

PROFONDEUR D'ENFOUISSEMENT DES CABLES OFFSHORE PAR UNE APPROCHE BASEE SUR LE RISQUE

OFFSHORE CABLE BURIAL DEPTH USING A RISK BASED APPROACH

Hong DOAN¹, Lucy MACNAY², Aboubacar SAVADOGO³, Kevin SMITH⁴

¹ Fugro, Paris, France

² Anatec Ltd, UK

³ Fugro, Paris, France

⁴ Fugro, Norfolk, USA

RÉSUMÉ –Un réseau de câble en mer est vulnérable à un large éventail de dangers potentiels. La forme de protection la plus fiable pour ces câbles demeure l'enfouissement sous le fond marin. L'objectif de cet article est de décrire une nouvelle méthodologie pour déterminer les profondeurs d'enfouissement par une approche basée sur le risque, pour efficacement et économiquement protéger les câbles sous-marins.

ABSTRACT –A network of offshore cable is vulnerable to a wide range of potential hazards as it crosses the seabed. The most reliable form of cable protection is generally recognized to be burial below the seabed. The objective of this paper is to describe a methodology to determine the minimum burial depths using a risk based approach, in order to adequately and economically protect the cables from the shipping and fishing.

1. Introduction

Un réseau de câbles en mer (télécommunications, internet, câbles électrique pour les parcs éoliens en mer, etc.) est vulnérable à un large éventail de dangers potentiels dû au fait qu'il repose sur le fond marin.

Des phénomènes naturels tels que les tremblements de terre et les glissements de terrain peuvent endommager les câbles, mais la grande majorité des dommages sont causés par les activités humaines dans l'océan. Les deux dangers anthropiques les plus importants sont la pêche et les activités maritimes qui, additionnés, représentent deux tiers des accidents survenant sur des systèmes de câbles sous-marins (Nakamura *et al.* 1992; Shapiro *et al.* 1997); dans ces deux tiers, les activités d'ancrages des navires représentent de loin la plus forte menace pour les câbles.

Il existe différentes techniques pour protéger un câble : l'enterrer; le mettre dans un tube d'acier; le déposer dans une tranchée puis le couvrir avec du gravier ou du béton etc. Parmi ces techniques, la plus fiable est généralement reconnue comme étant celle de l'enfouissement du câble sous le fond marin (Allan, 1999).

Pour que les câbles sous-marins soient bien protégés contre les plus grands navires qui croisent leur route, comme recommandé par la plupart des méthodes existantes (Mole *et al.* 1997; Allan, 1999; Jongergauw *et al.* 2001), la profondeur d'enfouissement requise contre les dangers d'ancrage est potentiellement au-delà de ce qui est économiquement réalisable en utilisant des outils de tranchées commercialement disponibles.

Ce document décrit une nouvelle méthodologie basée sur le risque afin de déterminer les profondeurs d'enfouissement le long d'une route de câble pour le protéger des menaces liées aux activités d'ancrages et de pêche.

La méthode évalue l'exposition du câble aux risques liés à ces deux activités en considérant un certain nombre de paramètres tels que les durées d'ancrage ou de

navigation de navires à proximité du chemin de câble, la probabilité qu'un navire subisse une panne de moteur et/ou qu'il jette l'ancre en cas d'urgence, les profondeurs de pénétration d'ancres associées, etc.

2. Méthodologie

Les risques les plus importants pour les câbles sous-marins sont les risques liés aux dragages d'ancres, aux ancrages en situation d'urgence et aux activités de pêche.

Dans la méthodologie proposée, la route du câble est décomposée en différents tronçons (i.e. différents KPs) en fonction des conditions géologiques du fond marin et de la densité de bateaux présents. Pour chaque section on évalue le risque lié aux activités d'ancrage et de pêche.

