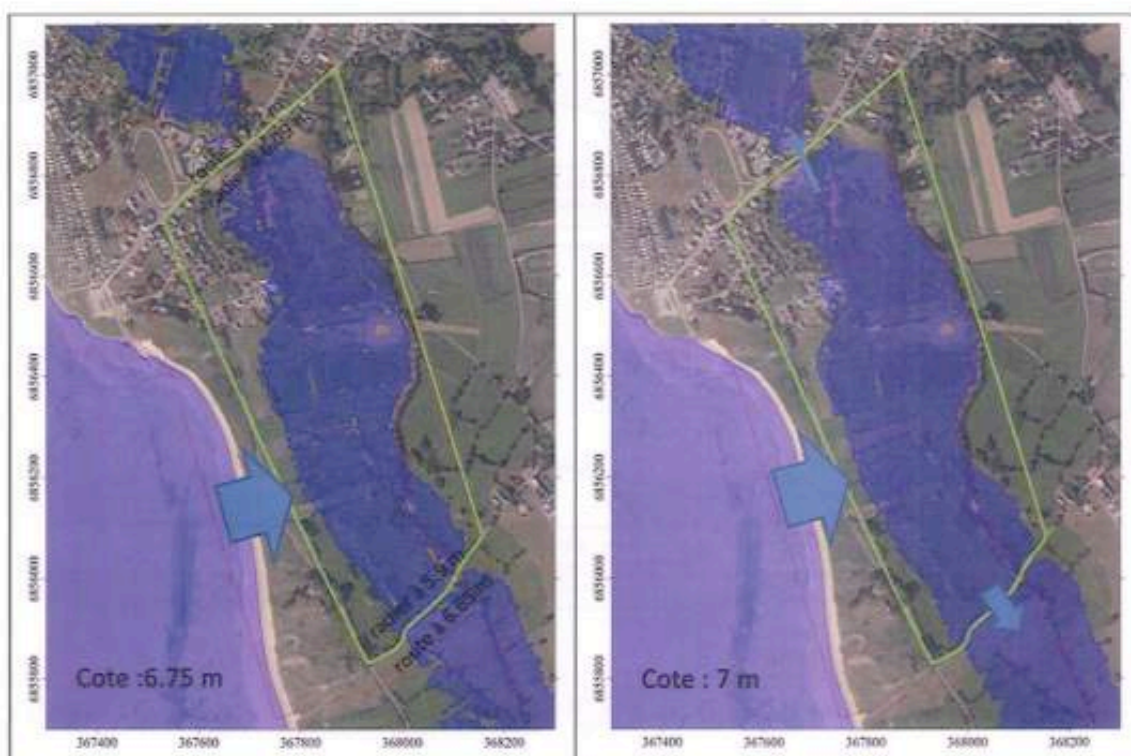


Topographie Lidar Circle mai 2014

Terrains sous la cote 8,20 m IGN 69



100 000 m³ ⇔ volume de la zone basse à la cote 7 m



1.1.2 Les valeurs écologiques, patrimoniales et naturelles du site

Cette partie s'appuie majoritairement sur l'étude paysagère réalisée par le bureau d'étude INEX Atelier. Les cartes évoquées dans cette partie sont situées en annexe.

1.1.2.1 Valeur patrimoniale

- **Site classé UNESCO, patrimoine mondial**

Le Mont Saint Michel et sa Baie :

« Sur un îlot rocheux au milieu de grèves immenses soumises au va-et-vient de puissantes marées, à la limite entre la Normandie et la Bretagne, s'élèvent la « merveille de l'Occident », abbaye bénédictine de style gothique dédiée à l'archange saint Michel, et le village né à l'abri de ses murailles. La construction de l'abbaye, qui s'est poursuivie du XI^e au XVI^e siècle, en s'adaptant à un site naturel très difficile, a été un tour de force technique et artistique. » *Source : www.unesco.org*

Département de Manche, Région de Basse-Normandie N48 38 8.016 W1 30 38.016 Date d'inscription : 1979 Année d'inscription de la modification mineure : 2007 Critères : (i)(iii)(vi) Bien : 6 560 ha Zone tampon : 57 510 ha Ref : 80bis
--

- **Deux ZNIEFF de type 1** : (extrait de l'étude paysagère INEX Atelier) (cf. annexe 1)

- **estran sablo-vaseux** (Identifiant national : 250008126) (Identifiant régional : 00070019)

« Cette partie inférieure de l'estran, composée de sédiments sablo-vaseux, présente une grande unité morphologique et constitue une zone exceptionnelle de niveau international pour ses caractères sédimentaires et paysagers. Elle est aussi la plus grande étendue sableuse d'Europe. L'importante productivité biologique qui caractérise cette zone engendre une richesse écologique que l'on peut apprécier au regard de la faune et de la micro-flore présente. » DUPONT B, 2011.- 250008126, ESTRAN SABLO- VASEUX. - INPN, SPN-MNHN Paris, 50P. <http://inpn.mnhn.fr/zone/znief/250008126.pdf>

- **Marais de la Claire Douve et dunes** (Identifiant national : 250008119) (Identifiant régional : 00070012)

« Inscrit dans le contexte grandiose de la baie du Mont Saint-Michel, ce secteur continental correspond à un cordon dunaire prolongé vers l'intérieur des terres par le marais arrière-littoral de la Claire Doves. Il participe à la dynamique sédimentaire de l'ensemble de la baie et laisse apparaître des zones très sensibles à l'érosion en fort recul, tandis que d'autres sont en proie à un engraissement notable. La disposition originale du massif dunaire, abritant un marais parallèle adossé à une falaise morte fossile, confère au site un grand intérêt paysager. La relative quiétude dont bénéficie cette zone et la présence d'une mosaïque de milieux aux conditions écologiques variées (dunes embryonnaires, vives et fixées, prairies au degré d'humidité variable, bois...) sont à l'origine de son intérêt écologique. » RUNGETTE D, 2011.- 250008119, MARAIS DE LA CLAIRE- DOUVES ET DUNES . – INPN

- **Une ZNIEFF de type 2 :** (*extrait de l'étude paysagère INEX Atelier*) (cf. annexe 2)
 - Baie du Mont Saint Michel
 (Identifiant national : 250006479) (Identifiant régional : 00070000)
 «Concerné par une vaste superficie de Domaine Public Maritime, le site de la baie du Mont-Saint-Michel se développe au sein du golfe normand-breton, au niveau de l'angle formé par les départements de la Manche et de l'Ille-et-Vilaine.
 Le substratum profond, constitué de schistes, est recouvert sur plusieurs mètres de sédiments meubles. L'amplitude des marées, parmi les plus fortes du monde, atteint 15 mètres aux marées d'équinoxe, découvrant ainsi plusieurs dizaines de milliers d'hectares de grèves, de vasières et de bancs de sable. Les phénomènes de sédimentation et de géomorphologie marines de grande ampleur confèrent à la baie un intérêt majeur.»
 RUNGETTE D, 2011.- 250006479, BAIE DU MONT SAINT- MICHEL. - INPN, SPN-MNHN Paris, 60P. <http://inpn.mnhn.fr/zone/znief/250006479.pdf>

- **Site d'Importance Communautaire : Natura 2000**
 (*Extrait de l'étude paysagère INEX Atelier*) (cf. annexe 3)

 Les dunes de Saint-Jean-le-Thomas appartiennent au Site d'Importance Communautaire : Natura 2000- FR2500077 - Baie du mont Saint-Michel
 Type : B (pSIC/SIC/ZSC)
 Compilation : 30/11/1995 Mise à jour : 31/03/2005 superficie de 38 747 ha dont Pourcentage de superficie marine : 97 %

- **Zone humide protégée par la convention de Ramsar**
 (*Extrait de l'étude paysagère INEX Atelier*) (cf. annexe 4)

 FR7200009 - Baie du Mont Saint Michel Zone humide protégée par la convention de Ramsar en date du 14-10-1994 .

 Depuis 1971, la Convention de Ramsar entend préserver les zones humides et promouvoir l'utilisation rationnelle de leurs ressources. Elle travaille à élaborer et maintenir un réseau international de zones humides importantes pour la conservation de la biodiversité mondiale et les services écosystémiques rendus.
 Procédure de création : désignation au titre d'une convention ou d'un programme international
 Superficie calculée - SIG (ha) : 45916.113

- **Parcelles dunaire appartenant au conservatoire du littoral**
 (*Extrait de l'étude paysagère INEX Atelier*) (cf. annexe 5)

- **Sites classés**

(Extrait de l'étude paysagère INEX Atelier) (cf. annexe 6)

- Sites classés n 50057-3 et 50058-2 : Bec d'Andaine, dunes de Dragey et rocher de Tombelaine. Baie du Mont Saint Michel

Classement :

- Décret du 25 mai 1987 (50057- 2477 ha)
- Arrêté du 26 mai 1987 (50058- 8533 ha)

1.1.2.2 Faune et Flore

Compte tenu de la période de nidification du gravelot à collier interrompu : de mars à octobre, une autorisation spécifique sera nécessaire pour la pose.

Un échange entre les services compétent et Espace Pur avait eu lieu et avec un repérage précis le jour d'avant la pose de l'ouvrage, il était envisageable de travailler sur l'estran pendant la période de nidification.

1.1.2.3 Activités et usages du site

- Activités économiques : économie équine
 - entraînement des chevaux, courses...
- Usages :
 - Site récréatif, balades et randonnées, pêche à pied...

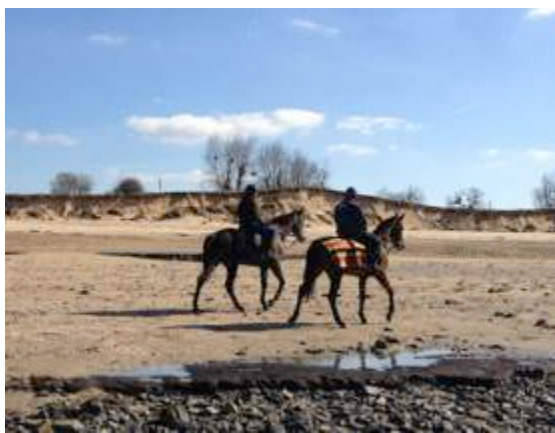


Figure 1 : photo de chevaux sur plage



Figure 2 : usagers du site

Photographies prises lors du premier confortement d'urgence de la zone de brèches potentielles le 29/02/2016.

1.2 Historique du projet

Historique	Projet épi	Travaux parallèles
Mars 2015	Premier contact avec F.Levoy Demande de devis à Espace Pur	
Octobre 2015	Signature du bon de commande	
Novembre 2015	Etude d'intégration paysagère, INEX Atelier	
Novembre/ Décembre 2015	Arrêt du projet	
Janvier 2016	Reprise du projet	Relevés topographiques initiaux <i>(Espace Pur / IN VIVO Environnement)</i> Confortement d'urgence n°1 en sable Confortement d'urgence n°2 en sable
Février 2016	Réunion en préfecture	
Février/ Mars 2016		
Avril 2016	Etude d'exécution / Espace Pur	

2 Présentation de la solution

2.1 Le projet global de protection

Extrait de l'étude CIRCLE, avril 2015, F. Levoy :

« La solution consistant à implanter des ouvrages transversaux de type épi pour stabiliser l'évolution de trait de côte et éviter la formation de brèches a été proposée dès 1994 dans le cadre de l'étude globale de défense contre la mer du département de la Manche. Elle reste pleinement d'actualité. En effet, la pertinence de ce type d'ouvrage avait été démontrée notamment compte tenu de l'existence d'un transport sableux Nord-sud bien marqué sur la partie haute de la plage du secteur étudié.

L'objectif de ces épis est de relever altimétriquement la haute plage afin de mieux dissiper les vagues de tempêtes. Cela permet de réduire, voire de supprimer, leur action érosive sur le front de dune protégeant ainsi le marais de Claire-Douve et plus globalement les biens sous le niveau des plus hautes mers en arrière du cordon dunaire.

Les caractéristiques de ce type d'ouvrage ne doivent toutefois en aucun cas induire un blocage complet du transport sédimentaire vers le Sud afin de ne pas générer une érosion immédiatement à l'aval-dérive sédimentaire des épis.

Il est proposé un dispositif différent de ceux issus des études antérieures menées par le GRESARC, sans enrochement, ni en structure bois. Une autre solution, de nombreuses fois expérimentée, est d'utiliser des containers souples de petites tailles en matériaux géosynthétiques qui sont remplis de sable. Ces containers sont fréquemment appelés géobags. L'objectif est d'avoir une solution qui soit, d'un coût raisonnable, relativement aisée à mettre en place, facilement réversible, correctement intégrée dans le contexte environnemental et qui peut être évolutive d'un point de vue géométrique.

Une batterie de 4 épis constitués de géobags est suggérée, ayant chacun une longueur de 25 à 50 m (cf. figure 3) selon l'état morphologique et topographique de la haute plage à définir précisément juste avant la mise en place du dispositif. Ces épis seraient donc implantés strictement sur la haute plage constituée de sable secs et ne doivent en aucun cas s'étendre au delà de la rupture de pente matérialisant le contact entre la haute et la moyenne plage ou avec les tangues et argiles fossiles qui affleurent sur l'estran de cette zone. Ces épis seraient distant l'un de l'autre de 150 mètres, le plus au Nord étant également à une distance d'environ 150 m de la terminaison de l'enrochement longitudinal. Cette batterie couvre avant toute la zone de brèches potentielles et ses domaines latéraux afin de mieux contrôler l'érosion sur l'ensemble de la zone où le cordon dunaire est relativement étroit. La hauteur de ces épis pourrait également être évolutive et l'élévation de la plage souhaitée ne sera donc atteinte que progressivement. La construction de cette batterie devra se faire du Sud (aval-dérive sédimentaire) vers le Nord (amont-dérive). (...) »

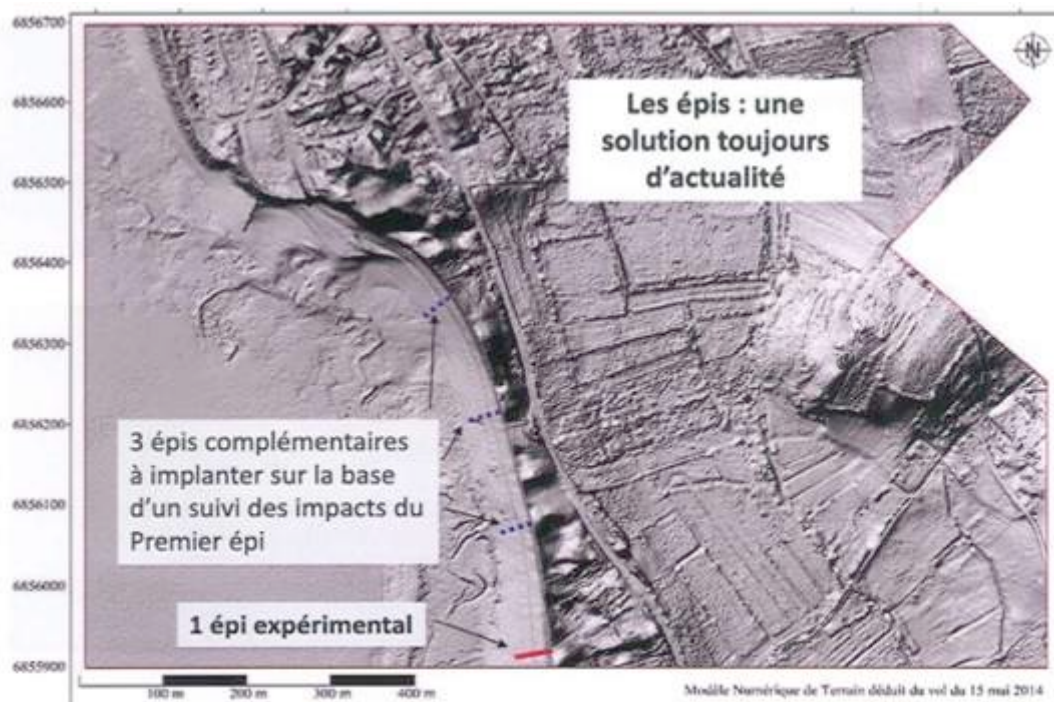


Figure 3 : positionnement des épis

Plusieurs phases de travaux envisagées :

- Phase 1 : réalisation du premier épi
- Phase 2 : contrôle des résultats et ajustements du premier épi
- Phase 3 : réalisation des trois autres épis

2.2 Un projet pilote : un premier épi expérimental

Extrait de l'étude CIRCLE, avril 2015, F. Levoy :

« Toutefois, dans un premier temps, un premier épi à caractère expérimental est préconisé compte tenu du faible retour d'expérience de ce type d'ouvrage en France. Il serait localisé au Sud de la zone concernée (à l'aval-dérive du transit sédimentaire) afin de tester d'une part, l'utilisation et la mise en œuvre de nouveaux matériaux de type géosynthétique sous la forme de géobags et d'autre part, de suivre l'évolution de la plage suite à la construction de cet épi. La hauteur de ce premier épi devra dans un premier temps être réduite, mais compte tenu de la technologie employée, il sera possible de la relever par étapes. Les enseignements de ces suivis devront permettre d'affiner la mise en œuvre ultérieure de la suite de l'aménagement ou, si nécessaire, de renoncer à sa poursuite en engageant une opération de démontage de l'ouvrage. (...) »

Ce type de modules permet la mise en place d'une structure d'épi, en coupe, de type pyramidale, qui peut être évolutive afin d'atteindre une hauteur déterminée par rapport au niveau moyen de la plage. Dans le cas présent, une pyramide de 6 modules atteignant une hauteur déterminée par rapport au niveau moyen de la plage. Dans le cas présent, une pyramide de 6 modules, atteignant une hauteur au dessus du niveau moyen de la plage d'environ 0,7 m serait suffisante pour apprécier les conséquences de la mise en œuvre et les impacts d'un tel ouvrage (figure 1). »

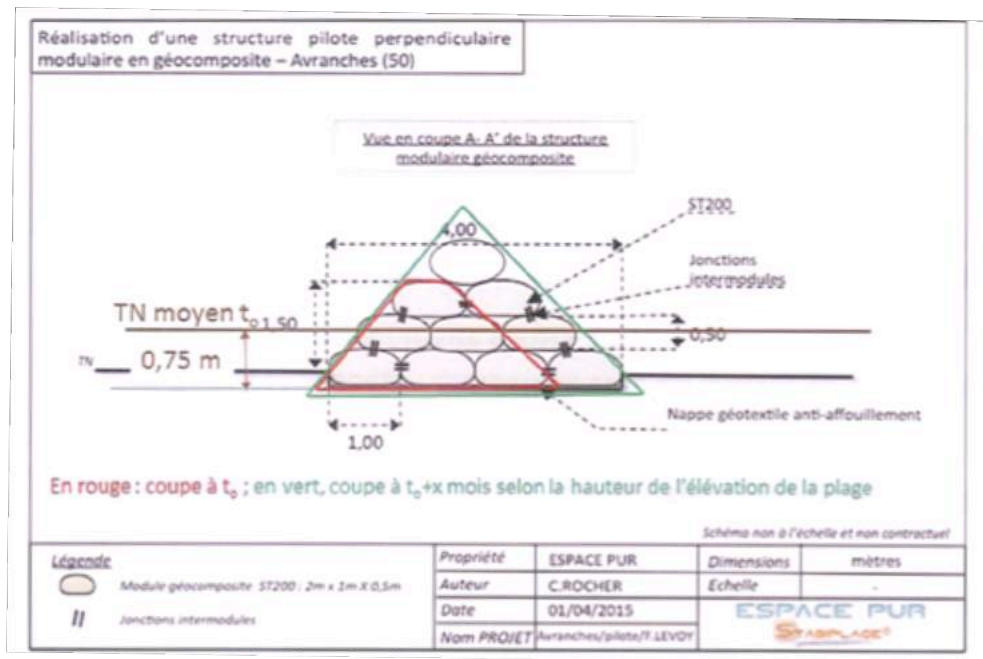


Figure 4 : coupe transversale de l'épi expérimental, réalisée pour le devis

Remarque :

La solution illustrée n'est pas celle retenue par le maître d'ouvrage. Cette solution illustre une solidarisation des modules afin d'améliorer la stabilité de l'ensemble de la structure. La structure commandée ne retient pas cette option.

