



Plan de maintenance de la partie sous-marine du raccordement des installations de production éoliennes en mer

2022



Sommaire

1. Contexte

A) Rôle et responsabilités de RTE	4
B) Descriptions des installations sous-marines	5
C) Types d'avaries possibles et actions mises en œuvre dès la conception	6

2. Plan de maintenance préventive

A) Une surveillance par fibres optiques	8
B) Des inspections régulières du tracé de la liaison	9
C) Une prévention auprès des usagers de la mer	10

3. Plan de maintenance curative

A) Une organisation adaptée pour maîtriser les délais	11
B) Une contractualisation des « opérations maritimes » et « opérations câblées »	12
C) Une expertise éprouvée en localisation du défaut	13
D) La constitution d'un stock de matériels de réparation	15

4. Occurrences d'avaries et délais de réparations

A) Probabilité d'occurrence des avaries	16
B) Meilleure estimation de la durée d'indisponibilité suite à une avarie	18



1. Contexte

A) RÔLE ET RESPONSABILITÉS DE RTE

Opérateur du système électrique français, RTE, gestionnaire du réseau public de transport d'électricité, assure à ses clients l'accès à une alimentation électrique économique, sûre et de qualité.

RTE connecte ses clients par une infrastructure adaptée et leur fournit tous les outils et services qui leur permettent d'en tirer parti pour répondre à leurs besoins, dans un souci d'efficacité économique, de respect de l'environnement et de sécurité d'approvisionnement en énergie.

RTE achemine l'électricité entre les producteurs d'électricité (français et européens), les consommateurs industriels et les distributeurs d'électricité raccordés au réseau public de transport. À cet effet, RTE exploite, maintient et développe le réseau à haute et très haute tension. Il est le garant du bon fonctionnement et de la sûreté du système électrique.

À ce titre, RTE est en charge du raccordement au réseau public de transport des nouveaux producteurs, les parcs éoliens en mer par exemple, du développement du réseau et des interconnexions avec les pays voisins qui peuvent emprunter le domaine public maritime.

Afin de répondre aux préoccupations des producteurs de fermes éoliennes en mer et en s'appuyant sur son

expérience des 35 dernières années d'exploitation de la liaison sous-marine d'interconnexion France-Angleterre IFA 2000, RTE s'est engagé à publier :

- ▶ le plan de maintenance préventive et curative décrivant les moyens que RTE compte mettre en œuvre pour remettre en service, dans les meilleurs délais, la partie sous-marine du réseau d'évacuation des installations de production éoliennes en mer,
- ▶ ses meilleures estimations en termes de probabilité d'occurrence d'avarie sur la partie sous-marine du réseau d'évacuation d'installations de production d'énergies à partir de sources d'énergie renouvelable en mer ainsi que les délais de réparation afférents.

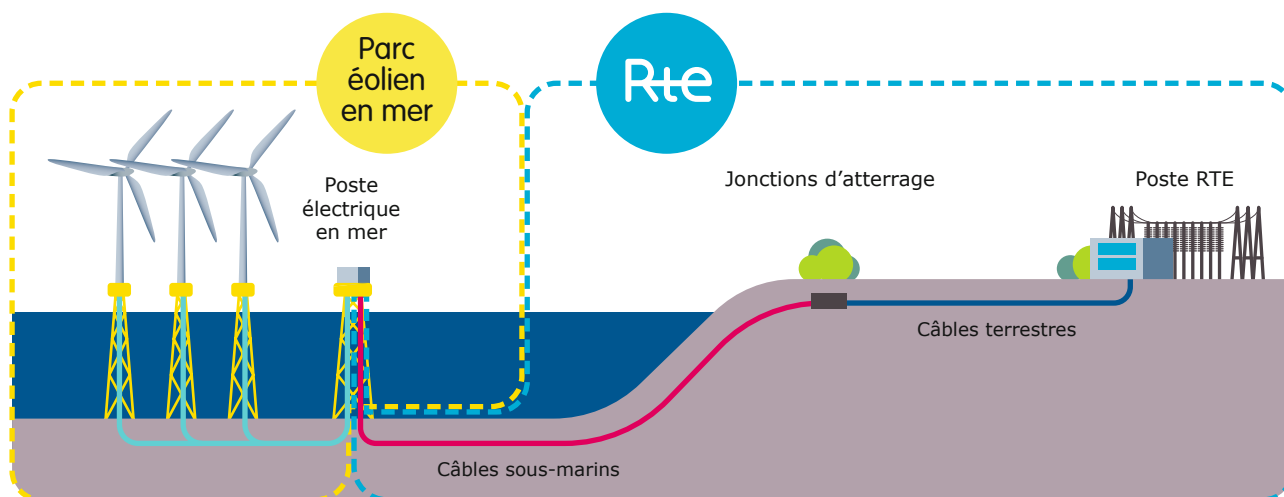
Ce plan de maintenance a pour objectif de minimiser les probabilités d'avarie et les durées de réparation. Il repose à la fois sur une conception optimisée de la partie sous-marine du raccordement, sur une maintenance préventive adaptée et sur une maintenance curative fondée sur une organisation, des compétences et des plans d'intervention préparés en amont.