Comme entrée à l'analyse de risque, une étude détaillée de l'activité maritime et de pêche en termes de nombre, type, taille et densité de bateaux ; de survenance d'ancrage ; de durées d'ancrages etc., doit être réalisée dans la zone d'études à partir des données AIS (*Automatic Identification System*). Cette étude permet de définir une grille de durées annuelles le long et autour du chemin du câble et dont chaque cellule contient la durée totale de bateaux s'ancrant/naviguant le long et à proximité du chemin du câble, par type et taille de bateaux.

2.1. Risque lié au dragage des ancres

Le modèle de risque lié au dragage des ancres estime la probabilité qu'un bateau drague son ancre à travers le chemin du câble dans une zone prédéfinie. Les durées d'ancrage sont utilisées comme données d'entrée en conjonction avec les pénétrations d'ancres, les données climatiques, les caractéristiques du fond marin et des bateaux.

La Figure 1 illustre la méthodologie du modèle de risque lié au dragage des ancres.

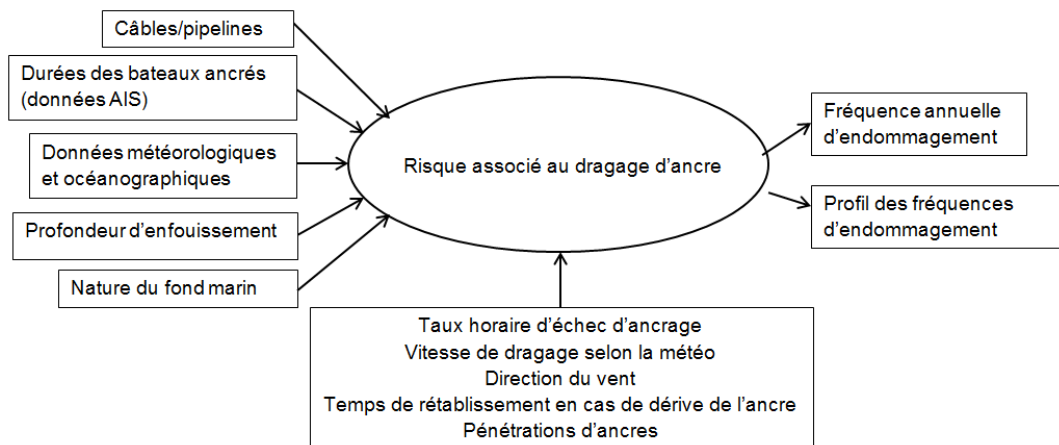


Figure 1: Illustration du modèle de risque lié au dragage d'ancres

Le dragage d'une ancre survient lorsqu'elle échoue à s'ancrer. Elle est alors draguée sur le fond marin et pénètre dans le sol jusqu'à atteindre une couche suffisamment résistante pour s'immobiliser. L'évaluation du risque associé aux opérations de dragage peut se décomposer comme suit :

- Calcul de la probabilité annuelle qu'un bateau drague son ancre ;
- Calcul de la probabilité que l'ancre soit draguée dans la direction du câble ;
- Calcul de la probabilité que les manœuvres pour arrêter le bateau échouent avant d'atteindre le câble ;

- Détermination de la fréquence de dragage d'ancre à travers le trajet du câble en faisant le produit des trois probabilités précédentes ;
- Calcul de la probabilité d'endommagement du câble par une ancre draguée;
- Fréquence annuelle d'endommagement du câble suite au dragage d'ancre sur son trajet.

Le calcul est effectué pour chaque état de la mer (calme, modéré et sévère) et sommé pour l'estimation de la fréquence totale.

2.2. Risque lié aux ancrages d'urgence

Le modèle de risque associé aux ancrages d'urgence combine la probabilité qu'un bateau naviguant au-dessus d'un chemin de câble ait une panne de moteur avec la probabilité qu'il jette ensuite l'ancre (basé sur la hauteur d'eau et la distance par rapport à la côte) pour calculer la fréquence d'ancrage d'urgence.