« La profondeur d'enfouissement de l'ouvrage par rapport au terrain naturel moyen sera variable, d'environ 1 mètre sur la partie haute de la plage à 0,5 m à l'extrémité de l'épi. Cette profondeur tient compte des fluctuations altimétriques de la plage au niveau du profil SW104 du suivi historique du trait de côte mené par le CG50. L'amplitude de ces fluctuations a été contrôlée plusieurs fois entre 2009 et 2014 à l'aide de données LIDAR. Elle sera toutefois à ajuster si nécessaires selon le niveau des tourbes et argiles fossiles sous-jacentes à déterminer par sondage. Dans un second temps, il serait possible de surélever l'ouvrage par tranche de 0,5 m, dimension de l'épaisseur d'un module, si l'efficacité et les caractéristiques de l'ouvrage s'avèrent satisfaisantes.

De manière à répondre à la réalisation du premier épi expérimental, F. Levoy, suite à son étude du site, a sollicité la société Espace Pur pour un devis correspondant à la phase 1 de l'épi expérimental.

2.2.1 Implantation

Extrait de l'étude CIRCLE, F. Levoy

« ...Dans un premier temps, un premier épi à caractère expérimental est préconisé compte tenu du faible retour d'expérience de ce type d'ouvrage en France. Il serait localisé au Sud de la zone concernée (à l'aval-dérive du transit sédimentaire) afin de tester d'une part, l'utilisation et la mise en œuvre de nouveaux matériaux de type géosynthétique sous la forme de géobags et d'autre part, de suivre l'évolution de la plage suite à la construction de cet épi »

Le premier épi, expérimental, doit être implanté en aval du transit sédimentaire par rapport à la zone de brèches potentielles. De cette manière, l'influence de l'épi sur le captage sédimentaire se fera au nord de l'ouvrage, au droit du trait de côte à protéger.

De façon à obtenir un résultat de captage sédimentaire optimal pour protéger la zone de brèches potentielles, il est nécessaire de débiter la mise en œuvre du premier épi en amont dérive transit. L'étude CIRCLE de F. Levoy le préconise.

Ce premier épi expérimental se situe à une distance d'environ 120 mètres linéaires de la brèche potentielle située le plus au sud de la zone à risque.

2.2.2 Longueur de l'ouvrage

Extrait de l'étude CIRCLE :

*« Une batterie de 4 épis constitués de géobags, ayant chacun une longueur de 25 à 50 m selon l'état morphologique et topographique de la haute plage (à définir précisément juste avant la mise en place du dispositif), est suggérée. **Ces épis seraient donc implantés strictement sur la haute plage constituée de sable secs et ne doivent en aucun cas s'étendre au delà de la rupture de pente matérialisant le contact entre la haute et la moyenne plage ou avec les tangues et argiles fossiles qui affleurent sur l'estran de cette zone** »*

2.3 Les contraintes imposées

Le projet soutient des contraintes techniques importantes :

Le site étant classé UNESCO, il est impératif de réduire les impacts lors de la phase de travaux au minimum, afin d'éviter des dégradations de l'estran de la flore et d'éviter au maximum le dérangement de la faune.

Il a été convenu de remplir les modules à l'extérieur du site. Cette méthode a été convenue en amont du projet afin de répondre au maximum à la préservation du site. Elle apporte toutefois des contraintes techniques importantes, notamment sur le transport des modules et leur mise en œuvre in-situ. Le protocole des travaux envisagés est expliqué au point 4.3 du présent document.

Ci-dessous, les contraintes imposées pour les modules géocomposites dans l'étude Circle, (F. Levoy)

- *Le remplissage des géobags puisse être strictement mené hydrauliquement ; la déformation du géobag doit être évitée après son remplissage. il devra donc être mis en place avec des équipements adéquats à valider.*
- *La stabilité des géobags soit garantie par calcul, cela pouvant imposer de revoir la géométrie du géobag utilisé*
- *La masse unitaire des géobags soit compatible avec les critères de stabilité usuels en ingénierie littorale pour le site considéré*
- *Les coutures soient éprouvées à l'épreuve de l'abrasion, notamment sous l'effet du sable de volage et le géosynthétique utilisé doit être garanti à l'épreuve des chocs (présence de galets)*
- *la fermeture des géobags soit garantie*
- *la couleur des géobags soit proche de la couleur du sable naturel du site étudié.*

Face à ces contraintes, une étude de stabilité était indispensable.

3 Calcul de la stabilité de l'ouvrage

3.1 Données et démarche de calculs

Suite à la commande, Espace Pur a effectué une étude avec des calculs de stabilité des modules pour assurer au mieux la stabilité globale de l'ouvrage face aux conditions météorologiques type tempétueuses de manière à répondre à :

(Extrait de l'étude CIRCLE, F. Levoy)

- « **La stabilité des géobags soit garantie par calcul**, cela pouvant imposer de revoir la géométrie du géobag utilisé
- *La masse unitaire des géobags soit compatible avec les critères de stabilité usuels en ingénierie littorale pour le site considéré »*

Ces calculs ont été menés de deux manières :

- la première sur la base des connaissances de dimensionnement d'un ouvrage type épi en enrochement, d'ingénierie lourde
- la deuxième sur les références actuelles mondiales en matière de conception d'ouvrage en modules en géocomposite.

Nous avons intégré à ces calculs notre savoir-faire et notre retour d'expérience depuis 15 ans sur la pose d'ouvrage en géocomposite.

Les conditions océano-météorologiques prises pour le calcul de stabilité sont situées en annexe.

Un premier rendu avait été effectué auprès de Franck Levoy courant mars. Suite à son retour par la note du 31 mars (annexe14), des adaptations et modifications ont été effectuées.

3.2 Résultats de l'étude de stabilité

Les résultats complets de l'étude de stabilité sont annexés à ce document (annexe 11)

Par rapport à **l'ouvrage commandé**, constitué de **modules ST200**, dont la masse minimale des modules prévue entre 1 à 1,5 tonnes, **la stabilité hydraulique au glissement n'est pas assurée** pour des houles supérieures à 1 mètre de hauteur.

Il convient par conséquent de dimensionner les modules au minimum avec une masse comprise entre 4,5 et 5,5 tonnes, c'est à dire des **modules ST 300**. **En tenant compte des impératifs de modularité et de réversibilité, nous confirmons la faisabilité de réalisation de l'ouvrage avec des modules ST300. Leurs caractéristiques et modalités de mises en œuvre sont présentées ci après.**

4 La solution préconisée suite à l'étude de stabilité

4.1 Implantation de l'ouvrage

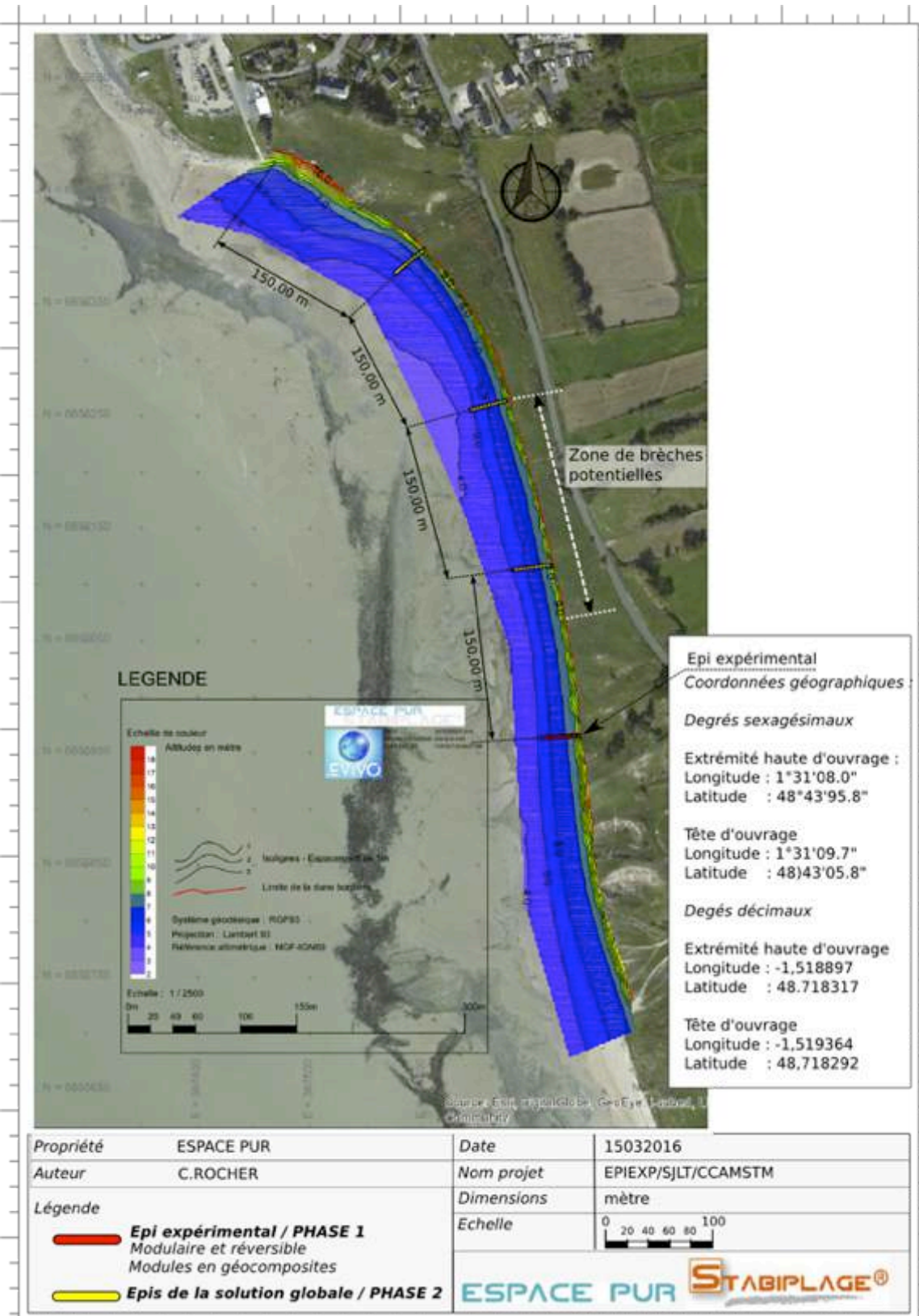
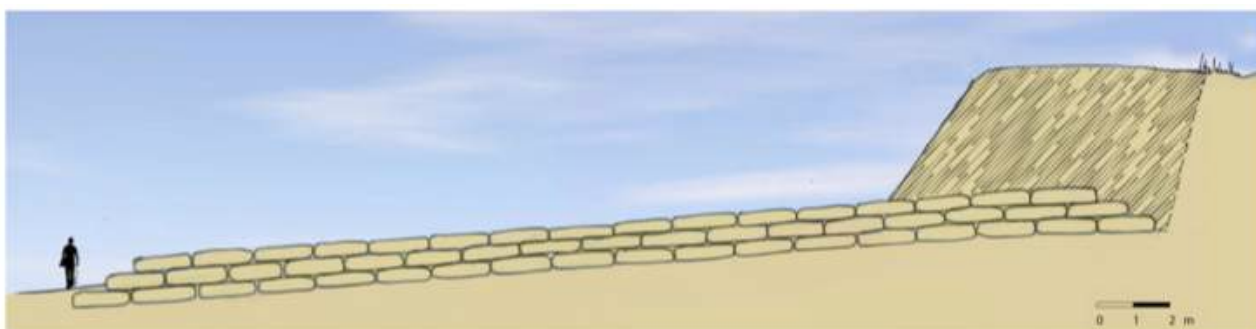


Figure 5 : plan d'implantation de l'épi expérimental

4.2 Dimensionnement de l'ouvrage

L'ouvrage doit évoluer dans ses dimensions en fonction des résultats de captage sédimentaire. La première phase consiste à dimensionner l'ouvrage de manière à correspondre aux conditions initiales du site. La seconde phase permet de faire évoluer les dimensions de l'ouvrage de manière à s'adapter aux résultats de captage sédimentaire.

La figure ci-dessous, réalisée par INEX Atelier, correspond à la phase 1 du projet d'épi expérimental modulaire et réversible.



Vue en coupe de rendu du projet (Source INEX Atelier)

4.2.1 Longueur de l'ouvrage

De manière à répondre à la demande de l'étude CIRCLE et en fonction de :

- la rupture de pente entre le haut de plage et la moyenne plage observée : Située à 30 mètres du bas du talus d'érosion (haut de haute plage), lors des premières mesures terrain (octobre, novembre 2015, janvier 2016)
- les relevés topographiques réalisés (février 2016)
- la nécessité de réaliser une pénétration de l'ouvrage dans la dune, de minimum 4 mètres linéaires, (cf. point 6.3.1.3)

La longueur de l'ouvrage sera de 35 mètres.

Au delà, la présence de tange (argiles fossiles) affleure sur la moyenne plage.



Figure 6 : affleurement en haut de moyenne plage

4.2.2 Hauteur de l'ouvrage

Concernant la hauteur de l'ouvrage, « *une pyramide de 6 modules, atteignant une hauteur au dessus du niveau moyen de la plage d'environ 0,7 m serait suffisante pour apprécier les conséquences de la mise en œuvre et les impacts d'un tel ouvrage* » (extrait étude CIRCLE).

La hauteur de l'ouvrage sera donc en moyenne de 0,70 m au dessus du niveau moyen de la plage. Le profil de terrassement, dépendant de l'épaisseur de la couche de sable présente sur les argiles fossiles a été convenu comme :

« *La profondeur d'enfouissement de l'ouvrage par rapport au terrain naturel moyen sera variable, d'environ 1 mètre sur la partie haute de la plage à 0,5 m à l'extrémité de l'épi* »
Extrait de l'étude CIRCLE, F. Levoy,

4.2.3 Largeur de l'ouvrage

La largeur de l'ouvrage :

- en phase 1 est de 3 mètres
- en phase 2 est de 4 mètres

4.2.4 Emprise au sol

En fonction des dimensions préconisées, l'emprise au sol sur le Domaine Public Maritime est de :

- phase 1 : 105 m²
- phase 2 : 140 m²

4.3 Caractéristiques techniques des modules

Les modules choisis pour cette configuration sont des modules type ST300 (Cf. étude de stabilité). Les modules seront fabriqués dans les locaux de la société Espace Pur, dès que l'étude d'exécution sera validée.

Un module a une longueur de 2,5m sur 2m de largeur (rempli).

Les contraintes évoquées pour la conception des modules sont :

- *La couleur des géobags soit proche de la couleur du sable naturel du site étudié.*
- *Les coutures soient éprouvées à l'épreuve de l'abrasion, notamment sous l'effet du sable de volage et le géosynthétique utilisé doit être garanti à l'épreuve des chocs (présence de galets) la fermeture des géobags soit garantie*

(Extrait de l'étude CIRCLE, F. Levoy)

4.3.1 Les matériaux :

Les matériaux qui seront utilisés ont été éprouvés couramment dans la lutte contre l'érosion marine.

La conception des modules ST200 et ST300 utilise deux types de matériaux différents :

- un matériau interne tissé,
 - fortes résistances aux forces de pressions exercées
 - résistance à l'abrasion interne lors du remplissage à haute pression
- un matériau externe non-tissé
 - traitement élevé anti-UV
 - forte résistance à l'abrasion par le sable
 - couleur proche de celle du sable du site

De manière générale, les modules, remplis de sable offrant une perméabilité adéquate, permettent de résister aux chocs d'objets, notamment les galets. L'addition de ces deux matériaux permet de renforcer cette caractéristique.

Données techniques de l'assemblage de ces deux matériaux	
Matière première	PET
Masse surfacique <i>NF EN ISO 9864</i>	≈930 g/m ²
Résistance à la traction <i>NF EN ISO 10.319</i>	L ≥177 kN/m T ≥177 kN/m
Allongement à la traction nominale <i>NF EN ISO 10.139</i>	L ≤12% T ≤12%
Perméabilité à l'eau <i>NF EN 11 058</i>	87 x 10 ⁻³ m/s (Tolérance ±10 x 10 ⁻³ m/s)
Ouverture de filtration <i>NF EN 12 956</i>	0,12 mm (Tolérance ± 0,02 mm)

De plus, les modules de tête seront renforcés par un troisième matériau côté interne de la structure. En effet, ce sont ces modules qui seront le plus soumis à l'hydrodynamique marine, même à faible coefficient, alors que les modules positionnés en haut de la haute plage, seront moins exposés.

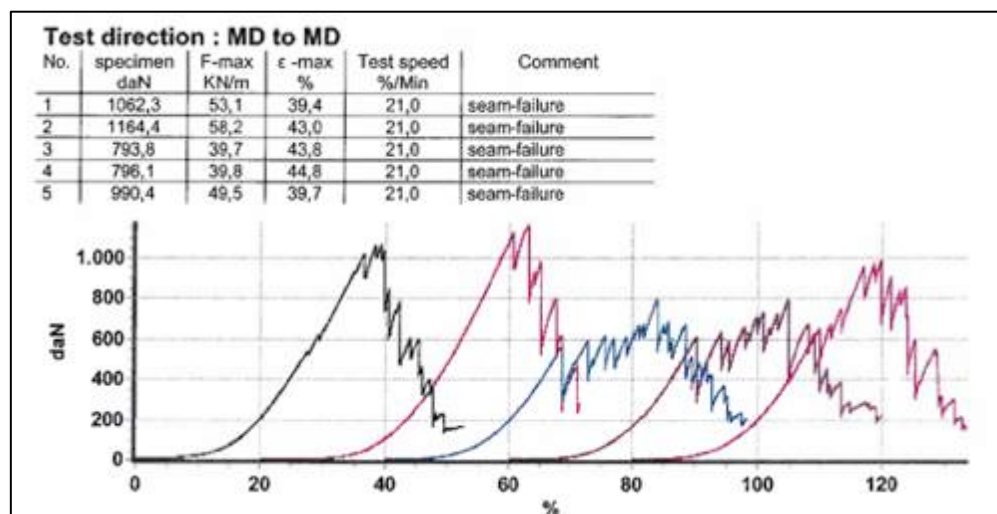
La couleur extérieure du matériau extérieur est proche de celle de la couleur naturelle du sable du site (Cf. étude d'intégration paysagère INEX Atelier).

