



Mise en œuvre d'un système de numérisation 3D mobile pour le suivi détaillé d'un linéaire de 3.5 km de falaises à Carry-le-Rouet (Bouches-du-Rhône)

Bertrand CHAZALY¹

1. Fugro Geoid SAS, 12 rue des Frères Lumière, 34380 Jacou, France.

b.chazaly@fugro.com

Résumé :

Développé par le groupe Fugro, Boat-MapTM est un système couplant un sondeur bathymétrique multifaisceaux à un scanner 3D mobile. C'est un système modulable permettant d'enregistrer et de géoréférencer une image 3D intégrale des surfaces au-dessus et sous l'eau, fournissant une topographie dense, précise et exhaustive des espaces maritimes et fluviaux.

Mis en œuvre à Carry-le-Rouet fin novembre 2011, le système a produit un semis de points 3D couvrant un linéaire de 3,5 km de falaises, à une densité moyenne et une précision de 5 cm. Parallèlement, une série de prises de vues photographiques haute résolution a été enregistrée et géo-référencée.

Le traitement des données aboutit à la fourniture de produits cartographiques exploitables : modèles maillés 3D, développé orthophotographique du linéaire de côte, cartographie des écarts au premier état enregistré.

La mesure 3D dense des élévations des falaises offre un instantané détaillé de leur morphologie, de précision centimétrique. La répétition de ces mesures à intervalle régulier permet un suivi de l'évolution de cette morphologie, d'où sont tirées des caractéristiques des mécanismes d'érosion, afin d'établir une typologie des instabilités de falaises et de qualifier l'aléa.

Mots-clés :

Centrale inertielle – GPS – Scanner 3D – Bathymétrie multifaisceaux – Lasergrammétrie – Numérisation 3D – Modélisation numérique – Auscultation – Trait de côte – Falaises

1. Introduction

En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, une approche des risques naturels, liés aux instabilités de falaises côtières a été jugée nécessaire compte tenu des enjeux (sécurité des personnes et des biens, impact socio-économique, environnement). Les falaises de Carry-le-Rouet font parties des 4 sites représentatifs du littoral à falaise de la région.

Afin d'établir une typologie des instabilités de falaises et de qualifier l'aléa, Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières réalise des investigations de terrain, préalables à une compréhension des phénomènes qui doit aboutir à une caractérisation de l'érosion et

à des propositions d'aménagement. Il s'agit au final d'établir une méthodologie de gestion du risque d'instabilités sur le littoral.



Figure 1. Falaises de Carry-le-Rouet.

Dans ce cadre, la topographie dense des élévations des falaises offre un instantané détaillé de leur morphologie, si tant est qu'elle puisse atteindre une précision et une densité d'ordre centimétrique. La répétition de ces mesures à intervalle régulier doit permettre un suivi de l'évolution de cette morphologie, d'où sont tirées des caractéristiques des mécanismes d'érosion.

2. Technologie

2.1 Problématique

L'enregistrement dense et homogène est jugé nécessaire lorsque la morphologie de l'objet ne peut pas être restituée par des mesures discrètes telles que celles fournies par une campagne GPS ou un relevé tachéométrique :

- évaluer finement les matériaux déficitaires sur les talus et positionner précisément les zones de rechargement lors du confortement des talus, dans le cas des digues de protection,

- détecter et mesurer les volumes des compartiments arrachés par l’océan sur de longs linéaires de falaises,
- cartographier précisément des installations portuaires qui ne sont accessibles que par moyen maritime.

La configuration du site de Carry le Rouet interdit tout accès terrestre : les falaises ne sont pleinement visibles que depuis la mer. C’est un problème récurrent dès qu’il s’agit d’acquérir de l’information géométrique en milieu maritime ou fluvial : c’est le cas des ouvrages de protection en enrochement dont une topographie régulière documente un diagnostic précis en matière de suivis et d’analyses en cas de travaux de renforcement.

Ces conditions réduisent les possibilités d’intervention :

- numériser au scanner 3D terrestre longue portée, en stations fixes et depuis des points de vue latéraux
- numériser à l’aide de moyens aériens
- numériser depuis la mer, en suivant le linéaire au plus près.