Le calcul peut se résumer aux étapes suivantes :

- Calcul de la probabilité annuelle de panne de moteur en tenant compte de la proportion de bateaux ayant un seul moteur et ceux en possédant plusieurs ;
- Calcul de la probabilité que le bateau jette l'ancre, qui est fonction du type et de la taille de bateau, de la hauteur d'eau et la distance par rapport à la côte ;
- Détermination de la fréquence d'ancrage d'urgence en combinant ces deux probabilités ;
- Calcul de la probabilité d'endommagement du câble dû à un ancrage d'urgence. Fréquence annuelle d'endommagement du câble suite à un ancrage d'urgence.

2.3. Risque lié à la pêche

Le principal risque sur les câbles sous-marins lié aux activités de pêche vient des engins de pêche qui peuvent interagir avec le câble, notamment pour la pêche de fond.

Les profondeurs de pénétrations des outils de pêche sont généralement très faibles par rapport aux pénétrations d'ancres de bateaux, de ce fait le risque sur les câbles sous-marins lié à la pêche est souvent négligeable par rapport aux risques liés aux activités d'ancrage de bateaux. De plus, les bateaux de pêche de par leur taille ne sont pas systématiquement et obligatoirement équipés de système AIS, ce qui ne permet pas d'avoir des informations détaillées sur le mouvement et la densité de ces bateaux, limitant ainsi l'utilisation d'une approche probabiliste.

Une profondeur d'enfouissement du câble de 0.60m est typiquement considérée comme suffisante pour protéger les câbles contre les engins de pêche (Shapiro *et al.* 1997; Linnane *et al.* 2000).

2.4. Ligne de menace et profondeur minimale d'enfouissement

Comme mentionné précédemment, le risque lié aux activités de pêche est généralement faible par rapport à celui associé aux ancrages de bateaux. Par conséquent les lignes de menace sont déterminées sur la base des résultats de l'évaluation du risque lié aux activités d'ancrages.

La ligne de menace est définie comme la profondeur de pénétration d'ancre de la plus grande taille de bateau de telle sorte qu'au moins 95% du risque global lié aux ancrages pour chaque tronçon du câble provienne de bateaux de plus petite taille.

Il est noté qu'un facteur de sécurité peut s'ajouter aux pénétrations d'ancres et/ou des engins de pêche, afin de pallier entre autres aux incertitudes liées aux données de sols et

à l'estimation de la taille des ancrages; à la non représentativité des données collectées sur l'activité des bateaux, par rapport aux durées de vie du câble, etc.

La ligne de menace en combinant avec le niveau de risque acceptable permet de recommander la profondeur minimale d'enfouissement le long de la route du câble.

3. Exemple de calcul

3.1. Risques dues au dragage d'ancre - Données d'entrée

Le projet consiste en l'étude d'enfouissement d'un câble d'export électrique pour des éoliennes offshore, le but de l'étude étant de déterminer la profondeur d'enfouissement du câble par l'approche décrite dans cet article.

Pour illustrer la méthodologie, nous estimons la fréquence d'endommagement du tronçon KP23-24 due au risque annuel lié au dragage d'ancre des bateaux'ancrant dans la cellule 5815 (Figure 2).

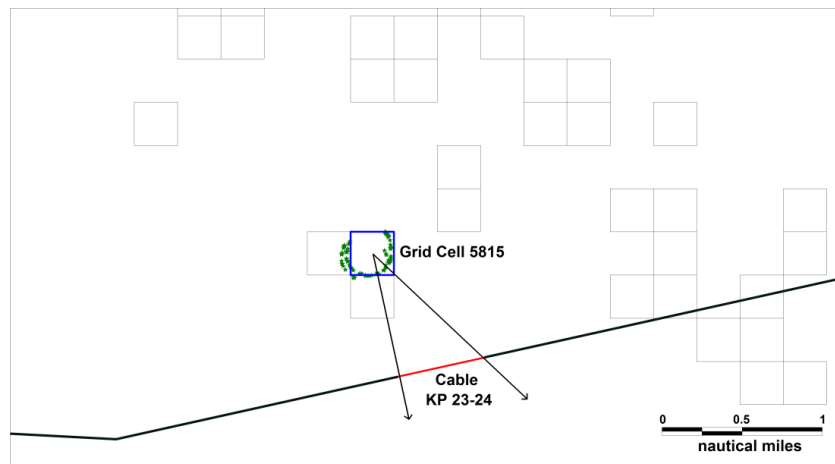


Figure 2 : Exemple de calcul – emplacement de la cellule (de durée) considérée

Les données d'entrée du calcul de risque associé au dragage d'ancres sont :