4.3.2 Les coutures :

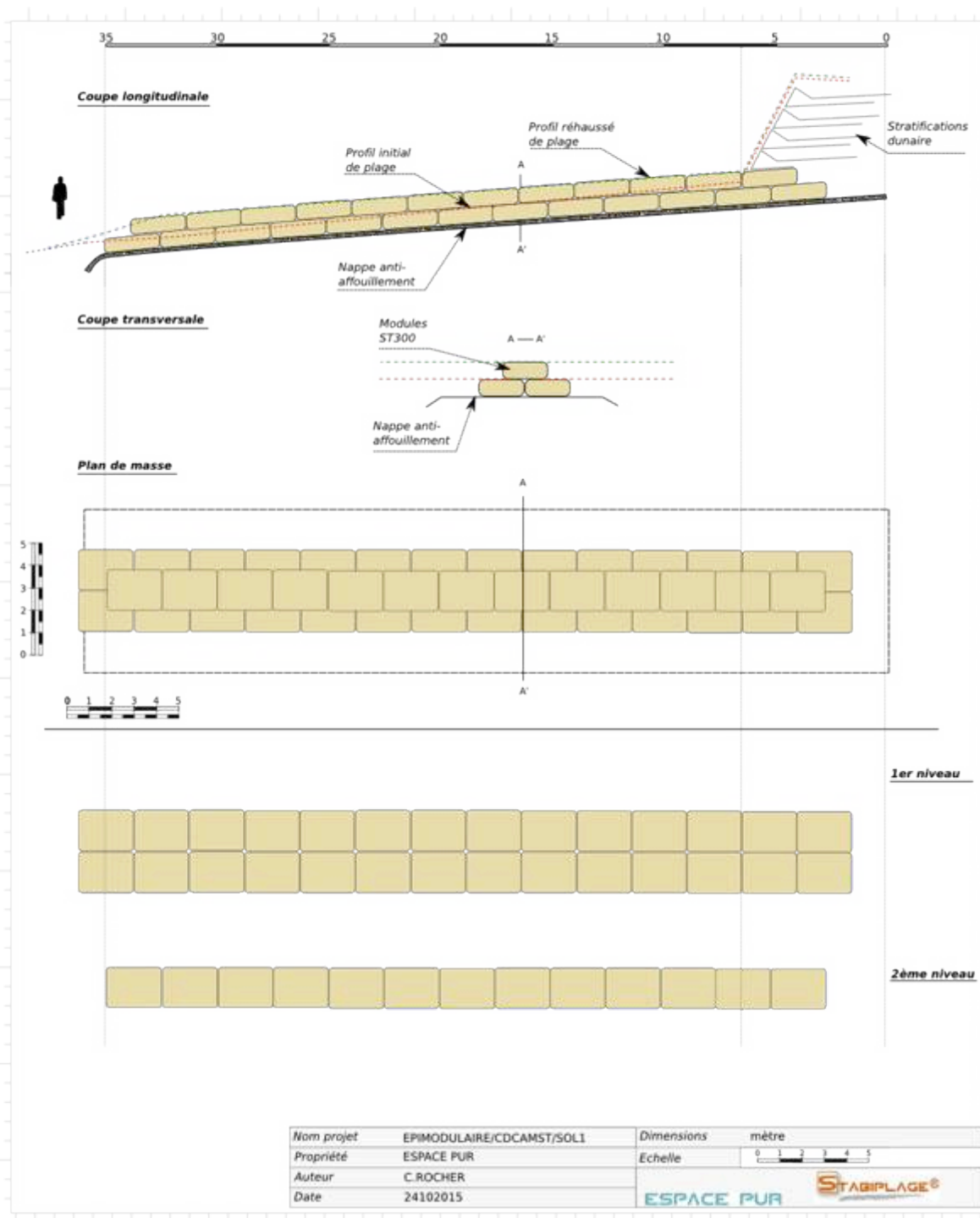
Les coutures utilisées pour la conception des modules sont éprouvées depuis plus 10 ans pour des ouvrages en géocomposite de type STABIPLAGE®, dans le traitement de l'érosion marine. Elles résistent aux caractéristiques suivantes :

- U.V
- abrasion du sable
- pressions exercées en phase d'injection, de levage et de fonctionnement sur site.

Exemple d'un de nos résultats de test de résistance de couture :
 Norme DIN EN ISO 9862, sous conditions ISO 554 20°C/65%.



4.3.3 Schémas et plans



4.4 Recommandations complémentaires

La solidarisation des modules de tête d'ouvrage, sur environ 10 mètres est recommandée (voir étude de stabilité)

De manière à alimenter la réflexion sur les trois ouvrages nécessaires de type épi, il est possible, en fonction des résultats de captage sédimentaire du premier épi, de réaliser des ouvrages STABIPLAGE®, sans impacter le site lors de la phase de travaux. De plus, ce type d'ouvrage comprend une réversibilité améliorée par rapport aux ouvrages d'ingénierie lourde, et leur mise en œuvre est simple et légère.

Rechargement de la plage en sable

Extrait de la note du 25.03.2016 de F. Levoy

« Compte-tenu des sables disponibles pour un véritable rechargement, il sera judicieux de l'envisager en complément de la pose de l'épi en géobags »

En effet, les entrants sédimentaires restent relativement faibles. De manière à optimiser la stabilisation des sédiments par l'épi, un rechargement de plage peut être envisagé.

A noter que cette opération demande une nouvelle étude pour déterminer la zone ressource. Le banc de sable de Genêts a diminué d'au moins 10 000 tonnes, en raison des deux confortements dunaires. Il s'agit d'analyser les possibilités d'extraction sur ce site, sans déséquilibrer les échanges sédimentaires existants sur le site. L'étude pourra déterminer aussi d'autres sites d'extraction potentiels.

Mise en œuvre de ganivelles pour :

- conforter la dune par captage du sable éolien
- canaliser le passage des usagers

Extrait de la note du 25.03.2016 de F. Levoy

« Il convient de retarder la pose de ganivelles et d'envisager cette mise en place à la fin du chantier, après la pose de l'épi expérimental. »

Confortement en sable du trait de côte

Des confortements du cordon dunaire par apports de sable, au niveau de la zone des brèches potentielles, pourraient être envisagés de manière à protéger le trait de côte, le temps de l'analyse des résultats du premier épi expérimental. En effet, la zone de brèches sera vulnérable, tant que, d'une part les résultats de stabilisation sédimentaire du premier épi ne seront pas connus, et d'autre part, que les trois épis (la solution globale) soit mise en œuvre.

4.5 Synthèse

La solution à mettre en œuvre est une structure comprenant des modules ST300 de 5 tonnes.

L'étude de stabilité hydraulique a permis de choisir cette option face à celle des ST200.

Cette structure comprend les avantages suivants :

- Stabilité améliorée :
 - les ST300 sont 3 à 4 fois plus lourds que les ST200
 - ils peuvent être solidarisés les uns aux autres, notamment les modules de tête d'ouvrage (décision attendue de l'assistant du Maître d'ouvrage)
- La réversibilité est conservée. Les modules ST300 peuvent être déplacés avec un système de levage adapté.
- Les dimensions de l'ouvrage peuvent être facilement modifiées en longueur, largeur et hauteur, de manière à répondre efficacement à une évolution suite aux résultats de captage sédimentaire

La longueur de l'ouvrage de 35 mètres linéaires est conservée, de manière à ne pas avoir d'emprise au sol de la structure au niveau de la cassure de profil entre la haute et la moyenne plage.

La hauteur de l'ouvrage demandée à 0,70 mètres au dessus du niveau moyen de plage est conservée.

Seule la largeur de l'ouvrage est modifiée, passant de 3 à 4 mètres.

Toutefois si la solution ST200 était maintenue, la faisabilité technique est validée. La stabilité des modules devra être améliorée par un système de solidarisation (Cf. annexe 13 : schémas et plans de la solution ST200).

5 Comportement et incidences attendus

Ce paragraphe a été écrit en considérant que c'était la solution ST300 qui était retenue.

5.1 Incidence sur les fonds marins

L'ouvrage est implanté sur le Domaine Public Maritime, sur l'espace intertidal, à partir du haut de plage. Il a pour objectif de revaloriser la plage. Les fonds marins ne sont par conséquent pas impactés.

5.2 Incidence sur la courantologie et la dynamique sédimentaire

L'ouvrage aura une incidence sur la courantologie du secteur qui se limitera à l'espace intertidal, dans la zone d'implantation. En aucun cas, l'ouvrage ne perturbera la courantologie générale liée à la cellule sédimentaire. Seul un effet micro-localisé au niveau du courant généré principalement dans le jet de rive et la zone de surf de déferlement des houles sera généré. C'est l'objectif recherché de ce type d'ouvrage: diminuer l'énergie des houles à ces niveaux pour favoriser le dépôt du sable.

Comportement et impacts sur l'hydrodynamique :

La structure modulaire STABIPLAGE® est un ouvrage composé de modules en géosynthétique dont les surfaces ne sont pas planes. La pression exercée par la houle ou les courants est rabattue vers le minimum puisque les lignes de forces appliquées ne sont plus réfléchies par une surface dure et réfléchive (cas des enrochements par exemple) mais absorbées et déformées, en partie grâce à la perméabilité des matériaux, mais aussi et surtout grâce à la forme de l'ouvrage, hydrodynamique.

Comportement des ouvrages perpendiculaires dans le processus de captage sédimentaire:

La structure projetée et objet de cette étude utilise les propriétés hydro-sédimentaires depuis longtemps mises en évidence en matière de captage sédimentaire : implanter une structure maritime perpendiculairement au trait de côte - donc perpendiculairement à la circulation des sédiments - entraîne une diminution de la capacité de transport de ces derniers. A la rencontre de l'ouvrage, les courants perdent de leur énergie et libèrent les sédiments qu'ils n'ont plus la force de transporter.

Le captage sédimentaire commence en tête d'ouvrage, puis, les sédiments commencent à s'accumuler progressivement le long de l'ouvrage. La structure provoque une sédimentation prématurée des particules sédimentaires en transit, ce qui est l'objectif recherché. Par le jeu combiné des houles et légèrement des marées, le volume du stock sédimentaire augmente. Le profil de plage s'engraisse ainsi naturellement en sédiments et retrouve une pente plus apte à absorber l'énergie des houles.



Figure 7 : captage sédimentaire sur une structure STABIPLAGE®

D'une manière générale ce type de structure, encore appelé « épi », peut entraîner un blocage de la circulation des sédiments le long de la côte et donc une sous alimentation des zones aval-transit (sous le courant) responsable d'une érosion. Le déplacement de la zone érodée vers les zones aval-transit est un phénomène gênant et peu désirable.

Cette érosion aval-transit est, très souvent, due au dimensionnement des ouvrages, à leurs positionnements et à leurs matériaux.

La technique modulaire STABIPLAGE®, mise en œuvre de manière globale, permet de diminuer cet impact négatif.

Sur le littoral de Saint Jean Le Thomas, l'étude de F. Levoy préconise une structure avec une hauteur relativement faible : 1,50 mètre maximum en première phase de fonctionnement. Il sera ensouillé, en moyenne de 0,75 mètre par rapport au profil moyen de plage, de manière à obtenir un profil plus fort que celui du terrain initial, « plongeant » en tête.

Par le stock de sable qu'il maintiendra et captera, il va permettre à la plage de recréer son rôle « tampon » entre la mer et la terre.

Il est à noter qu'une partie des sédiments captés pourra repartir par certaines houles plus fortes ; la structure accepte les échanges naturels. Néanmoins, grâce à ses propriétés, un minimum de sédiment sera retenu pour assurer le maintien du trait de côte.

5.3 Incidence sur les aléas naturels

La structure est conçue de manière à capter les mouvements naturels sédimentaires, de par les caractéristiques techniques, évoquées dans ce document.

L'épi modulaire est un ouvrage pilote. Son suivi permettra d'apprécier sa tenue et incidence sur les aléas naturels.

Pour information, la technique STABIPLAGE® a déjà été éprouvée lors d'aléas météorologiques marins majeurs, tels que des typhons au Viet Nam, des cyclones aux Antilles et des tempêtes et surcotes en Bretagne. Ils ont résisté à des houles de plus de 5 mètres déferlant sur le rivage, ces types d'aléas restent exceptionnels.

- aléas sismiques :
 - les ouvrages peuvent résister à des aléas sismiques mineurs. Ils épousent le sol et diffuse l'énergie reçue dans la totalité de l'ouvrage. La perméabilité permet de diffuser l'énergie reçue à l'extérieur de l'ouvrage. Ce phénomène ne peut se retrouver sur les ouvrages d'ingénierie lourde qui rentre en résonnance lors de fortes secousses sismique. Des risques de fissures, de déchaussement et de glissement peuvent dans ce cas intervenir.
 - Concernant l'aléa « tsunami ». Les STABIPLAGE® et modules n'ont jamais été testés face à une onde de choc de ce type. Ce type d'aléa reste exceptionnel.

5.4 Incidence sur le patrimoine naturel

En phase de fonctionnement, la perméabilité des matériaux de la structure mise en œuvre autorise le drainage nécessaire à la vie d'un sol et éventuellement au développement de la végétation. La structure autorise également le dépôt de la laisse de mer et préserve l'écosystème qui y est lié.

La restauration du profil de plage peut permettre la restauration ou le développement d'habitats et biotopes particuliers à certaines espèces.

L'ouvrage respecte significativement les habitats naturels, l'arrêt des phénomènes érosifs devant même avoir des effets positifs sur la préservation et la stabilité du milieu.

5.5 Incidence sur l'activité humaine

L'ouvrage présente une capacité d'intégration optimisée par rapport aux autres techniques. La dimension des ouvrages et la surface d'occupation au sol, peu importante, permettent de limiter l'impact visuel. L'intégration paysagère de l'aménagement est favorisée. La couleur extérieure de l'ouvrage limite son impact visuel. La couleur choisie se rapproche de la couleur naturelle du sable (Cf. étude d'intégration paysagère INEX Atelier, octobre 2015).

Concernant les incidences sur l'activité humaine sur la plage, l'ouvrage ne perturbera pas les usages et activités anthropiques en place. Un dénivelé peut être présent lors des phases de captage entre l'amont et l'aval transit de l'ouvrage. Ce dernier ne présente pas de surfaces anguleuses pouvant blesser les usagers. La circulation des usagers sur la plage ne sera pas impactée.

5.6 Incidences dues à la phase des travaux

La mise en œuvre de la technique modulaire STABIPLAGE® ne nécessite pas de moyens techniques lourds, ce qui présente l'avantage de minimiser les impacts et de ne pas fragiliser durablement l'écosystème.

Depuis le début du projet, nous nous efforçons d'écourter au minimum le nombre de jour de présence lors de la phase de pose. De 10 jours préalablement prévus, la durée de pose est aujourd'hui réduite à 5 jours, comprenant l'amenée et le repli du matériel nécessaire.

L'accès à la zone de travaux par les engins nécessaires (pelle mécanique, tracteur) sera balisé.

Lors de la phase du terrassement, la dune sera écrêtée de manière à insérer l'épi en arrière du trait de côte. Une attention toute particulière sera portée à cette opération. Les végétaux (couche supérieure) seront conditionnés et remis à leur place initiale. Le temps du stockage (mise en place des modules), ils seront stockés sur un géotextile, de manière à limiter un mélange sédimentaire.

Espace Pur a déjà l'expérience de cette procédure : nous l'avons réalisé pour la mise en sécurité du câble de télécommunication d'Orange sur la dune de la Torche, Commune de Plomeur, Terrain du Conservatoire du Littoral.

Les nuisances sonores dues aux engins mécaniques auront lieu en journée. Ces engins répondent à la réglementation relative aux nuisances sonores.

5.7 Incidences sur la qualité de l'eau

Les ouvrages ne peuvent pas dégrader la qualité de l'eau. Leur perméabilité et leur positionnement ne perturbent pas les échanges et le renouvellement de la masse d'eau. Le risque d'eutrophisation est donc écarté.

6 Démarche opérationnelle

6.1 Phases de réalisation

6.1.1 Phases de réalisation de l'épi expérimental, réversible et modulaire

La phase 1 correspond à la première étape de conception de la structure (exécutée courant 2016). Elle permet de tester le fonctionnement de l'épi expérimental.

La seconde phase, adaptée en fonction des résultats de captage sédimentaire de la première phase, interviendra au minimum après une année de fonctionnement.

6.2 Planning de la première phase de réalisation de l'épi expérimental

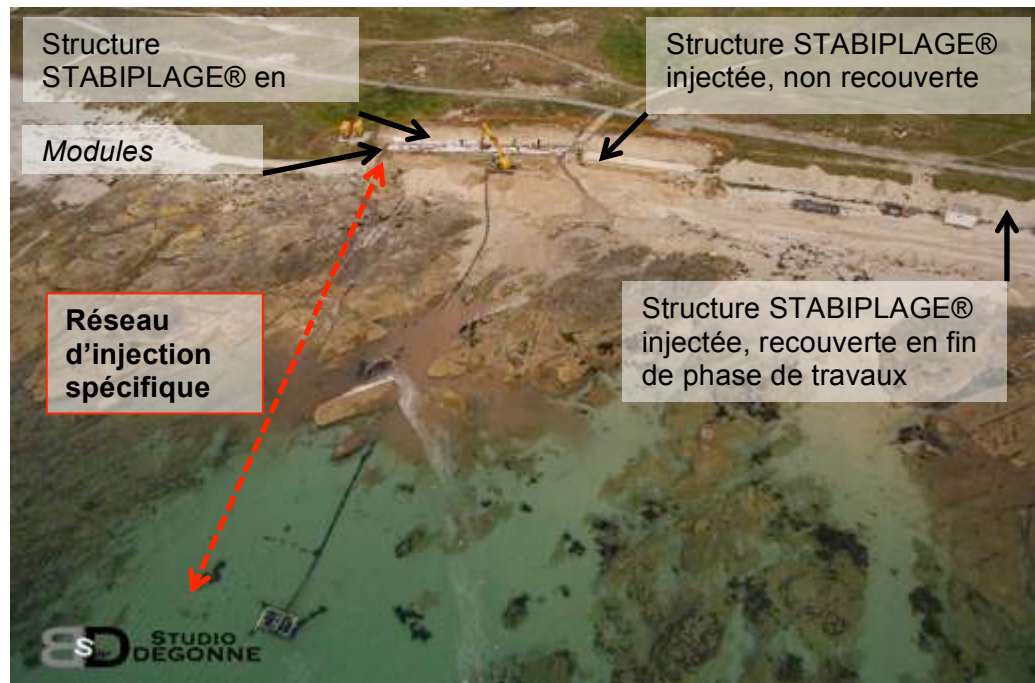
ETAPES	TEMPS REQUIS	ETAT	ACTEUR
Bon de commande phase 1/1 ^{er} épi expérimental		confirmé	CC AMSTM
Facture phase 1/1 ^{er} épi expérimental		Acquittée	CC AMSTM
ETUDES			
Relevés topographiques initiaux	1 jour	Réalisés	In Vivo Environnement/ Espace Pur
Etude d'intégration paysagère	1 mois	Réalisée	INEX Atelier
Etude d'exécution (dimensionnement et conception finale de la structure de l'épi)	3 à 4 semaines	Ce document à valider par Assistant à Maître d'ouvrage	Espace Pur / CC AMSTM
CONCEPTION DES MODULES			
Approvisionnement et fabrication	5 semaines	A réaliser après validation étude exécution	Espace Pur
Remplissage des modules en géocomposite hors du site d'implantation	2 à 3 semaines	A réaliser	Espace Pur
POSE DE L'EPI EXPERIMENTAL			
Relevés topographiques initiaux	1 jour	A valider	Espace Pur / Autre
Contrôle présence/absence de gravelots à collier interrompu	1 jour	lors de l'aménagé	Autorités compétentes
Autorisations requises pour la pose		Obtenues (à valider)	Autorités compétentes
Transport des modules en géocomposite sur site	1 à 2 jours	A réaliser	Espace Pur
Réalisation de l'épi expérimental, modulaire et réversible, en modules	3 jours	A réaliser	Espace Pur

6.3 Protocole des travaux

6.3.1.1 Remplissage des modules

- Les modules seront remplis à l'extérieur du site d'implantation.
- Ils seront remplis par nos soins, avec un de nos réseaux d'injection spécifique:
 - fiabilité d'injection
 - injection à 100 % des modules
 - puissances et pressions correspondantes à une injection optimale de structures en géocomposites, type STABIPLAGE®, et modules en géocomposites

Cette technique d'injection a été éprouvée, élaborée et améliorée depuis plus de 10 ans pour le remplissage des structures STABIPLAGE®. Notre technique permet d'obtenir des résultats de remplissage optimaux au sein des structures injectés.