2.2 Les techniques de mesures 3D denses

On distingue aujourd’hui trois catégories de capteurs 3D denses :

- a) les scanners 3D terrestres statiques (ou TLS, pour Terrestrial Laser Scanner). Les moyens de numérisation 3D statique longue portée ont parfois pu apporter une solution efficace pour l’enregistrement d’ouvrages. Ce fut le cas du levé topographique haute densité de la grande digue de Tarnos, protégeant la sortie du port de Bayonne (CHAZALY *et al.*, 2008). Un autre exemple significatif est le suivi mensuel des dépôts sédimentaires dans la baie du Mont Saint-Michel, à l’aide d’un capteur positionné au sommet de l’abbaye et numérisant la baie dans un rayon de 1500 m.
- b) les systèmes mobiles terrestres (ou MLS : Mobile Laser Scanner). C’est le cas du Système Boat-Map.
- c) les systèmes aéroportés, plus communément appelés lidar (ou ALS, pour Aerial Laser Scanner). Ce sont généralement des systèmes très coûteux et assez lourds à mettre en œuvre, nécessitant la mobilisation de moyens importants tels un avion disposant d’une trappe spéciale, ou un hélicoptère associé à un système ayant reçu l’agrément des autorités civiles.

Avec un système TLS, on comprend bien qu’il faut bénéficier d’une configuration géographique particulière du site pour disposer d’un point de vue en vis-à-vis, ou du moins assez bien placé pour acquérir l’information nécessaire. C’est rarement le cas dans la plupart des sites situés en front de mer.

En lidar, la mobilisation de moyens aériens peut souvent conduire à des coûts prohibitifs et ne permet parfois pas de coller au plus près au linéaire à relever.

2.3 La solution Boat-Map

Les solutions de numérisation 3D mobile sont en plein essor actuellement. La majorité sont mises en œuvre sur des projets routiers ou urbains, mais certaines ont été adaptées sur bateau (BÖDER *et al.*, 2011).

Boat-MAP™ est un système développé et mise en œuvre par Fugro. C'est un système éprouvé, associant un laser scanner Optech Ilris 3D, d'une précision de 7 mm à 100m (un sigma), un sondeur bathymétrique multifaisceaux, une centrale inertielle Applanix 320e et un couple d'antenne GPS bi fréquences (GPS+GLONASS). La précision sur la trajectoire peut atteindre 2 à 3 cm si la constellation de satellites est favorable. Il faut retenir une précision globale de 5 cm pour les nuages de points générés.

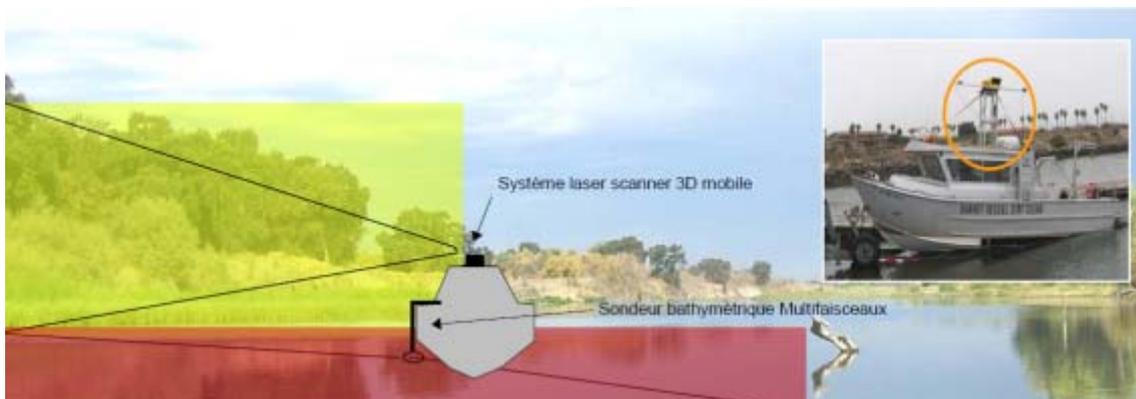


Figure 2. Le système BOAT-MAP™ en configuration de numérisation complète.

La densité de points peut atteindre 400 pts/m² en moyenne, soit 1 point / 5cm acquis sur une surface en vis-à-vis. Plusieurs passages permettent d'augmenter cette densité et de couvrir les zones masquées ou peu visibles (faces fuyantes).

