

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

FACULTÉ NAUTIQUE

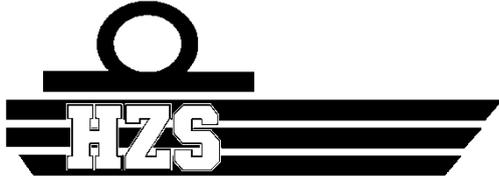
Etude de la pose et de la réparation des câbles sous-marins

Maxime Schoorens

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de
Master en Sciences Nautiques

Promoteur : Christophe Sensen

Année académique : 2019-2020



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

FACULTÉ NAUTIQUE

Etude de la pose et de la réparation des câbles sous-marins

Maxime Schoorens

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de
Master en Sciences Nautiques

Promoteur : Christophe Sensen

Année académique : 2019-2020

Avant-propos

Après mûres réflexions quant à la sélection du sujet pour mon travail de fin d'études, mon choix s'est porté, définitivement, sur la pose et la réparation des câbles sous-marins, ainsi que tous les aspects liés à ces opérations tels que les lois, l'écologie ou encore l'avenir des câbles.

Ce thème me paraît intéressant car j'ai pu m'apercevoir qu'il était méconnu du grand public mais également par une bonne partie de mes camarades de classe.

J'ai donc tenu à faire découvrir à ces derniers le savoir-faire et tout ce qui se réfère derrière les navires de type câblé.

J'ai réalisé cet écrit à l'aide de documents provenant de l'ICPC et de conventions attribuées aux câbles telles que « la *Convention Internationale Pour La Protection Des câbles Télégraphe Sous-marins (1884)* » et « la *Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (1982)* », qui publient des présentations et des documents de qualité sur leur site internet.

Merci à l'officier Y. Delegrange, l'officier M. Massart et le Lieutenant L. De Meulemeester de m'avoir accordé une interview, ce qui m'a permis d'apporter leur expérience à mon travail.

Les journalistes qui ont réalisé des reportages et des interviews dans ce domaine m'ont été, également, très bénéfique.

Enfin, Je tiens à remercier l'école supérieure de navigation d'Anvers qui met à disposition des ouvrages très intéressants, une bonne infrastructure et un bon encadrement.

Merci, aussi, aux différents professeurs qui m'ont prodigué leur savoir durant tout mon cursus scolaire.

Résumé

Les câbles sous-marins ne datent pas d'hier. En effet, le tout premier câble télégraphique transatlantique a vu le jour en 1858. Depuis, les technologies ont considérablement évoluées et des câbles coaxiaux puis à fibre optique sont apparus dans le siècle qui a suivi.

La technique utilisée pour l'installation de ces lignes s'est particulièrement développée. Aujourd'hui les câbles ne sont plus simplement déposés sur le fond marin. Ainsi, préalablement, une étude de parcours doit être réalisée afin de pouvoir déterminer au mieux la route qu'ils suivront. Cette démarche permet d'éviter tout risque de dégâts sur la nature du fond mais également sur l'activité de la pêche et des ancres des navires.

A l'aide des résultats de cette activité, on peut définir deux méthodes de poses différentes en fonction de la profondeur à laquelle le câble va se trouver.

La première consiste à enfouir la ligne à l'aide d'une charrue marine dans les eaux peu profondes. Quant à la seconde, plus rapide, elle permet tout simplement de déposer le câble sur le fond marin, dans les eaux dites profondes.

Toutefois, ce type de projet doit répondre aux normes et critères des Etats côtiers ainsi que des Institutions Internationales qui sont en charge de la pose et la protection des câbles sous-marins. Il doit également tenir compte de son impact potentiel sur l'environnement aquatique, ainsi que sur le future du câble une fois sa durée de vie dépassée ou s'il devient obsolète.

Abstract

Submarine cables are not new, the very first transatlantic telegraphic cable was born in 1858 but since then the technologies considerably evolved and coaxial cables and optical fibers cables appeared in the decades following.

The technique used to install these lines has evolved as well, today cables are not simply laid on the sea bottom but a whole route is made to determine the best path for the cable, to avoid every risk of damages with the nature of the bottom but also fishing activities and ships' anchors.

By means of the results of the survey, we can define two different laying methods according to the sea depth in which the cable will be installed.

The first one consists in burying the line by means of a marine plow in shallow waters and the second one, which is faster allows to simply lay the cable on the seabed when it takes position in deep waters.

This kind of project has to answer the standards and criteria of coastal States as well as International Institutions which handle the installation and the protection of sea cables, but it also has to take into account its potential impact on marine environment, as well as the submarine cable's future once it's lifespan is over or when it becomes obsolete.

Table des matières

Avant-propos	i
Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xi
Liste des abréviations	xiii
Introduction	xv
1. D'un point de vue historique	1
2. Le câblier	3
2.1 La charrue sous-marine	5
2.2 Le ROV.....	10
2.3 L'ensouilleuse à roue trancheuse.....	14
2.4 L'ensouilleuse à chaîne excavatrice.....	15
2.5 Le traineau à jets d'eau	16
3. Les câbles	17
3.1 Les utilisateurs	17
3.2 Les propriétaires	18
3.3 Types de câbles.....	19
3.4 Télécommunication	21
3.4.1 La fibre optique	21
3.5 Electricité	23
3.5.1 Isolation	23
3.5.2 Tableau comparatif	26
3.6 Les répéteurs	27
3.7 Symboles sur les cartes nautiques.....	28
4. Etude du parcours	29
4.1 La campagne océanographique.....	30
4.1.1 Sondage par multifaisceaux	31
4.1.2 Sonar à balayage latéral	32
4.1.3 Carottage.....	33
4.1.4 Nettoyage du tracé.....	33
4.2 En eaux peu profondes.....	34

4.3	En eaux profondes	35
4.4	En eaux polaires.....	36
5.	L'installation	37
5.1	La pose simple	38
5.1.1	Principes de base.....	39
5.2	La pose avec charrue	41
6.	La réparation.....	47
6.1	Maintenance.....	47
6.2	La procédure.....	48
6.3	Dédoublage d'une ligne	50
7.	Comment réduire le risque de dégâts sur un câble	51
8.	Point de vue juridique	55
8.1	Le droit de la mer.....	55
8.1.1	Protections légales	58
8.2	Assurance maritime.....	59
8.3	Espionnage.....	60
9.	Ecologie	63
9.1	Impact sur le milieu	64
9.1.1	Nuisances causées par le bruit.....	65
9.1.2	Nuisances causées par les champs électromagnétiques	66
9.1.3	Risque de contamination par les câbles imprégnés de masse	66
9.1.4	Perturbations.....	67
9.2	Incidents avec la faune marine.....	68
9.3	Câble en fin de vie	69
9.3.1	Afin de décider de la dépose ou du maintien d'un câble sur le fond	70
9.3.2	Si la décision de maintenir un câble redondant pour un futur usage ou d'abandonner un câble hors service a été prise	71
10.	Le futur	73
10.1	Sismologie	74
10.2	Une seconde vie.....	76
11.	Interviews	77
	Conclusion.....	I
	Bibliographie	III

Liste des tableaux

Tableau 1 Description de cinq types de câbles sous-marins.....	26
Tableau 2 Profondeurs et vitesses d'ensouillage d'une charrue en fonction du type de sol ..	43

Liste des figures

Figure 1	Câblier "Isaac Newton"	4
Figure 2	Éléments techniques de la charrue.....	5
Figure 3	Charrue sous-marine.....	9
Figure 4	ROV.....	10
Figure 5	ROV vu de l'arrière	12
Figure 6	Outil arrière.....	13
Figure 7	Outil avant.....	14
Figure 8	Ensouilleuse à roue trancheuse	14
Figure 9	Ensouilleuse à chaîne excavatrice.....	15
Figure 10	Traineau à jets d'eau	16
Figure 11	Câble de fibre optique avec différentes protections	21
Figure 12	Câble de fibre optique.....	22
Figure 13	Structure d'un câble extrudé.....	24
Figure 14	Structure d'un câble imprégné de masse.....	26
Figure 15	Répéteurs	27
Figure 16	Symboles sur les cartes nautiques	28
Figure 17	Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux.....	31
Figure 18	Principe de fonctionnement du sonar à balayage latéral	32
Figure 19	Tuyau en fonte permettant la protection du câble	34
Figure 20	Action du stamukha sur le câble sous-marin	36
Figure 21	Principe de base	39
Figure 22	Angle α pour un câble lourd et un câble léger.....	40
Figure 23	Ensouillage par charrue.....	42
Figure 24	Matelas et tube de protection	45
Figure 25	Dédoublage d'une ligne.....	50
Figure 26	Carte "KIS-ORCA" dans la zone Mer du Nord/Manche	53
Figure 27	Limites maritimes de juridiction de l'Etat côtier	56
Figure 28	Carte et vue en perspective du câble « MEUST-NUMer » et environnement du fond marin.....	75

Liste des abréviations

- **AIE** : Analyse de l'Impact sur l'Environnement
- **AIS** : Automated Identification System - Système d'identification Automatique
- **ALRS** : Admiralty List of Radio Signal
- **DGPS** : Differential Global Positioning System – GPS différentiel
- **GMDSS** : Global Maritime Distress and Safety System – Système Mondial de Détresse et de Sécurité en Mer (SMDSM)
- **GPS** : Global Positioning System (Assistant de navigation)
- **ICPSC** : International Convention for the Protection of Submarine Cables – Convention Internationale pour le Protection des Câbles Sous-marins
- **ISO** : International Organisation for Standards – Organisation Internationale de Normalisation
- **OHI** : Organisation Hydrographique Internationale
- **ROV** : Remotely Operated Vehicle – Véhicule Télécommandé
- **SCIG** : Submarine Cable Improvement Group - Groupe d'Amélioration des Câbles Sous-marins
- **UNCLOS**: United Nations Convention for the Law Of the Sea – Convention Internationale pour le Droit de la Mer
- **UKCPC** : United Kingdom Cable Protection Committee -Comité de Protection des Câbles du Royaume-Unis
- **VLCC** : Very Large Crudeoil Carrier – Très Grand Pétrolier Transporteur de Pétrole Brut

Introduction

Dans le cadre de mon travail de fin d'études, je vais analyser un domaine méconnu du grand public, à savoir, les câbles sous-marins.

Bien que dissimulés dans les profondeurs océaniques, ils sont d'une importance capitale dans un monde où les communications sont devenues indispensables et où l'énergie électrique est appelée à prendre une place importante dans notre société.

Dans ce domaine, ce ne sont pas majoritairement les satellites qui font le relais mais les câbles sous-marins qui diffusent 95% des appels internationaux, des messages et des connexions sur Internet (« Câbles sous-marins : du green dans le grand bleu » 2015). De plus, ils effectuent des transactions financières quotidiennes pour une valeur de plus de 10 000 milliards de dollars. Toute perturbation entraînerait une réduction catastrophique des flux de capitaux. (« Titans des mers - Le Tyco Resolute » 2008)

Dans le premier chapitre, je vais présenter et développer l'histoire des premiers câbles sous-marins et leur rôle dans l'histoire pour poursuivre ma réflexion dans le second chapitre sur les navires actuels, leurs équipements et les techniques actuellement utilisées.

Le troisième point aura pour thème l'explication des types de câbles utilisés dans ce domaine, ainsi que l'explication de la fibre optique et des répéteurs.

La quatrième partie sera consacrée à la compréhension de la définition du trajet entrepris ou à entreprendre à l'aide de la campagne océanographique ou comment choisir la route la plus sûre pour le câble.

L'installation en « pose simple » ou avec l'aide de la charrue mais aussi la réparation et le dédoublement du câble seront expliquées en détails dans les chapitres cinq et six.

Pour pouvoir éviter d'être impliqué dans un accident avec une ligne, des directives sont à disposition des officiers et des pêcheurs, c'est ce que nous verrons dans le chapitre sept.

Le point de vue juridique d'un tel projet vis-à-vis des autres navires et de la loi de la mer sera débattu dans le chapitre huit, ainsi que les assurances maritimes.

Un autre sujet important au 21^{ème} siècle est sans aucun doute l'écologie. Nous étudierons l'impact des câbles sur le milieu aquatique, leur avenir lorsqu'ils sont en fin de vie et leur seconde vie que nous traiterons dans les chapitres neuf et dix.

Et pour terminer, je vais mener des interviews avec des spécialistes.

Pour parvenir à mes objectifs, je me suis intéressé sur des recherches effectuées sur les sites des compagnies spécialisées dans le domaine, les revues maritimes et scientifiques ainsi que sur les conventions et les organismes consacrés aux câbles sous-marins.

1. D'un point de vue historique

Tout commence en 1837 au nord de Londres lorsque Charles Wheatstone¹ réalisa un système composé d'aiguilles aimantées réagissant au courant électrique qui les faisaient bouger vers des lettres. Pour la première fois, une liaison télégraphique filaire fut réalisée, sur une distance de deux kilomètres. (Verney 2014)

Dans les années qui ont suivi, la technique a été perfectionnée notamment par l'invention du « Code Morse » par Samuel Morse et la découverte de la gutta-percha².

En 1858, le premier câble télégraphique transcontinental sous-marin fut mis en service entre l'Irlande et Terre-Neuve au Canada sur une distance de 4 200 km par deux navires, l'*Agamemnon* et le *Niagara*, reconvertis en câbliers. Le message télégraphique officiel envoyé par la reine Victoria³ au président américain James Buchanan⁴ était long de 509 lettres. Il a mis 17 heures et 40 minutes pour être reçu, soit une connexion avec un débit de 2 mots par minute. Ce gain de temps battait largement les 10 jours que nécessitait pour la traversée en bateau à vapeur pour remettre le courrier aux destinataires (Andrea 2015).

Entre les années 1858 et 1911, le vaste Empire colonial britannique nécessitait une communication et les entrepreneurs britanniques ont financé la construction, la pose et l'entretien des premiers câbles télégraphiques sous-marins. La communication télégraphique signifiait que les navires pouvaient être chargés de ramasser des cargaisons, que les gouverneurs des différentes colonies pouvaient être en contact avec Londres et que la Grande-Bretagne pouvait coordonner ses unités militaires.

Au cours des années 1860 et 1870, la Grande-Bretagne a étendu son réseau télégraphique par câbles sous-marins vers l'est (la mer Méditerranée et l'océan Indien). En 1870, un câble reliant Bombay à Londres a été achevé par un consortium de quatre compagnies de câbles et en 1872, ces quatre sociétés se sont combinées pour former la « Eastern Telegraph Company ». (« Eastern Telegraph Co - Graces Guide »)

¹Charles Wheatstone : Physicien et inventeur anglais, 1802-1875.

²Gutta-percha : Latex inélastique servant d'isolant à l'eau.

³Reine du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande de 1837 à 1901.

⁴ 15^{ème} président des Etats-Unis de 1857 à 1861.

Ce n'est qu'en 1956 qu'apparut le premier câble sous-marin téléphonique coaxial transatlantique entre la France, l'Angleterre et les Etats-Unis. La technique rencontrant un vif succès, de nombreux câbles virent le jour, un peu partout dans le monde. Ils se sont modernisés, à nouveau, vers 1986 où des câbles sous-marins à fibre optique furent installés entre le Royaume-Unis et la Belgique. (Verney 2014)

Aujourd'hui, il existe près de 448 câbles de télécommunications sous-marins et 30 câbles d'alimentation d'interconnexion sous-marins en service. En 2019, il y avait environ 1,2 million de kilomètres de câbles sous-marins en service, soit environs trois fois la distance entre la terre et la lune (« Plongée au coeur d'Internet : cinq chiffres pour tout savoir des câbles sous-marins »). Certains de ces câbles sont relativement courts, comme la section "CeltixConnect" qui s'étend sur 131 kilomètres et qui connecte l'Irlande au Royaume-Unis (« CeltixConnect-1 »). A contrario, il y en a de plus longues comme "Asia America Gateway" d'une étendue de 20 000 kilomètres (« Asia-America Gateway (AAG) Cable System | Submarine Cable System »). Grâce à ces installations ingénieuses, nous pouvons capter internet sur nos appareils numériques et joindre n'importe qui dans le monde.

Qu'en est-il des satellites alors ?

Ceux-ci sont parfaits pour certaines applications. Ils alimentent les zones dépourvues de câbles à fibre optique mais également ils sont utiles pour distribuer le contenu d'une source vers plusieurs emplacements. Ils ont néanmoins une capacité bit à bit⁵ supérieure aux câbles. Toutefois, ces derniers permettent une capacité de transport de données nettement supérieure avec un coût inférieur à celui des satellites. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

La « Commission Fédérale des Communications des Etats-Unis » indique dans ses statistiques, que les satellites ne représentent que 0,37 % de la capacité internationale des Etats-Unis. (« FederalCommunicationsCommission »)

⁵Calcul manipulant les données directement au niveau des bits

2. Le câblier

Un navire poseur de câbles, nommé aussi navire hauturier, est utilisé pour l'implantation de câbles sous-marins utiles aux télécommunications et à l'électricité.

Les câbliers ne sont pas aussi imposants que certains ULCC⁶ ou autre porte-conteneurs Triple E⁷ car leur longueur maximale n'est que de 157 mètres avec un chargement n'excédant pas les 9 000 tonnes. (« World's largest cable-laying vessel joins ABB »)

On peut les distinguer notamment par leur grande poulie à câble nécessaire au guidage du câble sur la poupe et/ou la proue. L'avantage comparé à d'autres navires, est qu'ils sont beaucoup plus maniables. Grâce à leur équipement de positionnement dynamique très perfectionné, ils peuvent poser un câble avec une haute précision à des profondeurs atteignant les 8000 mètres. (« Secrets of Submarine Cables | NEC »)

Des officiers spécialisés en positionnement dynamique munis de leurs ordinateurs, sont capables de régler avec justesse la puissance et la direction des propulseurs azimutaux. Ce type de propulseur combine une hélice et un gouvernail. Il est placé sous la coque à l'avant ou à l'arrière du navire. L'ensemble du mécanisme est capable de pivoter autour d'un axe vertical, ce qui lui permet de délivrer de la poussée dans toutes les directions. Le bateau est alors très manœuvrable, même à faible vitesse. On retrouve, principalement, ce système sur les navires de petite taille comme les yachts, les navires de recherches ou encore les navires de croisières.

Les navires câbliers sont capables de poser, enfouir, réparer et enlever des lignes entières grâce aux différents outils installés à bord, tels qu'une charrue ou encore un ROV⁸ équipé de bras articulés et de caméras.

En règle générale, ce type de navire n'est pas réservé uniquement à la pose de câbles, il est multifonctionnel et peut être transformé pour différentes tâches comme l'installation de roches sous-marines, l'excavation de tranchées et parfois, il peut même servir de navire

⁶Ultra Large Crude Carrier : pétrolier > 320 000 tonnes et 380 m de long

⁷Porte-conteneurs géant : > 18 000 TEU, > 197 000 tonnes et 400 m de long

⁸Anglais: « Remotely Operated Vehicle », Véhicule Télécommandé.

océanographique. (« Isaac Newton: With 63 Km of Cable in One Go the World's Largest Cable-Laying Vessel | Jan De Nul Group » 2017)

Tout cela dépend des caractéristiques souhaitées par l'armateur et le contrat passé avec une autre entreprise pour la réalisation finale d'un projet préalablement discuté.

Pour la configuration de pose, les câbles sont enroulés dans une cuvelle. Il s'agit d'une bobine horizontale tournante qui se trouve sur le pont (cf. Figure 1). Mais il peut y en avoir une deuxième dans la cale afin d'installer des câbles de grande longueur atteignant parfois 63 km (« Isaac Newton: With 63 Km of Cable in One Go the World's Largest Cable-Laying Vessel | Jan De Nul Group » 2017).

Au-dessus des cuves de stockage se trouve le pont de travail. C'est un espace ouvert, très grand et très long, qui mène vers la poupe du navire. On y trouve des goulottes, sécurisées par des filets de sécurité, par lesquelles sortent les câbles en direction de la mer.

Tout le long de ce pont se trouve un parcours de machines de tractions permettant au câble de s'extraire lentement du navire et de manière à contrôler la tension.

Dans ce hangar, on trouve le stockage des répéteurs et des espaces de travail comme les postes de soudure où sont réparés les câbles défectueux, notamment lors des opérations de repêchage et maintenance.