Ce document pourra faire l'objet d'ajustements ultérieurs notamment pour intégrer des nouveautés techniques ou le retour d'expériences de RTE.



B) DESCRIPTION DES INSTALLATIONS SOUS-MARINES

Figure 1 Schéma typique du raccordement d'un parc éolien en mer (RTE)



Le raccordement des installations de production éoliennes en mer est composé, pour sa partie maritime, de liaisons par **câbles sous-marins** qui s'étendent de la jonction d'atterrage (limite des installations terrestres et sous-marines) jusqu'aux installations du producteur (poste électrique en mer par exemple).

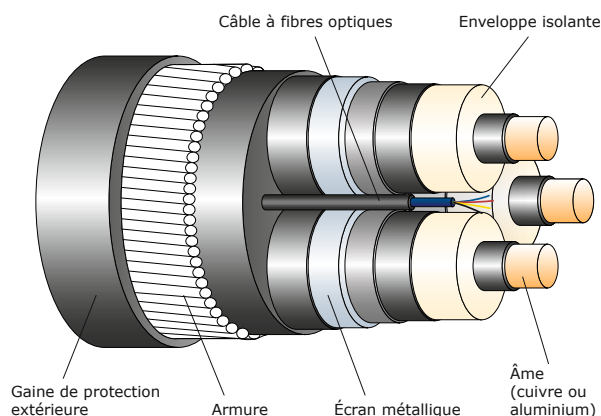
Pour le raccordement des installations d'éoliennes posées des appels d'offres gouvernementaux n° 1 et 2, RTE a sélectionné la technologie de **câbles tripolaires HVAC¹** à isolation synthétique au niveau de tension de 225 000 Volts.

Les câbles tripolaires HVAC comprennent :

- ▶ Une **gaine de protection** ainsi qu'une armure métallique servant à protéger mécaniquement le câble et regroupant les conducteurs isolés en un seul tenant ;
- ▶ Trois **conducteurs** en aluminium ou en cuivre entourés par un matériau hautement isolant ;
- ▶ Un à deux **câbles de télécommunication** à fibres optiques.

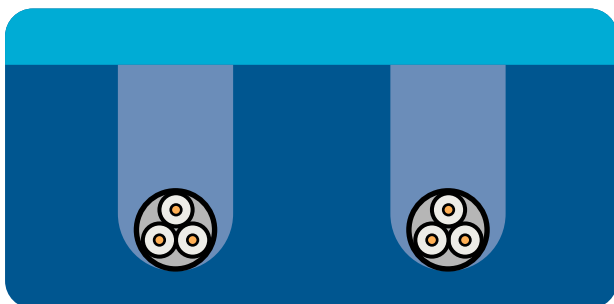
À ces câbles, s'ajoutent des accessoires tels que les **jonctions** permettant de faire la connexion entre deux longueurs de fabrication de câbles et les **extrémités** permettant la connexion avec les installations des producteurs. Les jonctions sont généralement réalisées en usine pour sécuriser et optimiser les opérations de pose de câbles.