Le capteur 3D Ilris possède une caméra intégrée qui permet la coloration des nuages de points. Sa résolution ne permet cependant pas de fournir des images détaillées des surfaces couvertes.

Le système est donc couplé à une caméra CCD Imperx 16M3 Lynx calibrée (distorsions, positions et orientations). Sa résolution de 16 Mpixels (4832×3248 pixels), son capteur plein champ 24×36 mm² et son optique fixe de 28 mm permettent d'assurer une résolution terrain de 1.3 cm à 50 m.

Les images sont enregistrées au format raw sdi, ce qui laissera toute latitude pour agir sur leur colorimétrie. Le logiciel IMPAQ permet d'appliquer les corrections au bloc de prises de vues avant d'exporter les résultats au format voulu (tiff, jpg, etc.).

Le système est démontable, adaptable, et permet ainsi une acquisition complète, sous et au-dessus de l'eau. Développé au Etats-Unis par Fugro-West, il est mis en œuvre partout dans le monde par les différentes divisions du groupe, sur des problématiques de numérisation de linéaires en milieu maritime ou fluvial :

- a) cartographie de ports
- b) hydrologie
- c) levés de berges, de bassins, de zones peu profondes
- d) zones de fortes marées
- e) sites dangereux ou d'accès difficiles
- f) brise-lames, plages
- g) rivières, digues, réservoirs, barrages
- h) ponts et ouvrages de soutènements, affouillements
- i) plates-formes offshore et terminaux méthaniers
- j) sites de pose de câbles et de pipelines
- k) suivi de dépôts sédimentaires
- l) dragage

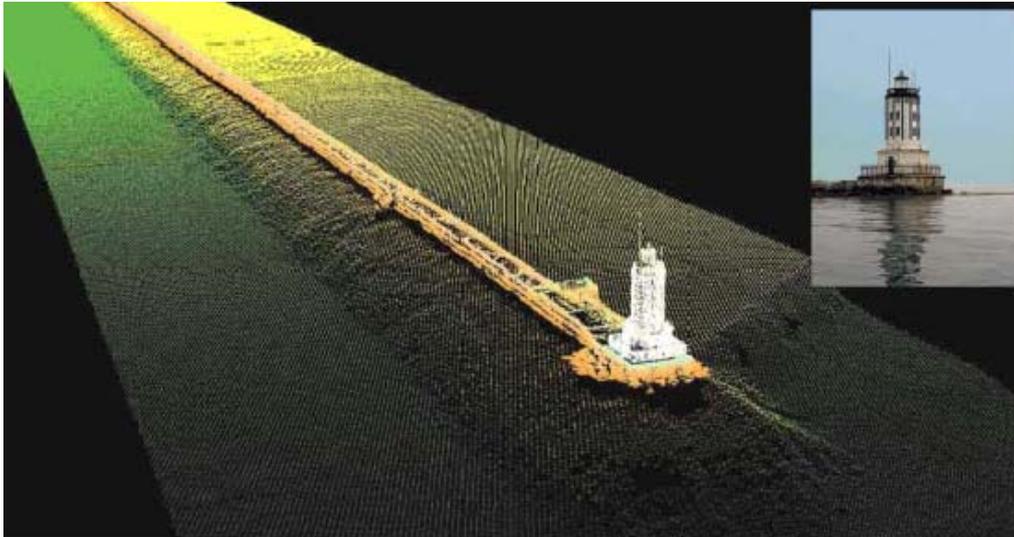


Figure 3. Exemple de numérisation laser et bathymétrique réalisée par le BOAT-MAP™ : digue de San Pedro, Port de Los Angeles.

3. Mise en œuvre à Carry-le-Rouet

Le linéaire de 3,5 km de littoral rocheux correspond aux secteurs des grandes falaises sur la commune de Carry-le-Rouet (Bouches du Rhône).

La numérisation 3D et les traitements se sont concentrés sur les falaises (en rouge sur la figure 5), et non sur les ouvrages maritimes (en vert) ou les plages (en jaune). Seule la partie aérienne du linéaire a été couverte : l'acquisition des surfaces sous l'eau n'a pas été jugée nécessaire et sa mise en œuvre aurait été impossible au vu des très faibles profondeurs.



Figure 4. Le linéaire de falaises à relever sur la commune de Carry-le-Rouet.