En se dirigeant vers le pont arrière, on arrive dans la zone où les équipes techniques dirigent le câble au travers de davieres lors de la pose. On y trouve également des treuils et des grues permettant la mise à l'eau de la charrue et du ROV. ("La pose de câbles sous-marins à bord du René Descartes" - Le Gall 2015)



Figure 1 Câblier "Isaac Newton"

Source : Jan De Nul

2.1 La charrue sous-marine

La charrue est l'un des éléments indispensables lors de la pose de câbles sous-marins. Sa masse peut varier entre 17 et 35 tonnes. Cette différence s'explique par le fait que les charrues légères sont plus faciles à tracter. Cependant, elles supportent difficilement les fortes tractions dues à une résistance plus importante du fond marin. Elles sont, aussi, sujettes aux raisons purement économiques. Au niveau des dimensions, la charrue moyenne a une longueur de 10 m, pour 5 m de largeur et 5 m de hauteur. (« Ploughs for Subsea Cable Burial - Underwater Trenching »)

Lors de son utilisation, la charrue est remorquée par le navire grâce à un câble de remorque et une source d'alimentation électrique fournie par un ombilical de 35 kW. Le tout est contrôlé par une cabine de pilotage située à distance. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

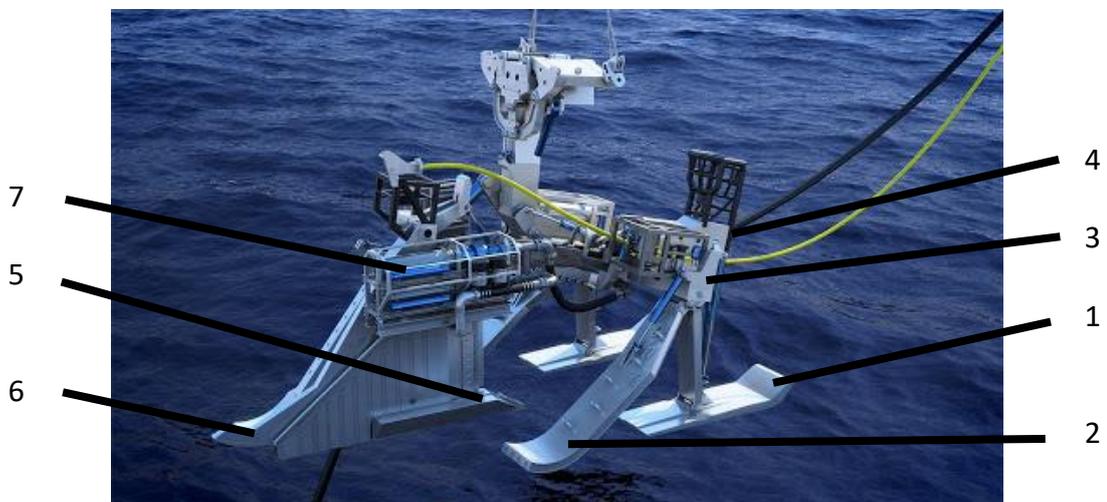


Figure 2 Eléments techniques de la charrue

Source : Adapté de : Soil Machine Dynamics Ltd (SMD)

Du point de vue technique, l'engin est composé de différents éléments tels que (Grinsted et Reece) (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AsoilACSM ») :

➤ **Des patins (1)**

Ils garantissent une bonne stabilité et un déplacement régulier sur les obstacles qui se présentent à elle.

➤ **Des stabilisateurs (2)**

Ils sont montés sur l'arrière et disposent d'une hauteur réglable afin d'adapter la profondeur du sillon et gérer les contraintes qui se présentent à la charrue. Ils servent de complément aux patins.

➤ **Un châssis (3)**

Extrêmement solide, il est capable de supporter des forces pouvant aller jusqu'à 150 T. Il forme la structure principale de la charrue.

➤ **La goulotte d'entrée (4)**

Elle se situe tout à l'avant et constitue l'élément via lequel le câble entre dans la charrue. Plusieurs instruments vitaux y sont fixés tels que les caméras, le sonar, le compas ou encore des lampes.

➤ **La barre de traction**

Egalement appelée « **arceau** », elle sert à fixer les deux brides du câble de traction qui forment une patte d'oie et qui sont capables de supporter de très fortes tensions. En déplaçant, latéralement, le point de traction de la charrue, on peut la faire changer de route.

➤ **Le soc (5)**

Sur le centre arrière, on retrouve une puissante lame appelée « **soc** », qui sur certains modèles dispose d'une hauteur réglable permettant d'ajuster la profondeur du sillon dans lequel le câble sera déposé.

Pour faciliter l'ensouillage dans les sols durs et pour recouvrir la souille plus rapidement, on utilise principalement un soc étroit. Les charrues américaines et anglaises, se différencient, car elles sont souvent équipées de la technologie « jetting ».

Cette méthode consiste à projeter des jets d'eaux à haute pression via des buses. Cette action facilite la formation de la tranchée. (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

D'autres charrues peuvent quant à elles, être munies d'un soc vibrant pour les fonds composés de galets ou autres petites roches. Le soc est pourvu d'une dent à l'avant qui facilite la pénétration et la perforation du sol. (Brown et al. 2012)

➤ **Le presseur (6)**

C'est un bras articulé passant au-dessus du soc. Il sert à exercer une légère pression sur le câble afin d'empêcher la sortie de ce dernier. Il permet, aussi, le réglage de la profondeur de l'ensouillage. Cet élément important se situe à l'arrière de la charrue.

➤ **Le système hydraulique (7)**

Il se compose d'un moteur électrique, d'accumulateurs, de vérins, de flexibles, d'un dépresseur, de distributeurs, de filtres et de réfrigérants. Il est muni d'une pompe qui alimente les distributeurs et qui déterminent le positionnement des éléments mobiles.

➤ **L'instrumentation**

Elle se compose de capteurs pour la position, la pression, la tension, la température, l'inclinaison. Elle est pourvue d'un sonar qui permet la détection des obstacles, d'un compas et d'un échosondeur.

➤ **La machine à câbles**

On la trouve sur certaines marques de charrues. Elle garde une tension constante et minimale sur le câble. Cela évite que le câble s'échappe de la souille en cas de distension. Le système va s'autoréguler en faisant varier la vitesse de la machine en fonction de la valeur de la tension résiduelle.

Dans les phases où elle est utilisée, le chargement du câble est effectué manuellement lorsque la charrue est sur le pont du navire. La mise à l'eau s'effectue à l'aide d'une grue et d'un treuil muni d'un câble en acier.

Le câble, qui a été préalablement préparé, entre par sa bouche, passe à travers la lame puis est enfoui dans le fond marin par une plaque métallique.

La charrue creuse, alors, une souille d'une profondeur pouvant aller jusqu'à 3 mètres, dans laquelle le câble sera déposé et enfoui. Cette disposition implique des ancres et des chaluts dans les zones plus risquées.

Lors de l'utilisation, un pilote la télécommande depuis une salle de contrôle. Il dirige la charrue à l'aide d'une manette, tout en suivant les images que renvoient les caméras sous-marines et les capteurs. Dès qu'un changement de cap est nécessaire, l'opérateur va déplacer le point de traction ou régler la différence de hauteur entre les stabilisateurs et les patins. La création d'un angle d'inclinaison peut, ainsi, faire changer le cap de la charrue.

L'opérateur veille, également, à garder un angle de traction variant entre 10 et 25°, dépendant du type de fond, de la difficulté de pénétration, de la pente ou encore de la profondeur opérationnelle. (« Titans des mers - Le Tyco Resolute » 2008) (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)



Figure 3 Charrue sous-marine

Source : Royal IHC

Cet engin, comme nous pouvons voir ci-dessus, est capable d'atteindre des profondeurs allant jusqu'à 2 000 mètres et de poser à une vitesse moyenne de 0,6 nœuds.

Du point de vue dimensionnel (variant selon les modèles et la nature du fond rencontré), une charrue a une longueur variant de 2,50 à 15 mètres, une hauteur de 0,50 à 5 mètres et une largeur de 1,80 à 5 mètres, le tout pour un poids pouvant aller jusqu'à 35 tonnes. (« Titans des mers - Le Tyco Resolute » 2008) (« LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN - Installation de câbles sous-marins ») (« Orange Marine »)

Ses dimensions et son poids restent des inconvénients pour les opérations délicates.

Par exemple, lorsqu'elle se trouve dans une pente abrupte, les opérateurs doivent être très attentifs pour qu'elle ne perde pas son adhérence. Cela pourrait provoquer son renversement, ce qui lui causerait d'énormes dégâts et sectionnerait le câble lors de la pose.

Un autre problème est l'ensouillage dans des fonds de nature rocheux. Lors de la présence de dunes ou de pipelines, les modèles les plus perfectionnés sont incapables de fonctionner correctement. Le câble se retrouve exposé aux dangers dans les eaux peu profondes et nécessite, dans certains cas, l'ensevelissement à l'aide de roches. (« SubSea Cables - Cable Burial | KIS-ORCA » 2018).

2.2 Le ROV

Abréviation de l'anglais signifiant « Remotely Operated Vehicle », il est mieux connu sous le nom français de « Véhicule Sous-marin Télécommandé ». Ses dimensions moyennes sont de 4 m de long, 3 m de large et 3 m de haut, mais certains modèles plus puissant, utilisés pour faire des tranchées, du « jetting » ou des opérations dans des sols plus dur, peuvent être deux fois plus grand car ils ont besoin de plus de puissance. (« Subsea Engineering Service Company ») (« LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN - Installation de câbles sous-marins »).



Figure 4 ROV

Source : Louis Dreyfus TravOcean

Il est composé de différents éléments tels que ("The ROV HandBook: A User Guide for ROV Pilot Technician" - Icolari) :

➤ **L'ossature métallique**

Elle est composée de tubes soudés en aluminium ou en inox qui permettent d'enfermer les équipements techniques de l'appareil ainsi que ses réserves de flottabilités.

➤ **Les composantes de flottabilité**

Elles garantissent au ROV une légère flottabilité positive. En d'autres termes, sa partie supérieure affleure la surface lorsqu'il est inerte dans l'eau.

➤ **Les propulseurs (1)**

Ils permettent le mouvement de l'engin dans l'espace à trois dimensions et le maintient plaqué sur le fond, lors d'opérations de « jetting ».

➤ **Les chenilles (2)**

Elles permettent de se déplacer sur le fond. Parfois, on peut les changer par des patins si la nature du fond ne permet un déplacement par chenilles.

➤ **Le module hydraulique**

Il comprend un moteur électrique submersible de 250 kW servant à alimenter les propulseurs et les pompes hydrauliques pour le jetting. Le module hydraulique peut avoir un moteur électrique indépendant pour chaque système. Le circuit est refroidi avec l'eau de mer ou un réfrigérant.

➤ **Les compensateurs**

Leur but est d'éviter que les modules ne soient écrasés.

Mais ils jouent, aussi, un autre rôle. Ils permettent d'éviter toute entrée d'eau dans les moteurs électriques, les transformateurs et les bras de manipulation qui pourrait être provoquée par une pression de l'eau lors d'opérations pouvant se dérouler jusqu'à 3000 mètres de profondeur (pouvant atteindre les 300 bars).

Le système des compensateurs fonctionne via les variations de la pression extérieure. Elles sont transmises par une membrane au système. Ce dernier met en surpression l'huile contenue dans les éléments du ROV pour ainsi égaliser les pressions intérieure et extérieure.

➤ **Un système de détection de câble avec deux types de détecteurs**

Le ROV est parfois muni d'un type de détecteur qui lui convient le mieux en fonction de la nature des câbles et s'il est habilité à la récupération de câbles. Par exemple, le TSS 340 ou le TSS 350.

- Le TSS 340 qui est un détecteur « actif ». Il détecte le cuivre contenu dans le câble en émettant un champ magnétique. Il est muni d'un altimètre couplé au système, ce qui permet un calcul de la profondeur de l'ensouillage pouvant aller jusqu'à 2 mètre sous le sol (« The Marine Technology Specialists »).
 - Le TSS 350, qui est un détecteur dit « passif » qui reçoit la fréquence émise par le câble (doit être alimenté) et calcule la position jusqu'à 1 mètre sous le sol (« The Marine Technology Specialists »).
- **Divers équipements dont des caméras (3), des lampes (3), un sonar (3), un profondimètre, un altimètre, des bras articulés pour saisir le câble et des outils d'ensouillage**

Ce véhicule, piloté à distance par un opérateur se trouve à bord du navire, dans une salle de contrôle équipée d'écrans et d'ordinateurs. Il peut effectuer des opérations de maintenance sur la ligne sous-marine via une caméra et des capteurs installés sur le robot. Il est capable d'effectuer des réparations mais également de sectionner la ligne, car le ROV est équipé d'outils capables de couper les câbles. Le système reste cependant très lent avec une vitesse de 0,15m/s. (« LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN »).

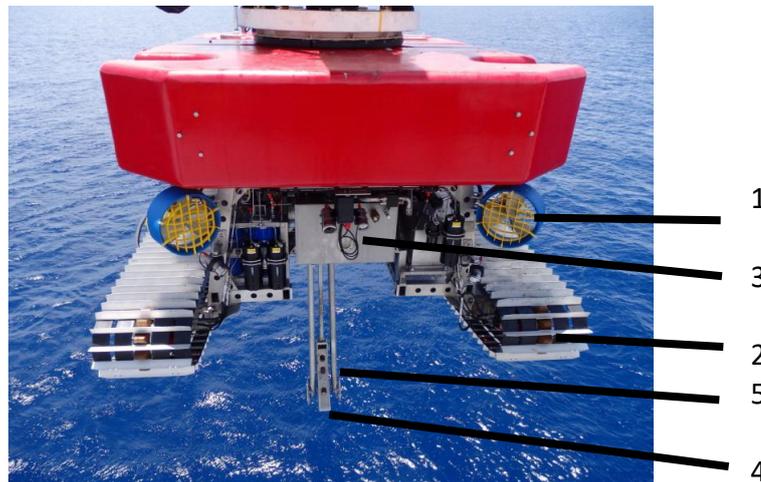


Figure 5 ROV vu de l'arrière

Source : adapté de : Simec Technologies

Son autre rôle est d'effectuer un ensouillage complémentaire sur une courte distance au cas où la ligne n'a pas été bien enfouie.

Prenons l'exemple de la charrue qui doit être ramenée à la surface lors d'une panne. Dans cette situation, le ROV se positionne juste au-dessus du tronçon et creuse un sillon de 20 à 40 *cm* de large et 2 *m* de profondeur. Il projette de l'eau de mer sous pression à un très haut débit sous le câble (« le Jetting »). Le sable et les autres sédiments sont, alors, déplacés.

Cette opération est délicate car les remous provoqués rendent la visibilité des opérateurs totalement nulle. Le risque est que le robot pourrait s'emmêler dans le câble sous-marin tenu en suspension et provoquer de graves dégâts. ("Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects" - Worzyk 2009)

Pour effectuer l'ensouillage, le ROV dispose de trois outils ("The ROV HandBook: A User Guide for ROV Pilot Technician" - Icolari) :

- **L'outil arrière (4)** ou « crosse », qui pulvérise l'eau en haute pression ou en basse pression par l'intermédiaire de deux rampes.

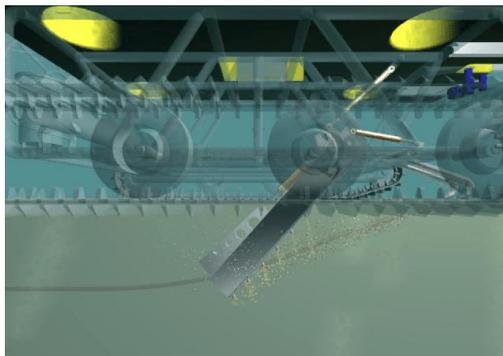


Figure 6 Outil arrière

Source : AACSM

- **Le dépresseur**, qui se situe entre les rampes de la crosse, appuie sur le câble pour le poser dans la tranchée. Il est équipé d'un détecteur qui s'assure de la présence du câble.
- **L'outil avant (5)** qui sert à pulvériser l'eau en haute pression et qui présente la forme d'un double crochet. Il dégage les sédiments sous le câble.

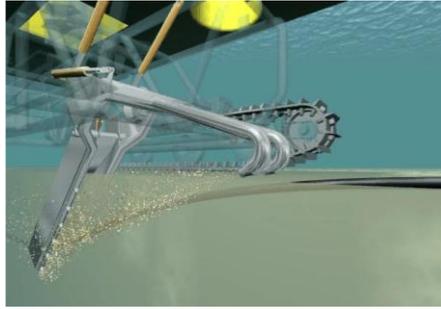


Figure 7 Outil avant

Source : AACSM

2.3 L'ensouilleuse à roue trancheuse

Cette ensouilleuse ressemble au ROV et est équipée, à l'arrière, d'une roue trancheuse à dents. Elle est solidaire d'un soc mobile qui la recouvre pour permettre au câble de passer.

Lorsqu'elle est mise en rotation, le soc s'abaisse et l'ensemble vient lentement s'enfoncer dans le sol pour excaver les sédiments.

Elle se meut à l'aide de chenilles car elle nécessite une puissance de traction élevée de par le fait qu'elle est utilisée dans les fonds très durs de type corail ou basalte. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

L'engin a une profondeur d'utilisation pouvant aller jusqu'à 100 m et peut ensouiller jusqu'à 1,3 m dans le sol.

Son utilisation est donc limitée aux faibles profondeurs et aux sols durs. (« LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN - Installation de câbles sous-marins »)



Figure 8 Ensouilleuse à roue trancheuse

Source : Louis Dreyfus TravOcean

2.4 L'ensouilleuse à chaîne excavatrice

Cet outil s'adapte sur l'ensouilleuse à roue trancheuse en remplaçant l'outil de tranchage.

Le fonctionnement est basé sur la tronçonneuse qui possède une chaîne mobile pourvue de pics ou de godets espacés de quelques centimètres.

Ce mécanisme permet d'excaver le sol lorsqu'on l'abaisse. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

Elle est principalement utilisée dans des fonds sédimenteux compacts et ensouille jusqu'à 2,5 m de profondeur avec une largeur de 30 cm. (« LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN - Installation de câbles sous-marins »)



Figure 9 Ensouilleuse à chaîne excavatrice

Source : Louis Dreyfus TravOcean

2.5 Le traineau à jets d'eau

Cette machine, comme son nom l'indique, est équipée de patins et d'un grand bras situé à l'arrière qui propulse l'eau par jets.

Le traineau est utilisé dans les sols meubles comme le sable. L'enfoncement du bras à jets dans le sol permet de créer une tranchée de 3 m de profondeur. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

Dans les zones plus risquées comme les zones de mouillage de Singapour où il y a énormément de navires à l'ancre, il existe des traineaux avec des bras à jets d'eau très puissants, capables d'ensouiller les câbles jusqu'à 10 m de profondeur. (« First Marine Stage Completes with Singapore Cable Landing · Australia Singapore Cable »).



Figure 10 Traineau à jets d'eau

Source : ETA Subsea Cable Specialists

3. Les câbles

Un câble sous-marin à fibre optique est un assemblage de différents types de câbles, de joints et de répéteurs.

L'assemblage final est déterminé selon la route prévue par la campagne océanographique qui détermine la nature du fond marin, le type d'installation et la position des répéteurs le long du parcours.

Il existe différentes longueurs de câbles. Les petits qui mesurent entre 50 et 100 *km* et coûtent environs 30 millions d'euros.

Quant aux plus longs, ils peuvent atteindre plusieurs milliers de kilomètres et sont munis de répéteurs tous les 100 *km*. Ils atteignent un coût pouvant aller jusqu'à 700 millions d'euros, comme l'explique Jean-Luc Vuillemin, directeur général d'Orange International Networks (« Plongée au coeur d'Internet : cinq chiffres pour tout savoir des câbles sous-marins »).

3.1 Les utilisateurs

Qui utilise ces câbles ? Nous tous !

Si vous surfez sur un site internet dont le serveur se trouve sur un autre continent, votre fournisseur a certainement utilisé en amont un câble sous-marin pour atteindre le serveur.

De même, si vous passez un appel téléphonique lors de vos voyages outre Atlantique ou sur un île par exemple, les données seront transférées via un ombilical sous-marin. Toutefois, vous n'êtes pas le seul utilisateur. Il existe bon nombre de personnes qui les emploient tels que les opérateurs de télécommunications et les opérateurs de mobiles, les multinationales, les gouvernements, les fournisseurs de contenu, les instituts de recherches. Ils ont besoin de ces câbles pour transférer des données dans le monde entier. (TeleGeography)

Dès lors, nous pouvons certifier que toute personne aillant accès à Internet, quel que soit le type d'appareil connecté, utilise très probablement un câble sous-marin.

3.2 Les propriétaires

Ultérieurement, les câbles appartenait à des opérateurs de télécommunications qui formaient un consortium de tous les partis intéressés à utiliser le câble.

A la fin des années 90, maintes entreprises ont construit de nombreuses lignes privées et vendu leurs capacités aux utilisateurs. ("Timeline History" - Verney 2014)

Aujourd'hui, le consortium et les câbles privés existent toujours. Seuls les types d'entreprises impliquées dans la construction de câbles constituent l'un des plus grands changements de ces dernières années.

Les grands investisseurs de nouveaux câbles sont les plus grands fournisseurs de contenu tels que Google, Facebook, Amazon ou encore Microsoft (« Plongée au coeur d'Internet : cinq chiffres pour tout savoir des câbles sous-marins »).

La quantité de capacité déployée par ces opérateurs de réseaux privés a dépassé les opérateurs de dorsale⁹ Internet.

Pour ces entreprises, la perspective d'une croissance massive nécessite l'occupation d'un leadership dans l'amélioration et la possession de nouveaux câbles sous-marins.

⁹Partie d'un réseau de télécommunications, caractérisée par un débit élevé, qui collecte et transporte les flux de données entre des réseaux périphériques

3.3 Types de câbles

Il existe différentes sortes de câbles. Ils sont fonction de leur nature, de la zone où ils sont déposés et de la protection des informations qu'ils transmettent. Les facteurs principalement pris en compte sont l'eau, les courants, les vagues, la pression et autres forces naturelles qui peuvent engendrer de graves problèmes sur la ligne.