Figure 2 Constitution typique d'un câble tripolaire sous-marin



1. En anglais : High Voltage Alternating Current (Courant Alternatif Haute Tension)

Figure 3 Illustration de l'ensouillage des câbles

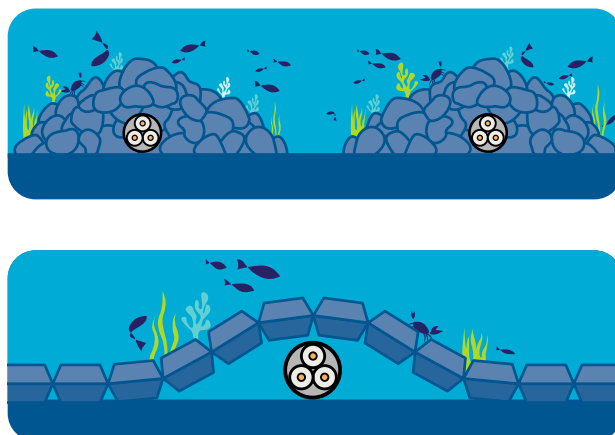


La protection contre les agressions extérieures des liaisons sous-marines peut être réalisée selon deux techniques :

- ▶ **L'ensouillage** qui consiste à enfouir les câbles dans le fond marin à une profondeur donnée ;
- ▶ La **protection externe** par des roches, des matelas de béton, des coquilles ou autres procédés.

RTE privilégie la protection par ensouillage à une profondeur adaptée à la nature des fonds marins, aux risques naturels et d'agression externes (cf. 1.C.I).

Figure 4 Illustrations de protections externes par enrochement et matelas de béton



Lorsque la nature du fond marin ne le permet pas, ou bien lorsque l'ensouillage est insatisfaisant, des protections externes sont ajoutées et adaptées au cas par cas par des études spécifiques.

Les matériels de ces liaisons (câbles, accessoires) sont conçus pour une durée de vie au moins égale à celle prévue pour l'exploitation des installations de production.

C) TYPES D'AVARIES POSSIBLES ET ACTIONS MISES EN ŒUVRE DÈS LA CONCEPTION

Les avaries sur les liaisons sous-marines peuvent être causées par une agression externe ou par un défaut interne. Les probabilités d'occurrences d'avarie sont données au paragraphe 4.A).

Sur l'interconnexion France Angleterre IFA 2000, RTE a subi les deux types d'avarie : une avarie interne sur un câble en 2003 et deux avaries externes touchant quatre câbles en 2016 lors d'un seul événement (ancres de bateaux à la dérive pendant une tempête).



I. Agressions externes

Les **agressions externes** peuvent être liées aussi bien à des phénomènes naturels qu'aux activités humaines. Elles ont pour cause :

- ▶ un phénomène météorologique extrême (tempête) pouvant endommager la protection des câbles,
- ▶ un mouvement de terrain lié à une activité sismique ou à l'action des courants,
- ▶ un impact ou une accroche par une ancre ou un engin de pêche,
- ▶ un impact lié à des travaux sur le fond marin tel que dragage, pose de câbles et conduites sous-marines, extraction de granulats,
- ▶ la chute d'objets ou le naufrage d'un navire,
- ▶ l'explosion de vestiges militaires à proximité.

Lors de la conception des liaisons sous-marines, RTE mène des études pour analyser l'environnement (naturel et activités) et les risques. Il adapte en conséquence le cheminement des liaisons sous-marines et leur mode de protection dans le but de réduire le risque d'agressions externes.

RTE s'assure également d'obtenir auprès de ses prestataires, lors de la construction de l'ouvrage, des engagements contractuels de nature à garantir un haut niveau de protection.

Des câbles à fibres optiques sont intégrés aux câbles tripolaires afin de permettre la communication entre postes électriques (poste producteur et RTE). Ces câbles peuvent aussi être utilisés pour détecter l'apparition d'éventuels dés-ensouillages des câbles en phase exploitation (cf. 2-A).