Exemple de travaux de pose de structures STABIPLAGE®. Commune du Guilvinec, Finistère, France.

- les sédiments injectés proviennent de carrières situées en Normandie, dans le département de la Manche. Les caractéristiques du sable injecté dans les modules seront proches de celles du site de pose, à savoir :
 - la granulométrie :
Il est nécessaire d'obtenir une granulométrie la plus proche de celle du site, afin d'obtenir les mêmes caractéristiques hydrauliques du sable que celui présent sur le site. Ce point est important pour optimiser le fonctionnement de l'ouvrage.

- la couleur
Une attention particulière est mise sur la couleur du sable. Dans l'hypothèse extrême de dégradation d'un module et d'une fuite sédimentaire, le sable apporté pourra se confondre avec celui du site. L'intégration paysagère sera améliorée.

En annexe 12 se trouve une fiche de présentation d'un des sables sélectionnés par nos soins.

6.3.1.2 Transport et levage des modules

- Les modules sont transportés sur route par plateau, et semi remorque du site de remplissage au parking de Pignochet, situé sur la commune de Saint Jean Le Thomas
- Du parking de Pignochet jusqu'au site d'implantation soit une distance d'environ 600 mètres, des engins spécifiques sont utilisés pour acheminer les modules, en raison de la nature du substrat de la plage (présence d'argiles fossiles) :
 - un plateau tracté par un tracteur agricole permettant le passage difficile sur des zones argileuses.

La circulation est envisagée sur le bas de la partie de la haute plage, comme lors des interventions de confortement dunaire

- Le système de levage est conçu de manière à ne pas déformer la structure des modules
 - Nous avons conçu un système de levage adapté au levage répété des modules, aussi bien pour leur mise en place, que pour un repositionnement potentiel lors de la phase de fonctionnement de l'épi modulaire. Les ST300, de 6 tonnes, apporte des contraintes techniques de levage auxquelles nous savons répondre avec ce système spécifique.

6.3.1.3 Pose des modules sur site

- Prise de contrôle
 - Détermination in-situ des extrémités de l'ouvrage,
 - par coordonnées GPS
 - calage en fonction des observations d'une évolution potentielle du trait de côte
 - Contrôle du profil de plage et de l'épaisseur de sable par sondage mécanique.

- Terrassement du site

- Première opération : écrêtement dunaire

De manière à obtenir un fonctionnement optimal de l'ouvrage d'épi expérimental, il est nécessaire d'insérer l'extrémité haute de l'ouvrage 4,00 mètres en arrière du trait de côte. En effet, le captage sédimentaire de l'épi doit être optimal et homogène sur toute la longueur de l'ouvrage. Un positionnement de l'extrémité haute directement sur la haute plage, sans pénétration dunaire, apporterait une fuite sédimentaire, et un non fonctionnement de l'épi.

Pour la réalisation de ce terrassement délicat, nous proposons un protocole de terrassement minutieux et rigoureux, à savoir :

- écrêtage de la végétation dunaire, sur 50 cm à 80 cm d'épaisseur, pour une surface maximum de 25 m², de manière à englober le maximum du système racinaire de la pelouse dunaire.
- la pelouse dunaire extraite sera entreposée sur une nappe géotextile de protection, et placée en attente de la phase finale de terrassement de fin de travaux
- le décaissement de la dune sera ensuite effectué, de manière à retrouver la profondeur de profil souhaité pour l'implantation de la structure.

Cette opération sera réalisée par le haut de plage. Aucun engin ne roulera sur la pelouse dunaire avoisinante.

- Seconde opération : terrassement de l'ensemble du profil

Décaissement de l'épaisseur de sable souhaitée, jusqu'à la surface de la couche d'argile fossile sous-jacente.

Les résultats des sondages montrent, à 5 mètres du trait de côte, sur le haut de la haute plage, une épaisseur d'environ 40 cm de sable. En dessous, les argiles (tange) et la matière organique (tourbe) fossilisées sont présentes.

L'épaisseur de sable diminue dans le profil, jusqu'à disparaître au niveau de la cassure du profil entre la haute et la moyenne plage.

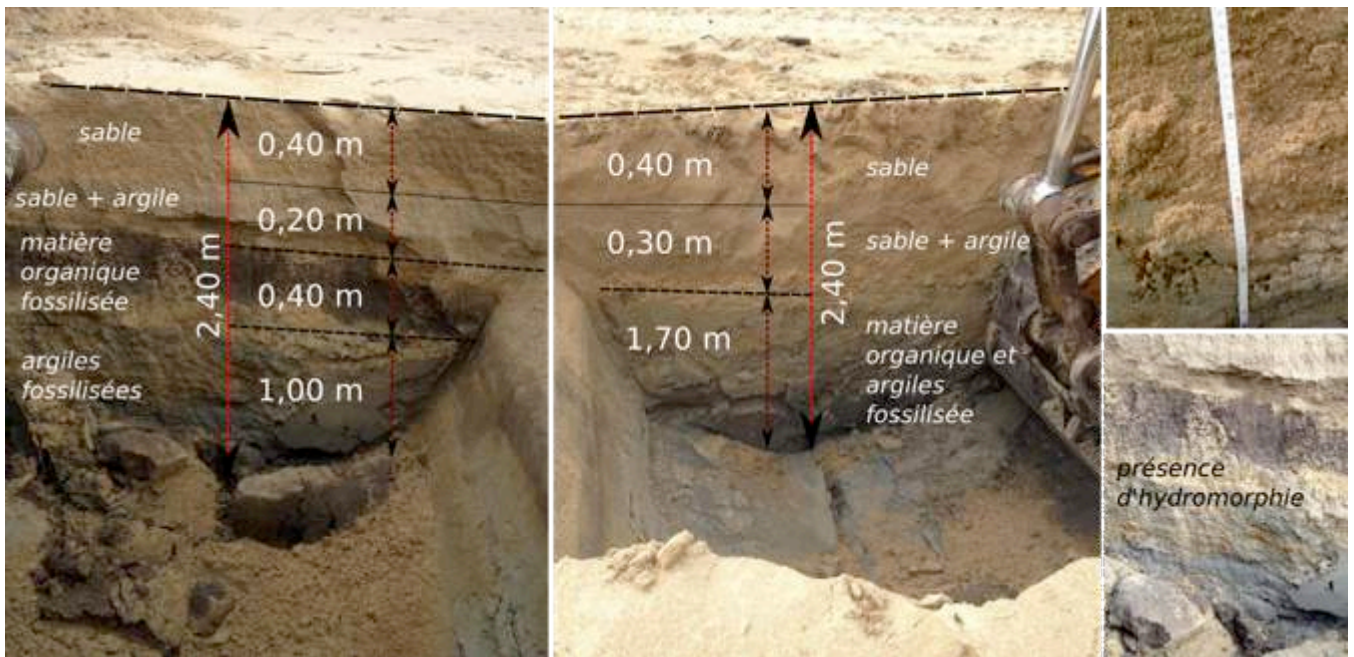


Figure 8 : sondage mécanique haut de plage

- pose des modules en géocomposite

Les modules seront acheminés au fur et à mesure sur le site d'implantation. La nappe anti-affouillement sera positionnée au préalable de la pose des modules. Les modules seront ensuite positionnés à partir de l'extrémité haute du haut de plage jusqu'à la tête de l'ouvrage.

- Reconstitution dunaire

Cette opération pourra être effectuée dans les temps d'attente d'acheminement des modules du corps et de la tête d'ouvrage. Il s'agit dans un premier temps de repositionner les sédiments extraits de la dune. Un compactage sera réalisé. Dans un second temps, la végétation dunaire sera repositionnée, de manière à retrouver l'état initial du site.

7 Aspects réglementaires et autorisations

Ce dossier est un projet pilote et compte tenu de l'historique, la Communauté de communes d'Avranches a, sous réserve de vérification auprès des services de l'Etat, obtenu les autorisations nécessaires à la pose de l'ouvrage.

Néanmoins, pour information, l'ouvrage est soumis à l'article R122-2 du code de l'environnement.

Etant donné son emprise au sol (140m²) et le montant des travaux (67k€) , les autorisations qui pourraient être nécessaires sont :

- une AOT
- une étude d'impact au cas par cas
- une déclaration Loi sur l'eau

Concernant la nécessité d'une étude d'impact (décision au cas par cas), le chapitre précédent a été volontairement développé (bien que non demandé dans une étude d'exécution) de manière à présenter les impacts de la structure. De plus, compte tenu du caractère expérimental du projet qui, justement, doit servir à évaluer les impacts, nous considérons que cette étude est sans objet.

Rappelons également l'aspect réversible des ouvrages.

8 Conclusion

Cet ouvrage innovant est vraiment très judicieux pour la baie du Mont Saint Michel compte tenu de sa réversibilité, de son intégration paysagère, du délai d'intervention terrain très restreint. Nous tenions à remercier, ici, le Professeur Franck Levoy pour cette initiative. Dès validation de la solution technique précisée dans cette étude, le lancement de la production sera effectué.

9 Contacts pour cette étude

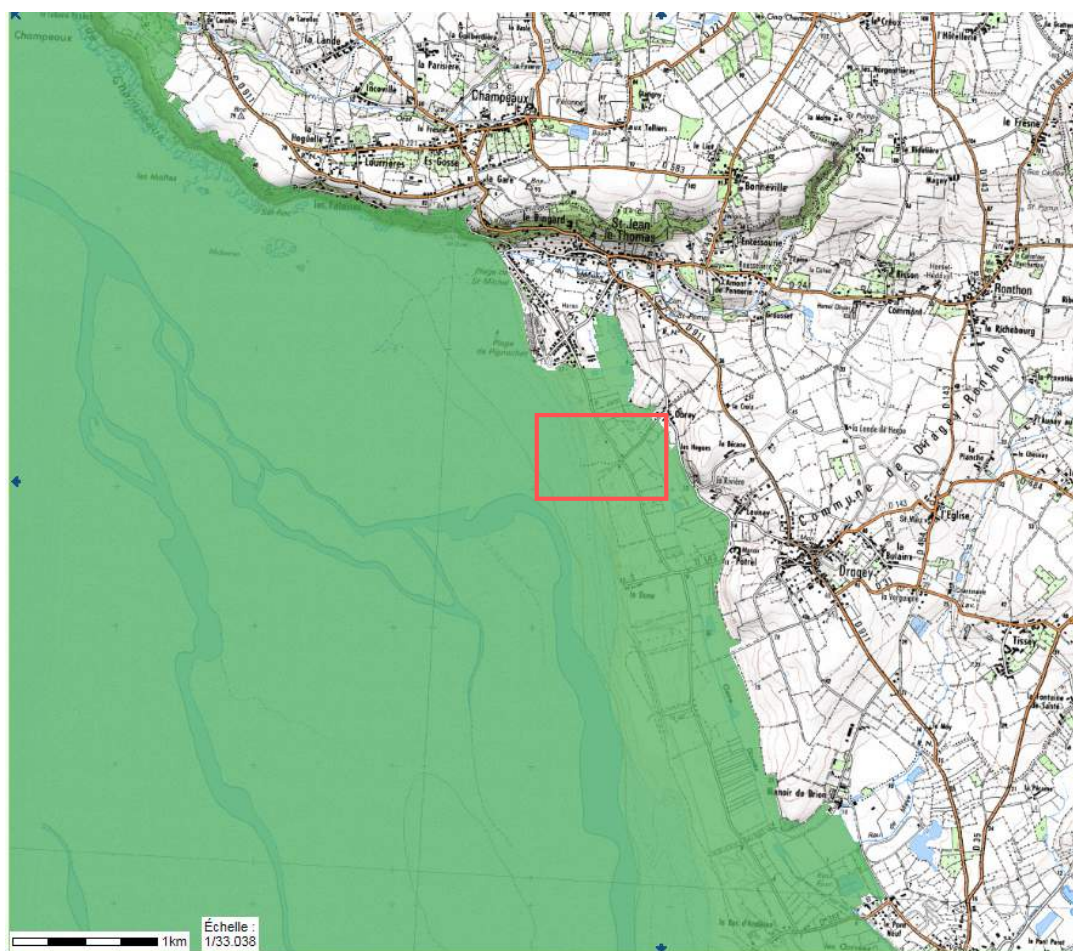
ESPACE PUR – STABIPLAGE®
Cédric ROCHER
Responsable Projets & Production
cedric.rocher@stabiplate.com
Mobile. 07 62 94 12 19
Fixe : 02 98 87 08 53

Béatrice CORNIC
Gérante d'Espace Pur
beatrice.cornic@stabiplate.com
02 98 87 08 53

ANNEXES :

- **Annexe 1 : Inventaires patrimoniaux _ ZNIEFF type 1. Source INEX Atelier**
- **Annexe 2 : Inventaires patrimoniaux _ ZNIEFF type 2, source INEX Atelier**
- **Annexe 3 : Gestion contractuelle _ Natura 2000**
- **Annexe 4 : Zone Humide - Ramsar**
- **Annexe 5 : Gestion foncière : Conservatoire du littoral et des rivages lacustres**
- **Annexe 6 : protection nationale : site classé, source INEX Atelier**
- **Annexe 7 : Présentation de la gamme modulaire ST**
- **Annexe 8 : Bon de commande**
- **Annexe 9 : fiche technique modules ST200**
- **Annexe 10 : Conditions océano-météorologiques**
- **Annexe 11 : Etude de stabilité hydraulique**
- **Annexe 12 : Fiche de présentation d'un des sables sélectionnés pour le remplissage des modules**
- **Annexe 13 : schémas et plans de la solution ST200**
- **Annexe 14 : Note F. Levoy du 25 mars 2016**

Annexe 1 : Inventaires patrimoniaux _ ZNIEFF type 1. Source INEX Atelier



Document issu du site: <http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr>

Annexe 2 : Inventaires patrimoniaux _ ZNIEFF type 2, source INEX Atelier

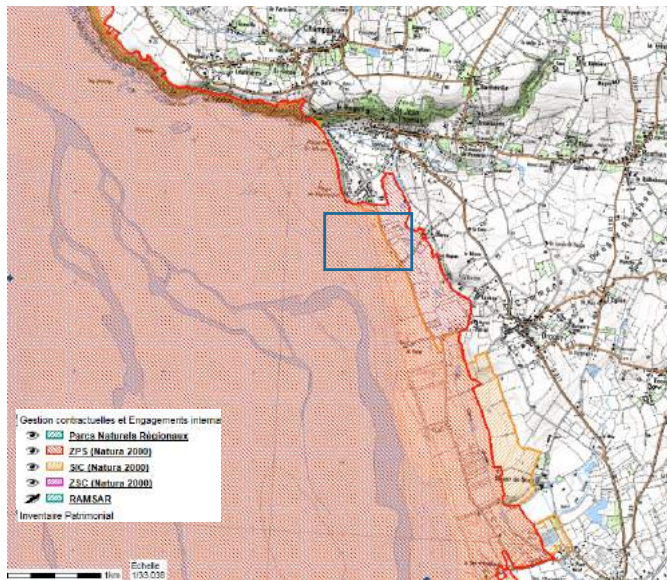


Document issu du site: <http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr>

Annexe 3 : Gestion contractuelle _ Natura 2000

Les dunes de Saint-Jean-le-Thomas appartiennent au Site d'Importance Communautaire :
Natura 2000- FR2500077 - Baie du mont Saint-Michel
Type : B (pSIC/SIC/ZSC)
Compilation : 30/11/1995
Mise à jour : 31/03/2005
superficie de 38 747 ha dont Pourcentage de superficie marine : 97 %

«Site inter-régional, la baie du Mont Saint-Michel correspond à un vaste écosystème de haute valeur paysagère découvrant, à marée basse, plusieurs dizaines de milliers d'hectares de grèves, de vasières et de bancs de sable (...) Les étendues maritimes sont associées à des secteurs terrestres (cordon dunaire, falaises granitiques, marais et bois périphériques) qui s'inscrivent dans le contexte géologique et paysager de la baie.(...)»



«Qualité et importance :

La baie du Mont Saint-Michel constitue un site d'importance internationale abritant régulièrement plus de 20.000 oiseaux d'eau. Les prés salés atlantiques, par la diversité des groupements qui les composent et la surface qu'ils occupent, constituent un ensemble phytocénotique de valeur internationale.

D'autre part, des concrétions biogéniques de Maërl, considérées comme les plus belles populations d'Europe ont été identifiées.(...)»

« La baie du Mont-Saint-Michel abrite une population résidente de phoque veau-marin (*Phoca vitulina*) tout au long de l'année, avec reproduction annuelle.

Enfin, une population de Grand dauphin est résidente dans le golfe normand-breton au sens large, dont ce SIC.(...)»

«Vulnérabilité :

- Productivité biologique de la baie tributaire de la préservation de la qualité physico-chimique des eaux.

- Maintien des habitats naturels de la directive directement lié à la non perturbation des phénomènes hydro-sédimentaires naturels.

- Fréquentation touristique importante (principaux accès à la mer, panoramas).

- Intérêt écologique des marais périphériques dépendant du maintien du niveau des eaux et des activités agricoles extensives.

- Déprise agricole au niveau de certaines parcelles marécageuses.

- Erosion éolienne du cordon dunaire situé entre Saint-Jean-le-Thomas et Dragey.(...)»

ARPLI, 1994 - Les dunes de Dragey. 1ère partie - Bilan écologique. 2ème partie - Orientations de gestion. Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres, 77 p. + 70 p. et Annexes.

DANAIS M. & LEGENDRE C., 1994 - Charte de gestion des herbues de la baie du Mont Saint-Michel ; Préfecture de la Manche, Direction Départementale de l'Équipement, DIREN Basse-Normandie, ARPEA, 70 p.