Leurs usages peuvent être divers et variés. Ainsi, on les retrouve dans le milieu offshore et militaire, dans les zones d'énergies marines renouvelables ou comme liaison entre les continents et les îles. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

En fonction de leurs tâches, les câbles auront des diamètres différents. Les plus fins sont destinés aux télécommunications, c'est-à-dire la fibre optique.

Les plus gros sont utilisés pour le transport d'électricité. Il existe également une troisième sorte appelée « câble composite » qui combine le courant électrique et la fibre optique. (« ITECO Ltd. - Cable Supply, Industrial Plant & Engineering, HDPE Pipe Supply »)

De nos jours, la grande majorité des câbles ont une gaine protectrice blindée qui assure une protection optimale contre les phénomènes naturels et les activités humaines.

Néanmoins, leur durée de vie ne dépasse pas 20 à 25 ans. Cela peut être vu comme une bonne nouvelle pour cette industrie, car l'intégralité du réseau actuel devra être remplacée dans les années à venir (« Internet : des câbles sous-marins pour faire transiter les données » 2016).

Cependant, nous verrons dans le chapitre 9.3 (Câble en fin de vie) et le chapitre 10 (Le futur), qu'après leur durée de vie, les câbles peuvent encore servir ou être recyclés à condition que d'ici quelques années la flotte de câbliers puisse encore répondre aux demandes.

❖ **Conditions de base pour un câble sous-marin :**

- Une grande longueur en continue
- Un niveau élevé de fiabilité avec absence pratique des défauts attendus
- Une bonne résistance à la corrosion et à l'abrasion
- Une résistance mécanique à toutes les contraintes interne et de pose
- Minimiser l'impact environnemental
- Minimiser la pénétration de l'eau en cas de dégâts

(Zaccone 2009)

❖ **Points clé pour la sélection d'un câble sous-marin :**

- La puissance à transmettre (électrique et/ou numérique)
- La route sélectionnée : géologie et topographie du fond
- La longueur du câble
- La profondeur
- Le type de protection : Profondeur d'ensouillage, les activités maritimes, les activités de pêche
- La sécurité d'approvisionnement
- Les considérations environnementales
- La viabilité économique

(Zaccone 2009)

3.4 Télécommunication

Après l'ère des câbles télégraphiques et téléphoniques, aujourd'hui ce sont les câbles à fibre optique qui sont installés pour l'utilisation d'Internet et du téléphone.

Ces câbles de télécommunication ont une masse moyenne de $0,7 \text{ kg/m}$ pour un diamètre de 20 mm , ce qui équivaut à un tuyau d'arrosage.

Il existe plusieurs sortes de câbles comme nous pouvons voir sur la figure ci-dessous. En fonction de leur exposition au danger, certaines lignes peuvent être armées d'une ou deux couches de protection en acier, la masse du câble peut alors aller jusqu'à $4,8 \text{ kg/m}$ avec un diamètre de 50 mm (« About Submarine Telecommunications Cables » 2011).



Figure 11 Câble de fibre optique avec différentes protections

Source : ICPC

3.4.1 La fibre optique

La communication par fibre optique est une méthode de transmission d'informations d'un endroit à un autre via des impulsions de lumière à travers une fibre optique. Elle permet de transporter des données à la vitesse de la lumière avec une bande passante presque illimitée.

Le câble est constitué d'un cœur et d'une gaine en silice contenant la fibre qui n'est pas plus épaisse qu'un cheveu, soit environ $0,25 \text{ mm}$.

La fibre est ensuite enveloppée dans une protection dans laquelle une diode laser émet l'onde lumineuse qui transporte les données avec une capacité pouvant aller jusqu'à 208 Tbit/s^{10} pour le plus moderne nommé « MAREA », qui relie Bilbao (Espagne) à Virginia Beach (USA). (« Deep Sea Diving: The State of Submarine Cable Technology »)

On doit cette invention remarquable à Charles K. Kao¹¹ qui est reconnu comme « Le père des communications dans la fibre optique ». Il a également reçu pour moitié le prix Nobel de physique en 2009 « *pour ses réalisations remarquables en matière de transmission de la lumière dans les fibres pour la communication optique* ».

C'est en 1960, aux Laboratoires de Télécommunication de Harlow, Essex (UK) que Kao a travaillé avec ses collègues. Ils sont reconnus pionniers de la fibre optique explorant cette technologie comme moyen de télécommunications. Quelques années plus tard, ils sont parvenus à expérimenter la première fibre de communication optique monomode au monde. Elle était en verre.

En outre, monsieur Kao avait prédit en 1983 que les océans du monde seraient remplis de fibres optiques, soit plusieurs années avant la pose d'un câble à fibre optique transocéanique utilisable. ("Meet The Father of Fiber Optic Communication" - Miller)



Figure 12 Câble de fibre optique

Source : NEC

¹⁰ Unité de débit binaire. Térabit par secondes [$1 \text{ Tbit/s} = 10^{12} \text{ bit/s}$]

¹¹ Ingénieur américano-britannique d'origine chinoise [1933-2018]

3.5 Electricité

D'autre part, nous avons les câbles à haute tension utilisés dans le transport d'électricité pour acheminer l'énergie fabriquée par les parcs éoliennes en mer aux îles et aux continents ou pour alimenter les plateformes pétrolières.

On distingue deux types de câbles : HVAC (fr : Haut Voltage Courant Alternatif), qui est limité par la distance de transmission, inférieure à 80 *km*. Et HVDC (fr : Haut Voltage Courant Continu), qui lui est utilisé pour de longues distances et l'interconnexion de systèmes. Le AC est converti en DC via une station pour la transmission dans le câble puis remis en AC à l'autre extrémité. (« About Submarine Power Cables » 2011)

Ils ont des tensions comprises entre 30 *kV* et 450 *kV* (« NKT | Cable Solutions – High, Medium, Low Voltage Cables & Accessories »).

Leurs masses et leurs diamètres sont beaucoup plus grands que les câbles à fibre optique. Les plus gros peuvent atteindre les 140 *kg/m* avec un diamètre pouvant aller jusqu'à 300 *mm*, dépendant de la capacité de transport du courant et de la couche de protection (« About Submarine Power Cables » 2011).

On peut généralement voir des câbles dit « composites » qui combinent électricité et fibre optique permettant de transmettre simultanément des informations numériques (parcs éoliens) et l'énergie produite ou à fournir. (« Cablel »)

3.5.1 Isolation

1) Extrusion

Le procédé de fabrication mécanique appelé « extrusion » consiste à compresser un matériau en un format défini sous l'action d'une pression.

L'extrusion se pratique à chaud ou à froid et se combine à une réaction chimique ou enzymatique. On peut de cette manière produire de longues sections creuses ou plates (Deluzarche). C'est le même principe que la fabrication des bouteilles en plastique.

Les matériaux utilisés pour ce procédé sont majoritairement l'XLPE et l'EPR pour leurs propriétés et leurs avantages cités précédemment ainsi que pour leur masse (20-35 kg/m) et leur diamètre (90-120 mm). (Ardelean et al. 2015)

Ces types de câbles sont utilisés pour des voltages bas (jusqu'à 300 kV DC).

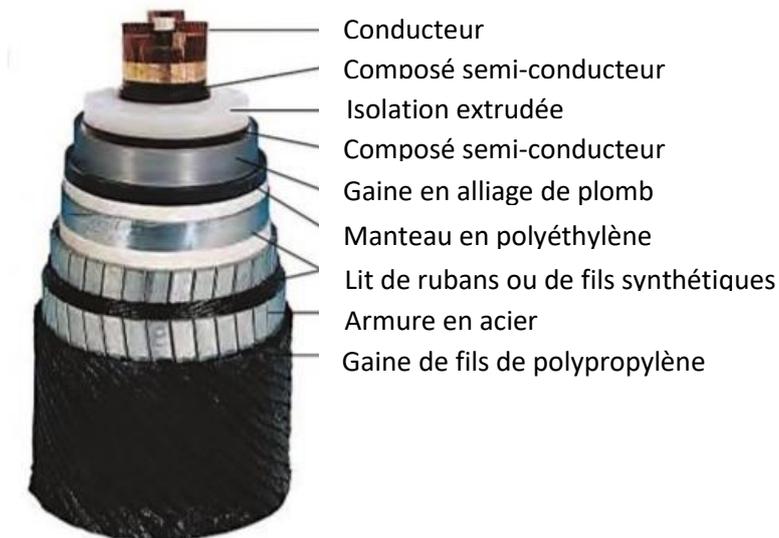


Figure 13 Structure d'un câble extrudé

Source : adapté de : (Zaccone 2009)

➤ **XLPE**

Le polyéthylène réticulé (Cross-Linked Polyethylene - XLPE) est un matériau d'isolation thermodurcissable. Il a une excellente rigidité diélectrique¹², une résistance d'isolation élevée et un faible facteur de dissipation à toutes les fréquences, ce qui en fait un isolant idéal.

L'XLPE est parfait pour des tensions allant de basse à très haute, surpassant d'autres matériaux d'isolation tels que le PVC, EPR ou les caoutchoucs de silicone.

¹² La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique, donc d'un court-circuit.

Ses propriétés mécaniques sont également meilleures que d'autres isolations, ce qui lui confère une plus grande résistance aux tractions, aux allongements et aux chocs. Certains fabricants ajoutent du carbone noir pour que le câble soit encore plus résistant aux déformations dues à la chaleur et augmente également sa résistance aux coupures (« FAQ: The benefits of XLPE insulated cables | Eland Cables »).

➤ **EPR**

Le caoutchouc éthylène-propylène (Ethylene-Propylene Rubber – EPR) est très utilisé dans le domaine des câbles électriques car il peut être adapté pour différents types d'applications étant donné que sa plage de température peut aller de - 55°C à 150°C et qu'il possède une résistance diélectrique élevée.

L'EPR peut être associé avec du polyéthylène (PE) ou du polypropylène (PP) pour améliorer ses propriétés physiques et le rendre plus dur. De ce fait, on obtient une meilleure résistance aux compressions, aux coupures, au déchirement, aux chocs, à l'humidité et à l'abrasion.

Comparé à l'XLPE, il possède de moins bonnes propriétés diélectriques, cependant, il a une meilleure flexibilité et une faible dilatation thermique.

(« FAQ: The Benefits of EPR Insulated Cables | Eland Cables » s. d.)

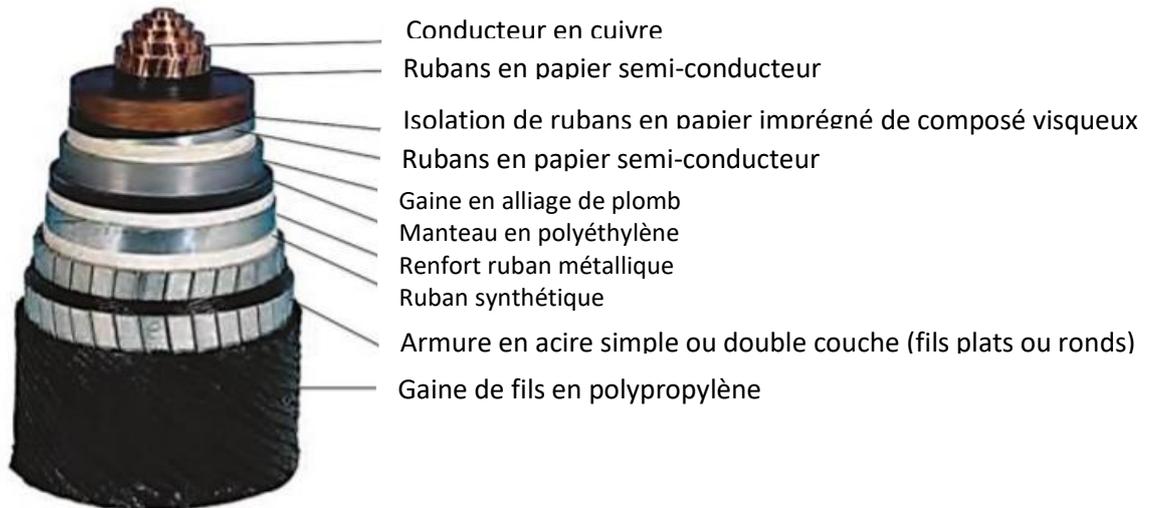
2) Câble imprégné de masse

Ce type de câble est isolé avec du papier spécial, imprégné d'un composé à haute viscosité, qui ne s'écoule pas en cas de dommage ou de problème avec les boîtes de jonction.

Ce sont les câbles les plus utilisés et sont en service depuis plus de 40 ans, ce qui est un gage de leur qualité et de leur fiabilité. On les utilise actuellement pour des tensions pouvant aller jusqu'à 500 kV DC. Leur masse est de 30-60 kg/m et ils ont un diamètre de 110 à 140 mm. (Zaccone 2009).

Cependant, le développement des câbles XLPE atteignant de plus hautes tensions pourrait les faire disparaître dans les prochaines années. (Worzyk 2009)

Les câbles



*Figure 14 Structure d'un câble imprégné de masse
Source : adapté de : (Zaccone 2009)*

3.5.2 Tableau comparatif



Type	1	2	3	4	5
Tension nominale	33 kV AC	150 kV AC	420 kV AC	320 kV DC	450 kV DC
Isolation	XLPE, EPR	XLPE	Papier/huile, XLPE	Extrudé	Imprégné de masse
Application	Approvisionner les petites îles ; Raccordement des turbines des éoliennes en mer	Raccorder les îles à haute densité de population ; Exporter la production d'électricité des parcs éoliens maritime	Traverser les rivières/chenaux avec une capacité de transmission	Connection longue distance des plateformes ou des parcs éoliens	Connection longue distance de réseaux électriques autonomes
Longueur maximale	20-30 km	70-150 km	< 50 km	> 500 km	> 500 km
Valeur nominale	30 MW	180 MW	700 MW/trois câbles	1 000 MW/pair de câble	600 MW/câble

*Tableau 1 Description de cinq types de câbles sous-marins
Source : adapté de : Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol 96, November 2018)*

3.6 Les répéteurs

Etant donné les grandes distances parcourues par les câbles à fibre optique, le signal envoyé par la station émettrice perd rapidement en intensité. C'est pourquoi, il est essentiel de disposer de répéteurs tous les 80 à 100 *km* pour amplifier et booster les signaux.

Un répéteur ressemble à un boudin de 2 à 4 mètres de long avec un diamètre de 30 *cm*. Son prix atteint le million de Dollar l'unité. Pour ce faire une idée, il y a 70 répéteurs sur la ligne transatlantique « FLAG Atlantic » (FA-1) qui relie les Côtes d'Armor (France) à New-York (USA). ("La pose de câbles sous-marins à bord du René Descartes" - Le Gall 2015)

A l'intérieur du répéteur, sur une certaine distance, la fibre est dopée en ions d'Erbium¹³ qui une fois en contact avec un signal lumineux d'une longueur d'onde de 800, 980, 1480 *nm*, engendrera l'énergie nécessaire pour amplifier les signaux lumineux. Cette réaction sera transmise le long du câble à l'aide de reliures épissées à intervalles réguliers (« La Fibre Optique et la technologie WDM »).

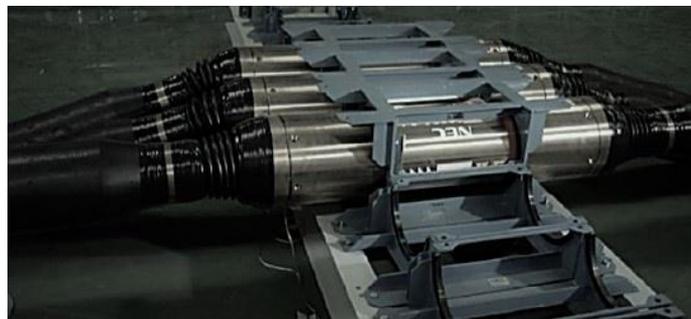


Figure 15 Répéteurs

Source : NEC

¹³ Erbium (Er) : Élément chimique, N° Atomique 68.

3.7 Symboles sur les cartes nautiques

Lorsqu'un câble est installé, il doit être préalablement signalé aux entités nationales puis à l'Organisation Hydrographique Internationale qui est responsable de la création et des mises à jour des cartes nautiques.

Ainsi, il sera clairement indiqué via un symbole et selon sa nature, comme nous pouvons le voir ci-dessous.

Le but est d'avertir les navires qui passent dans cette zone afin qu'ils évitent de mouiller, de faire très attention en cas d'une ancre dérapant ou encore pour les pêcheurs (plus particulièrement les chalutiers afin d'éviter que le câble ne soit endommagé ou arraché). (United Kingdom Hydrographic Office)

Référence	Symbole OHI	Description
30.1		Câble sous-marin
30.2		Zone de câble sous-marin
31.1		Câble électrique sous-marin
31.2		Zone de câble électrique sous-marin
32		Câble sous-marin abandonné, désaffecté

Figure 16 Symboles sur les cartes nautiques

Source : Adapté de Organisation Hydrographique Internationale

4. Etude du parcours-

Pour déterminer le choix final du tracé, un cheminement en trois étapes est nécessaire.

1) **L'étude de documents.**

Cette étude est faite lorsque l'on détermine une ou plusieurs routes préliminaires.

L'étude des cartes marines, bathymétriques et géographiques déjà existantes.

L'étude des réglementations et des lois, les activités humaines présentes et futures (pêche, champ pétrolier, parc éolien...), etc.

2) **La détermination d'un couloir.**

Un corridor d'une largeur définie comprenant le tracé préliminaire est déterminé pour ensuite démarrer la campagne océanographique de l'étude du fond marin dans ce couloir.

3) **La sélection du tracé final.**

Avec les résultats de la campagne océanographique, le tracé final est choisi en fonction des fonds les plus praticables, bien souvent les fonds les plus meubles, pour la charrue et les plus sûres pour le câble.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

4.1 La campagne océanographique

Le but de la campagne océanographique est d'obtenir les informations nécessaires pour déterminer le relief des fonds marins et la nature du sous-sol.

C'est pourquoi, une équipe de planificateurs de route constituée de géologues marins, expérimentés dans la pose de câbles, recherchent la meilleure route pour faire passer le câble. Ils rassemblent toutes les informations concernant les données hydrographiques et géologiques. Les critères retenus et qui ont la priorité sont les zones où le fond marin est le plus plat possible, sans dénivelés trop importants, sans monts sous-marins, sans fractures et avec un sous-sol sans intérêt du point de vue économique et scientifique.

Pour ce faire, ils utilisent différentes techniques, basées sur l'acoustique de sondeurs et des prélèvements en carottage. Ils fournissent, ainsi, une cartographie du fond et du sous-sol.

Leurs résultats sont représentés sur des documents cartographiques. Des cartes morpho-bathymétriques qui affichent le relief du fond marin et des cartes sédimentologiques qui décrivent la composition de la nature du sous-sol marin.

Sur la zone appelée « plateau continental », la reconnaissance géologique permet d'obtenir une cartographie pouvant aller jusqu'à une échelle de 1/10000.

En outre, les zones de pêche ainsi que les zones de mouillages sont, également, recensées afin d'avoir une analyse complète du tracé. A l'aide de ces données, ils vont définir des relevés GPS¹⁴ ou DGPS. Ils utilisent des stations terrestres pour obtenir une précision de l'ordre de 1 à 5 m, pour le positionnement des câbles et des répéteurs.

Le prix d'une campagne océanographique peut varier entre 1 et 4 % du prix total. Cela dépend de la profondeur, de l'ensouillage s'il est nécessaire, etc. Cette opération est cependant primordiale pour déterminer le type de câble à fabriquer et la méthode de pose qui à long terme permettra d'avoir un réseau fiable.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

¹⁴ Positionnement par satellites

4.1.1 Sondage par multifaisceaux

Un sondeur multifaisceaux est un équipement de cartographie sous-marine disposé sous la coque du navire hydrographique. Il fonctionne par émission-réception d'un signal acoustique diffusé perpendiculairement à la route du navire pour obtenir les données de bathymétrie.

La profondeur est ainsi obtenue par le calcul du temps nécessaire au signal pour faire un aller-retour, tout en tenant compte de la nature des sédiments et de la morphologie du fond.

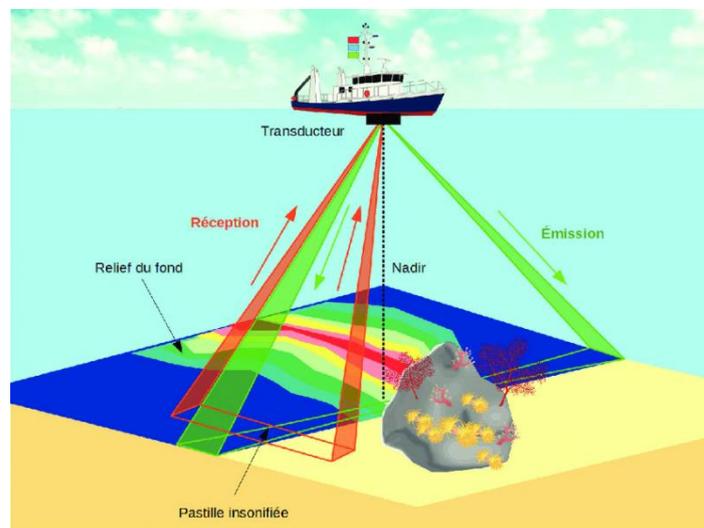


Figure 17 Principe de fonctionnement du sondeur multifaisceaux

Source : ResearchGate

Le résultat de l'enregistrement représente le fond marin en nuances de gris.