II. Défautes internes

Les défauts internes aux matériels ont pour cause :

- ▶ une malfaçon lors de la fabrication du matériel en usine ou lors de la confection des accessoires sur site,
- ▶ des points de fragilité liés à un transport, un stockage ou une installation non conforme aux conditions d'utilisation des matériels,
- ▶ un environnement thermique non maîtrisé menant à une surchauffe du matériel,
- ▶ des surtensions ou surcharges de courants électriques supérieures aux valeurs admissibles des matériels.

Lors de la conception des liaisons sous-marines, RTE s'assure du bon **dimensionnement des matériels**, prévoit la mise en place de moyens de **protections contre les surtensions et surcharges** (systèmes de protections au niveau des postes électriques), sélectionne des **matériels provenant d'une technologie mature** (essai de pré-qualification) ayant subi des essais de conformité visant à tester et valider les matériels proposés dans les conditions d'installation spécifiques des projets. Ces éléments sont de nature à apporter des garanties sur la qualité et la durée de vie du matériel.

Des **câbles à fibres optiques** sont intégrés aux câbles tripolaires pour **détecter l'apparition d'éventuels points chauds** sur le tracé du câble.

Pendant l'installation, RTE engage des **experts** spécialistes en travaux maritimes à bord des navires pour s'assurer notamment que le câble n'est pas endommagé lors de son transport et son installation. **La pose du câble sur le fond marin est surveillée en continu** (*touch-down monitoring*).

Enfin, RTE exige auprès de ses prestataires **des essais réalisés en usine après fabrication des matériels et des tests après installations sur site, de nature à détecter la majorité des malfaçons éventuelles**.



2. Plan de maintenance préventive

A) UNE SURVEILLANCE PAR FIBRES OPTIQUES

RTE mettra en œuvre une **surveillance thermique des liaisons sous-marines sur toute leur longueur** grâce à l'utilisation du **DTS** (*Distributed Temperature Sensor* = capteur de température distribué).

Ce système de surveillance est **installé au poste RTE de raccordement à terre, et est connecté aux fibres optiques** intégrées aux câbles tripolaires sous-marins jusqu'à la limite de propriété avec les installations de production en mer.

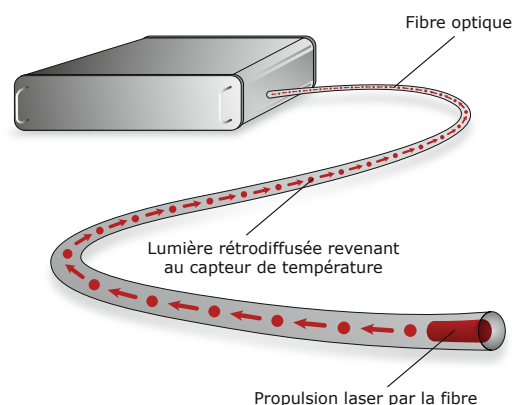
Le DTS fournit le « profil thermique » de ces fibres optiques. La température des fibres est ainsi estimée sur toute la longueur de la liaison.

La surveillance thermique sera utilisée pour détecter et localiser des phénomènes potentiellement préjudiciables à l'intégrité et donc à la durée de vie de la liaison. Par exemple :

- ▶ L'apparition de **points chauds** localisés, pouvant refléter une anomalie interne au matériel ou une évolution défavorable de l'environnement thermique autour de la liaison ;
- ▶ À l'inverse, l'apparition d'une zone froide ponctuelle pourrait correspondre à une zone de **désensouillage du câble**, et donc de vulnérabilité vis-à-vis de l'environnement extérieur.

Une attention particulière sera portée sur ces points chauds ou froids lors des inspections régulières du tracé définies au point B) ci-dessous (voire lors d'une inspection déclenchée spécifiquement si ces points sont identifiés comme critiques), afin d'expliquer le phénomène et d'y remédier afin qu'il n'évolue pas en avarie.