- Grille de durées: contient la durée totale d'ancrage de bateaux, par type et taille de bateaux.
- Facteur de tenue (HF): dépend de la nature des sols composant le fond marin (sable, argile, gravier, etc.). Plus le fond marin offre une bonne capacité de rétention, plus le coefficient de tenue qui lui est affecté est élevé. En général, le facteur de tenue varie entre 0,9 et 1,2.
- Taux horaire d'échec d'ancrage (AFR): dépend de l'état de la mer évalué en terme de probabilité de conditions météo calme, modérée et sévère, sur la base des données météorologiques et océanographiques. Les valeurs courantes sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4} (MCA, 2005; Allan, 2006; MAIB, 2008).
- Profondeur de pénétration d'ancre (APD): cela correspond à la pénétration maximale de l'ancre, dépendant des conditions de sols, de la géométrie et de la taille de l'ancre.

3.2. Fréquence annuelle de dragage d'ancre dans la cellule

La probabilité horaire pour qu'un bateau drague son ancre dans une cellule donnée de la grille de durées d'ancrage est donnée par la formule suivante :

$$\text{Probabilité horaire de draguer une ancre} = \frac{AFR}{HF} \times p \quad (1)$$

Où AFR est le taux horaire d'échec d'ancrage pour des conditions météo données (calme, modérée ou sévère), HF le facteur de tenue et p est la probabilité associée à la condition météo considérée.

Le taux d'échec d'ancrage pour des conditions météorologiques calmes est estimé à 6.5×10^{-6} et la probabilité d'avoir un temps calme est de 0.49. Un facteur de tenue de 0.9 a été considéré. Cela donne pour un temps calme une probabilité horaire de draguer l'ancre de 3.5×10^{-6} .

En multipliant cette valeur par le nombre d'heures d'ancrage du bateau par an (152.338 heures dans ce cas), on obtient la fréquence annuelle de dragage d'ancre dans la cellule considérée qui vaut donc 5.4×10^{-4} .

3.3. Probabilité que l'ancre soit draguée dans la direction du câble

La probabilité qu'un bateau drague son ancre dans la direction du câble dépend de la probabilité que le vent souffle dans cette direction. Pour la déterminer, on dessine 360 lignes par pas de 1° à partir du centre de la cellule considérée, puis on recense les directions interceptant le trajet du câble. La probabilité que le bateau drague son ancre dans la direction du câble est égale à la somme des probabilités que le vent souffle dans ces directions.

Pour la cellule considérée, le bateau drague son ancre dans la direction du câble pour un vent venant de la direction Nord-Ouest, spécialement pour des directions entre 314° et 347° par rapport au centre de la cellule.

A partir des données météorologiques et océanographiques, les probabilités que le vent vienne d'une direction à 300° , 330° et 0° par rapport au centre de la cellule considérée ont été estimées à 0.089357, 0.10241 et 0.10743 respectivement. La probabilité que le vent vienne de directions entre 314° et 347° est donc estimée comme suit:

$$P(\text{Vent}) = \frac{1}{30} \times 0.089357 + \frac{30}{30} \times 0.10241 + \frac{3}{30} \times 0.10743 = 0.1161 \quad (2)$$

3.4. Probabilité que le bateau ne recouvre pas

Lorsqu'une ancre échoue à s'ancrer et commence à draguer, cela est par exemple perceptible à travers des changements dans le mouvement du bateau. Des manœuvres sont donc entreprises (jeter une seconde ancre ou arrêter les moteurs par exemple) pour éloigner le bateau de tout danger. La probabilité que ces mesures n'aboutissent pas avant que l'ancre n'atteigne le trajet du câble est donnée par la formule suivante :

$$\text{Probabilité de non recouvrement} = \exp\left(-\frac{D}{V \cdot TR}\right) \quad (3)$$

Où D est la distance par rapport au câble, V est la vitesse de dérive de l'ancre et TR est le temps nécessaire pour recouvrir le bateau.