Ce type de sonde a une portée de 10 000 m de profondeur et possède une excellente couverture, alliant rapidité d'exécution et confort pour l'opérateur qui visualise directement le résultat sur ses écrans. Il peut, ainsi, cartographier automatiquement « sur commande ».

("Canalisation et câbles sous-marins" - Droit et Delort)

4.1.2 Sonar à balayage latéral

Les sonars à balayage latéral sont également des systèmes acoustiques de type émetteur-récepteur munis de deux voies disposées symétriquement de part et d'autre du poisson¹⁵. Ils fonctionnent plus précisément avec les propriétés de rétrodiffusion acoustique du fond marin, c'est-à-dire la manière dont le fond va renvoyer les ondes en fonction de l'angle d'incidence.

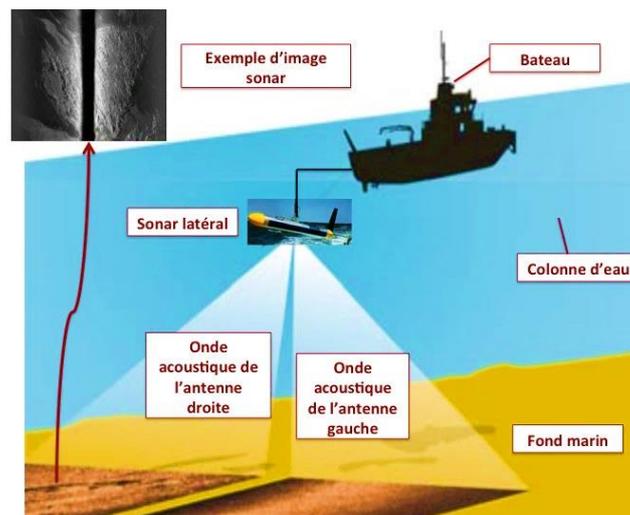


Figure 18 Principe de fonctionnement du sonar à balayage latéral

Source : ResearchGate

L'énergie de l'onde retour dépendra de la réflectivité du fond et de ses irrégularités. Elle combine un effet de surface du fond et un effet de volume lié à la granulométrie¹⁶, ce qui la rend sensible à la compaction du sédiment et du degré de porosité.

Lors de l'émission-réception, seule l'onde qui emprunte la même trajectoire après réflexion, aussi appelée onde spéculaire, est intégrée par le poisson. L'enregistreur situé dans celui-ci traite les échos de retour, les corrige et calcule la position de chaque signal.

L'opérateur peut ensuite imprimer les résultats sur un papier électrosensible, thermique ou numériquement sur un ordinateur. Le résultat obtenu des images sonar est appelé sonogramme. ("L'application du Sonar à Balayage Latéral (SBL) pour la cartographie des habitats marins en domaine subtidal" - A. EHRHOLD)

¹⁵ Nom donné au sonar tracté par le navire hydrographique

¹⁶ Mesure de la forme, de la dimension et de la répartition en différentes classes de grains

4.1.3 Carottage

Après la campagne géophysique, les prélèvements par carottage sont effectués pour fournir une coupe verticale d'une dizaine de mètres dans les couches sédimentaires. Le but est de calibrer les données d'imagerie acoustique avec les classes de sédiments du sous-sol.

Toutes ces données feront l'objet d'une analyse de risques. C'est le bureau d'études qui évaluera et résumera ceux-ci dans une matrice.

L'objectif fondamental est d'identifier pour ensuite développer un parcours d'étude afin d'éviter les dangers rencontrés durant les recherches. D'autres constituantes seront, également, possibles comme : définir le type de câble, la longueur désirée, fournir toutes les informations documentaires pour soutenir l'installation ainsi que dispenser une structure de base de données concernant la maintenance du réseau.

Une fois le dossier complété, il est envoyé aux autorités compétentes pour l'obtention de l'autorisation de faire passer la ligne dans leur zone sans violation de leur territoire. Car le risque de lourdes amendes voire d'une peine de prison est potentiel.

De plus, le service hydrographique (UKHO) pourra dessiner la nouvelle ligne sur les cartes marines et la signaler aux navires qui auraient l'intention de mouiller ou d'effectuer des travaux de dragage proches de cette zone. ("Canalisation et câbles sous-marins" - Droit et Delort)

4.1.4 Nettoyage du tracé

Pour que la charrue puisse avoir une route sans encombre, tous les débris, tels que des fils, des filets de pêche abandonnés ou des restes de cordes d'amarrage, se trouvant sur son passage sont enlevés. On appelle cette technique « Opération de pré-pose du grappin » (PLGR). (« SubSea Cables - Cable Burial | KIS-ORCA » 2018)

4.2 En eaux peu profondes

Les zones d'eaux peu profondes se trouvent à une profondeur inférieure à 1 500 *m* et sont généralement à l'intérieur des eaux territoriales où la pêche et le mouillage ont bien souvent lieu. (ICPC 2016)

Jusqu'à 30 *m* de profondeur, les câbles sont exposés à des forces physiques et biologiques se matérialisant par les marées qui associées avec les courants océaniques et les tempêtes entraînent des sédiments susceptibles d'ensevelir, d'abraser, de fragiliser et même de déplacer le tronçon.

Vers une profondeur de 130 *m*, ces phénomènes sont atténués mais peuvent, toutefois, avoir une légère influence tel que la constitution d'un dépôt de sédiments qui va s'accumuler et enfouir la ligne à hauteur de 1 *cm/an*. (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

C'est pourquoi les câbles sont ensevelis « nu » ou ensevelis en étant insérés dans un tuyau articulé en fonte pour les protéger au mieux dans cette partie du trajet mais non sans contraintes car l'enfouissement est effectué par des plongeurs expérimentés dans ce type d'opération (« Montserrat Submarine Fibre Optic Project | Facebook » 2020).

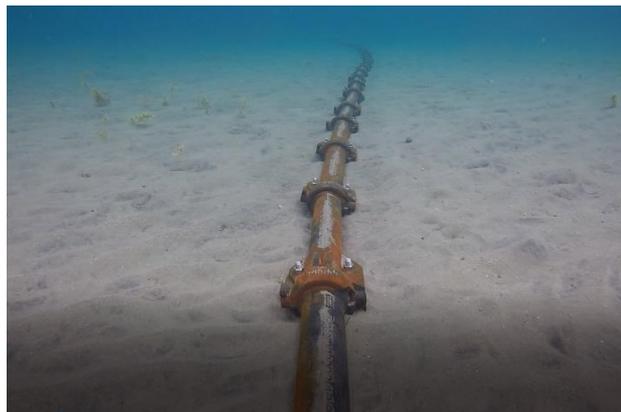


Figure 19 Tuyau en fonte permettant la protection du câble

Source : Montserrat Submarine Fibre Optic Project

Il est nécessaire que des données bathymétriques soient collectées pour déterminer les profondeurs d'immersion. Cela s'effectue en faisant un couloir de 500 à 1 000 *m* de large à l'aide d'une imagerie sonar pour avoir la topographie du fond sous-marin et ainsi le cartographier.

De plus, des relevés géologiques du sous-sol sont effectués pour connaître ces propriétés et définir si la charrue pourra fonctionner sans encombre pour pouvoir ensouiller la ligne.

Cette analyse géologique est obtenue à l'aide de carottages similaires à ceux faits avant n'importe quelle construction de bâtiments ou pour des recherches scientifiques. (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

4.3 En eaux profondes

Dans ce cas, nous parlons d'une profondeur supérieure à 1 500 *m* et bien souvent hors juridiction nationale. (ICPC 2016)

A une telle profondeur, le câble peut être juste déposé sur le fond car les risques que l'on rencontre en eaux peu profondes disparaissent et l'accumulation des sédiments est nettement plus faible. Elle est de l'ordre de 0,001-0,004 *cm/an*. (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

Cependant, les zones proches des grandes rivières, des glissements sous-marins et des régions du monde soumises à des pluies diluviennes peuvent provoquer un influx élevé de sédiments, de sable et de boue. Cela peut créer des courants de turbidité pouvant rompre les câbles.

Il est donc primordial de prendre en compte ces différents éléments même s'il est question d'eaux profondes.

Pour les câbles n'étant pas enfouis à de telles profondeurs, une simple collecte de données bathymétriques est effectuée dans un couloir d'une largeur allant de 3 fois la profondeur du fond à maximum 20 *km*.

4.4 En eaux polaires

Dans les régions situées le plus au Nord et plus particulièrement dans la partie Nord de la mer Caspienne, les câbles peuvent subir un autre danger qui est celui de la glace.

Le type de glace le plus susceptible de poser des problèmes est le *stamukha*¹⁷. Il s'agit d'une accumulation de glace de mer ancrée qui se développe généralement le long de la banquise côtière et de la banquise dérivante, parallèlement le long de la côte et atteindre des profondeurs de 20 à 50 mètres, créant une crête de pression, comme vu dans le cours « *Navigation dans les glaces* » (Y. Janssens).

Cette glace a tendance à s'étendre vers le bas avec une pénétration du fond marin jusqu'à 5 m. Elle reste normalement ancrée au fond marin mais elle peut être sujette à des déplacements provoqués par les vents, les courants de marées, la pression de la banquise dérivante ou encore par l'expansion thermique.

Ce type de glace peut donc poser un risque considérable sur les câbles de télécommunication car elle peut facilement les bouger, les endommager voire même les sectionner.

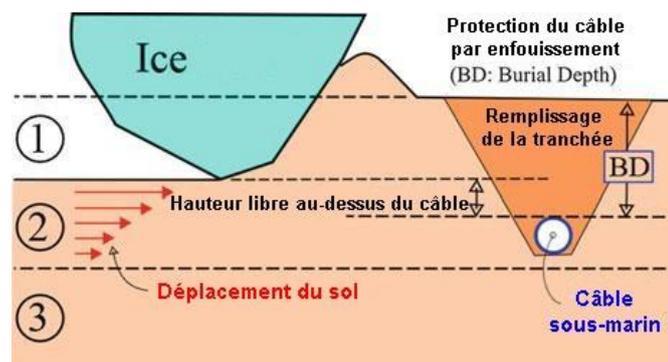


Figure 20 Action du *stamukha* sur le câble sous-marin

Source: Adapté de: *Oil and Gas Pipelines in the Black-Caspian Seas Region*

¹⁷ Mot Russe, pluriel « *Stamukhi* »

5. L'installation

Avant de pouvoir commencer sa mission, le navire reçoit un document synthétisant l'intégralité des documents nécessaires pour les opérations. Ce document est appelé « System Load and Lay Instructions » (SLLI) et comprend les éléments suivants :

- Le plan de chargement des cuves du navire.
- Les cartes de pose précisant le tracé, les obstacles et la nature des fonds.
- La liste des points de route pour les changements de cap et/ou de vitesse. Route Position List (RPL).
- Les recommandations pour les tests durant la pose afin ne pas détériorer le système.
- Un diagramme en ligne de la composition de l'ensemble du système et de ces différents éléments.
- Les procédures de sécurité liées aux risques électriques et optiques.
- Le guide opérationnel donnant des informations sur les caractéristiques techniques du système.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

A bord, les hydrographes disposent, en plus, d'un logiciel leur permettant de contrôler l'avancée de la pose et anticiper l'enchaînement des opérations.

Il peut être utilisé lors de la pose avec ou sans la charrue mais également lors de réparations sur le câble.

Le logiciel est capable de régler automatiquement la vitesse du navire ainsi que la vitesse de la machine à câble.

Le personnel navigant dispose, quant à lui, d'un système de positionnement dynamique (DP), qui lui permet grâce à des propulseurs azimutaux de suivre avec une extrême précision la route à suivre mais également de maintenir le navire sur une position fixe.

Sur les écrans de la console DP, est également affichée la localisation de la charrue. Celle-ci est équipée d'une balise acoustique qui permet de réduire les contraintes exercées. Pour cette raison, on ajoute la valeur de tension du câble de traction qui sera considérée par le logiciel comme une force extérieure agissant sur le câblier.

L'officier ajoute deux seuils : un qui entraîne le ralentissement du navire et l'autre qui le stoppe. Ainsi, si le navire s'arrête, la tension diminuera.

5.1 La pose simple

Lors d'une pose dite « simple », le câble appelé aussi « ombilicale » ou « caténaire », est déposé sur le fond marin depuis le câblier.

L'ombilicale doit être installée - comme expliqué précédemment - suivant un tracé précis et avec une sécurité optimale.

Les conditions météorologiques doivent être excellentes pour pouvoir garder une tension et un mou dans les limites prédéfinies.

Le « mou » est l'excès de câble qui lui permet d'épouser la forme du relief marin dans le but d'éviter toute suspension dans les zones irrégulières, mais aussi d'éviter les tensions résiduelles dans l'ombilicale.

Il est nécessaire de garder un mou dans le câble pour faciliter la récupération du câble lors des réparations. Cependant le mou ne doit pas être trop excessif, ceci afin d'éviter que le câble forme des boucles avec le courant d'une part et d'autre part, pour éviter de trop longues distances qui engendreraient un coût supérieur à l'installation. (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

5.1.1 Principes de base

Pour mieux discerner le comportement du câble dans l'eau, il est utile de comprendre les principes de base.

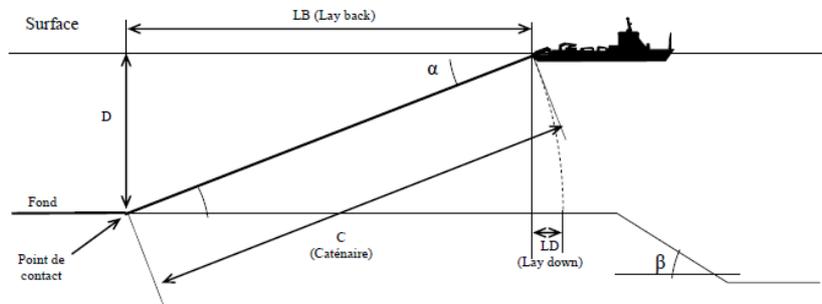


Figure 21 Principe de base

Source : AACSM

- **La caténaire (C)** : longueur de câble entre le point de sortie de la poulie du navire dit « davie » et le point de contact avec le fond.
- **Lay-Back (LB)** : distance horizontale entre le point de contact et le davie.
- **Lay-Down (LD)** : distance horizontale entre un point du câble à la sortie du davie et sa position finale sur le fond.
- **L'angle (α)** : l'angle du câble avec l'horizontale.
- **L'angle (β)** : l'angle d'inclinaison du fond par rapport à l'horizontale (positif si la profondeur augmente dans le sens de la pose. Sinon, angle négatif).
- **La profondeur (D)** : profondeur de la surface jusqu'au point de contact. La hauteur du davie au-dessus de la surface peut être ajoutée si non négligeable.
- **La constante hydrodynamique (H)** : cette constante est calculée sur base de la masse, du diamètre et du coefficient de friction du câble. Elle est spécifique à chaque type de câble. La constante relie la vitesse d'enfoncement dans l'eau avec la vitesse de pose du câble (vitesse du câblier). « H » est exprimée en *degré.nœud*.

La figure, ci-dessus, représente typiquement la pose en « régime établi ».

On considère la caténaire comme homogène. La vitesse du bateau (V_N) et la vitesse de la machine à câble (V_C) restent constantes et le fond est considéré comme étant plat. Au moment où V_N et V_C atteignent une valeur suffisante pour que la caténaire s'enfonce sans retenue, celle-ci prendra la forme d'une droite sans aucune tension dans le câble au point de contact.

Cette absence de tension au point de contact est la condition nécessaire pour pouvoir poser du mou. Pour se faire, la vitesse V_C doit être légèrement supérieure à V_N .

En « régime établi », l'angle α est fonction de la constante H et de V_N . Et le point de contact est le plus souvent très éloigné du câblier.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

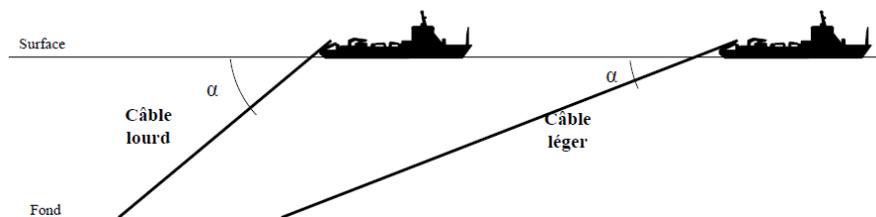


Figure 22 Angle α pour un câble lourd et un câble léger

Source: AACSM

5.2 La pose avec charrue

Lors de l'utilisation de la charrue, la mise à l'eau et la remontée sont des moments critiques nécessitant un arrêt du navire câblé.

Il faut prendre des précautions pour ne pas emmêler le câble de remorque, le câble ombilical servant à alimenter la charrue en électricité et le câble de télécommunication.

La charrue doit notamment être remontée lorsque le chemin croise une autre ligne de câble ou des tuyaux. Si l'on ajoute à cela les situations d'urgence et les avaries, telles que des pannes d'ombilical, d'instruments, de casses, de retournement de la charrue, etc., les retards sur le planning peuvent parfois devenir longs et coûteux.

Pendant l'utilisation de la charrue, la vitesse est inférieure à la vitesse à laquelle le câble pénètre dans l'eau. La caténaire ne sera plus en ligne droite mais aura une légère courbure, ce qui aura pour effet d'avoir une tension T_0 au point de contact supérieur à $0 N$.

L'opérateur a la possibilité d'ajuster la longueur de la caténaire entre le navire et la charrue pour que le point de contact du câble avec le fond marin soit situé en avant de la charrue et à une distance suffisante. Ainsi la tension à l'entrée de la charrue sera la plus petite possible.

Néanmoins, cette distance ne doit pas être trop grande pour éviter que le câble ne forme un angle droit à l'entrée et à l'avancée de la charrue.

Pour vérifier que le câble ne se mette pas en angle droit, l'opérateur peut visionner, à l'aide de caméras situées à l'avant de la charrue, si la tension dans le câble est correctement réglée avec la machine à câble. Il peut de cette façon garder une distance comprise entre 50 et 200 m.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

Malgré ces précautions pour que la tension en avant soit proche de 0 N , le fait que le câble se lève devant la charrue pour passer dans la cage et les frottements à l'intérieur de la charrue, le câble ensouillé aura quand même une tension résiduelle. Cette tension doit rester la plus petite possible, en particulier dans les changements de directions ou dans les fonds ondulés, pour éviter que le câble ne sorte de sa souille.

La tension moyenne après le passage de la charrue se situe aux alentours de 200 kg . Pour pouvoir réduire encore plus la tension résiduelle, certaines charrues sont munies d'une machine à câble.

On remarque, donc, que le mou et la pose par charrue ne sont pas compatibles. Après calculs, le mou peut fluctuer entre 0 et 0,25 % et ce, en raison des légères altérations de cap de la charrue le long du parcours.

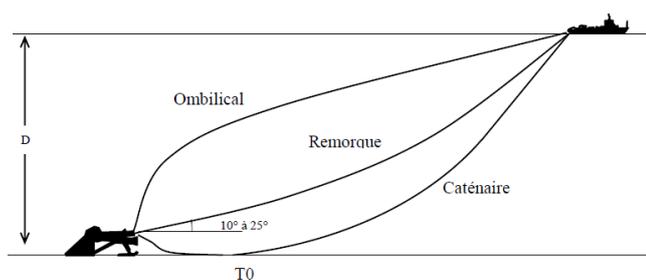


Figure 23 Ensouillage par charrue

Source: AACSM

De nos jours, la profondeur d'ensouillage est généralement de 1 mètre. Néanmoins, elle peut varier jusqu'à 2 mètres même si cela reste compliqué dans les sols plus durs.

Pour éviter un quelconque danger, certaines charrues sont cependant capables d'ensouiller dans les fonds sableux jusqu'à 3 mètres. Ces performances viennent du fait que les navires peuvent tracter les charrues avec une tension nominale proche de 60 tonnes.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

Ainsi, les charrues anglaises « Rock plough » sont capables d'ensouiller également dans les fonds rocailloux.

Type de sol	Vitesse (m/s)	Profondeur (m)
Roche dure morcelée	0,1	0,4
Craie/Roche tendre	0,2	0,7
Sédiment compact	0,3	1,2
Sédiment non compact	0,4	1,5
Argile/Sable	0,5	1,75
Vase/Glaise	0,8	2,5

Tableau 2 Profondeurs et vitesses d'ensouillage d'une charrue en fonction du type de sol

Source : adaptée de AACSM

Dans le cas où la station émettrice se trouve à terre, le câblage se positionne à quelques miles nautiques de la côte.

A partir de ce positionnement, un petit navire spécialisé tire la ligne depuis le câblage et ce jusqu'à la côte afin d'établir une connexion avec le câble terrestre. Pour faciliter cette opération, le câble a été préalablement équipé de flotteurs (cela procure une meilleure maniabilité étant donné qu'il n'est pas traîné au sol).