Annexe 4 : Zone Humide - Ramsar



Document issu du site: <http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr>

Annexe 5 : Gestion foncière : Conservatoire du littoral et des rivages lacustres



Document issu du site: <http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr>

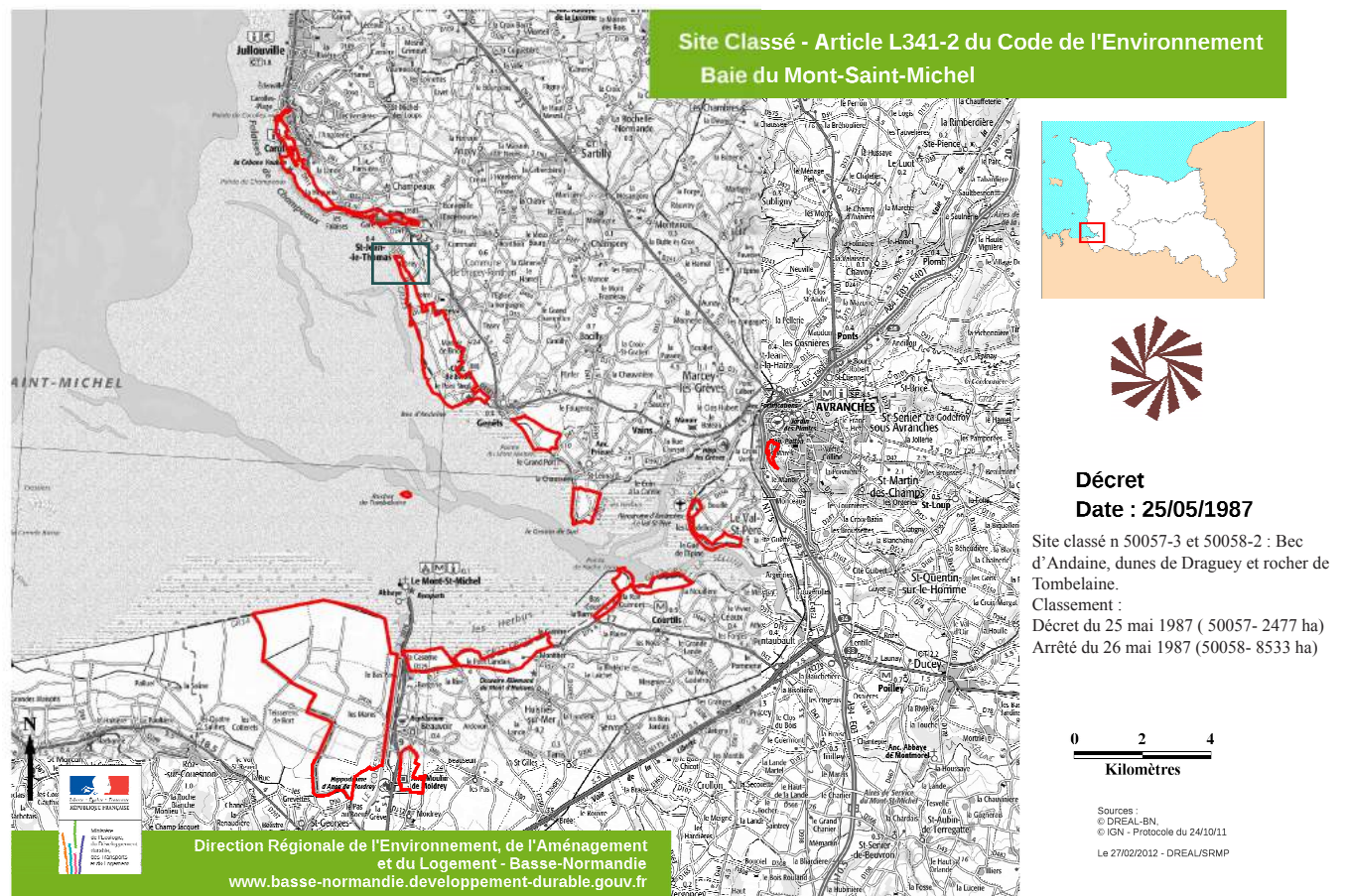
d'Andaine de Genêts.

Du fait de la déprise agricole, les dunes de Dragey et les parcelles de marais ont tendance à retourner à la friche. Des gabions s'installent, des terrains de loisirs accueillent des bungalows et des peupleraies se dressent le long des canaux de drainage.»

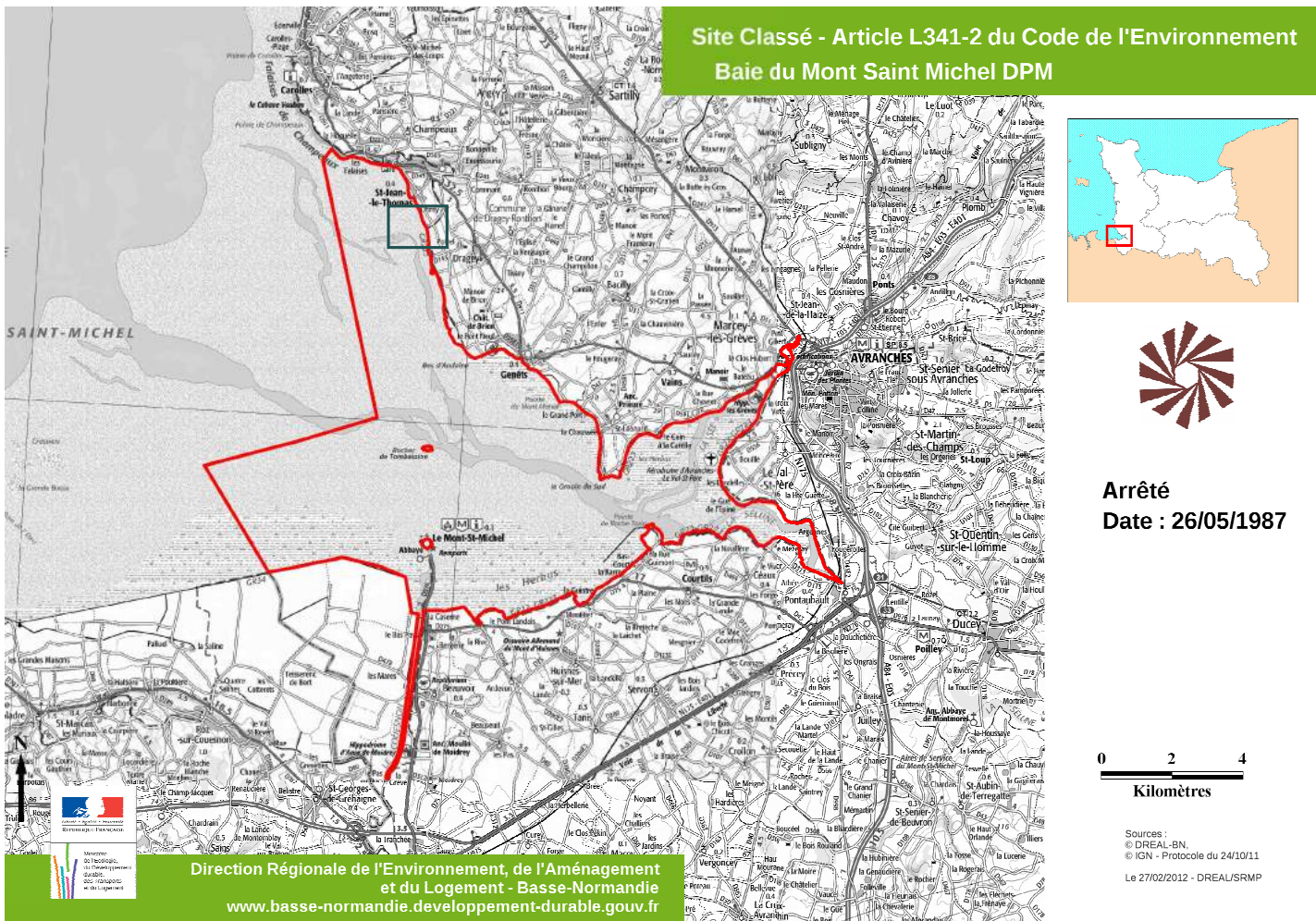


Les parcelles en bleu correspondent aux parcelles acquises par le Conservatoire. Le projet se situe en grande partie sur le domaine public maritime.

Annexe 6 : protection nationale : site classé, source INEX Atelier



Annexe 6 : Protection nationale : site classé



Modules, gamme ST

Caractéristiques et applications

Applications

Urgence Sécurisation Traitement à long terme

- Protection des infrastructures (bâti, route, câble, pipeline...)
- Confortement de cordon dunaire, berge (positionnement avant ou arrière dune)
- Application dans des zones difficiles d'accès

Avantages

- Issus de la technologie STABIPLAGE®
Plus de 15 ans d'expertise,
Expériences en France et à l'international
Savoir-faire dans la conception de structures en géocomposite (conception et fabrication française calibrée ou sur mesure)
- Résistances accrues par rapport aux sacs type "Big Bag"
- Rapidité de remplissage et de mise en oeuvre
- Structures réversibles et réutilisables
- Un accompagnement et une expertise technique à tous les niveaux (choix produit, implantation sur site)
- Une gamme complète, adaptée à tous les sites

Produits*

résistance en milieu salin
résistance à l'abrasion
résistance aux U.V.
remplissage

ST50	ST100	ST200	ST300	ST300s
●	●●	●●●	●●●●	●●●●●
●	●●	●●●	●●●●	●●●●●
○	●	●●	●●●	●●●●
M	M / Mq	M / Mq	M / Mq / H	H

Sur mesure

Nos équipes d'études et techniques conçoivent, avec vous, des solutions sur mesures et adaptées à vos enjeux

Options : sangles de manutention, oeillets de fixation, carapace de protection, ouverture et fermeture spécifique
M : Manuel ; Mq : Mécanique ; H : Hydraulique * Fiche technique sur demande. Prix : nous consulter

Caractéristiques du produit ST200

Dimensions		Résistance à la traction (L&T) : 170 kN/m	
Longueur : 200 cm	Largeur : 100 cm	Matériau : NF EN ISO 10.319	
Volume : 1 m ³	Poids du module vide : 2,32 kg	Allongement à la traction nominale (L&T) : < 12%	
	Poids en charge max : 1,4 t	Matériau : NF EN ISO 10.319	
Remplissage		Perméabilité à l'eau : 95 x10⁻³ m/s (±10x10⁻³ m.s⁻¹)	
taux de remplissage : 80 %	Fermeture couture haute résistance	Matériau : NF EN ISO 11.058	
manuel ou mécanique		Ouverture de filtration : 0,14 mm (± 0,02 mm)	
		Matériau : NF EN ISO 12.286	
Option "sangle" : non	Option "oeillets" : non	Poinçonnement statique (CBR) : 19 kN	
	Option "carapace" : non	Matériau : NF EN ISO 13.433	
		Poinçonnement dynamique : 3,8 mm	
		Matériau : NF EN ISO 13.433	

Le choix du type de module sera effectué avec nos équipes en fonction de vos besoins.

Quelques références



Mise en sécurité du cordon dunaire, ST100, Gabon - 2012
Client : compagnie pétrolière. Expérience présentée à Eurogé 2013



Mise en sécurité du cordon dunaire et atterrissage de câble, structure sur-mesure, France - 01/2014
Client : Groupe Orange

ESPACE PUR 4 route de Kerveil, 29140 Saint Yvi, FRANCE
Tél : +33 (0)2 98 87 08 53 / E-mail : contact@stabiplate.com
WWW.STABIPLAGE.COM

N°RCS Quimper B412929960 - N°TVA Intra : FR79412929960 - SIRET : 41292996000042 - APE : 7112B - SARL au capital de 53 360 €

Annexe 8 : Bon de commande

<p>BON DE COMMANDE</p> <p>Réf commande : 20150627</p> <p>Date de la commande : 20/10/2015</p>	<p>CDC AVRANCHES-MONT SAINT MICHEL</p> <p>1 Rue Général Ruel</p> <p>50300 Avranches</p> <p>Ref. Client</p>	
--	---	--

<p>Adresse de livraison</p> <p>CDC AVRANCHES-MONT SAINT MICHEL</p> <p>Contact : Le Vice-Président, Mr Jean ANDRO Tél : 02-33-89-67-00 Fax : 02-33-68-10-52 Mél : accueil@ccamsm.fr</p>	<p>Fournisseur</p> <p>ESPACE PUR</p> <p>17 ROUTE DE LOCTUDY 29120 Pont-l'Abbé</p> <p>Contact : Tél : 02-98-87-08-53 Fax : Mél : contact@stabiplate.com</p>
---	---

Objet : fourniture de modules de gamme ST pour la réalisation d'un épi expérimental

Référence devis : D300915.36 du 30/09/15

Demandeur : Mme MONTEMBAULT

Réf. fournisseur	Désignation	Quantité	P.U.	Remise		Taux TVA	Montant HT
				%	Montant		
	suivant devis joint	0,00	0.00 €	0,00	0.00 €	20,00	67 279.00 €

Observations	Total H.T.	67 279.00 €
	Total T.V.A.	13 455.80 €
	Total T.T.C.	80 734.80 €



Visa Le Vice-Président, Mr Jean ANDRO

ADG91

Page 1 sur 1

Collectivité ou établissement Budget	Exercice	Service	Réf. Commande N° engagement	Code fournisseur	Date
CDC AVRANCHES-MONT SAINT MICHEL CDC - BUDGET PRINCIPAL	2015	COMPTA1	20150627 926	ESPACE PUR	20/10/2015

ESPACE PUR



La solution à l'érosion en milieu :

- ☐ Littoral
- ☐ Fluvial
- ☐ Lacustre
- ☐ Désertique

DEVIS N°D300915.36

CLIENT

Communauté de Communes Avranches- Mont Saint Michel
1 rue Général Ruel
BP 540
50305 AVRANCHES CEDEX

Date
Lieu

30-sept-15
Pont l'Abbé

VENDEUR

ESPACE PUR
17 route de Loctudy
29120 PONT L'ABBE

DESCRIPTION	Origine	Qté	Prix Unitaire	Total HT	TVA 20%	Total TTC
Fourniture de modules de gamme ST pour la réalisation d'un épi expérimental <i>Caractéristiques modules: géocomposite, résistance 175 Kv/m, remplissage mécanique et hydraulique avec du sable pris sur place</i> <i>Modules non garantis</i>	Fr	50	305,00 €	15 250,00 €	3 050,00 €	18 300,00 €
Mise en œuvre des modules sur site <i>(inclus: sable, sous-traitance, main d'œuvre et gestion de chantier)</i> 10 jours de travaux		Forfait	51 029,00 €	51 029,00 €	10 205,80 €	61 234,80 €
Suivis annuels		2	500,00 €	1 000,00 €	200,00 €	1 200,00 €
TOTAL				67 279,00 €	13 455,80 €	80 734,80 €

Soit: quatre-vingt mille sept cent trente quatre euros et quatre vingt centimes TTC

Livraison: DDP (ICC 2010) - Saint Jean le Thomas
Délais: 2 mois approvisionnement et fabrication
12 jours transport et pose

Date de validité: 31 décembre 2015

Coordonnées bancaires

Crédit Mutuel de Bretagne
IBAN : FR76 1558 9297 5402 7031 8954 034
BIC : CMBRFR2BARK
Agence de Kerfeunteun - Plogonnec

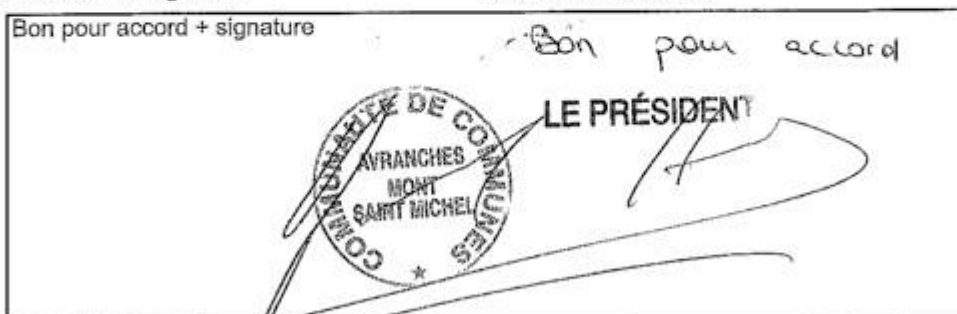
Prise en compte du devis

A réception du devis signé
ET du paiement de l'acompte

Conditions de paiement

Par chèque ou virement au nom de Espace Pur
100% à la commande

Bon pour accord + signature



ESPACE PUR 17 route de Loctudy 29120 Pont l'Abbé - FRANCE
Tél : +33 (0)2 98 87 08 53 - E-mail : contact@stabiplate.com
Site : www.stabiplate.com

N°RCS Quimper 8412929960 - N°TVA Intra : FR79412929960 - Siret : 41292996000042 - APE : 7112B - SARL au capital de 50 700 €

Annexe 9 : fiche technique modules ST200

Modules ST200

Fiche technique

ST50 ST100 **ST200** ST300 ST300s

Spécificités

- Protection modulaire de site en érosion
- Protection temporaire pour le risque de submersion
- Grande adaptabilité à tous projets, réutilisables
- Facilité de mise en oeuvre



Caractéristiques

Fonctions	PERMEABILITE	REVERSIBILITE	PROTECTION U.V.	ABRASION	REINFORCEMENT AUX CHOCS
	● ● ●	● ● ●	● ●	● ●	● ●

Caractéristiques standards* du produit ST200

Dimensions à vide			Résistance à la traction (L&T) : 170 kN/m PRV95 -10%
Longueur : 245 cm	Largeur : 145 cm		Matériaux : NF EN ISO 10 319
Poid unitaire : 2,32 kg	Type de couture : double chaînette, haute résistance		Allongement à la traction (L&T) : < 12 % PRV95 +22%
Dimensions plein			Matériaux : NF EN ISO 10 319
Longueur : 200 cm	Largeur : 100 cm	Hauteur : 50 cm	Perméabilité à l'eau : $95 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 10 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$)
Volume : 1m3	taux de remplissage : 80 %	Poids en charge max : 1,2 t	Matériaux : NF EN ISO 11 058
Option "sangle" : non	Option "oeillets" : non	Option "carapace" : non	Ouverture de filtration : 0,14 mm ($\pm 0,02 \text{ mm}$)
			Matériaux : NF EN ISO 11 058
			Poinçonnement statique (CBR) : 19 kN
			Matériaux : NF EN ISO 12236
			Poinçonnement dynamique : 3,8 mm
			Matériaux : NF EN ISO 13433

Méthode de remplissage : manuel ou mécanique

Technique de pose : pince hydraulique /sangles et élingues de portage/civière souple de portage/remplissage direct sur site

Couleur : blanc

* les dimensions, la couleur et les caractéristiques des matériaux peuvent varier en fonction du projet

options

Fermeture	Jonction inter-modules	Portage	Produits complémentaires (nous consulter)
couture (1)	Simple 1 bord	sangle intégrée	Nappe anti-affouillements
ligature simple	Simple 2 bords	harnais sangle amovible	Nappe de revégétalisation
ligature renforcée (oeillets)	Complets	civière de portage	Systèmes de drainage
			Carapace de renforcement, autre...

(1) couture : machine à coudre portable spécifique. Prestation comprise avec notre expertise sur site

Services

- Un accompagnement et une expertise technique à tous les niveaux (choix produit, implantation sur site, documents administratifs et réglementaires)

ESPACE PUR - STABIPLAGE 4 route de Kerveil, 29140 Saint Yvi - FRANCE
Tél : +33 (0)2 98 87 08 53 / E-mail : contact@stabiplate.com

WWW.STABIPLAGE.COM

N°RCS Quimper B412929960 - N°TVA Intra : FR79412929960 - SIRET : 41292996000042 - APE : 7132B - SARL au capital de 53 360 €

ANNEXE 10 : Conditions océano-météorologiques

1) Niveaux d'eau

Le niveau marin observé, à un instant donné, résulte de la combinaison de plusieurs composantes associées à différents phénomènes élémentaires. Ce niveau oscille autour du niveau moyen des mers en fonction de :

- La marée : ce phénomène est déterministe et prédictible. Il est directement lié aux mouvements des astres et à leurs variations saisonnières. Sa composante principale sur les côtes de l'Atlantique et de la Manche a une périodicité semi-diurne.
- Les surcotes/décotes d'origine météorologique : ces phénomènes sont la manifestation des effets des paramètres atmosphériques que sont la pression (effet de baromètre inverse) et les vents (accumulation d'eau par friction à la surface de l'eau) lors du passage des perturbations atmosphériques. Ils sont sensibles localement à l'orientation des vents par rapport à la côte, et plus généralement à une configuration littorale (bathymétrie, trait de côte, nature des fonds marins). Une tempête peut générer des pics de surcotes pendant quelques heures à 2 ou 3 jours.
- La surcote liée aux vagues : surcote supplémentaire (wave set-up) à la côte générée par le déferlement des vagues.
- Localement, dans certains environnements semi-fermés (baies, rades et bassins portuaires), des phénomènes oscillatoires locaux liés à la "mise en résonance" peuvent s'ajouter (phénomènes de seiches).