3.1 Numérisation

En février 2011, une campagne de numérisation 3D mobile a couvert le linéaire, constituant une première archive 3D de sa morphologie. Une nouvelle campagne de mesures a été réalisée le 30 novembre 2011, afin d'enregistrer un deuxième état. A l'issue des traitements en cours, une première comparaison sera possible.

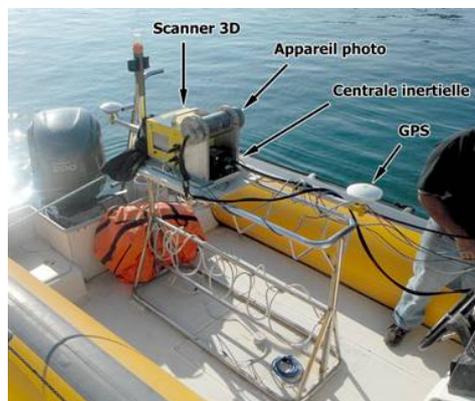


Figure 5. Le système BOAT-MAPTM à Carry le Rouet.

La date et l'heure d'intervention a été fixée quelques jours avant la mise en œuvre du système, en fonction des prévisions météorologiques et de la configuration de la constellation GPS.

Un temps de préparation de 2 à 3 heures est nécessaire pour le montage du système sur le bateau, de type Zodiac à fond rigide dans le cas de cette opération, pour manœuvrer au plus près de la côte. Un pivot GPS est stationné sur zone, sur le toit de la capitainerie et reste en place durant toute la phase d'acquisition (calibration du système et numérisation des falaises).

La numérisation débute par une phase de calibration réalisée en mer, d'une durée d'un quart d'heure. Elle se poursuit ensuite par la numérisation des falaises, le bateau suivant le linéaire au plus près à une vitesse de quelques nœuds pour assurer une densité la plus forte possible. Le cas échéant, le pilote interrompt son cheminement pour insister sur le balayage d'une zone. Le tout est enregistré en moins de trois heures.

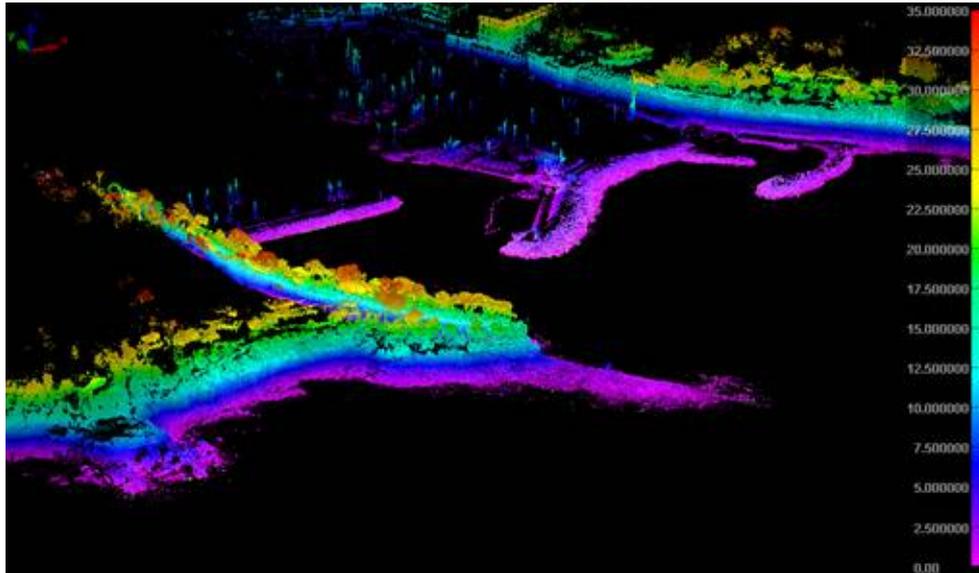


Figure 6. Nuage de points 3D - aperçu des falaises encadrant le port de Carry.

Lors de cette deuxième campagne, nous avons rencontré des conditions de houle assez forte et le système inertielle a été particulièrement sollicité sur une embarcation aussi petite. Pour assurer une densité suffisante et analyser la précision des nuages de points, nous avons réalisé un deuxième passage, le lendemain. La comparaison entre les deux nuages a permis de valider la précision de 5 cm.