Figure 5 Illustration d'un système de surveillance par fibre optique



En outre, RTE investit la mise en place de **surveillance acoustique** grâce à l'utilisation d'un second système de surveillance utilisant les fibres optiques : le **DAS** (*Distributed Acoustic Sensor* = capteur acoustique distribué). Cette technologie est relativement nouvelle et RTE suit de près les derniers développements technologiques dans ce domaine.

La surveillance acoustique est notamment pressentie pour :

- ▶ **détecter et localiser toute agression externe sur la liaison** (n'entraînant pas nécessairement immédiatement un défaut) tel qu'un choc d'ancre,
- ▶ compléter et **fiabiliser la détection de désensouillage** par DTS, par une activité acoustique différente du reste de la liaison ensouillée.



B) DES INSPECTIONS RÉGULIÈRES DU TRACÉ DE LA LIAISON

Afin de contrôler la bonne protection des liaisons sous-marines, RTE réalisera des **relevés du profil des fonds marins** par sondeur multifaisceaux, qui seront comparés entre eux pour suivre l'évolution de la topographie des fonds marins. Ces relevés seront effectués pour :

- ▶ une première vérification sur l'ensemble du tracé **1 an environ après mise en service** ;
- ▶ **des visites ultérieures** espacées en fonction des résultats des vérifications précédentes, des zones à risques traversées, du mode de protection ;
- ▶ **des visites déclenchées** suite à des événements climatiques exceptionnels, ou suite à des points critiques remontés par les systèmes de surveillance ou par les usagers de la mer.

En effet, la profondeur d'ensouillage et les protections des liaisons peuvent évoluer avec le temps, notamment sous l'action des vagues et des courants qui peuvent causer des mouvements sédimentaires (érosion, accrétion, formation et déplacement de dunes sous-marines) et dégrader les protections externes (phénomènes d'affouillements, déplacement des protections).

Les activités humaines peuvent aussi dégrader la protection des câbles, comme les travaux sur les fonds marins, les opérations de dragage ou encore certaines activités de pêche.

Les inspections du tracé de la liaison seront réalisées à l'aide de navires qui scrutent et enregistrent les détails des fonds marins.

En présence de protections externes, RTE réalisera également des **relevés de la morphologie des fonds marins** par sonar à balayage latéral.

RTE réalisera également **des inspections visuelles** au niveau de la zone **d'atterrage** lors des visites périodiques de maintenance sur les liaisons ainsi qu'au niveau de la **plateforme en mer** (état des câbles et des extrémités).

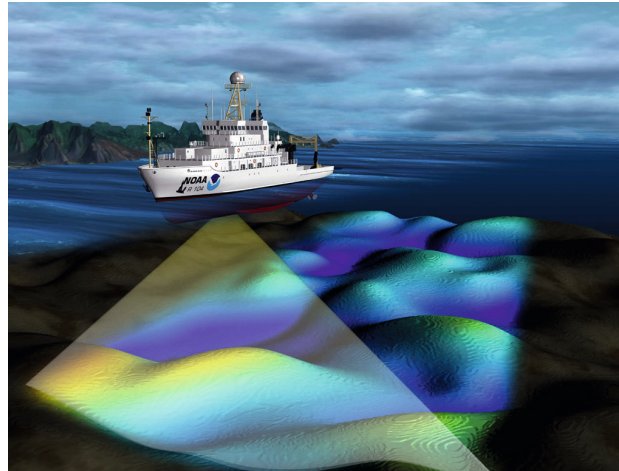


Figure 6 Illustration d'un sondage bathymétrique

Une importance particulière sera apportée au **format des données géographiques** issues des visites de tracé afin de fiabiliser la comparaison avec les résultats des visites précédentes, et enrichir une base de données qui pourra faire gagner du temps lors d'interventions ultérieures sur le tracé de la liaison.

En cas d'anomalie détectée et selon son niveau de gravité, RTE déclenchera la réalisation de mesures appropriées pouvant aller, en accord avec les autorités maritimes, jusqu'à des travaux correctifs tel qu'un ré-ensouillage ou encore la pose de protections externes.