La distance entre la cellule considérée et le câble est de 0.829 miles nautiques. La vitesse de dérive de l'ancre est estimée à 1 nœud pour des conditions météo calmes et le temps nécessaire pour recouvrir le bateau est pris à 15 minutes. Cela donne une probabilité de non recouvrement de 0.036.

3.5. Fréquence annuelle de dragage d'ancre sur le trajet du câble

En faisant le produit des trois probabilités précédemment déterminés, on obtient une fréquence de dragage d'ancre sur le trajet du câble de 2.3×10^{-6} pour une mer calme.

De la même façon, les fréquences pour des conditions météo modérée et sévère ont été estimées respectivement à 3.4×10^{-5} et 0.0 (la probabilité d'avoir une météo sévère est de 0 dans la zone étudiée), ce qui nous fait une fréquence de dragage d'ancre sur le trajet du câble de 3.63×10^{-5} pour la section du câble considérée.

3.6. Fréquence annuelle d'endommagement du câble suite au dragage d'ancre

En supposant qu'une ancre soit draguée sur le chemin du câble, la probabilité de l'endommagement dépend de la profondeur de pénétration de l'ancre, du facteur de fond pour chaque segment le long de la route du câble et de la profondeur d'enfouissement du câble. La probabilité d'endommagement est donnée par:

$$\text{Probabilité d'endommagement} = \frac{1}{\pi} \left(\arctan(3(\text{APD} \times \text{SF} - \text{BD})) + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

APD est la profondeur de pénétration maximale de l'ancre, SF est le facteur du fond marin (pris égal à 1) et BD est la profondeur d'enfouissement du câble.

A partir de la géométrie de l'ancre du bateau s'ancrant dans la cellule considérée et des données de sol, une pénétration maximale de 1.66m a été calculée en suivant la procédure décrite par Puech *et al.* (1978). On en déduit donc par exemple pour une pénétration d'ancre de 2m, une probabilité d'endommagement du câble de 0.2468.

En multipliant cette probabilité par la fréquence de dragage d'ancre sur le trajet du câble, on obtient pour le tronçon KP23-24 (et pour le bateau s'ancrant dans la cellule 5815), une fréquence annuelle d'endommagement suite au dragage d'ancre sur le chemin du câble de 8.96×10^{-6} . Dans le cas où la cellule contient plusieurs bateaux s'ancrant, la fréquence d'endommagement est évaluée pour chacun des bateaux comme décrit précédemment, puis sommée pour déduire le risque lié à la cellule.

La fréquence totale d'endommagement du tronçon KP23-24 de câble due au dragage d'ancres de bateaux s'ancrant dans la zone étudiée (composée de l'ensemble de cellules de la grille de durées) est la somme des fréquences associées à chaque cellule.

En faisant le même calcul pour d'autres tronçons du câble (autres KPs) on peut définir un profil de risque le long du câble comme représenté en Figure 3.