Dans certains cas, cette tâche peut être supervisée par des plongeurs qui surveillent le bon déroulement de l'opération.

Après quelques heures de travail, les techniciens à terre effectuent le raccord, le câble sous-marin devient le prolongement de la ligne terrestre. Les électriciens à bord vont effectuer, alors, une boucle de connexion. C'est-à-dire qu'ils vont envoyer un signal et attendre d'avoir un retour provenant de la station terrestre. Ils s'assurent, de cette manière, du bon fonctionnement du câble et vérifient que le raccord a été correctement effectué. (« Titans des mers - Le Tyco Resolute » 2008) (« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

Lorsque la connexion est établie, les flotteurs sont détachés pour pouvoir placer le câble à sa position exacte. Cette opération s'effectue avec l'aide des plongeurs qui utilisent des jets d'eau pour déplacer les sédiments se trouvant sous le tronçon. Une tranchée capable de l'accueillir est, dès lors, formée. (« About Submarine Power Cables » 2011)

Dès ce moment, le câblier commence à filer le câble en appliquant une des deux méthodes utilisées dans ce domaine en fonction de la zone et des prescriptions faites par le bureau d'étude, c'est-à-dire avec la charrue ou sans la charrue. Le câble quitte la cuve de stockage et passe via une série de roues et tambours destinée à contrôler la tension. Elles empêchent, aussi, d'avoir des courbures excessives. Il ne faut, également, pas omettre de dire que tout au long de l'installation, le câble est alimenté en permanence pour s'assurer de son bon fonctionnement au cas où il subirait des dégâts lors du débobinage ou de la pose. Cette surveillance a lieu à bord, dans une salle de contrôle qui est en contact permanent avec la station terrestre.

La première méthode est employée, notamment, dans les zones où il existe un risque pour le câble.

Dans ce cas, la charrue est mise à l'eau pour effectuer l'ensouillage, pour protéger la ligne en l'enterrant dans une tranchée. Depuis une salle d'écrans, une équipe contrôle le bon déroulement de l'opération grâce à des caméras fixées sur la charrue et à des capteurs indiquant en temps réel la distance parcourue, la vitesse et la tension dans la ligne. Cette seconde technique est beaucoup plus lente que la première étant donné que le poids de la charrue et la résistance qu'elle procure en faisant le sillon sont plus conséquents.

Ainsi le navire peut poser 700 mètres de câble/heure, soit 17 kilomètres/jour (cf. : les étapes de la pose d'un câble sous-marin de fibres optiques sur le René Descartes - (Le Gall 2015). C'est nettement moins que les 100 kilomètres atteints lors d'une pose simple.

Lorsque la charrue arrive à un point de croisement avec un autre câble ou un pipeline, elle doit être relevée suffisamment pour passer au-dessus avant d'être redéposée de l'autre côté pour continuer son travail. Ces parties seront ensevelies ou aménagées plus tard par le ROV ou des plongeurs.

La deuxième méthode s'applique en eau profonde, là où le fond se situe à plus de 1,5 *km* sous le niveau de la mer. A ce stade, le risque causé par les filets de pêches et les ancres est quasiment nul.

Elle consiste à déposer le câble sur le fond marin et d'éventuellement l'ancrer si prescrit le tracé, le mentionne. Cette méthode est la plus rapide. Ainsi un câblier peut poser environ 100 kilomètres de câble par jour.

Dans les deux cas, il est rare que la câble soit installé en ligne droite. Bien souvent, le navire va effectuer des zigzags pour éviter tous les endroits difficiles tels que les rochers, les gouffres ou encore les épaves.

Dans les zones où aucune de ces méthodes ne peuvent être employées - notamment dans les fonds rocheux où la charrue est inutilisable ou au croisement avec un pipeline - des techniques alternatives seront mises en œuvre afin de protéger le tronçon situé à cet endroit. On utilisera alors des tuyaux flexibles, pour recouvrir le câble, qui seront enfouis sous des roches ou des sortes de matelas que l'on viendra déposer délicatement par-dessus.

On crée, ainsi, un tunnel qui permettra une protection plus accrue.

(« Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM »)

(Taormina et al. 2018)



Figure 24 Matelas et tube de protection

Source : Taormina et al. 2018

6. La réparation

Pour de multiples raisons tels la corrosion, un chalut, une ancre dérivante, l'abrasion ou même le sabotage, un réseau peut être endommagé. Cela arrive régulièrement et nécessite une bonne semaine de maintenance.

Pour de tels travaux sur des câbles électriques, les coûts s'élèvent entre 7 et 12 millions d'euros. En outre, il a été rapporté que les défaillances des câbles sous-marins représentent 77 % du coût total mondial des pertes des parcs éoliens offshore (*Mike McLachlan*).

Lorsqu'un câble a subi des dégâts, il est urgent de le réparer au plus vite car un autre câble prend le relais pour servir de soutien aux câbles endommagés, ce qui le pousse dans ces limites opérationnelles.

S'il s'agit d'une ligne de fibre optique, la réparation est très importante car des pays entiers pourraient être privés de téléphone et d'internet. Et par conséquent les chefs d'états aussi. Imaginez-vous les lourdes répercussions ! A noter : de telles lignes ont la capacité de faire passer 200 000 emails ou 100 000 appels téléphoniques (« Titans des mers - Le Tyco Resolute » 2008).

6.1 Maintenance

Pour une opération optimale du câble, des inspections et des tests doivent être effectués périodiquement pour prévenir la détérioration. Ce qui inclus les éléments suivant :

- Une inspection pour vérifier qu'il n'y a pas de déchirures ou des usures.
- Une étude de la route du câble pour vérifier la stabilité du fond marin et les activités géodynamiques possibles qui pourraient menacer l'intégrité de la ligne.
- Un remplacement préventif des composants des câbles dès lors qu'il-y-a des signes d'usure ou lorsqu'ils sont proche de leur fin de vie.
- Appliquer les règles et règlements concernant la protection dans les zone d'ancrage. (Ardelean et al. 2015)

6.2 La procédure

Quand le propriétaire s'aperçoit d'un dysfonctionnement, il avertit immédiatement la compagnie avec laquelle il a un contrat. Celle-ci dispose de 24 heures pour appareiller avec tout l'équipement nécessaire pour effectuer la mission. Nous parlons du personnel, du câble, des outils, des kits de jointage et des vivres.

Lorsque la partie endommagée est localisée précisément et une fois le navire arrivé sur la zone, une personne responsable appelle la station émettrice pour stopper l'alimentation électrique, détourne le trafic internet et téléphonique circulant dans le câble vers un autre chemin. Même s'il n'est pas forcément un réseau appartenant à la compagnie de ce câble.

Ce genre de situation coûte très cher à cette compagnie qui souhaite une réparation dans les plus brefs délais.

Une fois le feu vert donné, les techniciens peuvent sectionner le tronçon à l'aide d'un grappin muni d'une lame, pesant près de 800 *kg* et ainsi récupérer le câble endommagé. Mais ceci n'est pas chose facile et plusieurs paramètres sont à déterminer tels :

- L'angle et la vitesse de récupération.
- La route à suivre par rapport au câble.
- La résistance du câble, car son diamètre a pu augmenter à cause des coquillages et autres organismes.
- La profondeur, la vitesse du courant.

Heureusement le manufacturier fournit des tables de tensions de récupération qui décrivent la vitesse maximale recommandée pour une profondeur donnée et un angle de récupération pour chaque type de câble fabriqué.

D'autre part, les meilleures compagnies travaillent avec les normes et des systèmes de gestions fournis par l'Organisation Internationale pour les Normes sous le système ISO 9 000 et ISO 9 001 qui couvrent les aspects du management de la qualité. Ces compagnies ont également à leur disposition des recommandations publiées par le Comité de Protection des

câbles qui leur fournit des informations essentielles sur le sujet. Mais également d'autres institutions publient aussi ce genre de recommandations tels le Groupe d'Amélioration des Câbles Sous-marins (SCIG) et le Comité de Protection des Câbles du Royaume-Unis (UKCPC).

Une fois que le câble a été correctement sectionné que le ROV est employé. Il s'empare d'une des deux sections et la ramène à la surface à proximité du navire puis replonge immédiatement pour s'emparer de l'autre moitié. Dans le cas où le ROV ne fonctionnerait pas pour une raison ou une autre, cette tâche peut également être faite par un filin muni d'un crochet spécial qui attrape et soulève le câble jusqu'au navire.

Une fois hissé à bord du câblage, il est emmené jusqu'au laboratoire de fibre optique où il est nettoyé, dénudé et ausculté. Les fibres optiques sont si fines qu'elles doivent passer dans une machine à épisser électronique. Les deux extrémités sont fusionnées à l'aide d'une minuscule étincelle. Cette technique est quasiment la même que celle employée, par des techniciens, lors de raccords d'installation effectués dans des maisons.

Lorsque la soudure est terminée, les techniciens appliquent une coque en plastique ou en résine qui est moulée autour de l'épissure. Elle sert de boîte de protection aux fibres qui viennent d'être soudées pour que la réparation résiste à l'énorme pression sous-marine. Il existe deux types de joint, « câble-câble » appelé Joint Universel (UJ) ou « câble-répéteur » appelé Couplage Universel (UC).

Le joint en résine passe ensuite dans un scanner à rayons-x pour être radiographié et examiné. Les objectifs sont de vérifier l'étanchéité et l'absence de bulle d'air à l'intérieur, car cela risquerait, une fois immergé, de faire éclater la réparation sous l'effet de la pression.

Quand toutes ces opérations sont terminées, les stations terminales sont averties et relancent le flux de données et/ou d'électricité en collaboration avec les centres de supervision. Des tests sont effectués afin de vérifier que le réseau est à nouveau opérationnel.

La repose du câble se déroule de la même manière que lors de la pose. La seule différence est que le tronçon est légèrement plus grand suite au joint en résine qui a été appliqué.

6.3 Dédoubllement d'une ligne

Dans certaines situations, une ligne peut être amenée à être divisée en deux routes pour pouvoir desservir un autre pays. C'est notamment le cas entre le Costa Rica et la ligne Panaméricaine (PAC-1) qui relie la Californie (USA) au Panama dans l'océan Pacifique.

Une ligne a été amenée au large en effectuant les opérations nécessaires pour poser un réseau. Une fois sur le site de rencontre avec le PAC-1, le câble est détaché et déposé sur le fond. A ce stade, le câblier peut procéder au sectionnement de la ligne déjà existante suivant les mêmes procédures que lors de la réparation.

Quand une des deux sections est amenée à bord, les techniciens vont faire une épissure avec une unité de connexion ; il s'agit d'un commutateur électronique de 600 *kg*. Ce connecteur a une entrée et deux sorties permettant de diviser le réseau en 2 câbles distincts. Vient ensuite la deuxième et la troisième connexion. Une fois les branchements terminés, on s'assure que chacun des deux pays reçoit un signal de bonne qualité. S'il s'avère correct, l'unité de connexion peut être déposée, avec une grande délicatesse, au fond de l'océan. (« Montserrat Submarine Fibre Optic Project | Facebook » 2020) (« Titans desmers-LeTycoResolute »2008)



Figure 25 Dédoubllement d'une ligne

Source : Montserrat Submarine Fibre Optic Project

7. Comment réduire le risque de dégâts sur un câble

Pour minimiser le risque de dégâts aux câbles, le personnel navigant doit prendre de bonnes mesures avant le voyage. En voici quelques exemples :

- Une bonne pratique de la navigation et une planification des passages doivent être mises en place systématiquement même lors de manœuvres dans des eaux familières.
- Une évaluation de la zone des opérations de pêche doit être menée avant le voyage et les opérations. Ainsi les câbles sous-marins et autres obstructions seront notés sur les cartes papier et/ou électroniques avec vérification des mises à jour.
- Les avis temporaires et préliminaires aux navigateurs (T&P's) qui les préviennent des nouveaux câbles et obstructions devant être consultés. Chaque semaine l'Amirauté publie une nouvelle version détaillant tout nouvel obstacle avant la publication des corrections de cartes.
- Des informations via les avertissements et les émissions de radionavigation (Navtex et EGC safety net) peuvent être utiles concernant des nouveaux câbles sous-marins et autres travaux. Le navtex et les autres récepteurs GMDSS doivent être correctement configurés pour recevoir les messages importants et utiles. Les informations à ce sujet peuvent être renseignées via l'ALRS vol 5.

Pour les pêcheurs il existe le « *Code de sécurité des pêcheurs et des bateaux de pêche, 2005* », il comprend les éléments suivants :

1.3.13 Une attention particulière doit être portée lorsque la traction des engins de pêche peut avoir un effet négatif sur la stabilité (par exemple lorsque les filets sont tirés par un bloc électrique ou que le chalut attrape des obstacles sur le fond marin). La traction de l'engin de pêche doit être aussi basse que possible sur le navire, au-dessus de la ligne de flottaison.

4.1.7 Les attaches (obstructions aux engins sur le fond marin) sont une source de danger sur le pont jusqu'à ce que la dernière section de l'équipement soit à bord.

La tension dans les chaînes pouvant dégager les attaches doit être aussi basse que possible et aussi proche que possible de la poupe du navire.

De grandes tensions peuvent se produire dans des endroits inattendus lors du soulèvement sur des chaînes tendues ou par le mouvement du vaisseau. Les fixations qui entraînent la séparation du train à une extrémité et le transport de la charge entière à partir d'une chaîne présentent des situations dangereuses.

4.2.4 Lorsqu'un filet se rapproche d'un obstacle sur le fond marin (une attache), les freins à tambour du treuil doivent être immédiatement desserrés. Le skipper ne doit jamais essayer de récupérer un filet à partir d'une attache avec la chaîne qui passe sur le bloc à l'extrémité extérieure de la flèche du stabilisateur. Il y a un risque de chavirement du navire de cette façon. Le bloc de chaîne à l'extrémité extérieure de la flèche doit ensuite être abaissé et ramené à l'intérieur. Il en va de même pour le levage de poids lourds ou inconnus.

En plus de toutes ces mesures, les pêcheurs de l'Union européenne doivent au minimum garder leur système d'identification automatique (AIS) opérationnel à tout instant (légalement requis pour les navires de plus de 15 mètres, comme le stipule la Commission européenne). Cependant l'OMI stipule que l'AIS n'est pas obligatoire pour les navires inférieurs à 300 gross tonnage et donc aux navires de pêche non européens entrant dans cette condition.

Le personnel à bord de ces bateaux ne doit jamais supposer que les câbles sont enfouis, il est nécessaire de vérifier que les dernières cartes « KIS-ORCA » sont téléchargées dans le traceur, ainsi que de consulter les bulletins (bimensuels) de « Kingfisher » qui fournissent les mises à jour concernant la position et l'état des câbles sous-marins.

Comment réduire le risque de dégâts sur un câble



Figure 26 Carte "KIS-ORCA" dans la zone Mer du Nord/Manche

Source : KIS-ORCA

Toutefois si l'engin vient à être accroché, il est conseillé aux membres de l'équipage de ne pas essayer de le récupérer mais de le laisser sur place. Ils sont invités à noter son emplacement et à alerter les garde-côtes.

Dans la mesure où le programme « KIS-ORCA » est installé et à jour et que l'autorité compétente est notifiée dans les 24 heures suivant l'arrivée au port, les pêcheurs pourront être remboursés pour leur matériel endommagé. En procédant de la sorte, les pêcheurs sont moins sujets à réclamer (de la part des opérateurs de câbles), des dédommagements coûteux mais cela évite, également, le risque de pertes de vies. (« SubSea Cables - Cable Burial | KIS-ORCA » 2018)

8. Point de vue juridique

8.1 Le droit de la mer

Les câbles sont soumis principalement à la Convention Internationale de la Protection des Câbles Sous-marins (ICPSC). Bien que les principaux termes soient mentionnés dans la Convention des Nations Unies pour la Loi de la Mer (UNCLOS), l'ICPSC reste la seule à fournir des procédures détaillées comme indiqué dans les articles ci-dessous.

- *Article 5 : Les feux et marques de jour à montrer par les câbliers ; la distance minimale à laquelle les autres navires peuvent se tenir par rapport au câblier ;*
- *Article 6 : La distance minimale à laquelle un autre navire peut se tenir par rapport aux bouées des câbles ;*
- *Article 7 : Les procédures en cas de sacrifice d'une ancre ou d'un engin de pêche ;*
- *Article 8 : La compétence des Cours nationales pour les infractions ;*
- *Article 10 : Les procédures pour embarquer à bord des navires suspectés d'avoir endommagé des câbles et obtenir des preuves de l'infraction.*

Comme nous avons vu dans le cours « *Droit de la mer* » (G. Gonsaeles), les navires soumis à la pose et à la réparation des câbles sous-marins privilégient d'un statut spécial. Ils sont libres de poser, faire une maintenance et réparer une ligne dans la mer territoriale d'un pays.

La seule condition est que le tracé posé sur le plateau continental ait été approuvé par l'Etat côtier. Si tel est le cas, l'Etat en question ne pourra pas porter atteinte à la navigation ni entraver une quelconque opération, sauf en cas d'une circonstance exceptionnelle mentionnée clairement par le pays.

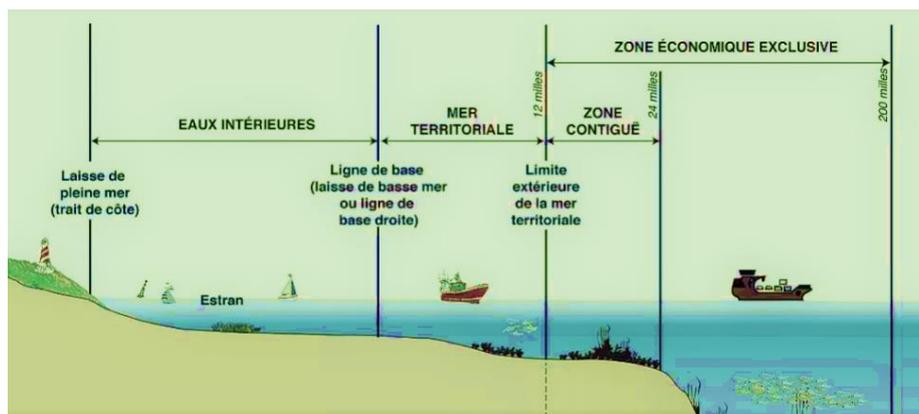


Figure 27 Limites maritimes de juridiction de l'Etat côtier

Source : Le SHOM

Lorsqu'un câble sous-marin est installé, il est lié au pays dans lequel la compagnie propriétaire du réseau possède son siège social. Cela signifie que si un individu sabote le câble, il sera poursuivi par l'Etat responsable de la ligne et devra répondre de ses actes devant le tribunal, selon les lois de cet Etat.

Dans le cas où les dégâts sont involontaires, notamment si l'ancre ou le filet de pêche se retrouve bloqué par un câble, il est possible de sacrifier ce dernier. Le propriétaire du câble est alors soumis à un dédommagement pour éviter des complications. Il bénéficie, dans ce cas, d'un gain potentiel d'argent. En effet, il n'aura pas à devoir réparer sa propre ligne.

Lors d'une réparation, il est important de noter qu'elle sera organisée régionalement par un contrat privé et non par un mandat gouvernemental. ("Submarine Cables: The Handbook of Law and Policy". Burnett, Beckman, et Davenport 2013)

Les câbles sont protégés par trois conventions internationales citées ci-dessous :

- **Convention Internationale Pour La Protection Des Câbles Télégraphes Sous-Marins (1884).**

Convention qui définit le statut des lignes télégraphiques sous-marines et aériennes en période de paix et en période de guerre.

- **Convention Internationale sur le Plateau Continental (1958).**

L'expression « plateau continental » est utilisée pour désigner :

« a) Le lit de la mer et le sous-sol des régions sous-marines adjacentes aux côtes, mais situées en dehors de la mer territoriale, jusqu'à une profondeur de 200 mètres ou, au-delà de cette limite, jusqu'au point où la profondeur des eaux surjacentes permet l'exploitation des ressources naturelles desdites régions ;

b) Le lit de la mer et le sous-sol des régions sous-marines analogues qui sont adjacentes aux côtes des îles. »

L'Etat riverain exerce des droits souverains sur le plateau continental aux fins de l'exploration de celui-ci et de l'exploitation de ses ressources naturelles.

- **Convention des Nations Unies sur le Droit De La Mer (1982).**

Cette convention définit les droits des Etats côtiers et des compagnies des câbles en fonction des limites maritimes dans lesquelles le câble se situe ainsi que le responsabilités en cas de dégâts sur la ligne.

Ces traités assurent :

- La liberté d'installer des câbles sous-marins en haute mer au-delà du plateau continental et de réparer les câbles existants sans obstacle ni préjudice.
- La liberté d'installer et d'entretenir des câbles sur le plateau continental, sous réserve de mesures raisonnables pour l'exploitation de ses ressources naturelles.
- La liberté d'installer et d'entretenir des câbles dans la Zone Exclusive de tous les Etats.
- La liberté d'installer et d'entretenir des câbles sur le territoire ou la mer territoriale d'un Etat sous réserve des conditions et de l'exercice de la juridiction nationale.
- La liberté de maintenir les câbles existants traversant les eaux d'un Etat archipel sans toucher terre.