Les mesures marégraphiques sont parmi les principales sources d'information sur les niveaux marins à la côte. Ils permettent une estimation statistique des niveaux marins extrêmes aux points de mesure. Cependant, les marégraphes sont généralement situés dans les ports. Ils n'enregistrent donc pas l'ensemble des phénomènes côtiers qui peuvent intervenir en dehors de ces points de mesure spécifiques. En dehors des ports, les surcotes liées aux vagues peuvent être plus importantes. Aussi, les analyses menées à partir des seules mesures marégraphiques portuaires ne permettent qu'une estimation des niveaux marins extrêmes sans prise en compte de l'ensemble des effets, notamment ceux liés aux vagues.

Les niveaux d'eau ont été extraits de différentes études issues de travaux du SHOM, du CERAMA et effectués dans le cadre du PPRL :

- Références Altimétriques Maritimes, SHOM - 2015
- Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines - CERAMA - 2013
- PPRL Marais de Dol de Bretagne - Pour le DDTM Ile et Vilaine - 2012

Les niveaux de marées théoriques (données en référence altimétriques mIGN69) en baie de Mont Saint Michel sont les suivants :

Port Granville	Niveau moyen	Vive eau exceptionnelle (PHMA)		Vive eau moyenne		Morte eau moyenne	
		Pleine mer	Basse mer	PM	BM	PM	BM
CM	7,08	14,27	-0,23	12,80	1,5	9,7	4,4
m IGN69	0,46	7,65	-6,85	6,18	-5,12	3,08	-2,22

Mont-Saint-Michel	Niveau moyen	Vive eau exceptionnelle		Vive eau moyenne		Morte eau moyenne	
		Pleine mer	Basse mer	PM	BM	PM	BM
CM	7,19	14,86	–	13,20	–	–	–
m IGN69	0,45	8,12	–	6,46	–	–	–

Cancale	Niveau moyen	Vive eau exceptionnelle		Vive eau moyenne		Morte eau moyenne	
		Pleine mer	Basse mer	PM	BM	PM	BM
CM	7,20	14,52	0.09	13,05	4,55	9,90	1,65
m IGN69	0,46	7,78	–6,65	6,31	–2,19	3,16	–5,09

On note qu'au sein de la baie, les niveaux d'eau de haute mer sont d'environ 30 à 50cm supérieurs aux niveaux annoncés à Granville. Ceci est cohérent avec les prédictions de niveau d'eau fournies par le site www.previmier.org de l'IFREMER et du SHOM.

Les extrêmes de niveaux marins de pleine mer (en m IGN69) extraits pour différentes périodes de retour sont les suivants :

Port	Ref. IGN69/CM	Période de retour (années)			
		10	20	50	100
Saint Malo	–6,29	7,38	7,45	7,55	7,6
Granville	–6,62	7,85	7,90	8,00	8,10
Cancale	–6,774	7,90	7,95	8,00	8,10
Le Vivier / Mer		8,00	8,05	8,15	8,20

Pour cette étude, on considèrera en première approche les niveaux suivants (en m IGN69) :

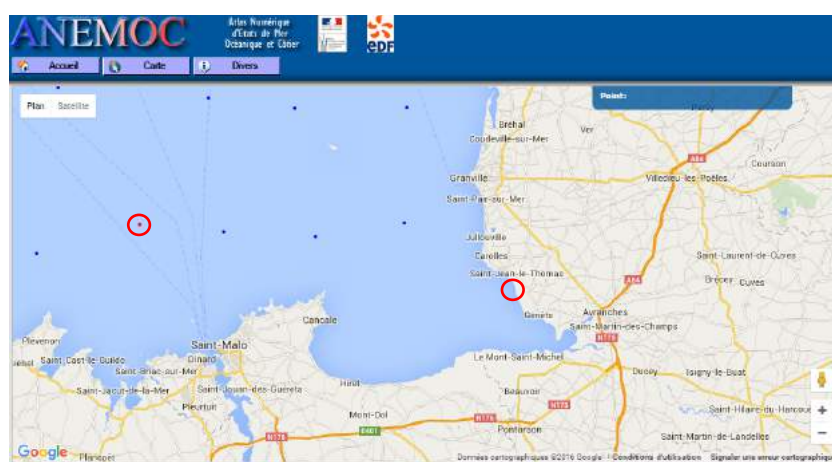
	PMVE	PMHA	Période de retour (années)			
			10	20	50	100
Site	6,5	8,1	8,00	8,05	8,15	8,20

De plus, il est nécessaire de tenir compte du setup induit par la houle venant déferler au niveau du site d'étude.

2) Houle

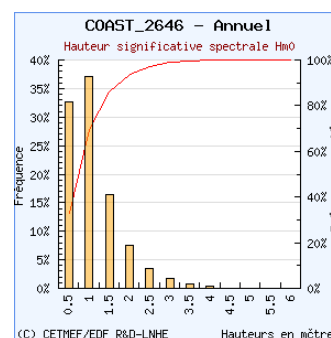
Le site d'étude est situé en fond de baie et est donc relativement bien protégé des houles du large qui, avant de l'atteindre, sont largement réfractées et atténuées par dissipation sur le fond et déferlement. Il est exposé aux houles l'atteignant par le secteur Ouest.

Afin d'évaluer le climat de houle au large du site et ses environs, les données extraites de la base de données ANEMOC du LNHE d'EDF et du CEREMA sont présentées ci-après. Les analyses sont faites au point situé au large de saint Malo, à environ 40km du site (voir figure ci-après).



Localisation du site d'étude et du point d'extraction de données ANEMOC (source LNHE-CEREMA)

Le climat de houle en ce point présente une prédominance pour les houles provenant du secteur Ouest à Nord-Nord-Ouest, avec provenance principale d'Ouest-Nord-Ouest (N300°-N315°). Il est relativement énergétique avec des houles supérieures à 1m pour 1/3 de temps.



Les tableaux des houles extrêmes évaluées par le LNHE-CETMEF à partir des données extraites en ce point sont présentés ci-dessous (pour deux approches) :

Distribution Généralisée de Pareto			
Estimation des paramètres (méthode du maximum de vraisemblance)			
Estimation du paramètre σ		0,640	
Estimation du paramètre k		0,1579	
Niveaux de retour			
Périodes de retour	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)	Estimation ponctuelle de Hm0 (en m)	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)
1 an	3,94	4,04	4,14
10 ans	4,84	5,04	5,23
30 ans	5,11	5,40	5,69
50 ans	5,20	5,55	5,89
100 ans	5.30	5.73	6.16

Loi Exponentielle			
Estimation des paramètres (méthode du maximum de vraisemblance)			
Estimation du paramètre ρ			1,81156
Niveaux de retour			
Périodes de retour	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)	Estimation ponctuelle de Hm0 (en m)	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% de Hm0 (en m)
1 an	3,91	4,01	4,11
10 ans	5,05	5,28	5,51
30 ans	5,59	5,89	6,18
50 ans	5,85	6,17	6,49
100 ans	6,19	6,55	6,92

Dans le cadre de cette étude de dimensionnement, sur la base d'une combinaison des données des tableaux ci-dessous, une première estimation du climat des intensités des houles extrêmes au large de saint Malo est donnée dans le tableau ci-dessous :

Large de Saint Malo	Période de retour (années)				
	1	10	30	50	100
Hs (m)	4	5,2	5,6	5,9	6,1
Intervalle (m)	+/- 0,1	+/- 0,3	+/- 0,6	+/- 0,6	+/- 0,8

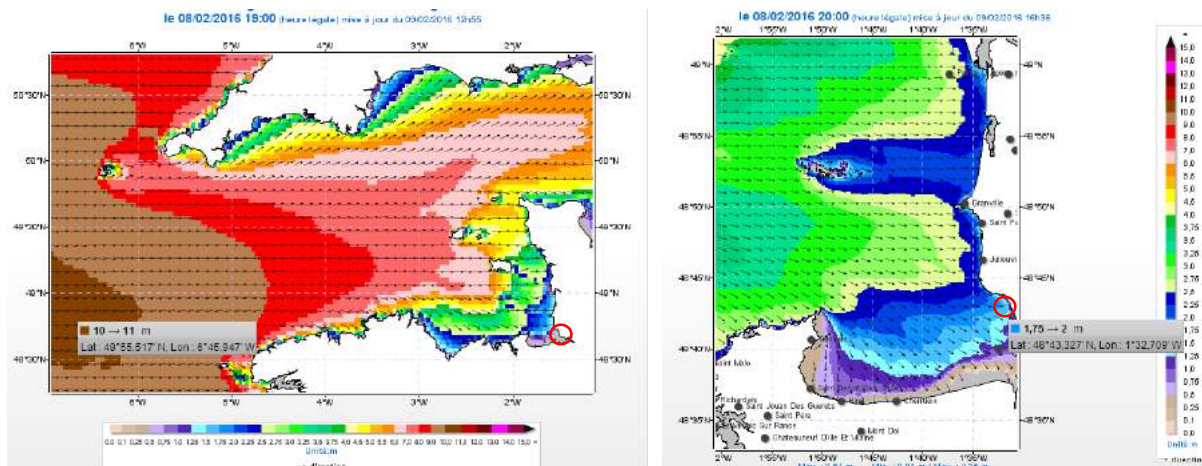
Les plans de houle présentés-ci-après sont extraits du site www.previmer.org. Le projet PREVIMER est coordonné par l'Ifremer et le SHOM.

Les plans de houles sont extraits pour les tempêtes ayant atteint les côtes françaises de la Manche les 8/02/2016 à 20h et 09/02/2016 à 19h.

Au large de Saint Malo, au point ANEMOC équivalent, les valeurs maximales de hauteurs significatives de houle atteintes sont pour ces deux tempêtes environ 4 à 4,5m, soit l'équivalent d'une houle de période de retour annuelle.

Le 8/02/2016 :

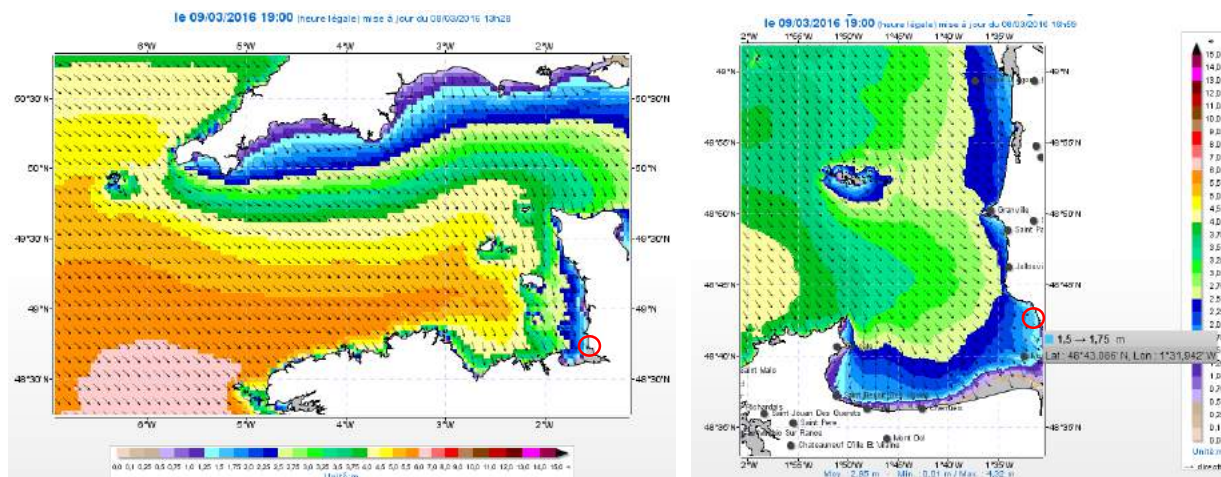
- les houles étaient principalement orientées Ouest (autour de N280°)
- Le coefficient de marée à Granville était de 96 pour une PM à 19h21 à 5,93mNGF IGN69.
- Les hauteurs significatives de houles, Hs, prédites au niveau du site d'étude sont d'environ 1,75 à 2m



Prédiction de climat de houle pour l'épisode du 08/02/2016 (Source www.previmer.org)

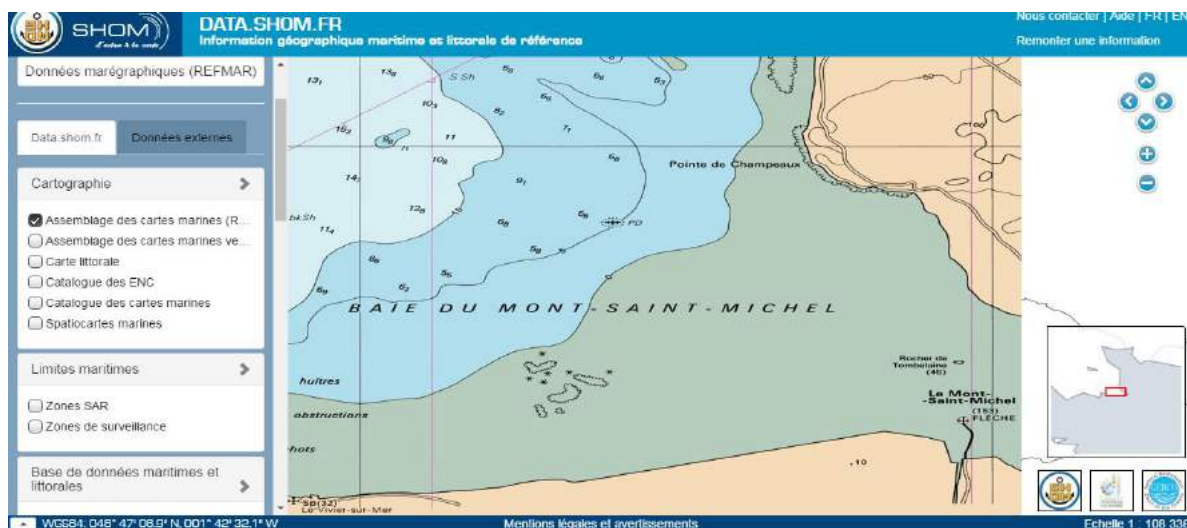
Le 9/03/2016 :

- les houles étaient principalement orientées Nord-Ouest (autour de N310°)
- Le coefficient de marée à Granville était de 112 pour une PM à 19h46 à 6,87mNGF IGN69
- Les hauteurs significatives de houles, Hs, prédites au niveau du site d'étude sont d'environ 1,5 à 1,75m.



Prédiction de climat de houle pour l'épisode du 09/03/2016 (Source www.previmer.org)

La bathymétrie en fond de baie présentant des fonds très faibles (supérieurs au 0m CM) et des pentes très douces, les hauteurs des houles atteignant le site d'étude sont limitées, entre autres, par le phénomène de déferlement. Les hauteurs de houle atteignant le site lors d'une tempête vont donc dépendre principalement des niveaux d'eau.



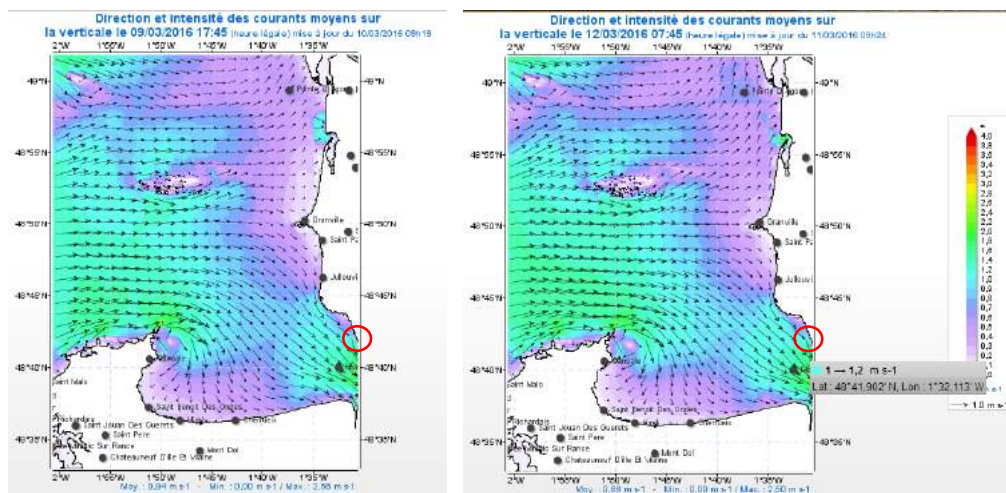
Bathymétrie aux environs de la zone d'étude (Source data.shom.fr)

D'après les informations recueillies par Espace Pur suite à la tempête du 09/03/2016, les hauteurs de houle maximales à considérer au niveau du site d'étude seraient de $H=1,2\text{m}$.

2.3 COURANTS

Les courants au niveau du site d'étude se composent des courants de marée et des courants induits par les houles incidentes.

L'analyse des prédictions de courant données par www.previmer.org pour la période du 09 au 12/03/2016 donne une estimation des courants de marée lors de grand coefficients au niveau du site d'étude (figures ci-dessous) à environ 1 à $1,2\text{m/s}$.

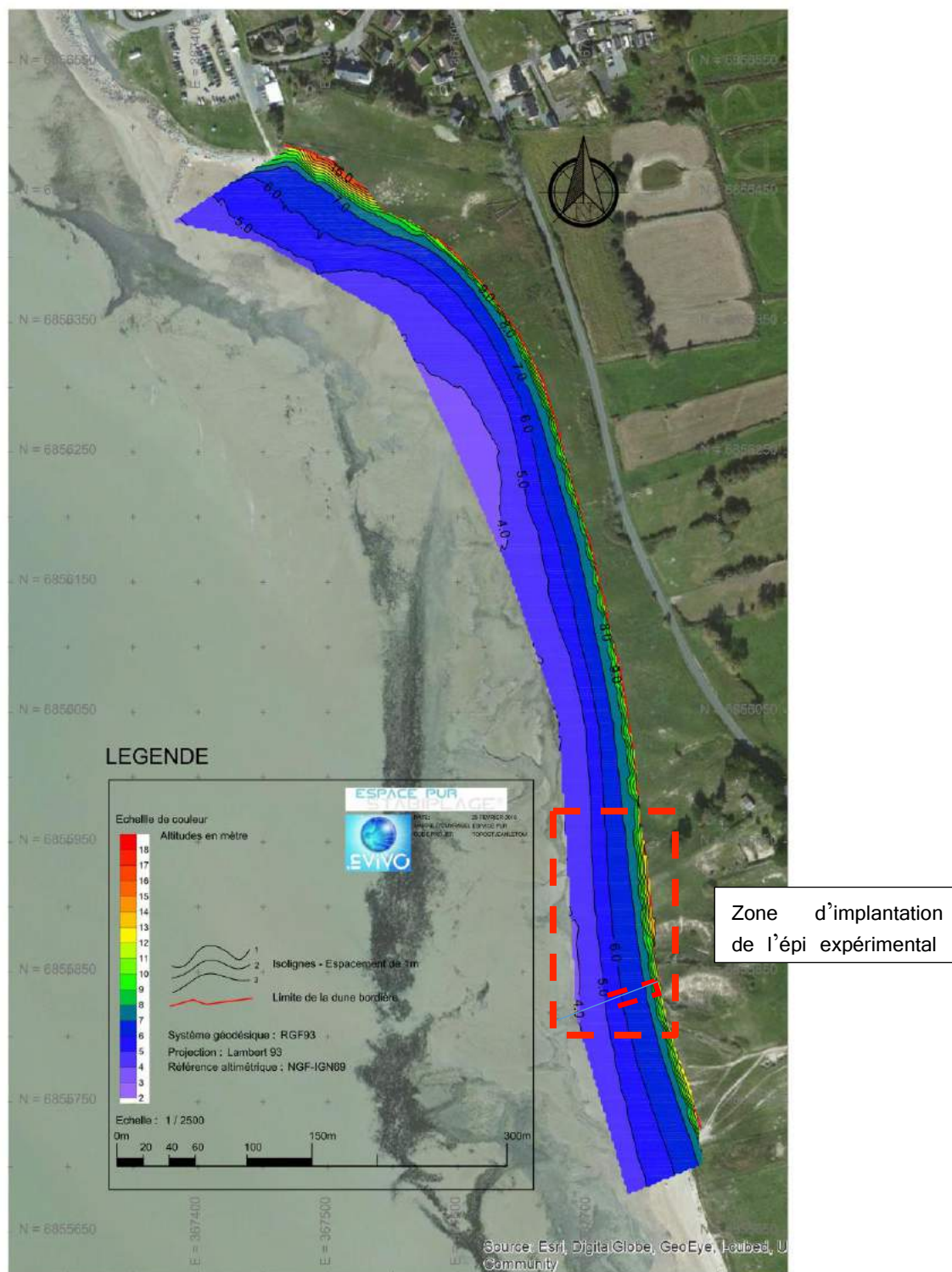


Prédiction de courants de surface pour la du 09 au 12/03/2016 (Source www.previmer.org)

De plus, il est nécessaire de tenir compte des courants induits par la houle venant déferler au niveau du site d'étude.