Pour le raccordement des parcs lauréats de l'appel à projets pour des fermes pilotes éoliennes flottantes réalisé par l'ADEME en 2015 et 2016, en présence d'un câble dynamique pour le raccordement sur une éolienne, une inspection sous-marine du câble dynamique dans sa colonne d'eau sera réalisée régulièrement pour vérifier la bonne position du câble, la présence et la position des accessoires (bouées, tether, bend stiffener...) et contrôler le niveau de croissance de biofouling (développement de matière organique). En cas d'anomalie et selon son niveau de gravité, une action de maintenance conditionnelle pourra être engagée.

C) UNE PRÉVENTION AUPRÈS DES USAGERS DE LA MER

Afin d'assurer la sécurité des usagers de la mer et de prévenir les agressions externes liées aux activités humaines en mer, RTE mettra en œuvre :

- ▶ la **mise à disposition** et la publication du **cheminement des liaisons** sous-marines sur les cartes marines (notamment celles éditées par le SHOM²) issu d'un géo-référencement précis lors de la pose ;
- ▶ des **actions de sensibilisation** auprès des usagers de la mer, au sujet des précautions à prendre à l'approche d'une liaison sous-marine, notamment via une **surveillance du trafic maritime**, basée sur les données de positionnement géographique des navires ;
- ▶ l'élaboration d'un **guide de bonnes pratiques** en phase travaux et exploitation à l'attention des professionnels de la pêche en collaboration avec les comités des pêches.

Dans le cas où un risque pour les activités maritimes serait relevé, la Préfecture Maritime (PREMAR) concernée pourra édicter une **zone de restrictions** spécifique.

2. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine



3. Plan de maintenance curative

RTE a une grande expérience dans la gestion de situations de crise pour lesquelles une organisation adaptée est mise en place, ce qui s'est fait plusieurs fois au cours de son histoire, notamment lors des tempêtes de décembre 1999 ou lors de la panne d'électricité du 4 novembre 2006. La gestion d'une crise dans le domaine public maritime nécessite la mise en place très rapidement d'une organisation et de moyens très

spécifiques pour effectuer la réparation de l'ouvrage endommagé dans les meilleurs délais.

Une des clés de réussite pour ce type d'intervention maritime est la préparation en amont, ce qui implique la pré-rédaction des plans d'intervention, la passation de marchés et la réalisation d'exercices de crises.

A) UNE ORGANISATION ADAPTÉE POUR MAÎTRISER LES DÉLAIS

En cas de crise, l'organisation de RTE se décline de la façon suivante :

- ▶ la désignation d'un **chef de projet qui pilote une cellule opérationnelle** dotée des ressources et compétences nécessaires, aussi bien au niveau régional qu'au niveau national, sur les plans techniques (ingénierie, expertise réparation sous-marine, expertise matériels/câbles), achat, sécurité, environnemental et réglementaire,
- ▶ des **procédures particulières** et adaptées sont mises en place pour raccourcir les délais de validation ainsi que les processus d'achats.

En outre, dans le cas des avaries en mer, le chef de projet peut disposer d'un **assistant à maîtrise d'ouvrage (AMOA)** expérimenté en travaux maritimes et maîtrise des risques, représentant RTE à bord des navires. Il contrôle les opérations et assure un conseil auprès du chef de projet.

Ce type d'organisation a montré son efficacité lors de la gestion par RTE de l'avarie, en novembre 2016, de quatre câbles de la liaison sous-marine IFA 2000 entre la France et l'Angleterre : une quarantaine de personnes de RTE ont été mobilisées autant que de besoin dans les différentes entités concernées. Des échanges très fréquents entre le chef de projet et le comité de pilotage ont permis de lever rapidement les difficultés opérationnelles rencontrées sur le terrain. Grâce à la mobilisation des équipes de RTE et de ses prestataires, la liaison a été rétablie dans

un court délai (3,5 mois) au regard de la nature de l'avarie et des conditions hivernales.

La formalisation de cette organisation fait l'objet d'un **plan d'intervention** spécifique aux raccordements maritimes. Ce plan d'intervention définit également les procédures et modes opératoires, le rôle et les responsabilités de chaque intervenant, les prestataires et listes de contacts, les exigences réglementaires, les mesures en termes de sécurité et d'environnement.