8.1.1 Protections légales

Légalement le statut des câbles sous-marins est peu protégé. En particulier lorsqu'ils ne relèvent plus de la juridiction d'aucun Etat, quand ils se trouvent sur les fonds marins en haute mer. C'est la conclusion de deux grandes études juridiques qui ont abordé le problème comme nous allons le voir.

Le professeur Heintschel von Heinegg a examiné la cyber-infrastructure sous-marine dans un chapitre d'une publication du Centre d'excellence en matière de cybersécurité coopérative de l'OTAN en 2013 et a conclu que : « *Le régime juridique actuel comporte des lacunes et qu'il ne protège plus adéquatement les câbles sous-marins* ».

En 2015, Tara Davenport, Yale Law School a examiné le même sujet et a déclaré : « *Le régime juridique actuel est insuffisant pour garantir la sécurité des câbles.* ».

« La capacité des États à cibler les câbles sous-marins en temps de guerre est également ouverte à la discussion. Les objets peuvent être visés par le droit international humanitaire s'ils contribuent efficacement à l'action militaire en raison de leur nature, de leur emplacement, de leur but ou de leur utilisation et si leur destruction totale ou partielle, leur capture ou leur neutralisation offre un avantage militaire certain. »

Le meilleur exemple de l'étendue de la dépendance militaire à l'égard des câbles sous-marins appartenant à des civils et exploités par des civils se trouve dans un article du « Belfer Centerpaper » de 2010.

Il indique que trois des plus gros câbles entre l'Italie et l'Égypte ont été sectionnés à la fin de 2008. En conséquence, les opérations de drones américains en Irak ont été considérablement réduites. Les câbles sous-marins transmettent simultanément des données militaires et civiles critiques. Si la présence des premiers signifie qu'ils peuvent être ciblés, cela est toujours soumis aux principes de proportionnalité et de précautions dans l'attaque, conçus pour minimiser les dommages causés à la population civile.

(« The Challenge of Defending Subsea Cables »)

8.2 Assurance maritime

Ces dernières années ont vu un nombre croissant de réclamations pour des ruptures de câbles, ceci n'est pas étonnant vue l'augmentation du nombre de ces derniers. Comme expliqué précédemment, les réclamations proviennent de dommages causés par les ancres et les engins de pêche. (« International Union of Marine Insurance »)

Après la rupture de la section, la première étape consiste à recueillir des preuves légales, c'est-à-dire des images vidéo à l'aide d'un ROV, des données de surveillance des signaux en temps réel à terre et des données de suivi des navires (Système d'Identification Automatique (AIS) et Système de Surveillance des Navires (VMS)).

Pour établir la responsabilité, l'opérateur du câble doit prouver que le navire a fait preuve de négligence. Il doit présenter les éléments suivants :

- 1) Le câble a été endommagé par des moyens mécaniques.
- 2) Le navire avait les informations sur la position du câble (via les cartes par exemple).
- 3) Le navire était sur le lieu de la défaillance au moment de celle-ci.
- 4) Le navire était engagé dans une opération pouvant mener à des dégâts.
- 5) Aucun autre navire ne se trouvait dans la zone de défaillance au moment de la faute.

Pour l'opérateur du câble, les réclamations doivent être déposées auprès de la Cour de l'Amirauté. La compétence de la Cour dépendra de multiples considérations relatives aux questions de droit international privé. Si cette dernière est compétente, il faut considérer la limitation du tonnage qui autorise les armateurs et les autres partis intéressés à limiter leur responsabilité à un montant fixe calculé sur base de la jauge brute du navire (sauf si l'opérateur du câble arrive au-delà du seuil de limites). Les opérateurs ont le droit de faire arrêter le navire en question pour garantir leur demande de dédommagement jusqu'à ce que le fonds de limitation ait été constitué. En pratique, les assureurs P&I (Protection et Indemnité) du navire vont rédiger une lettre d'engagement pour éviter l'arrestation. ("Subsea Cable Damage Claims – A Legal Perspective" - Kazaz 2018)

8.3 Espionnage

L'espionnage entre les pays n'est pas qu'un scénario de film ou un mythe. Il existe réellement et notamment sur les câbles sous-marins d'internet.

Fin 2017, le contre-amiral Lennon (USN), commandant des sous-marins de l'OTAN a révélé que : « *Nous voyons maintenant une activité sous-marine russe à proximité de câbles sous-marins que je ne crois pas avoir jamais vus. La Russie s'intéresse clairement à l'infrastructure sous-marine de l'OTAN et des pays de l'OTAN.* ». (« The Challenge of Defending Subsea Cables »)

En novembre 2019, le « Yantar », un navire espion russe était soupçonné de roder près de câbles internet dans la région de Trinidad et des Caraïbes. Il est même arrivé qu'il disparaisse du système de suivi des navires pendant plusieurs heures. D'après les analyses, il serait passé aussi au large des Etats-Unis.

Ce navire n'est pas inconnu, il a une notoriété dans la marine russe car il est spécialisé dans la recherche d'objets sur le fond marin, c'est qui d'après les experts inclue les câbles internet mais aussi les communications militaires.

Lors de ses précédents voyages, il passait régulièrement au-dessus de câbles internet. Notamment en octobre 2016 en Méditerranée orientale. Les soupçons se sont d'autant plus renforcés lorsque la compagnie Syrian Telecom (filiale de l'Etat – Syrie) a annoncé une panne d'internet pendant 10 jours. En réalité, la panne a duré moins de 10 jours, ce qui correspond au temps de présence du Yantar sur la zone.

On peut donc imaginer que monsieur Poutine aidait son allié syrien, le président Bachar el-Assad.

Au mois de novembre suivant, le navire se trouvait dans le golfe Persique où une panne d'internet a aussi été signalée sur le câble sous-marin « GBI ». Il se trouvait non loin de celui-ci après la panne puis il a fait une escale en Iran.

Dans la marine militaire, les opérations liées aux câbles sous-marins font partie de ce qu'ils appellent la « Seabed Warfare » (la guerre des fonds marins). Ce terme apparaît de

plus en plus depuis l'apparition d'internet mais c'est n'est pas non plus quelque chose de nouveau.

Durant la guerre froide, la marine américaine et certains de leurs alliés occidentaux ont effectué des missions d'espionnage au large de l'URSS. Le programme baptisé « Operation Ivy Bells » a engagé des sous-marins pour exploiter les câbles de communications soviétique. (Sutton 2019)

On se doute forte qu'avec les nouvelles technologies et les tensions restantes de la guerre froide, de telles pratiques soient toujours effectuées.

Le contre-amiral Thomas Ishee a déclaré, en s'adressant à l'US Naval Institute, qu'il souhaiterait voir plus de progrès dans la Seabed Warfare et dans les capteurs des fonds marins. La crainte est que la Russie s'attaque aux infrastructures critiques situées sur le fond marin. Ce qui déclancherait un nouveau conflit.

Le maréchal en chef de l'Air, Sir Stuart Peach, qui également chef d'état-major britannique à la Défense a déclaré en décembre 2017 au Royal United Services Institute que : « *Il-y-a un nouveau risque, pour notre mode de vie, qui est la vulnérabilité des câbles qui sillonnent les fonds marins* ».

Cela fait suite à un rapport pour l'échange politique par Rishi Sunak, qui est membre du Parlement britannique, qui a obtenu une importante couverture médiatique et qui fait réagir les hauts responsables militaires quelques semaines plus tard. (« The Challenge of Defending Subsea Cables ») (Sutton 2019)

Le même mois, le conseiller à la sécurité nationale du Royaume-Uni, Mark Sedwill a déclaré : « *Vous pouvez obtenir le même effet que lors de la Seconde Guerre mondiale, disons, en bombardant les quais de Londres ou en détruisant une centrale électrique en poursuivant l'infrastructure physique du cyberspace qui est sous la forme de câbles sous-marins* ». (« The Challenge of Defending Subsea Cables »)

On peut en conclure que pour la Russie, la Seabed Warfare est un objectif important.

En plus du Yantar, qui est équipé de mini-sous-marins, l'armée russe possède deux grands sous-marins nucléaires. Ils servent de navires-mères pour de plus petits sous-marins nains, également à propulsion nucléaire. Ces petits sous-marins sont capables d'atteindre les câbles situés dans le fin fond des océans.

(Sutton 2019)

Les analystes du renseignement américain ont ouvertement déclaré dans les journaux nationaux que le sous-marin américain « USS Jimmy Carter » pourrait avoir la capacité de « capturer » des câbles sous-marins et d'obtenir les données transférées sans briser le câble. Les spécialistes craignent que le Yantar possède des capacités similaires. (« The Challenge of Defending Subsea Cables »)

De part ces faits, on remarque que les câbles sous-marins ont été négligés bien que le piratage et les cyberattaques contre les ports sont régulièrement abordés dans les discussions sur les menaces maritimes et que certains auteurs avaient déjà identifiés les risques potentiels.

Cependant, ce n'est pas que les câbles qui sont visés mais aussi leur station d'atterrissage, lieux de débarquement des câbles sous-marins, qui sont à la fois bien connues et peu protégées. (« The Challenge of Defending Subsea Cables »)

Ces faits m'ont également été rapportés par le Lieutenant L. De Meulemeester (Belgian Navy), qui m'a précisé que l'armée belge était au courant de ces faits. Ils ont eu aussi quelques situations douteuses avec des navires de la marine russe mais également des navires non-militaires, suspectés d'appartenir à l'armée russe sans être officiels.

Il leur est même arrivé de capter du réseau internet en mer alors qu'en temps normal ils n'en avaient pas. Et dans les environs se situait un « navire de pêche » russe. L'ordre a immédiatement été donné à tout l'équipage de ne pas essayer de se connecter avec son smartphone, ni son ordinateur. Le risque d'espionnage était beaucoup trop grand.

9. Ecologie

Dans certains pays, les lois et les réglementations exigent une analyse de l'impact sur l'environnement (AIE) pour s'assurer que la pose et la maintenance n'auront pas un effet néfaste sur le milieu aquatique.

Cette analyse est relativement bien établie en Europe, Australasie, Amérique du Nord et pour certaines parties de l'Asie et de l'Afrique.

Cependant, une AIE dépend du processus réglementaire. Dans certains cas, elle doit être très complète et contenir des informations techniques, une déclaration de conformité ainsi qu'une accréditation environnementale.

Dans d'autres cas, elle peut être réduite à une simple consultation publique et/ou gouvernementale. Une telle évaluation peut durer quelques semaines voire une année. Cela dépend du nombre d'informations à recueillir et de la présence de ressources environnementales fragiles dans la zone.

Une AIE comporte généralement 5 éléments :

- 1) Une description du projet.
- 2) Une description de l'environnement (facteurs physique, biologique, géologique et socio-économique).
- 3) Une évaluation des effets potentiels sur l'environnement.
- 4) Une évaluation des mesures d'atténuation nécessaire pour réduire l'incidence du projet à un niveau environnemental acceptable.

(« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

9.1 Impact sur le milieu

Contrairement à ce que certaines personnes peuvent croire, les câbles sous-marins n'ont pas d'impact majeur sur la faune et la flore vivant sur son passage et ne procurent aucune pollution. Même si ces câbles sont à haute tension, le champ électromagnétique ne procure aucune perturbation.

Le seul dérangement subit est lors de l'utilisation de la charrue, la vie sous-marine se retrouve perturbée pour une période très courte.

Heureusement, la zone de pose redevient assez vite recolonisée. Après 1 à 2 mois, les organismes viennent s'accaparer de la surface libre offerte sur le câble.

Nous pourrions croire qu'il y a une augmentation du nombre de poissons et d'organismes dans le périmètre du câble, mais des études révèlent qu'aucune augmentation ni diminution n'est observée. (« About Submarine Power Cables » 2011)

Généralement, il existe des zones de protection pour les câbles sous-marins afin de leur éviter tout dommage. En combinant ces zones avec des sanctuaires marins, on peut améliorer la biodiversité et donc la quantité de poissons. Pour ce faire, ces zones doivent être réglementées contre la pêche illégale et contenir un habitat favorable au développement de la vie marine (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009).

D'autre part, Orange Marine a fait réaliser par le Groupement d'Intérêt Scientifique Posidonie une étude très élaborée de l'impact des câbles sur les écosystèmes marins qui a conclu elle aussi à un impact quasi nul.

Un câble sous-marin est conçu spécifiquement pour être installé dans l'environnement aquatique, il ne se dégrade donc pas dans l'eau de mer et ne cause pas de pollution. Au contraire, il permettrait même à certaines espèces de s'installer, ou de survivre, dans des environnements où elles n'auraient pas pu le faire.

C'est le cas de certaines espèces d'étoiles de mer ou d'anémones qui trouvent sur le câble un point d'accroche. Certaines expériences ont même été menées pour créer des récifs

artificiels avec des câbles sous-marins, au large du New Jersey et du Maryland. Ces récifs artificiels ont été colonisés par de nombreuses espèces de poissons, d'algues, d'invertébrés... (« Câbles sous-marins : du green dans le grand bleu » 2015)

Cependant, nous savons que les études commanditées par une société dont les intérêts sont en jeu peuvent être faussées ou exagérées.

9.1.1 Nuisances causées par le bruit

On entend souvent que les océans sont « bruyants » à cause des vibrations causées par les navires, les plateformes en mer, les sonars, etc. mais qu'en est-il des câbles sous-marins ?

Malheureusement, il existe peu d'informations sur les impacts potentiels de ces installations, la maintenance et l'opération. Cela est dû au fait que le bruit n'est pas considéré comme un élément clé des problèmes environnementaux lié aux câbles par la plupart des environmentalistes. Si l'on compare avec d'autres activités telles que les activités militaires, le martelage de pieux ou le forage, les niveaux maximaux de pression acoustique de l'installation et l'opération des câbles est très faible.

D'après les informations que j'ai obtenues auprès de « EGS Survey », un navire effectuant une opération d'installation se déplace à très faible vitesse (environs 3m/s), ses machines et ses propulseurs génèrent donc peu de bruit comparé à d'autres navires naviguant à pleine vitesse.

Le son produit par les instruments de mesures lors des enquêtes et lors des opérations est atténué naturellement sur de courtes distances, ce qui leur confère une faible empreinte acoustique. Pour le matériel mis en œuvre, les charriages à jets d'eau ne sont pas bruyantes malgré leurs puissants jets. Et pour finir, après l'installation les câbles restent silencieux au fond de l'océan. (« EGS Survey »)

9.1.2 Nuisances causées par les champs électromagnétiques

Avec le nombre grandissant de parcs éoliens en mer, le nombre de câbles électriques grandit lui aussi. On peut donc se poser la question : Est-ce que le champ magnétique induit par le courant des câbles électrique a une influence sur les poissons ?

Cette question fait suite à des études qui ont révélées que certaines espèces de poissons sont magnéto-sensible, c'est-à-dire qu'ils perçoivent le champ magnétique terrestre (ou magnétoréception) pour s'orienter et migrer (Allemand 2012). Mais ce n'est pas tout, cela pourrait également avoir des répercussions sur leur physiologie, leur reproduction et leur survie.

La nature d'un champ magnétique varie en fonction des courants électrique, des types de câble utilisés et si le câble est posé sur le fond ou enfoui.

Par exemple, le câble FenoScan est de type HVDC et se situe entre la Suède et la Finlande dans la mer Baltique. Lorsque sa puissance est maximale, le courant est de 1 600 ampères. Le champ magnétique généré est suffisamment puissant pour influencer le compas magnétique des navires. Ce qui nécessite des avertissements aux navires pour éviter des erreurs de navigation. (Sigray et Westerberg 2008) (Söker et al. 2000)

9.1.3 Risque de contamination par les câbles imprégnés de masse

Le risque avec ce type de câble est qu'il est rempli d'huile. En cas de rupture du câble, le fluide peut entrer dans le milieu aquatique. La quantité déversée dépendra du temps du colmatage, des réparations et de sa position.

Pour le câble « NorNed », les ingénieurs ont calculés un débit d'écoulement d'environ 50 l/h. Avec une pression décroissante dans le câble, l'écoulement va diminuer également. (« NorNed - TenneT ») (Taormina et al. 2018)

Il est estimé que la rupture dans la ligne va être notifiée dans les 100 premières heures. Durant cette période, 1 000 litres d'huile vont s'écouler. Le pire des scénarios pour les ingénieurs et les responsables serait de dépasser une quantité de 2 000 litres car ce serait terrible pour l'écologie. Ce type de scénario est cependant qualifié comme étant peu probable de se produire. (Taormina et al. 2018)

Si un tel événement venait à se produire, les mammifères marins et les oiseaux seraient les directement impactés mais également indirectement car les petits organismes dont ils se nourrissent, comme le plancton et le benthos¹⁸, seraient affectés. De ce fait, ils pourraient en mourir. (Taormina et al. 2018)

9.1.4 Perturbations

Les effets des perturbations liées à l'installation d'un câble sous-marin sont temporaires et localisés. Il apparaît que les équipements moderne et les normes actuelles garantissent que la concentration des sédiments en suspension qui apparaissent durant l'ensouillage ou l'enlèvement d'une ligne n'excède pas celle lors des conditions naturelles. (Taormina et al. 2018)

Un deuxième élément perturbateur pour la faune est lorsque le câble est protégé par des structures de protections (tuyaux, roches, matelas). Ces structures doivent être limitées à de petites tronçons le long du câble. Le risque est l'introduction de faune et de flore étrangères à la zone de par la création d'un nouveau sol dur dans un milieu composé de sédiments. (Taormina et al. 2018)

En ce qui me concerne, je pense que l'impact sera minime et très limité sur une petite zone étant donné que les structures sont placées sur de courtes distances. Il-y-a donc peut de risque sur le long terme, à moins que de futures recherches scientifiques nous démontre le contraire.

¹⁸ Benthos: ensemble des organismes aquatiques vivant à proximité du fond des mers et océans, des lacs et des cours d'eau.

9.2 Incidents avec la faune marine

Entre les années 1877 et 1960, les publications référençant les erreurs survenues dans les câbles indiquent que 16 baleines se sont emmêlées dans des câbles de télégraphe. Depuis, aucun autre incident de ce type n'a été recensé. Ceci, grâce à l'amélioration des techniques, des matériaux employés nettement plus solides et d'un meilleur arrimage sur et dans le fond ce qui évite d'avoir des lignes détendues. (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

Un peu plus tard entre les années 1985 et 1987, une découverte a prouvé que des requins se sont attaqués à un câble à fibre optique situé à environ 1,5 km de profondeur dans l'archipel des îles Canaries. Des dents de squales ont été retrouvées, coincées dans le câble. (« Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World » 2009)

Les attaques ont pu avoir lieu pour différentes raisons liées à l'odeur du câble, à sa couleur, à son mouvement ou à son champ électromagnétique. D'après les spécialistes, cette dernière raison reste la plus probable, car les premiers câbles transatlantiques étaient très peu isolés et qu'un champ électromagnétique s'en dégageait. La conséquence était que les requins s'en prennent à ces derniers qui étaient perçus comme une menace ou une proie.

A l'époque, la gaine protectrice entourant les câbles était très mince, la plupart des lignes étaient vulnérables. Grâce aux nouvelles techniques, des gaines blindées ont été ajoutées sur tous les câbles modernes, réduisant fortement le risque tant pour les animaux que pour le réseau.

Bien qu'en 2013 des dents ont été retrouvées plantées dans un câble, la fréquence des attaques de squales à l'heure actuelle est très minime (comme le confie Michel Piéton, directeur des maîtrises d'ouvrages chez Orange, « Le requin, une menace pour Internet très exagérée » (*FIGARO* 2014).

Le « Comité International de Protection des câbles sous-marins », confirme également que les morsures de poissons (dont les requins) ne représentent aucun défaut dans les câbles entre 2007 et 2014.

9.3 Câble en fin de vie

Comme toutes choses, les câbles ont une durée de vie limitée ne dépassant que très rarement les 25 ans de service. Mais qu'advient-il de ces derniers et de leurs composants en cuivre, acier, aluminium et plastique ?

Ils peuvent être remis à niveau pour pouvoir être réutilisés sur place ou être revendus comme câbles de seconde main. Il en est de même pour leurs répéteurs. Cela permet de répondre à la demande des pays en voie de développement, pour qui un câble neuf coûte trop cher ou pour des structures de recherches scientifiques telles que le CNRS (Boero 2019). D'autres sont tout simplement recyclés pour en récupérer les matières premières comme l'acier et le cuivre.

La société de récupération de câbles « CRS Holland » a estimé que 94% des câbles inutilisés et quelques 72 000 répéteurs sont laissés à l'abandon sur les fonds marins, ce qui représente une somme colossale estimée en milliards de Dollars. Arne De Jong, le cofondateur de cette société explique que lui et son équipe ont enroulé pas moins de 20 000 *km* de câbles gisant dans les océans entre 2009 et décembre 2016. Cette opération a rapporté la somme de 27 millions de Dollars (« The Guardian » 2016) (« CRS Holland » 2016).