3) application au site d'étude

Dans le cadre des études d'implantation de cet épi expérimental, IN VIVO a réalisé pour Espace Pur un relevé topographique sur la plage de Saint-Jean-le-Thomas. Ce levé a été effectué le 24 février 2016. Le modèle numérique de terrain qui en résulte est présenté sur l'image ci-après.



MNT du levé topographique du 24/02/2016 (source IN VIVO)

Le profil de plage, extrait le long de l'implantation proposée de l'ouvrage est présentée ci-après, les coordonnées des deux extrémités de l'ouvrage étant (source Espace Pur) :

- Extrémité Est : latitude 48,717053° longitude -1,518596°
- Extrémité Ouest : latitude 48,717044° longitude -1,519023°

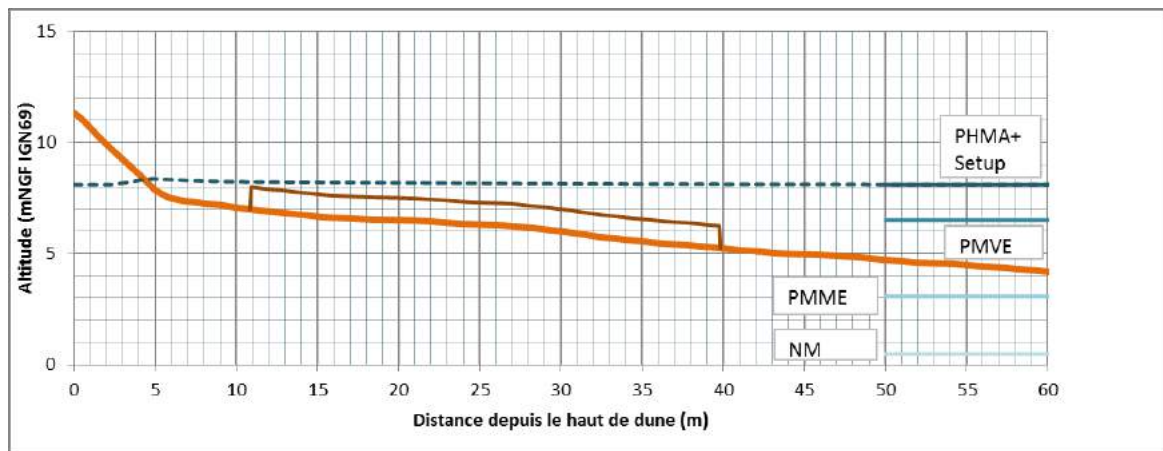
On distingue deux ruptures de pente :

- à la distance $x=5$ à 7m, correspondant à priori au pied de dune existant
- à la distance $x=35$ à 40m, correspondant à la séparation entre haute et moyenne plage

La pente du profil pour est d'environ 7% pour la moyenne plage et 8% pour la haute plage

Niveaux d'eau et Setup :

Sur la base des éléments fournis par le Coastal Engineering Manual (CEM II 4 15, figure II 4 9), on considèrera un ordre de grandeur de 20 à 30cm au niveau de la ligne d'eau pour le setup dû au déferlement de la houle, pour des plages en pente douce.



Ainsi, dans le cas d'un niveau d'eau extrême, une hauteur d'eau de 3m peut être atteinte à l'extrémité Ouest de l'ouvrage, zone à priori la plus exposée.

Hauteurs de houle

D'après les observations recueillies Espace Pur, suite à la tempête du 09/03/2016, la hauteur de houle atteignant généralement le site, par tempête, serait à environ $H=1,2m$. Outre l'incertitude liée à l'observation visuelle et son interprétation, cette hauteur peut être associée soit à la hauteur significative, soit à la houle maximale d'un état de mer. Les deux cas seront étudiés par la suite.

Cependant, à l'extrémité Ouest de l'épi, la hauteur de houle limitée par le déferlement a été étudiée en considérant différentes formulations : Miche pour une houle monochromatique et en houle aléatoire Kamphius (2000), Goda (2000) et Ruessink (2003) et ce pour un niveau d'eau exceptionnel équivalent PHMA ou +7mNGF soit l'équivalent des marées de très forts coefficients.

La théorie de distribution des hauteurs de houle en zone peu profonde de Battjes et Groenendijk (2000) a été considérée pour évaluer la hauteur H_{max} (équivalent $H_{2\%}$) associée à un H_s donné.

Les paramètres de vitesses et accélérations orbitales des particules d'eau au passage d'une vague au niveau des modules, servant aux calculs de stabilité hydraulique, ont été déterminés à partir de la théorie de « Stream function » de Dean (1965).

Le tableau ci-après présente les hauteurs de houle au déferlement données par les différentes formulations.

Hs au déferlement suivant différentes formulations	Miche (monochromatique)	Kamphius (2000)	Ruessink (2003)	Goda (2000)
PHMA (8,1mNGF)	2.6m	2.3m	1.4m	3.5m
7 mNGF	1.8m	1.6m	0.9m	2.4m

Les formulations en houle aléatoire donnent pour ce cas d’étude des résultats inhomogènes. La formule de Goda apparait surestimer les hauteurs de déferlement alors que la formule de Ruessink semble donner des résultats plus proches des observations. La formule de Kamphius semble plus conservatrice que la formule de Ruessink. De plus, dans le cas de la formule de Kamphius, les hauteurs de houle maximale (soit une vague) associée à un Hs au déferlement, d’après la loi de distribution de Battjes et Groenendijk (2000), sont similaires à celles indiquées par la formule de Miche donnant la hauteur de déferlement d’une houle monochromatique suivant la cambrure limite.

Par la suite, seront considérées pour l’étude de stabilité hydraulique, les hauteurs de houle données par les observations et les formulations de Ruessink et Kamphius, limitées par la loi de distribution de Battjes et Groenendijk.

Niveau d’eau	PHMA (8,1mNGF)			
Hs (m)	0.9	1,2	1,4	2
Hmax (m)	1.2	1,7	2,0	2,6
Umax z_module (m/s)	1.4	1.7	1.9	2.2
U à Amax z_module (m/s)	0.8	0.9	1	1.2
Amax z_module (m/s²)	1	1.2	1.4	1.6

Niveau d’eau	7 mNGF		
Hs (m)	0.9	1.2	1.4
Hmax (m)	1.2	1.6	1.8
Umax z_module (m/s²)	1.5	1.8	1.9
U à Amax z_module (m/s)	0.9	1.0	1.1
Amax z_module (m/s²)	1.1	1.3	1.4

Annexe11 : Etude de stabilité hydraulique

Remarques préliminaires ;

- les modules étant remplis de sable, la masse volumique associée aux modules par la suite sera de : $\rho_s = 1480 \text{ kg/m}^3$ (source Espace Pur)
- on s'intéresse à la stabilité hydraulique des modules situés à l'extrémité Ouest de l'épi, soit la zone, à priori, la plus exposée.

De façon traditionnelle, la formule de stabilité pour les structures en enrochements d'Hudson (1956) considère un équilibre des forces agissant sur un bloc constituant la carapace de l'ouvrage à étudier. Le poids moyen requis par bloc est obtenue par la formulation suivante :

$$W_{50} = \frac{\rho_s g H^3}{K \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cot \alpha}$$

Avec H la hauteur de houle, $\tan \alpha$ la pente de l'ouvrage, K un paramètre empirique dépendant de la rugosité, la forme et l'imbrication des blocs.

Cette formule s'applique pour la stabilité des enrochements au niveau de la surface libre (zone la plus exposées).

Cette formule s'applique donc au cas d'étude avec **un niveau d'eau à environ 6,5m NGF IGN69 (soit le niveau PMVE)**, avec une hauteur de houle associée limitée au déferlement. Selon cette formule, considérant des paramètres équivalents à des enrochements (notamment K variant de 2 à 4), on obtient :

$$W_{50} = 7 \text{ à } 15 \text{ Tonnes}$$

Outre les conditions hydrodynamiques considérées sur site, ce résultat est dû à une pente d'ouvrage considérée de 1H/1V. Une pente d'ouvrage moins raide, de 3H/2V par exemple, amènerait au résultat suivant :

$$W_{50} = 5 \text{ à } 10 \text{ Tonnes}$$

Cependant, pour des conditions de niveau d'eau plus exceptionnelles, l'extrémité Ouest de l'ouvrage est immergée et on peut appliquer, par exemple la formule de Van der Meer, d'Angremond et Gerding, relative au dimensionnement des digues immergées en enrochements et butées de pied de talus (CEM, part VI-5 table VI-5-46) :

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left(0.24 \frac{h_b}{D_{n50}} + 1.6 \right) N_{od}^{0.15}$$

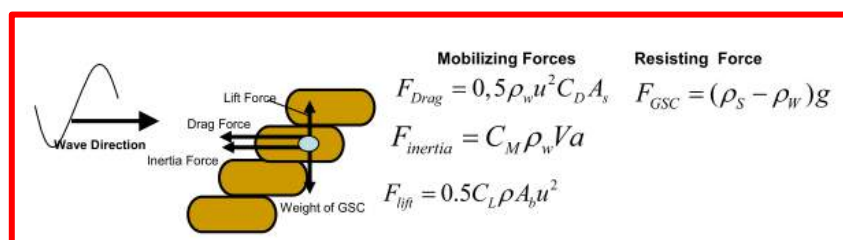
Avec Nod associé au taux de dommage : 0,5 correspondant à aucun dommage.

Suivant les conditions de houle incidente, on obtient alors :

Niveau d'eau	PHMA (8,1mNGF)			
Hs (m)	0.9	1,2	1,5	2
W ₅₀ (T)	2	5,8	12,6	33,3

Niveau d'eau	7 mNGF		
Hs (m)	0.9	1.2	1.4
W ₅₀ (T)	3	8	12,5

L'évaluation de la stabilité hydraulique des modules peut également être effectuée sur la base des travaux effectués par Recio et Oumeraci (2007 – Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers et 2009 – Process based stability formulae for coastal structures made of geotextile sand containers). Suivant ces travaux, les forces s'exerçant sur chaque module de l'ouvrage sont présentées sur le schéma ci-dessous.



Ces forces proviennent de formulation type Morrison, avec les coefficients C_m , C_d et C_l étant respectivement les coefficients d'inertie, trainée et de soulèvement.

Selon Recio et Oumeraci (2009), pour un nombre de Reynolds compris en 10^5 et 10^6 et suivant la configuration d'implantation des modules :

- $1,3 < C_d < 15$
- $0,3 < C_m < 0,6$
- $0,2 < C_l < 1,4$

La stabilité au glissement est vérifiée si :

$$\mu [F_{GSC} - F_L] \geq F_D + F_M$$

Avec μ le coefficient de frottement entre les modules. Ce coefficient est pris égal à 0,5 suivant Recio et Oumeraci (2009).

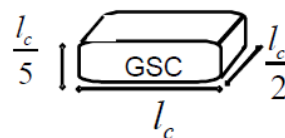
La stabilité au renversement est vérifiée si :

$$F_{GSC} \cdot r \geq (F_D + F_M) m_s + F_L \cdot r_s$$

Avec r et m les distances respectivement horizontale et verticale entre le centre de gravité d'un module et le centre de rotation.

Aucun coefficient de sécurité n'est appliqué à ce stade de calcul sur les force de trainé et de soulèvement.

A noter que la géométrie étudiée par Recio et Oumeraci (2009), notamment pour la détermination de C_d , et C_l , est la suivante, avec l_c la longueur dans le sens de propagation de la houle.



Aussi, considérant une hauteur de module de 0,5m, on aurait les dimensions de modules suivantes:

- Hauteur ; 0,5m
- Largeur : 1,25m
- Longueur : 2,5m

Soit des dimensions proches de celles envisagées actuellement pour la constitution de l'épi, prises comme suit, et équivalent à une masse d'environ 1,8T:

- Hauteur ; 0,5m
- Largeur : 1,0m
- Longueur : 2,5m

Les résultats des calculs de stabilité hydrauliques pour les différentes conditions de houle et niveaux d'eau sont les suivants:

Niveau d'eau	PHMA (8,1mNGF)			
Hs (m)	1	1,2	1,4	2
Coefficient de stabilité au glissement	0,6	0,2	0	0
Coefficient de stabilité au renversement	1,5	1	0,8	0,6

Niveau d'eau	7 mNGF		
Hs (m)	0,9	1,2	1,4
Coefficient de stabilité au glissement	0,4	0,1	0
Coefficient de stabilité au renversement	1,3	0,9	0,8

La condition de stabilité hydraulique au glissement n'est pas assurée.

La condition de stabilité hydraulique au renversement est assurée pour des houles de $H_s < 1m$

A noter que dans le cas de l'exposition des modules uniquement au courant, type courant longshore généré par la houle (jusqu'à 1m/s) et/ou de marée (jusqu'à 1m/s), le calcul de stabilité hydraulique peut être réalisé sur la base de la formulation de Morrison.

Ainsi, pour un courant de 2m/s (approche à priori conservative), la masse minimale d'un module, dont les dimensions sont comme ci-dessus, pour en assurer la stabilité serait de 1 à 1,5 Tonnes

D'autres dimensions sont envisagées pour la constitution de l'épi, prises comme suit, et équivalent à une masse d'environ 11,8T:

- Hauteur ; 1,0m
- Largeur : 2,0m
- Longueur : 4,0m

Les résultats des calculs de stabilité hydrauliques pour les différentes conditions de houle et niveaux d'eau sont les suivants:

Niveau d'eau	PHMA (8,1mNGF)			
Hs (m)	1	1,2	1,4	2
Umax z_module (m/s)	1,4	1,7	1,9	2,2
Coefficient de stabilité au glissement	1,5	0,9	0,6	0,5
Coefficient de stabilité au renversement	2,8	1,9	1,5	1,4

Niveau d'eau	7 mNGF		
Hs (m)	0,9	1,2	1,4
Umax z_module (m/s)	1,5	1,8	1,9
Coefficient de stabilité au glissement	1,2	0,7	0,6
Coefficient de stabilité au renversement	2,4	1,7	1,5

La condition de stabilité hydraulique au glissement est vérifiée pour des houles de Hs<1m

La condition de stabilité hydraulique au renversement est assurée

A noter que dans le cas de l'exposition des modules uniquement au courant, type courant longshore généré par la houle (jusqu'à 1m/s) et/ou de marée (jusqu'à 1m/s), le calcul de stabilité hydraulique se fait sur la base de la formulation de Morrison.

Ainsi, pour un courant de 2m/s (approche à priori conservative), la masse minimale d'un module, dont les dimensions sont comme ci-dessus, pour en assurer la stabilité serait de 4,5 à 5,5 Tonnes

Recommandations quant à la stabilité hydraulique des modules

Sur la base des modules de dimensions étudiées par Recio, les longueurs de modules minimales pour assurer un coefficient de stabilité hydraulique au glissement de 1, suivant les conditions hydrodynamiques, sont les suivantes :

Conditions de houle	1,2m/PHMA	1,2m /7mNGF	1,4m/PHMA	2,0m/PHMA
U _{max} z _{module} (m/s)	1.7	1,8	1.9	2.2
Longueur de module (m)	4,8	5,3	5,9	8
Volume (m ³)	11	14,9	20,5	51,2
Masse équivalente (T)	16,4	22	30,4	75,8

Aussi, afin d'assurer la stabilité hydraulique des modules suivant les conditions déterminées, les dimensions indiquées dans le tableau suivant sont recommandées.

Longueur de module (m)	8
Largeur (m)	4
Epaisseur (m)	1,6
Volume (m ³)	51,2
Masse équivalente (T)	75

En considérant une masse volumique associée de 1480 kg/m³.

Ces dimensions permettent, suivant la formulation de Recio et Oumeraci (2009), pour l'ensemble des houles étudiées, à l'exception du cas H_s=2,0m par PHMA, d'assurer un coefficient de stabilité au glissement et au renversement supérieur à 1,5. Cette valeur de 1,5 permet d'intégrer un critère de sécurité, compte tenu des incertitudes sur les paramètres d'entrée, notamment ceux liés aux conditions climatiques.

Pour le cas H_s=2,0m par PHMA correspondant à une approche conservative sur les conditions climatiques, un coefficient de 1 sur la stabilité est assuré.

Niveau d'eau	0,9m/PHMA	0,9m/7mNGF	1,2m/PHMA	1,2m /7mNGF	1,4m/PHMA	2,0m/PHMA
U _{max} z _{module} (m/s)	1,4	1,5	1.7	1,8	1.9	2.2
Coefficient de stabilité au glissement	3,5	3	2,2	1,8	1,6	1,0
Coefficient de stabilité au renversement	5,0	4,3	3,3	3,0	2,7	2

A noter que selon une approche moins conservatrice, en considérant une longueur de **6m**, les résultats sont les suivants :

Longueur de module (m)	6
Largeur (m)	3
Epaisseur (m)	1,2
Volume (m3)	21,6
Masse équivalente (T)	32

Niveau d'eau	0,9m/PHMA	0,9m/7mNGF	1,2m/PHMA	1,2m /7mNGF	1,4m/PHMA	2,0m/PHMA
Umax z_module (m/s)	1,4	1,5	1.7	1,8	1.9	2.2
Coefficient de stabilité au glissement	2,5	2,1	1,5	1,2	1	0,6
Coefficient de stabilité au renversement	3,7	3,2	2,5	2,2	2,0	1,5

Ainsi, la stabilité de ce modèle ne serait pas assurée que dans le cas très défavorable et niveau d'eau extrême et de houle extrême conservative.

Remarques relatives au calcul de stabilité hydraulique

- Le dimensionnement est effectué suivant la méthode de Recio et Oumeraci (2009) en considérant les valeurs de Cd, Cm et Cl recommandées. Cependant, ces coefficients peuvent être différents suivant le cas de figure étudié.
- Il a été considéré que les modules ne se déforment pas sous l'effet de l'impact de la houle
- L'effet d'impact lorsqu'une houle viendrait frapper directement un module n'a pas été étudié.
- L'étude ne tient pas compte des problématiques éventuelles d'affouillement en pied d'ouvrage.