Le résultat de la campagne de mesure est un nuage de points 3D dense exprimé dans le système de coordonnées Lambert 93 et couvrant les falaises et leur environnement (blocs en pied, végétation, habitations au sommet, ouvrages se situant sur le parcours). L'intensité de réflexion du laser codée sur 256 niveaux de gris permet une première distinction entre les objets numérisés.



Figure 7. Nuage de points 3D – rendu de l'intensité de réflexion en niveaux de gris.

3.2 Traitements 3D

Trois grandes phases sont distinguées dans le traitement :

- a) *le filtrage des nuages de points* : Le capteur 3D enregistre tout ce qu'il voit, y compris les objets qui ne sont pas nécessaires à l'étude des falaises. C'est notamment le cas de la végétation qui masque certaines parties des élévations. Un très gros travail de filtrage est nécessaire, pour classer le nuage 3D et isoler les points qui ont un intérêt pour l'étude de ceux qui peuvent la gêner. Les solutions logicielles utilisés habituellement pour classer les données lidar sont mises en œuvre et adaptées au profil particulier des points acquis.

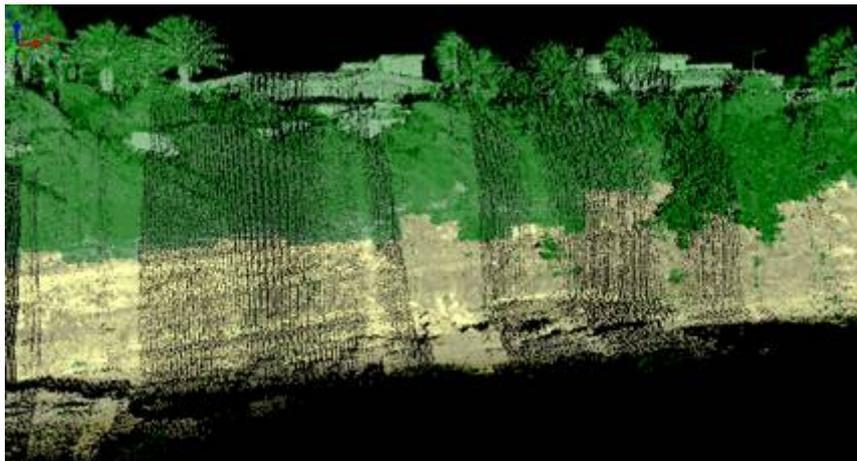


Figure 8. Classement du nuage de points.

- b) *L'édition des nuages* : le linéaire de côtes est très découpé : si globalement, il est orienté vers le sud, de longs secteurs sont orientés au sud-est, d'autres au sud-ouest. Il

est donc impossible d'appréhender les falaises en une seule vue. Les données ont donc été déroulées le long d'une ligne suivant le trait de côte, et composée de portions rectilignes ou en arc de cercle. Le résultat est un nouveau jeu de données, où la totalité des élévations est restituée en vis vis-à-vis.

Après le filtrage et le déroulé, les semis couvrant les falaises sont interpolés afin de générer une surface 3D maillée. C'est cette surface qui est alors utilisée pour la comparaison entre les campagnes de mesure et la production du déroulé orthophotographique.

- c) *Le traitement orthophotographique* : cette dernière étape reste à faire. Elle consiste à exploiter la résolution des prises de vues photographiques, bien plus fine que celle du nuage, pour texturer le modèle maillé déroulé. Cela conduit à la production d'une vue photographique géométrale, restituant en détail, en couleur et à l'échelle les élévations du linéaire de falaises.

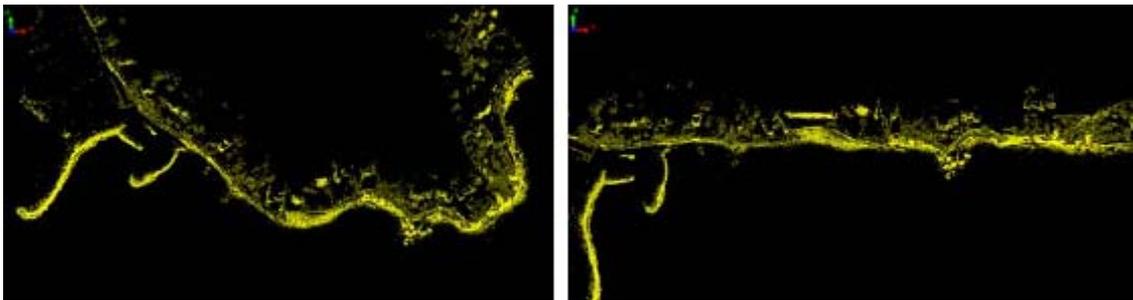


Figure 9. Déroulé du linéaire de côte.