Après chaque réparation, un **rapport** est rédigé pour analyser les causes de l'avarie, décrire le déroulement des opérations, et tirer les **enseignements pour les futures interventions**. Des partages d'expériences se font également avec d'autres gestionnaires de réseaux de transport (GRT) européens.

La réalisation d'**exercices de crise** réguliers s'inspirant notamment des avaries vécues sur IFA 2000 permet de se préparer à gérer ce type de crise et participe au maintien en compétences des équipes.

B) UNE CONTRACTUALISATION DES « OPÉRATIONS MARITIMES » ET « OPÉRATIONS CÂBLIERS »

Une réparation en mer nécessite des moyens maritimes spécifiques (opérations maritimes) et un personnel qualifié pour la confection de jonctions de réparation (opérations câblières).

À court et moyen termes, il est prévu de négocier des dispositions contractuelles avant mise en service auprès d'un opérateur maritime d'une part et avec le câblier d'autre part, de façon à réagir et réparer le plus rapidement possible en cas d'avarie.

Lors de ces négociations, RTE demande systématiquement des engagements en matière de délais d'intervention.

À plus long terme, RTE réfléchit au développement de prestations plus intégrées, et éventuellement partagées avec d'autres GRT, similaires par exemple aux prestations existantes dans le domaine des câbles télécom en mer (ACMA³). En tout état de cause, ces solutions devraient présenter un service *a minima* équivalent à celui qui est actuellement envisagé.

I. Opérations maritimes

Une réparation en mer nécessite des navires légers permettant de réaliser des opérations préparatoires telles que la localisation fine de défaut et des inspections

(*surveys*), ainsi que des barges ou navires plus conséquents pour remonter le câble à bord pour la réalisation des découpes et jonctions de réparation, poser et protéger la portion de câble réparé. Les navires de réparation doivent être équipés de moyens adaptés à la maintenance des câbles tripolaires sous-marins : notamment une table tournante, un davier et un robot sous-marin (ROV).

RTE réalisera une **mise en concurrence des acteurs de la maintenance sous-marine**, ayant pour objectif de disposer, dès la mise en service, d'un contrat d'opérations maritimes performant permettant de :

- ▶ **mobiliser tous les moyens maritimes nécessaires** pour toute opération de réparation ou de travaux correctifs avec **engagements de délais** de mise à disposition,
- ▶ disposer d'**équipages prêts à intervenir** selon des modes opératoires préétablis,
- ▶ disposer de **moyens adaptés**, notamment de dés-ensouillage, ré-ensouillage et ROV avec des engagements de délais de mise à disposition,
- ▶ disposer de **spécifications** techniques, contractuelles et d'un bordereau de prix permettant de passer une commande rapidement,
- ▶ réaliser des **exercices de crise** réguliers.

3. Atlantic Cable Maintenance and Repair Agreement



Ce type de processus n'est pas nouveau pour RTE qui dispose d'un contrat de ce type pour la maintenance de la liaison sous-marine IFA 2000 entre la France et l'Angleterre.

II. Opérations câbliers

Le savoir-faire du câblier et plus particulièrement des équipes de monteurs qui assemblent les jonctions est un élément clef de la réussite d'une réparation, en particulier sur les niveaux de tension élevés.

À court terme et *a minima* en période de garantie, RTE contractualise auprès du câblier d'origine la réparation du câble en cas d'avaries et donc demande :

- ▶ la **mise à disposition de monteurs qualifiés sur le matériel** dans des délais compatibles avec la mise à disposition du câble à réparer,
- ▶ le maintien en conditions opérationnelles des matériels en stock.

Lors d'une réparation, ces opérations câbliers consistent à réaliser le montage de la jonction de réparation en préparant les têtes de câble puis en assemblant les différentes parties de la jonction, depuis le raccord des âmes jusqu'à la protection externe, en passant par un bloc pré-moulé. Des équipes de monteurs se relaient tout au long du processus afin de réaliser l'opération dans un temps court.