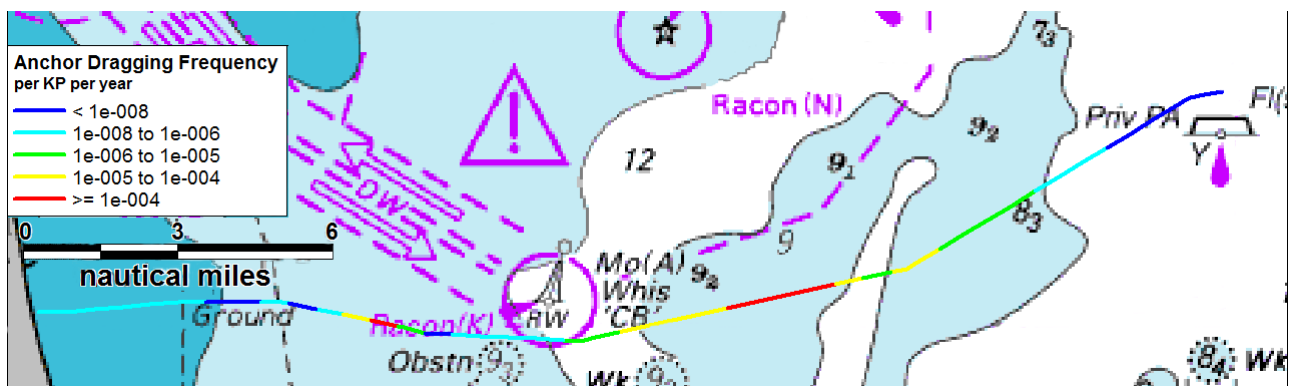


Figure 3: Profil de risque lié au dragage d'ancre -cas du câble non enfouie (BD = 0m)

Le Tableau 1 présente la fréquence globale d'endommagement obtenue pour le câble d'export, qui est la somme des fréquences d'endommagement de chaque tronçon, pour différentes profondeurs d'enfouissement du câble considérées.

Tableau 1. Fréquences d'endommagement du câble suite au dragage d'ancre

Profondeur d'enfouissement (m)	Fréquence d'endommagement (par an)	Période de retour (ans)
0	3.58×10^{-3}	279
1	2.46×10^{-3}	406
2	6.39×10^{-4}	1565

3.7. Risques dues aux ancrages d'urgence

De la même manière on calcule aussi les fréquences d'endommagement du câble lié aux ancrages en situation d'urgence pour chaque tronçon du câble, ainsi que le profil de risque associé.

3.8. Constructions de la ligne de menace et recommandation sur la profondeur minimale d'enfouissement

La ligne de menace du projet est présentée à la Figure 4. La ligne de menace est définie comme la profondeur de pénétration d'ancre de la plus grande taille de bateau de telle sorte qu'au moins 95% du risque global lié aux ancrages pour chaque tronçon du câble provienne de bateaux de plus petite taille.

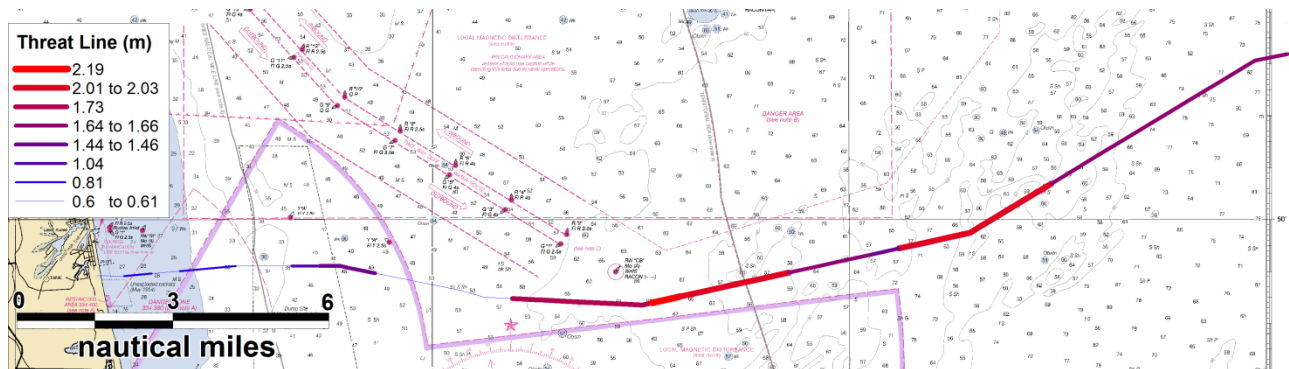


Figure 4: Ligne de menace du projet

La ligne de menace combinée ensuite avec un niveau de risque spécifique permet de recommander la profondeur minimale d'enfouissement le long de la route du câble afin de protéger les câbles contre des menaces liées aux activités d'ancrages (et de pêche).