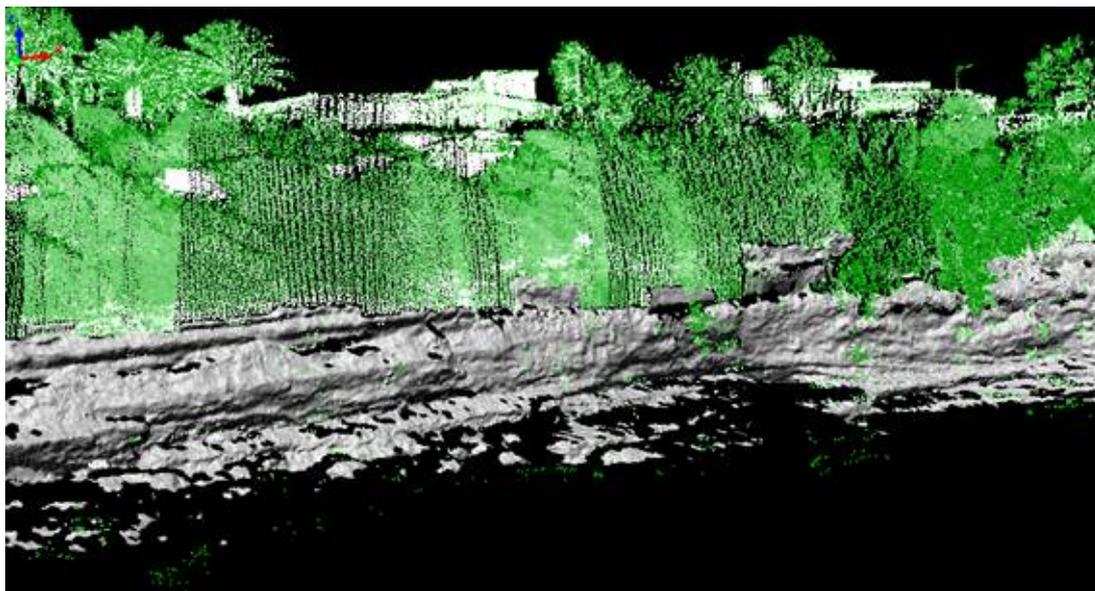


Figure 10. Superposition du semis de la végétation au modèle 3D maillé de la falaise.



Figure 11. Modèle maillé texturé, restitué sur les falaises de Carry-le-Rouet.

4. Conclusions

Boat-Map™ est un système éprouvé, régulièrement mis en œuvre pour la cartographie précise et complète de canaux et de ports. C'est la première fois qu'il est utilisé pour un suivi de falaises. Les conditions rendues particulièrement difficiles par les fonds peu profonds, un linéaire très découpé et une météorologie peu favorable n'ont pas empêché l'acquisition d'un nuage exploitable.

A l'issue de la campagne de mesures, l'ensemble des données acquises et traitées constitue une archive qui fige l'état des falaises et restitue finement et en trois dimensions leur morphologie. Elle est en cours d'exploitation. La réalisation de campagnes régulières et la comparaison des différents jeux de données vont permettre de fournir les informations statistiques nécessaires à la caractérisation du comportement de ce type particulier de falaises.

5. Références bibliographiques

BÖDER V., KERSTEN T. P., THIES T., SAUER A. (2011). *Mobile Laser Scanning on Board Hydrographic Survey Vessels - Applications and Accuracy Investigations*. FIG Working Week 2011 : Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May 2011.

CHAZALY B., LHOMME D., ROBIN Y., FAGES S., GUBERT S. (2008). *Le levé topographique haute densité par scanner laser 3D appliqué au génie côtier : l'exemple du suivi des digues du port de Bayonne*. Actes des X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, pp 525-532. doi:10.5150/jngcgc.2008.050-C