Ce type d'activité n'est pas illicite tant que ces opérations sont réalisées pour le compte de la société propriétaire de la ligne ou avec son accord. Le plus gros problème concerne les vieux câbles télégraphiques situés en haute mer. En effet, la plupart des entreprises n'existent plus. Il est à savoir qu'aucun article de la Convention des Nations Unies pour le droit de la mer y fait référence. (*Convention des Nations Unies sur le droit de la mer* 1982)

En faisant mes recherches, j'ai compté sur le site l'ICPC qu'il existe 54 câbliers en activité dans le monde, ce qui paraît peut-être quand on compare avec l'étendue du réseau des câbles sous-marins. Avec l'augmentation croissante de la demande d'Internet, d'utilisation de l'électricité, de la croissance des parcs éoliens et bon nombre de câbles qui vont arriver en fin de vie au même moment, je pense que le secteur risque d'être au maximum de sa capacité à installer, réparer et récupérer les câbles.

Tout dépendra aussi si les sociétés voudront, ou seront contraintes par les Etats à récupérer leurs câbles après le délai de 25 ans.

9.3.1 Afin de décider de la dépose ou du maintien d'un câble sur le fond

Les éléments à considérer sont les suivants :

- *Tout effet potentiel sur la sécurité de la navigation ou d'autres usages, de façon à décider si l'enlèvement du câble est raisonnable (par exemple en considérant la présence d'épaves, de débris, ou de conduites d'hydrocarbures ou de gaz sur le fond).*
- *Les effets immédiats ou futurs sur l'environnement marin. Si le câble est composé d'un matériel inerte ou sans effet sur l'environnement, la possibilité de laisser le câble sur le fond peut être envisagée.*
- *La faisabilité technique et économique.*
- *La détermination d'un nouvel usage justifiant de laisser le câble sur le fond.*
- *La comparaison entre l'impact environnemental relatif à l'abandon du câble sur le fond à celui engendré par la dépose du câble.*
- *La gestion du câble hors service et notamment sa protection s'il reste sur le fond.*
- *Les bénéfices socio-économiques liés à la récupération du câble*

(Droit et Delort).

9.3.2 Si la décision de maintenir un câble redondant pour un futur usage ou d'abandonner un câble hors service a été prise

Les propriétaires du câble doivent :

- *Notifier aux autorités nationales et internationales que le câble n'est plus en service.*
- *Notifier aux pêcheurs locaux et aux autres utilisateurs des fonds marins de ce changement de statut De confirmer que toute future requête pour l'endommagement d'un appareillage sera de leur responsabilité.*
- *Confirmer qu'ils restent responsables pour assurer l'enfouissement du câble hors service ou toute autre opération nécessaire à la sécurité des usages.*
- *Considérer un usage alternatif pour le câble telle qu'une donation à un organisme de recherche scientifique*

(Droit et Delort).

10. Le futur

La Terre étant recouverte d'eau sur plus de 70% de sa surface, il reste encore beaucoup de choses à découvrir pour les chercheurs, tant sur le plan géologique que sur la biologie des océans.

Actuellement, il existe des observatoires permanents des fonds marins reliés à la terre par des câbles électro-optiques. Une telle installation est très coûteuse à installer et à entretenir, ce qui limite leur nombre et par conséquent, les recherches.

Les scientifiques ont remarqué que depuis le développement d'Internet, les océans sont de plus en plus souvent traversés par des câbles sous-marins à fibres optiques qui leurs sont très utiles pour les transmissions d'informations.

C'est pourquoi en 2012, un groupe de travail mixte international a été créé pour concevoir des câbles « SMART¹⁹ » (abréviation anglaise pour : Surveillance Scientifique et Télécommunications Fiables) équipés de boîtiers répéteurs munis de capteurs environnementaux placés tous les 50 *km*. ("Scientific Monitoring And Reliable Telecommunications (SMART) Cable Systems: Integration of Sensors into Telecommunications Repeaters" - Lentz et Howe 2018)

L'instrumentation des océans pourrait répondre à bon nombre de questions scientifiques, telles que la structure interne de la Terre, la dynamique des océans, mais aussi l'interaction entre la vie, les océans et la géologie.

Pour se faire, la surveillance des ressources naturelles et des risques naturels comme les tremblements de terre, les glissements de terrain sous-marins, les tsunamis, les bruits sous-marins et également la houle sont à prendre en considération.

¹⁹ Scientific Monitoring And Reliable Telecommunications

10.1 Sismologie

Plusieurs institutions françaises de recherche, parmi lesquelles le CNRS²⁰, l'IRD²¹ et l'OCA²², font une étude afin de démontrer que les câbles de télécommunications à fibres optiques sous-marins peuvent être utilisés pour détecter la propagation des ondes sismiques dans le fond des océans. Les chercheurs aimeraient les utiliser dans le futur pour créer un réseau dense de capteurs sismo-acoustiques.

L'étude a été réalisée au large de Toulon (France), sur un câble de télécommunication (MEUST-NUMerEnv) d'une longueur de 41,5 *km*. Le câble traverse plusieurs domaines océaniques du Nord de la Méditerranée, le plateau continental (peu profond), une pente continentale abrupte et une plaine océanique d'une profondeur de 2500 *m*.

Il est comme la plupart des câbles, simplement posé sur le fond marin, excepté pour les 2 premiers kilomètres. L'objectif principal est de collecter les données du détecteur « neutrinos KM3NeT/ORCA » qui est situé sur le plancher océanique.

L'étude a démontré la capacité de surveiller les interactions océans-terre de la côte jusqu'à la plaine abyssale avec beaucoup de détails. En plus de la sismicité de la région avec des caractéristiques comparables à celles des stations sismiques côtières, il est tout-à-fait possible à l'aide de ce câble, de mesurer un microséisme de magnitude 1,9 situé à 100 *km*.

(Boero 2019)

²⁰ Le Centre National de la Recherche Scientifique

²¹ L'Institut de Recherche pour le Développement

²² L'Observatoire de la Côte d'Azur

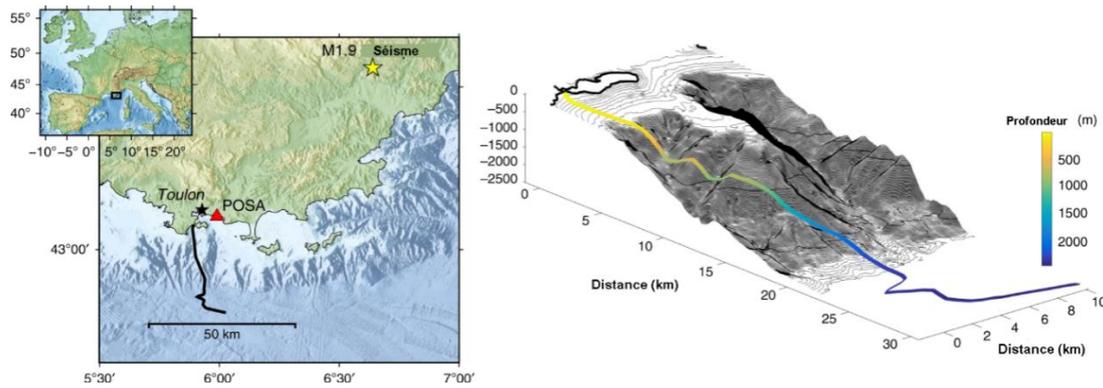


Figure 28 Carte et vue en perspective du câble « MEUST-NUMer » et environnement du fond marin.

Source : adaptée de : Springerature

La technique est appelée Détection Acoustique Distribuée (DAS, Distributed Acoustic Sensing). Elle exploite la phase de la lumière qui est rétrodiffusée par les inhomogénéités inhérentes de la fibre de silice pour fournir des mesures de déformation à haute densité.

Le DAS fournit des mesures acoustiques à haute fréquence (1kHz) avec un espacement métrique, transformant les câbles à fibres optiques en réseaux sismiques linéaires denses. L'industrie pétrolière et gazière utilisait cette technologie depuis plusieurs années. Mais ce n'est que récemment que son plein potentiel a été révélé pour des applications environnementales et sismologiques.

La méthode est cependant plus difficile qu'il n'y paraît car les câbles sont robustes. Ils sont fabriqués avec un gel spécial et un blindage métallique pour leur garantir une bonne stabilité. Ils possèdent une protection contre les torsions et toute autre perturbation externe comme les activités de pêche le long des côtes. Ajouter à ça un faible couplage entre le câble et les sédiments du fond marin, les ondes sismiques ne seront pas enregistrées correctement.

Malgré les résultats prometteurs de l'étude, les performances du DAS sur les câbles sous-marins doivent, encore, être étudiés afin de définir au mieux les applications possibles.

("Séismes : les câbles sous-marins rendent possible la détection des tremblements de terre" - Boero 2019)

10.2 Une seconde vie

Les scientifiques voient dans les câbles en fin de vie une aubaine pour leurs recherches techniques. Car, s'ils ne sont plus assez performants pour la demande actuelle, ils sont toujours fonctionnels pour la transmission de données.

En effet, des mesures d'ondes terrestres ainsi que celles des océans et de la houle (pour établir l'empreinte des vagues le long de la côte sur le fond marin et l'effet sur la plaine abyssale) sont possible pour les scientifiques avec ces câbles obsolètes.

Dans leur étude, les chercheurs supposent que les câbles pourraient être capables d'enregistrer les bruits émis par les cétacés ou les navires. L'avenir semble, donc, prometteur aux câbles en fin de vie car une utilisation encore plus avancée de ceux-ci semble possible si les études à venir s'avèrent concluantes.

("Séismes : les câbles sous-marins rendent possible la détection des tremblements de terre"
- Boero 2019)

11. Interviews

1. Extrait de l'interview téléphonique avec Y. Delegrange, 2ème officier à bord du câblé « Isaac Newton » (Jan De Nul)

- **Bonjour Mr Delegrange, je suis heureux de vous avoir par téléphone pour que vous puissiez répondre à mes questions. Premièrement je voulais vous demander, à quelle profondeur posez-vous les câbles sous-marins ?**
- Nous effectuons des poses à différentes profondeurs mais actuellement il est possible d'aller jusqu'à 8 000 mètres de profondeur.
- **J'imagine que la pose à une telle profondeur ne doit pas être une opération facile à exécuter ?**
- En effet, c'est très difficile. Les fonds marins ne sont pas plats, il-y-a des montagnes, des creux, des roches, du sable... Nous devons en permanence vérifier que le câble ne rencontre pas d'obstacle car il y a aussi des épaves en plus des obstacles naturels.
- **Comment faites-vous pour éviter ces obstacles ?**
- Une étude préliminaire est exécutée avant la pose pour décider du chemin à suivre et éviter ainsi le maximum d'obstacles. C'est une des étapes les plus importante.
- **Cette étude est-elle faite pour tout le trajet ou pour des zones très profondes ?**
- Pour tout le trajet. Car c'est vrai que pour les eaux profondes il n'existe pas de cartes mais dans les eaux de faibles profondeurs nous devons respecter la faune et les récifs de coraux. L'étude prend en compte également le risque que le câble soit endommagé par un navire au mouillage ou un pêcheur. Dans ces zones-là, nous enfouissons le câble.

- **Y-a-t-il une différence de diamètre entre un câble en eau profonde, plusieurs milliers de mètres, et un câble en eau peu profonde comme un câble côtier ?**
- Oui, il y a une différence. Dans des eaux peu profondes les câbles ont un diamètre plus grand que ceux installés dans les eaux profondes.
- **Qu'est ce qui explique cette différence ?**
- Dans les eaux profondes les câbles ont un diamètre de 17 mm, ça paraît peu mais lorsque le câble rencontre un obstacle il sera plus flexible et ne risque pas de casser. Tandis que les câbles d'eau peu profondes ont une gaine de protection et sont donc un peu plus épais pour les protéger des ancres et des pêcheurs.
- **Dans mon travail je parle des charrues, pouvez-vous m'expliquer son utilisation ?**
- Oui, tout à fait. Nous utilisons la charrue pour creuser une tranchée dans le fond marin. Un peu comme font les fermiers. La charrue est trainée derrière le navire pour nous permettre de déposer le câble dans la tranchée. Ensuite avec les courants le câble sera enfoui par les mouvements du sable.
- **Vous me disiez au début qu'un câble peut être posé à 8 000 mètres de profondeur. Comment faites-vous pour poser de manière précise à une telle distance ?**
- Nous devons prendre en compte plusieurs paramètres comme par exemple la vitesse des courants. Mais heureusement nous sommes aidés par des ordinateurs car au total la distance est deux fois plus longue que la profondeur car le câble ne tombe pas droit sous le navire. Nous avançons avec le navire tout en mettant le câble à la mer pour garder un certain angle.
- **Je suis épaté par la distance et la précision de cette technique. Je n'imaginais pas de telles performances lorsque j'ai commencé mon travail.**
- C'est vrai que lorsque l'on parle de notre métier aux gens il y a toujours de l'étonnement et beaucoup de questions.

- **Il n’y a pas que la pose, vous êtes aussi capable de réparer les câbles défectueux ?**
- C’est exact, parfois il se peut qu’un câble se casse suite à un tremblement de terre ou à cause d’un autre problème, mais c’est très rare. Bien souvent quand nous repêchons un câble c’est pour le connecter à un autre.
- **Comment faites-vous pour retrouver la ligne ?**
- Grâce à nos cartes nous savons assez précisément où se trouve le câble. On avance avec un cap perpendiculaire à la ligne pour l’attraper à l’aide d’un crochet et la remonter pour la réparer ou la connecter.
- **Une dernière question : Comment fait-on pour charger les câbles dans le navire ?**
- Le navire est équipé d’une cuvette dans laquelle le câble est enroulé. Cette opération prend du temps car il est fait manuellement. Une équipe se trouve dans la cuvette et s’assure que le câble est enroulé correctement et l’ajuste manuellement. Le chargement peut prendre plusieurs jours, cela dépend de la longueur de câble.
- **Mr Delegrange, merci de m’avoir accordé cette interview et merci à vous et votre équipe de nous permettre d’avoir accès à internet grâce aux câbles.**

2. Extrait de la rencontre avec M. Massart, 2^{ème} officier à bord du « Vole au vent » (Jan De Nul), installation d'éoliennes offshore.

- **Bonjour Monsieur Massart, je vous remercie de cette rencontre et le temps que vous m'accorder. Pour commencer, quelle votre grade à bord et qu'elle expérience avez-vous eu avec les câbliers ?**
- Actuellement, je suis 2^{ème} officier et officier DP sur le poseur d'éoliennes « Vole au vent » avec lequel nous travaillons en étroite collaboration avec un câblier lors des installations. Précédemment, j'ai travaillé sur un câblier en tant que 3^{ème} officier.
- **Où se situait le projet lorsque vous étiez à bord du câblier ?**
- Nous installons un câble de télécommunication entre l'Allemagne et la Russie.
- **Et actuellement, où se situent les éoliennes que vous installez ?**
- Nous sommes principalement en mer du Nord, au large de la Belgique. Mais il-y-a quelques mois, nous sommes allés au large des Etats-Unis car le pays veut développer l'énergie éolienne offshore mais ils ne disposent pas des moyens nécessaires donc nous en avons installé deux pour qu'ils puissent faire leurs essais.
- **Quelles sont les principales fonctions de personnes à bord d'un câblier ?**
- Il-y-a quatre officiers DP divisé en deux équipes de deux (un chef DP et un officier DP). Quand une équipe travaille, une effectue le travail de positionnement et l'autre inspecte ce qu'il se passe à l'extérieur, comme se comporte le navire, les conditions météo et vérifie que l'officier ne commet pas d'erreurs car c'est beaucoup de concentration.

Pour le chargement/déchargement du câble, une personne possède le grade d'opérateur carroussel. Il est chargé de superviser que le chargement dans cette grosse bobine qu'on appelle carroussel ou cuvelle. Avec son équipe, il met le câble en position à l'aide d'un gros pied de biche et vérifie qu'il soit chargé avec la bonne tension, comme prescrit par le fabricant, et va décider également de la vitesse de rotation du carroussel. Cette opération dure plusieurs jours, tout dépend de la

longueur et du diamètre du câble. Pour avoir une idée, le câble qui relie le parc éolien à la côte fait environs 300 *mm* de diamètre, donc un mètre de câble pèse dans les 80 *kg*. Cependant, s'il s'agit purement de fibre optique, le câble est beaucoup plus petit, environs 5 *cm* de diamètre.

Un surveyor (inspecteur) qui s'assure que le câble est posé à l'endroit exacte comme prévu dans les plans.

Quatre opérateurs pour le ROV, ils surveillent que le câble possède l'angle idéal avec le sol lors de son atterrissage mais aussi l'angle avec le navire.

Le propriétaire ou le client est sur place aussi, il va décider du déroulement des opérations. En cas de doutes ou de questions, on se réfère toujours à lui. Par exemple avec les éoliennes, nous on installe une éolienne et le câblier veut poser une ligne au même moment proche de nous. Dans ce cas, on contacte le client qui va décider de l'ordre de priorité des opérations.

Un représentant de l'assureur est présent également. Avant de commencer une opération, il va vérifier que les conditions météo sont dans les limites définies par les parties. Il peut dire non si la houle est 10 cm plus haute que prévu ou pour toutes autres limites dépassées même si ça paraît peu. Si tout est conforme, il signe le « certificat of approval - COA » (certificat d'approbation). Avant la signature, l'assureur est en quelque sorte le propriétaire du câble, pour avoir une garantie.

- **Pour un officier DP, quelles sont les principales difficultés lors des opérations ?**
- L'élément principal est la météo (le vent et le courant), lorsque tout est latéral ça complique un peu les choses. Bien qu'avec les ordinateurs, les moteurs compensent presque seuls ces effets.
- **Combien de moteurs y-a-t-il ?**
- Il-y-a six moteurs, divisé en trois groupes de deux moteurs. Comme ça en cas de panne, d'incendie ou de problème technique, les autres moteurs vont compenser et on peut continuer les opérations.

- **Vous parliez de la météo précédemment, lorsque la météo se dégrade durant les opérations, comment fait-on avec le câble en cours de pose ?**
- C'est assez simple, le câble est sectionné, on y place une protection et une bouée et puis on le laisse sur le fond. Dès que la météo est plus clémente, on le récupère avec le treuil via le câble de la bouée, il est reconnecté et on continue.
- **Dans de situations comme celle-là ou lors d'une panne. Qui paie qui ?**
- Si le navire a une panne, c'est la compagnie qui doit prendre en charge les cout (salaires, carburant, nourriture etc.). Si les conditions ne sont pas bonnes, la compagnie émet un « waiting on weather - WOW » (en attente de la météo), le client paiera mais moins. Il peut arriver que les conditions soient bonnes mais que le client ne veut pas. Dans ce cas il doit payer au tarif normal. Pour avoir une idée, dans la pose d'éolienne, le navire coût 300 000 \$ par jour. Pour les câbliers, le tarifs est moindre mais tout de même, ça donne une idée.
- **En parlant de tarifs, quels sont les coûts d'une pose ?**
- Pour être honnête, même nous nous ne sommes pas au courant des tarifs. Tout est tenu secret pour la concurrence, même les coûts lors d'escales pour le bunkering (remplir la citerne de fuel) et les provisions etc, Les prix sont grisés sur les papiers. Tu ne trouveras normalement pas de tarifs sur internet. Même les photos, juste quelques personnes sont habilitées à en prendre.
- **Que pensez-vous sur le future des câbles ? Du moins dans votre secteur les câbles électrique pour les éoliennes.**
- C'est en plein boom à l'heure actuelle car beaucoup de groupes privés veulent des concessions pour installer leurs éoliennes et des pays comme les USA veulent commencer à installer des éoliennes également. La raison est que les éoliennes coûtent moins cher comparer aux usines pour fournir de l'électricité. Il-y-a d'ailleurs plusieurs navire poseur d'éolienne en construction car les éoliennes deviennent plus grandes et les navires actuels ne sont pas assez grand. Donc pour les câbliers il y aura du boulot pour faire toutes les connexions. D'après ce que je sais, il-y-a quelques

nouveaux navires en cours de projet et préparation, notamment car les câbles sont de plus en plus long.

- **A propos des éoliennes, comment fait-on pour les connecter au câble électrique ?**
- Le câblage amène le câble jusqu'au « mono pil » (structure de base de l'éolienne qui est enfoncé jusqu'à 30 mètres de profondeur). Là, le ROV insère le câble dans un des trois trous prévu (au cas où la mono pil serait trop ou pas assez enfoncée). Puis il est tiré jusqu'au sommet de cette structure. Lorsque nous arrivons pour poser l'éolienne, celle-ci dispose déjà d'un câble reliant sa base à son sommet. Il ne reste alors plus qu'aux ingénieurs à effectuer la jonction entre les deux câbles.

Les éoliennes sont reliées entre elles par groupes puis redirigé vers une sorte de transformateur, qui lui envoie tout l'électricité en un seul câble vers la station côtière. C'est nécessaire pour envoyer un courant « plat » et ne pas avoir de changements de fréquences car les turbines des éoliennes n'ont pas toujours la même vitesse.

- **Lorsque le câble rencontre une crevasse, quelle technique est utilisée ?**
- Un navire spécialisé renfloue en déposant des roches ou parfois un petit pont est installé, mais c'est rare, c'est surtout lorsqu'il faut passer au-dessus d'un tuyau. Pour chevaucher les tuyaux, on utilise aussi une sorte de matelas (plus facile d'installer).
- **Je vous remercie d'avoir partagé vos connaissances et votre expérience dans ce domaine.**
- Tout le plaisir est pour moi, la transmission est un élément clef dans le secteur maritime.