Le choix du risque acceptable relève de la décision du constructeur. DNV-OS-F101 (DNV, 2012) recommande des valeurs de fréquences annuelles acceptables de 0.01 à 0.0001 correspondant à des périodes de retour de 100 ans à 10000 ans.

4. Conclusions

Ce papier a pour but de présenter une méthode probabiliste basée sur l'évaluation du risque pour déterminer la profondeur minimale d'enfouissement des câbles sous-marins

afin de les protéger efficacement et économiquement contre des menaces liées aux activités d'ancrages et de pêche.

La méthode permet, pour une profondeur d'enfouissement du câble et une pénétration d'ancre donnée, d'estimer une fréquence annuelle d'endommagement du câble par dragage d'une ancre ou suite à un ancrage d'urgence. A cette probabilité peut être associée une période de retour d'endommagement du câble.

Ainsi en se fixant un niveau de risque acceptable, on peut déduire la profondeur minimale d'enfouissement du câble correspondante. Cela évite aux exploitants de câbles sous-marins de protéger leur câble contre les plus grands bateaux, ce qui peut conduire à des profondeurs d'enfouissement au-delà de ce qui est économiquement réalisable avec les outils de tranchées existants.

Il est à noter que la méthode proposée dans cet article fournit des recommandations sur les profondeurs minimales d'enfouissement. Cependant ces profondeurs peuvent être dépassées par des événements de probabilité relativement faible, par conséquent le développeur doit envisager la possibilité de dépassement des profondeurs d'enfouissement finales considérées et ainsi mettre en place un suivi régulier du câble pour s'assurer du maintien des profondeurs d'enfouissement.

5. Remerciements

Les auteurs remercient les acteurs du projet mentionné pour leur autorisation à publier les résultats. Ils remercient également Dr. Alain Puech et Mr. Alexandre Seban (Fugro) pour leur contribution en tant que relecteurs pendant la préparation de la communication.

6. Références bibliographiques

- Allan, P.G. (1999) Selecting Appropriate Cable Burial Depths – A Methodology. *Submarine Communications, Cannes*.
- Allan, R. (2006) *Non-Natural Marine Hazards Assessment*. Ltd Naval Architects.
- DNV (2012) *Offshore Standard DNV-OS-F101, Submarine Pipeline Systems*.
- Jongergauw, M. et al. (2001) Industry developments in Burial Assessment surveying. *SubOptic 2001, Kyoto*.
- Linnane, K., Ball, B. and Mundy, B. (2000) A Review of Potential Techniques to Reduce the Environmental Impact of Demersal Trawls. *Irish Fisheries Investigations (New Series) No. 7*.
- MAIB (2008) Marine Accident Investigation Branch. *Report on the Investigation of Young Lady*.
- MCA (2005) FSA of Class IV/V/VI Passenger Ships, CBA for Inland Waterways. *Maritime and Coastguard Agency, Appendix V*
- Mole, P., Featherstone, J. and Winter, S. (1997) *Cable Protection - Solutions through New Installation and Burial Approaches*. Chelmsford: Cable & Wireless Marine.
- Nakamura, M, Nanayakkara, N., Hatazaki, H. and Tsuji, K. (1992) Reliability analysis of submarine power cables and determination of external mechanical protection. *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, 895–902*.
- Puech, A., Meunieur, J. and Paillard, M. (1978) Behaviour of Anchors in Different Soils. *OTC 3204, Houston*
- Shapiro, S., Murray, J., Gleason, R., Barnes S., Eales B., and Woodward, P. (1997) Threats to Submarine Cable. *San Francisco: SubOptic'97*.