Recommandations particulières

- ⇒ Il est recommandé que les modules d'extrémité de l'épi, en particulier les modules de la couche supérieure, sur au moins les 10 premiers mètres, soient de dimensions les plus proches de celles du module étudiés ci-dessus de 8m de long. Cette zone est en effet la plus exposée, à la fois aux houles incidentes (direction dans le sens longitudinal de l'épi) et aux courants (direction dans le sens transversal de l'épi).

- ⇒ A défaut, un liaisonnement entre modules pourrait être mis en œuvre. ces derniers devant être de la plus grande dimension envisageable au regard des contraintes de travaux sur site.
- ⇒ Pour le corps de l'ouvrage, des modules de taille(s) inférieure(s) peuvent être utilisés. Des modules de 2,5m de long (eq. 1,8t) seraient hydrauliquement stables vis-à-vis des effets de courants, mais hors effets de houles. Aussi, sur la base des éléments de cette étude, la mise œuvre de modules de taille supérieure est recommandée.

Statistiques ANEMOC au large de Saint Malo

Corrélogramme Hm0 / DirMoy - ANEMOC_COAST_2646 - annuel																											
Hm0 (m)	DirMoy (degrés)																										
0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Total		
0.5	4.20	2.79	1.28	0.79	0.63	0.37	0.21	0.10	0.09	0.09	0.02	0.03	0.02	0.01	0.07	0.05	0.17	0.21	0.94	239.45	46.63	13.59	9.21	5.50	326.44		
1	9.33	8.46	6.86	4.10	1.86	0.85	0.74	0.23	0.35	0.18	0.13	0.25	0.38	0.40	0.62	0.74	1.50	3.03	7.43	212.71	78.21	15.06	9.03	10.42	370.66		
1.5	4.68	4.90	4.31	1.45	0.64	0.31	0.00	0.00	0.02	0.04	0.06	0.05	0.24	0.27	0.42	0.92	2.47	5.92	14.62	86.97	41.89	7.76	3.20	3.60	163.66		
2	1.51	1.31	0.67	0.10	0.08	0.04		0.00	0.01				0.03	0.05	0.20	0.39	1.12	3.87	10.41	30.68	18.09	3.32	1.41	1.22	74.52		
2.5	0.33	0.16	0.07	0.06										0.02	0.06	0.17	0.47	1.60	5.54	15.69	8.45	1.40	0.71	0.38	35.11		
3	0.07															0.03	0.14	0.49	2.38	9.00	3.74	0.52	0.19	0.16	16.72		
3.5	0.05																0.01	0.11	0.45	4.91	1.65	0.06	0.03	0.05	7.23		
4																		0.02	0.09	2.21	0.74	0.03			3.10		
4.5																		0.00	0.02	0.71	0.14				0.87		
5																			0.01	0.18	0.02				0.22		
5.5																				0.05	0.02				0.07		
6																				0.00					0.00		
Total	20.16	17.62	12.99	6.49	3.21	1.57	0.96	0.34	0.48	0.31	0.21	0.34	0.67	0.75	1.37	2.30	5.90	15.25	41.88	581.67	197.29	41.75	23.79	21.33			
Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les case vides correspondent à des fréquences nulles																											

Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les cases vides correspondent à des fréquences nulles

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Corrélogramme Hm0 / Tpic - ANEMOC_COAST_2646 - annuel																					
Hm0 (m)	Tpic (Secondes)																				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0.5				1.53	14.95	13.92	9.24	13.60	31.82	56.65	59.54	45.09	34.08	23.23	13.03	5.54	2.65	1.23	0.37	0.19	0.01
1			0.15	15.19	43.04	37.21	28.47	19.63	21.06	26.93	32.61	34.36	37.04	31.46	22.59	12.32	4.35	2.34	0.39	0.30	
1.5				0.36	14.14	28.91	30.41	16.69	9.23	7.35	6.94	7.58	7.59	7.99	7.63	8.60	4.12	4.11	1.56	0.57	0.02
2					1.24	6.31	15.74	14.92	7.05	4.38	3.38	2.98	2.58	2.41	2.71	3.16	1.73	2.18	1.15	0.67	0.01
2.5					0.11	1.54	5.39	9.04	6.04	2.97	1.80	1.53	1.34	1.13	1.00	0.88	0.76	0.85	0.35	0.38	0.05
3						0.19	1.23	2.72	4.17	2.59	1.34	0.87	0.92	0.89	0.65	0.47	0.28	0.30	0.17	0.10	0.01
3.5						0.00	0.17	0.84	0.89	1.58	0.98	0.53	0.51	0.35	0.42	0.29	0.38	0.24	0.06	0.21	
4							0.00	0.12	0.20	0.43	0.55	0.55	0.29	0.19	0.26	0.18	0.16	0.11	0.01	0.03	
4.5								0.01	0.02	0.05	0.10	0.20	0.09	0.13	0.04	0.08	0.03	0.05	0.04	0.00	
5									0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	
5.5																0.01	0.02		0.02		
6																		0.00			
Total				1.68	30.50	72.46	85.41	93.02	95.58	106.21	107.92	92.78	82.68	74.63	67.41	41.08	28.66	13.06	10.60	3.99	2.33

Les valeurs du tableau sont exprimées en "pour mille (‰)" - Les valeurs 0.00 ‰ correspondent à des fréquences comprises entre 0 ‰ et 0.01 ‰ - Les cases vides correspondent à des fréquences nulles

Code des couleurs		
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰

Annexe 12 : Fiche de présentation d'un des sables sélectionnés pour le remplissage des modules

	<h1>FICHE DE PRESENTATION DU PRODUIT</h1>	Date de mise à jour 03/01/2012
---	---	---------------------------------------

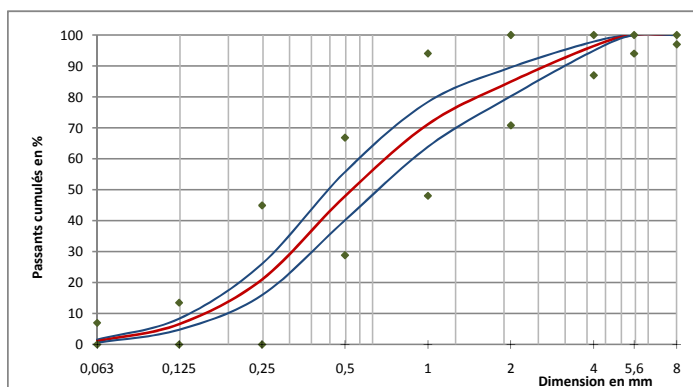
Fournisseur : SABCO Site d'élaboration : LIEUSAIN Nature pétrographique : Sable quartz Elaboration : lavage, criblage	<h2>Sable 0/4</h2> semi concassé, lavé
--	--

"Le" sable à béton par excellence : présent dans les bétons les plus techniques comme les ponts d'autoroute ou les centrales nucléaires. Ce matériaux représente le cœur du savoir faire SABCO



Partie Informative

Exemple de suivi de production															
	granulométrie											essais annuels			
	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	FM	SE	FS	WA ₂₄	C	S
Maximum	2,1	11,9	31,5	63,8	81,3	90,9	98,7	100	100	3,22	81				
Xf + 1,25 sf	1,5	8,3	26,0	55,6	78,3	89,5	97,8	100	100	3,0	78,4				
Moyenne Xf	1,0	6,5	20,9	47,9	71,1	84,8	96,4	100	100	2,7	73	20	0,2	<0,001	0,009
Xf - 1,25 sf	0,5	4,7	15,9	40,1	63,8	80,2	94,9	100	100	2,5	67,6				
Minimum	0,4	4,7	13,7	32,7	56,4	75,4	93,4	100	100	2,29	62				
Ecart type	0,40	1,42	4,02	6,23	5,78	3,72	1,15	0	0	0,19	4,29				
Nbre résultats	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	42				

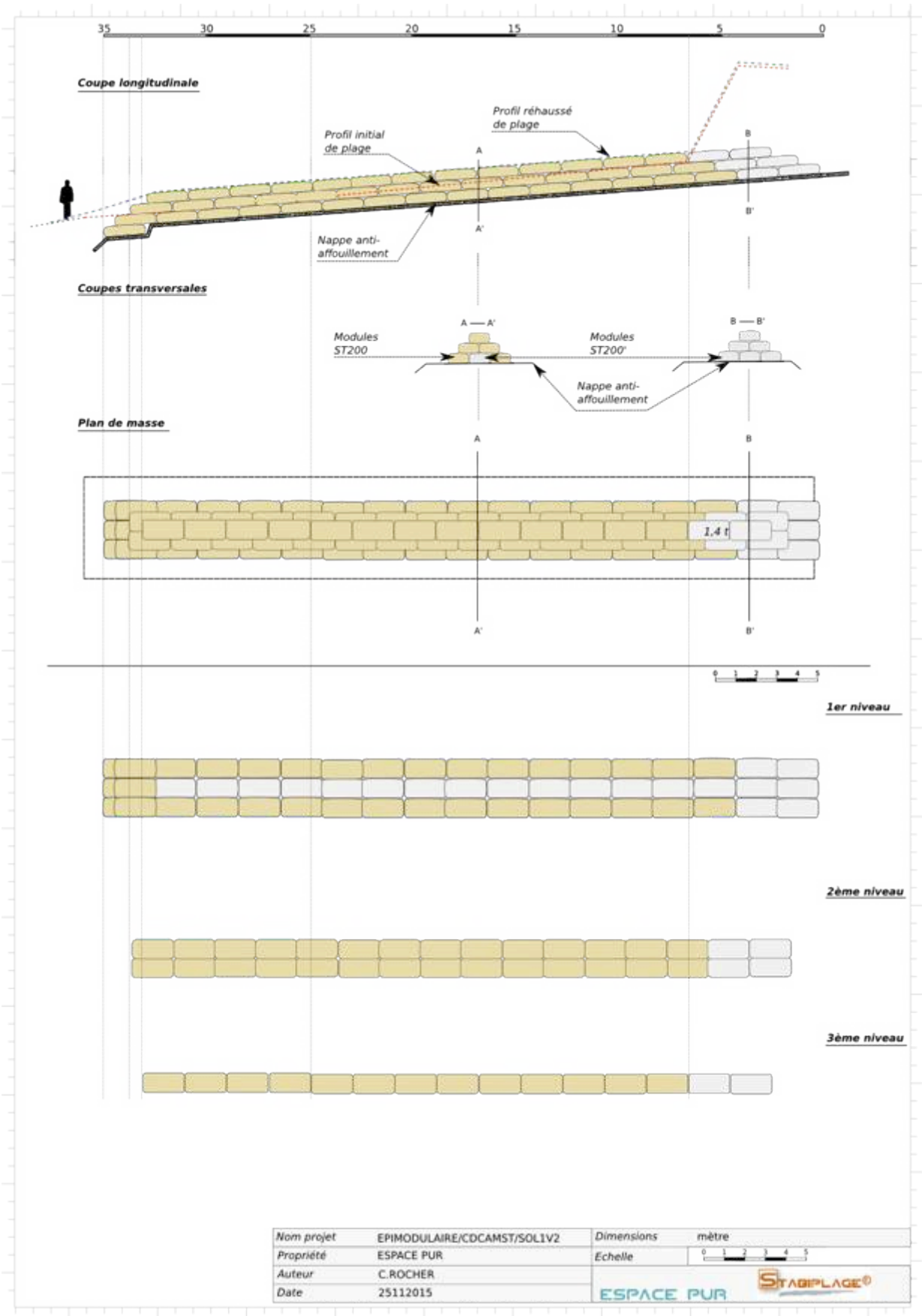


Résultats d'essais complémentaires en date du 29/03/2011

Alcali-réaction : NR
Alcalins actifs : 0.0173 %
Teneur en chlorures <0.001%
Soufre total : 0.009%
Masse Vol. : 2.61Mg/m3
Friabilité : 20%
Matières humiques : négatif
Absorption d'eau : 0.2 %
Essai accéléré sur mortier autoclave : 0.08%

Date d'édition : 03/01/2012

Annexe 13 : Schémas et plans ST200



Annexe 13 : Note F. Levoy du 25 mars 2016

Note à l'intention de la Communauté de Communes Avranches Mont-Saint-Michel

Analyse du document transmis par la société Espace Pur le 24 mars 2016 intitulé :

- Étude provisoire de stabilité hydraulique de l'épi expérimental, modulaire et réversible

⇒ Conditions hydrodynamiques

Les **niveaux d'eau considérés**, 8,15 m IGN 69 pour une période de retour de 50 ans et 8,20 m pour 100 ans sont des valeurs cohérentes avec les données SHOM- CETMEF de 2008 à savoir 8,20 m pour le niveau centennal à la pointe de Champeaux, valeur toutefois revue à la baisse dans le rapport du SHOM de 2012 (7,70 m IGN 69).

Concernant les **données d'agitation**, les données Anemoc proviennent d'un site au large de Saint-Malo. Il faut rappeler que ces données issues de modèles numériques ne tiennent pas compte de la marée qui module fortement les hauteurs de l'agitation en zone littorale. Ce site, très au large, est peu représentatif du lieu d'implantation de l'épi. Des données Anemoc proche du site, au point 3668 par une profondeur de 15,5 m, sont disponibles auprès du CEREMA. Elles couvrent une période pluri-décennale.

Des statistiques sont disponibles sur le site de Videcoq au large de Granville (site Internet OLIBAN du CREC, Université de Caen), mais sur une seule période hivernale d'octobre 1992 à juin 1993. La houle trentennale est estimée à 3,36 m (Hs). Elles tiennent compte de l'influence de la marée sur les hauteurs significatives dont l'importance en zone littorale est signalée page 6. Ces données peuvent être comparées à celles du site Anemoc à proximité pour en apprécier la validité.

De manière pragmatique, les Hs issues des modèles sur le site Internet Prévimer au large de Saint-Malo, 4 à 4,5 m sont mises en miroir de l'agitation sur le site d'étude, 1,75 à 2 m le 8/2/2016 et 1,5 à 1,75 m le 9/3 pour un niveau d'eau toutefois très inférieur à la hauteur centennale (5,93 et 6,87 m IGN69).

Au final, une Hmax 1,2 m est estimée pour le site d'étude (Hsmax ou Hmax) visuellement (niveau du plan d'eau statique non précisé). A noter qu'une estimation du set-up (0,2 à 0,3 m) est déterminée grâce à l'utilisation d'un abaque du CERC reposant sur une pente de 3% sensiblement différente de la pente sur plage de projet (7 à 8%).

Concernant les **courants de marée** sur haute plage où sera implanté l'épi, leur intensité est très faible (frottement dû à la réduction de hauteur d'eau sur la haute plage). C'est le courant parallèle à la côte induit par les vagues obliques au rivage qu'il est important de déterminer à l'aide des formules adéquates.

Pour le **dimensionnement de la structure en géobags**, une hauteur d'eau de 3 m en extrémité d'ouvrage est possible en cumulant niveau astronomique et set-up, bien que celui-ci s'exprimerait vraiment à terre de la ligne des premiers déferlements bathymétriques.

Des Hs proches du déferlement pour des plans d'eau respectivement de 7 m et 8,1 m sont déterminées à l'aide de diverses formulations donnant des résultats variant de 1.4 à 3.5 m (plan d'eau astronomique). L'approche suivie ne repose pas a priori sur la détermination d'une agitation de période de retour donnée pour un plan d'eau de projet au large, avec l'étude de sa propagation vers le site d'implantation

de l'ouvrage. Une palette de hauteurs de houle pour les deux plans d'eau de référence est proposée avec associé les vitesses orbitales maximales.

Dans l'étude globale de défense contre la mer du département de la Manche (Levoy et Larsonneur 1994), afin de dimensionner des ouvrages, les valeurs suivantes ont été calculées pour la zone d'étude :

- Plan d'eau annuel et houle trentennale : H1/10 2.17 m à la cote +4 m IGN69 (hauteur d'eau de 3.56 m)
- Plan d'eau centennale et houle trentennale : H1/10 de 2.29 m à la cote +4 m IGN69 (hauteur d'eau de 3.93 m).

A noter que ces valeurs sont obtenues pour des hauteurs d'eau supérieures à celles prévues à l'extrémité de l'épi et ne tiennent pas compte de l'évolution récente des fonds sur la zone d'étude.

⇒ Stabilité de l'ouvrage

La densité du sable dans les modules est à préciser : 1800 kg/m³ ou 1480 kg/m³ de même que l'état du sable associé sec ou saturé.

L'utilisation de la formule d'Hudson n'est pas adaptée pour les géobags, le coefficient Kd n'est pas bien défini pour ce type d'ouvrage. L'effet de la pente de l'ouvrage sur la masse des blocs est toutefois bien souligné (masse moyenne de 2 à 5 t pour une pente de 1/1 et 1,5 à 2 t pour pente de 3/2. Il en est de même pour l'utilisation de la formule du CREC sur la stabilité des bermes de pied de digue à talus en enrochements.

La stabilité hydraulique des modules est étudiée sur la base de la publication de Recio et Oumeraci de 2007. L'utilisation de ces travaux est pertinente pour dimensionner les modules à mettre en place. Il est recommandé d'utiliser les publications de ces mêmes auteurs de 2009 pour affiner le dimensionnement et donc la stabilité des modules.

La géométrie des modules devra être proche de celle préconisée par ces auteurs. La hauteur, h, du module sera proche de L/5, L étant la longueur du module. Sa largeur, l, sera proche de L/2. A noter que les expériences menées en Australie indiquent une largeur de l'ordre de L/1.35, grandeur déjà utilisée dans le dimensionnement d'épis.

La longueur du module est donc fortement dimensionnante et peut être mise en relation avec la hauteur des vagues. En fait ce sont les vitesses orbitales qui sont prises en considération dont les grandeurs vont varier avec la période des vagues et la hauteur d'eau considérée au niveau du projet. La pente de l'ouvrage est également un facteur de modulation de la dimension des modules et donc de leur masse.

⇒ Recommandations

La déformation des modules influence leur stabilité et celle de la structure. Il dépend du taux de remplissage du geocontainer, du type de géotextile utilisé (possibilité d'allongement) et des frottements qui peuvent s'exercer entre les modules. **Le remplissage en sable des containers doit être au plus proche des capacités du géobag afin d'éviter tout mouvement de sable dans les géobags. Ce point est fondamental pour avoir une bonne stabilité de la structure dans le temps. A ce titre, la résistance du géotextile et des coutures est essentielle.**

Si les dimensions calculées des modules s'avèrent importantes au regard des conditions de houle et de courants induits considérés, rendant difficile voire impossible la réversibilité de l'ouvrage, il conviendra de revoir sa pente notamment à son extrémité afin de réduire la masse des modules les plus exposés. Le choix du plan d'eau de projet et de la houle associé pourrait également être revu dans la mesure où un rechargement viendra épauler l'épi et que la vulnérabilité des biens menacés n'est pas immédiate. **Tout surdimensionnement est à proscrire à notre avis.**

Il convient de rappeler que le dispositif mis en place est expérimental et qu'il pourrait subir des désordres compte-tenu de l'état de l'art dans l'utilisation des géobags et de leur mise en œuvre notamment pour la réalisation d'épis. Un **suivi de l'environnement immédiat** est indispensable (effet sur la sédimentation), ainsi qu'un **suivi de la déformation des modules** eux-mêmes.

Le 31 mars 2016

Pr. F. Levoy