3. Extrait de l'interview avec le Lieutenant L. De Meulemeester, démineur
« Godetia » (Armée belge).

- **Bonjour monsieur De Meulemeester, merci de m'accorder quelques questions. En voyant les opérations de déminage je me suis demandé si les câbles ne posent pas de problèmes lors de telles opérations ?**

- Pas vraiment, car généralement les mines ou les bombes sont trouvées lors des campagnes océanographique menées avant la pose du câble. Ils prennent alors contact avec nous et nous intervenons directement sur place et nous la faisons exploser sans devoir la déplacer car il n'y a pas encore de câble.

- **Est-ce qu'il est possible de détecter une mine après que le câble soit posé ?**

- Oui, ça peut arriver, notamment avec des câbles plus anciens car les techniques n'étaient pas les mêmes à l'époque et il peut arriver qu'il soit installé près d'une mine. C'est pendant les opérations de nettoyage de mine ou simplement par hasard (lors d'un exercice, via un pêcheur...) qu'une mine peut être trouvée près d'un câble. Dans ce cas-là, il faut qu'on « remorque » la mine vers une zone prévue pour la neutraliser.

Pour remorquer une mine, il existe plusieurs méthodes. La plus utilisée consiste à la ramener à la surface à l'aide d'un ballon d'air que des plongeurs ont au préalable attaché à la mine. Une fois à la surface et dépendant de l'état de l'explosif, celui-ci sera placé sur la plage arrière du démineur, soit vers une zone de destruction.

- **Je vous remercie pour ces explications sur votre métier et le lien que vous avez avec les câbles sous-marins. C'était intéressant.**

Conclusion

Depuis l'ère du télégraphe, le réseau des câbles sous-marins ne cesse de croître. Aujourd'hui, les câbles de télécommunication font partie intégrante de notre société. Ils connectent les pays entre eux, y compris, ceux en voie de développement.

Pour répondre à une augmentation de la demande, les navires se modernisent afin de répondre rapidement aux projets tout en limitant les risques d'accidents.

Ainsi, ils sont équipés d'une charrue sous-marine capable d'enfouir le câble mais également d'un robot sous-marin (ROV) pour inspecter et enfouir le câble aux endroits adéquats. Leur application ne se limite pas simplement à l'installation de nouvelles lignes. Ils sont aussi capables d'effectuer des réparations sur des réseaux déjà existants ou de connecter un tronçon à un câble déjà installé afin de relier un pays à un autre.

En outre, certains de ces navires sont polyvalents. Ils effectuent des tâches qui émanent du domaine offshore comme la réalisation de fondations à l'aide de roches, l'excavation ou la recherche océanographique.

Un tel projet doit se faire en accord avec les conventions UNCLOS et ICPSC mais également avec l'Etat côtier où le câble passe. Une étude de parcours est menée lors de la campagne océanographique afin de fournir un dossier complet sur le tracé emprunté mais également pour le délimiter avec précision et sans danger.

Malgré les avertissements, les marquage sur les cartes marines et l'expérience, l'erreur humaine est toujours présente et parfois il arrive qu'une ligne peut être endommagée à cause d'un chalut ou d'une ancre. C'est pourquoi des outils tel que KIS-ORCA et des directives sont mis à la disposition des pêcheurs et des officiers pour éviter un tel événement.

De nos jours, le respect de l'environnement prend une place importante dans ce que l'Homme entreprend, c'est pourquoi des recherches scientifiques sont menées pour vérifier que de telles installations ne causent pas de perturbations dans le milieu aquatique. Fort heureusement les câbles s'intègrent particulièrement bien avec ce milieu.

Dans certains cas, ils permettent de créer des zones protégées qualifiées de réserves naturelles. Cependant, il reste des zones d'ombres, car peu de recherches scientifiques, sur ce que l'on ne voit pas, tels que l'impact sur la faune des ondes électromagnétiques et du bruit émis par les câbles. Le point positif est qu'aujourd'hui des entreprises pensent à recycler les câbles en fin de vie pour récupérer les métaux précieux ou encore de leur donner une seconde vie pour les recherches scientifiques.

En réponse à ce travail de fin d'études, vous voici informés d'être les principaux utilisateurs des câbles sous-marins de télécommunication.

En effet, la plupart de nos projets ont pour objectif premier d'établir des connexions afin de vous fournir un accès direct à des serveurs internet. Grâce à eux, les distances entre les pays, les mers et océans n'ont plus d'importance. Sont à la portée de tout à chacun, l'électricité et la communication.

Cette accessibilité mène malheureusement à de l'espionnage entre les grandes Nations, ce qui pourrait mener à une guerre d'un nouveau genre.

En outre, l'avenir des recherches nous semble prometteur pour l'utilisation de ces différents câbles dans bien d'autres domaines tel que la sismologie.

Bibliographie

- « à FUVEAU. Votre spécialiste d'engins et de travaux sous-marins Bouches-du-Rhône ». s. d. Consulté le 8 juillet 2020. <http://www.simec-technologies.com/>.
- « About Submarine Power Cables ». 2011. International Cable Protection Committee Ltd.
- « About Submarine Telecommunications Cables ». 2011. International Cable Protection Committee Ltd.
- Allemand, Denis. 2012. « Les mystères de la réception magnétique ». studylibfr.com. novembre 2012. <https://studylibfr.com/doc/4608956/les-mysteres-de-la-reception-magnetique>.
- Andrea, Paterson. 2015. « Everything You Need to Know about the Vast Undersea Network That Makes the Internet Work ». The Independent. 27 octobre 2015.
- Anonymous. 2016. « Technologies de Contrôle ». Text. Pêche - European Commission. 16 septembre 2016. https://ec.europa.eu/fisheries/cfp/control/technologies_fr.
- Ardelean, Mircea, Philip Minnebo, European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Energy and Transport. 2015. *HVDC Submarine Power Cables in the World: State-of-the-Art Knowledge*. Luxembourg: Publications Office. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:LDNA27527:EN:HTML>.
- « Asia-America Gateway (AAG) Cable System | Submarine Cable System ». s. d. Fiber Atlantic. Consulté le 9 mai 2020. <http://www.fiberatlantic.com/system/31wNM>.
- « Association des Amis des Câbles Sous-Marins - AACSM ». s. d. Consulté le 9 mai 2020. <http://aacsm.cablesm.fr/>.
- « Automatic Identification Systems (AIS) ». s. d. Consulté le 8 juillet 2020. <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Navigation/Pages/AIS.aspx>.
- Boero, Alexandre. 2019. « Séismes : les câbles sous-marins rendent possible la détection des tremblements de terre ». Clubic.com. 30 décembre 2019. <https://www.clubic.com/mag/sciences/actualite-880779-seismes-ird-cables-marins-rendent-detection-tremblements-terre.html>.
- « Both the U.S., Russia Are Stalking the World's Undersea Cables ». 2019. 16 août 2019. <https://interestingengineering.com/both-the-us-and-russia-are-stalking-the-worlds-undersea-cables>.
- Boztas, Senay. 2016a. « Enterré En Mer: Les Entreprises Qui Encaissent Des Câbles Abandonnés », décembre 2016, The Guardian édition, sect. Guardian Sustainable Business. <http://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/dec/14/ocean-pollution-cable-waste-technology-reuse-recycling-circular-economy-crs-holland>.

- . 2016b. « Buried at Sea: The Companies Cashing in on Abandoned Cables ». *The Guardian*, 14 décembre 2016, sect. Guardian Sustainable Business. <http://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/dec/14/ocean-pollution-cable-waste-technology-reuse-recycling-circular-economy-crs-holland>.
- Brown, Michael, Aleksandra Zefirova, Andrew Brennan, et Scott Boyes. 2012. « Improving the performance of offshore pipeline ploughs using vibration. » In .
- Burnett, Douglas R., Robert Beckman, et Tara M. Davenport. 2013. *Submarine Cables: The Handbook of Law and Policy*. Martinus Nijhoff Publishers.
- « Cablel ». s. d. Consulté le 14 juillet 2020. <https://www.cablel.com/>.
- « Câbles sous-marins : du green dans le grand bleu ». 2015. 2015. <https://www.orange.com/fr/actus-courtes-tuiles/responsabilite/actions/Environnement/Cap-sur-la-COP-episode-5>.
- « CeltixConnect-1 ». s. d. Aqua Comms. Consulté le 9 mai 2020. <http://aquacomms.com/our-network/celtixconnect-1/>.
- « Chart 5011. Symbols and Abbreviations used on Admiralty Paper Charts ». s. d. Consulté le 11 mai 2020. <http://online.fliphtml5.com/gqsx/kiux/>.
- Code of Safety for Fishermen and Fishing Vessels: Safety and Health Requirements for the Construction and Equipment of Fishing Vessels*. 2006. IMO Publishing.
- Convention des Nations Unies sur le droit de la mer*. 1982.
- Convention Internationale Pour La Protection Des Câbles Télégraphe Sous-Marins*. 1884.
- Convention Internationale sur le Plateau Continental*. 1958. Vol. RS 0.747.305.13.
- « CRS Holland ». 2016. Entreprise. [Www.Crsholland.Com](http://www.Crsholland.Com). 2016.
- « Deep Sea Diving: The State of Submarine Cable Technology ». s. d. Consulté le 11 mai 2020. http://www.circleid.com/posts/20200210_deep_sea_diving_the_state_of_submarine_cable_technology/.
- Deluzarche, Céline. s. d. « Extrusion ». Futura. Consulté le 15 juillet 2020. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-extrusion-18482/>.
- Droit, Julie, et Eric Delort. s. d. *Canalisations et câbles sous-marin. Etat des connaissances. Préconisations relatives à la pose, au suivi, et à la dépose de ces ouvrages sur le Domaine Public Maritime Français*. Juin 2010. Etat de l'art. Cerema (ex-CETMEF).
- « Eastern Telegraph Co - Graces Guide ». s. d. Consulté le 9 mai 2020. https://www.gracesguide.co.uk/Eastern_Telegraph_Co.
- « EGS Survey ». s. d. Consulté le 16 juillet 2020. <http://www.egssurvey.com/Home.html>.

- EHRHOLD, Axel. s. d. « L'application du Sonar à Balayage Latéral (SBL) pour la cartographie des habitats marins en domaine subtidal ». IFREMER.
- « FAQ: The Benefits of EPR Insulated Cables | Eland Cables ». s. d. Consulté le 15 juillet 2020. <https://www.elandcables.com/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-benefits-of-epr-insulated-cables>.
- « FAQ: The benefits of XLPE insulated cables | Eland Cables ». s. d. Consulté le 14 juillet 2020. <https://www.elandcables.com/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-benefits-of-xlpe-insulated-cables>.
- « Federal Communications Commission ». s. d. Federal Communications Commission. Consulté le 9 mai 2020. <https://www.fcc.gov/>.
- FIGARO. 2014. « Le requin, une menace pour Internet très exagérée », 19 août 2014.
- « First Marine Stage Completes with Singapore Cable Landing · Australia Singapore Cable ». s. d. <https://www.australiasingaporecable.com/articles/first-marine-stage-completes-with-singapore-cable-landing/>.
- Gall, Francois Le. s. d. « La pose de câbles sous-marins à bord du René Descartes ». Ariase. Consulté le 11 mai 2020. <https://blog.ariase.com/box/dossiers/navire-cablier-rene-descartes>.
- Gonsaeles, Gwendoline. 2018. « Law of the sea ». Hogere Zeevaartschool Antwerpen.
- Grinsted, Timothy W., et Alan R. Reece. 1989. Pipeline or cable plough. United States US4802793A, filed 19 avril 1988, et issued 7 février 1989. <https://patents.google.com/patent/US4802793A/en>.
- « Homepage | KIS-ORCA ». s. d. Consulté le 22 mai 2020. <https://kis-orca.eu/>.
- Icolari, Giancarlo. s. d. *The ROV HandBook: A User Guide for ROV Pilot Technician*. Atlantis Deep Sea ltd.
- ICPC. 2016. « Submarine cables and BBNJ ». ICPC, ICC, EWI.
- « Ifremer ». s. d. Ifremer. <https://wwz.ifremer.fr/>.
- « International Union of Marine Insurance ». s. d. Consulté le 13 mai 2020. <https://iumi.com/>.
- « Internet : des câbles sous-marins pour faire transiter les données ». 2016. Franceinfo. 5 juillet 2016. https://www.francetvinfo.fr/internet/securite-sur-internet/internet-des-cables-sous-marins-pour-faire-transiter-les-donnees_1532971.html.
- « Isaac Newton: With 63 Km of Cable in One Go the World's Largest Cable-Laying Vessel | Jan De Nul Group ». 2017. JandenuL. 2017. <http://annualreport.jandenuL.com/en/articles/isaac-newton-with-63-km-of-cable-in-one-go-the-worlds-largest-cable-laying-vessel>.
- « ITECO Ltd. - Cable Supply, Industrial Plant & Engineering, HDPE Pipe Supply ». s. d. Consulté le 11 mai 2020. http://www.iteco.co.kr/cables/submarine_cables.php.

- Janssens, Ynse. 2019. « Polar Training ». Hogere Zeevaartschool Antwerpen.
- « Jetting Sleds for Subsea Power Cable Laying | ETA - Subsea Cable Specialists ». s. d. Consulté le 22 mai 2020. https://www.eta-ltd.com/jettingsleds_power_cable_laying.html#mod.
- Kazaz, Nicholas. 2018. « Subsea Cable Damage Claims – A Legal Perspective ». 2018. <https://iumi.com/news/iumi-eye-newsletter-june-2018/subsea-cable-damage-claims-a-legal-perspective>.
- « La Fibre Optique et la technologie WDM ». s. d. Institut d'électronique et d'informatique Gaspard-Monge. http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/rlefiivr_Fibre_Optique_et_WDM/wdm_amplificateurs.htm.
- Le Gall, F. 2015. « Les étapes de la pose d'un câble sous-marin de fibres optiques sur le René Descartes », octobre. <http://www.ariase.com/fr/reportages/navire-cablier-rene-descartes-3.html>.
- Lentz, Stephen, et Bruce Howe. 2018. « Scientific Monitoring And Reliable Telecommunications (SMART) Cable Systems: Integration of Sensors into Telecommunications Repeaters ». In , 1-7. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOBE.2018.8558862>.
- « LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN - Installation de câbles sous-marins ». s. d. LOUIS DREYFUS TRAVOCEAN. <https://www.ldtravocean.fr/>.
- « LouisDreyfusTravOcean - Présentation générale - Brochure FR 2017 ». s. d. Consulté le 11 mai 2020. https://www.ldtravocean.fr/wp-content/uploads/2017/10/LDTVO_Brochure_FR_2017_rev0.pdf.
- « Map | KIS-ORCA ». s. d. Consulté le 22 mai 2020. <https://kis-orca.eu/map/>.
- Miller, Jayne. s. d. « Meet The Father of Fiber Optic Communication ». <https://blog.telegeography.com/the-father-of-fiber-optic-communication-who-is-charles-k-kao>.
- « Montserrat Submarine Fibre Optic Project | Facebook ». s. d. Consulté le 8 juillet 2020. https://www.facebook.com/MontserratSFP/?ref=page_internal.
- Nedwell, J, J Langworthy, et D Howell. 2003. « Assessment of Sub-Sea Acoustic Noise and Vibration from Offshore Wind Turbines and Its Impact on Marine Wildlife Initial Measurements of Underwater Noise during Construction of Offshore Windfarms and Comparison with Background Noise », 72.
- Nielsen, Kristian. s. d. « Submarine Cable News and Analysis ». Submarine Telecoms Forum. <https://subtelforum.com/>.
- « NKT | Cable Solutions – High, Medium, Low Voltage Cables & Accessories ». s. d. Consulté le 14 juillet 2020. <https://www.nkt.com/>.
- « NorNed - TenneT ». s. d. Consulté le 10 août 2020. <https://www.tennet.eu/our-grid/international-connections/norned/>.

- « Orange Marine ». s. d. <https://marine.orange.com/>. <https://marine.orange.com/fr/>.
- « Plongée au coeur d’Internet : cinq chiffres pour tout savoir des câbles sous-marins ». s. d. 01net. 01net. <https://www.01net.com/actualites/plongee-au-coeur-d-internet-cinq-chiffres-pour-tout-savoir-des-cables-sous-marins-1588422.html>.
- « Ploughs for Subsea Cable Burial - Underwater Trenching ». s. d. SMD. Consulté le 11 mai 2020. <https://www.smd.co.uk/our-products/ploughs/>.
- « Secrets of Submarine Cables | NEC ». s. d. Consulté le 11 mai 2020. <https://www.nec.com/en/global/about/mitatv/02/2.html>.
- « Shom ». s. d. <https://www.shom.fr/>.
- Sigray, Peter, et Håkan Westerberg. 2008. « Offshore Windmills and the Effects of Electromagnetic Fields on Fish ». *Ambio* 36 (janvier): 630-33. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[630:OWATEO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[630:OWATEO]2.0.CO;2).
- Sladen, A., D. Rivet, J. P. Ampuero, L. De Barros, Y. Hello, G. Calbris, et P. Lamare. 2019. « Distributed Sensing of Earthquakes and Ocean-Solid Earth Interactions on Seafloor Telecom Cables ». *Nature Communications* 10 (1): 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13793-z>.
- Söker, H., K. Rehfeldt, F. Santjer, M. Strack, et M. Schreiber. 2000. « Offshore Wind Energy in the North Sea: Technical Possibilities and Ecological Considerations: A Study for Greenpeace ». <http://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=5046>.
- « Submarine Cables and the Oceans: Connecting the World ». 2009. 188. UNEP-WCMC Biodiversity Series. ICPC, UNEP, WCMC.
- « SubSea Cables - Cable Burial | KIS-ORCA ». 2018. 2018. <http://www.kis-orca.eu/subsea-cables/cable-burial#.WwbB0EiFNPY>.
- « Subsea Cables: Preventing and minimising claims against fishing vessels ». 2019. Gen2 Natural Resources. 28 mars 2019. <https://gen2group.co.uk/naturalresources/blog/2019/03/28/subsea-cables-preventing-and-minimising-claims-against-fishing-vessels/>.
- « Subsea Engineering Service Company ». s. d. SMD. Consulté le 8 juillet 2020. <https://www.smd.co.uk/>.
- Sutton, H. I. 2019. « Russia’s Suspected Internet Cable Spy Ship Vanishes Off The Americas ». *Forbes*. novembre 2019. <https://www.forbes.com/sites/hisutton/2019/11/19/russias-suspected-internet-cable-spy-ship-vanishes-off-the-americas/>.
- Taormina, Bastien, Juan Bald, Andrew Want, Gérard Thouzeau, Morgane Lejart, Nicolas Desroy, et Antoine Carlier. 2018. « A Review of Potential Impacts of Submarine Power Cables on the Marine Environment: Knowledge Gaps, Recommendations and Future Directions ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (novembre): 380-91. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>.

- TeleGeography. s. d. « Submarine Cable FAQs ». <https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>.
- « The Challenge of Defending Subsea Cables ». s. d. The Maritime Executive. Consulté le 11 août 2020. <https://www.maritime-executive.com/editorials/the-challenge-of-defending-subsea-cables>.
- « The Marine Technology Specialists ». s. d. Seatronics. <https://seatronics-group.com/>.
- « Titans des mers - Le Tyco Resolute ». 2008. *Titans des mers*. www.discovery.ca.
- « Uljanik Shipyard ». s. d. <https://www.uljanik.hr/en/>.
- United Kingdom Hydrographic Office, UKHO. s. d. « ADMIRALTY Maritime Data Solutions ». United Kingdom Hydrographic Office, UKHO. United Kingdom Hydrographic Office, UKHO. United Kingdom Hydrographic Office, UKHO. Consulté le 11 mai 2020. <https://www.admiralty.co.uk:443/>.
- Vaudano, Maxime. 2013. « Les câbles sous-marins, clé de voûte de la cybersurveillance ». *Le Monde.fr*, 23 août 2013. http://www.lemonde.fr/technologies/article/2013/08/23/les-cables-sous-marins-cle-de-voute-de-la-cybersurveillance_3465101_651865.html.
- Verney, Al. 2014. « Timeline History ». ISPC. 29 septembre 2014.
- « World's largest cable-laying vessel joins ABB ». s. d. Consulté le 11 mai 2020. <http://www.abb.com/cawp/seitp202/46b31c71c628d1a4c1257b270053c798.aspx>.
- Worzyk, Thomas. 2009. *Submarine Power Cables: Design, Installation, Repair, Environmental Aspects*. Springer Science & Business Media.
- Zaccone, Ernesto. 2009. « HVDC TRANSMISSION CABLE SYSTEMS | State of the art and future trends| High Voltage Direct Current | Electric Power Transmission ». Scribd. 2009. <https://www.scribd.com/document/413721294/HVDC-TRANSMISSION-CABLE-SYSTEMS>.
- Zhiltsov, Sergey S., Igor S. Zonn, et Andrey G. Kostianoy. 2016. *Oil and Gas Pipelines in the Black-Caspian Seas Region*. Springer.