À ce jour, pour les câbles 225 000 Volts tripolaire à isolation synthétique, les opérations de réparations réalisées par d'autres opérateurs que le câblier d'origine posent des questions de fiabilité, de responsabilité, de compatibilité des matériels entre eux, et de propriété intellectuelle.

À moyen terme, une plus grande compatibilité entre les matériels de constructeurs différents permettrait d'élargir les possibilités de réparation. Cette évolution, si elle se réalisait conduirait RTE à adapter sa stratégie à la condition que cela ne dégrade pas le service rendu attendu par l'ouvrage de raccordement.

C) UNE EXPERTISE ÉPROUVÉE EN LOCALISATION DU DÉFAUT

L'expertise en recherche de défaut est une compétence essentielle pour permettre une réparation rapide. RTE dispose de ses propres moyens (hors moyens maritimes) et équipes permettant une bonne maîtrise des délais.

RTE utilise différentes méthodes de **pré-localisation reposant sur le principe de l'échométrie**, mises en pratique sur les près de 6900 km de liaisons souterraines du réseau de transport RTE. À ce jour, trois équipes de maintenance spécialisées sur les câbles réalisent l'ensemble des pré-localisations de défaut sur le réseau RTE. Ces équipes, basées en région parisienne, disposent chacune de leur propre camion de localisation qui embarque l'ensemble des moyens de pré-localisation. De cette manière la compétence est centralisée et mobile pour intervenir sur l'ensemble du territoire au plus près de l'événement.

Dans les rares cas où le défaut ne serait pas visible par les méthodes de pré-localisation échométriques sur les câbles de puissance, il est également possible



Figure 7 Illustration d'une recherche de défaut depuis un poste (RTE)



Figure 8 Caisson RTE de recherche de défaut embarqué sur un navire

d'utiliser une méthode similaire par injection d'un signal optique sur les fibres intégrées aux câbles triphasés, et de faire appel à des entreprises spécialisées. RTE dispose déjà pour son réseau de marchés avec des prestataires permettant de réaliser ces recherches de défauts optiques.

Pour vérifier, circonscrire et expertiser la zone de câble maritime en défaut, il est nécessaire d'affiner la position estimée du défaut obtenue par les méthodes de pré-localisation.

RTE a développé et breveté une méthode magnétique de localisation fine de défaut en mer. Le principe repose sur l'injection d'un faible courant alternatif dans le câble en défaut afin de mesurer, à l'aide de bobines embarquées sur un bateau léger, le champ magnétique créé par

cette circulation de courant jusqu'à l'endroit du défaut. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre et repose sur l'utilisation de moyens légers. La précision de localisation est équivalente à la hauteur d'eau à l'endroit du défaut.

Les équipes RTE sont régulièrement entraînées pour la mise en œuvre de cet équipement en mer.

La méthode magnétique est adaptée aux défauts de continuité et de court-circuit. Pour les autres types de défauts, il est pressenti de pouvoir utiliser le DAS (*Distributed Acoustic Sensor*) qui consiste à utiliser les fibres optiques du câble pour « écouter » le claquage du défaut, ou d'autres méthodes qui ont fait leurs preuves.

Pour confirmer, renseigner les causes du défaut et prévoir la réparation, RTE fait ensuite appel à des moyens spécifiques (opérations maritimes) tels que :

- ▶ **Sonar** pour obtenir une image du fond marin,
- ▶ **ROV** (véhicules téléguidés et immergés) équipés de caméra,
- ▶ Éventuellement des **plongeurs** pour une observation visuelle.

La méthode développée par RTE a démontré son efficacité suite à l'avarie en novembre 2016 de quatre câbles de la liaison IFA 2000 entre la France et l'Angleterre. Les quatre défauts ont été localisés (par pré-localisation puis localisation fine) avec une précision de moins de 10 mètres en 2 semaines seulement suite à l'avarie.

RTE a également contribué au sein du CIGRE⁴ à la rédaction de la brochure TB 773 – « Fault Location on land and submarine links » aux côtés d'experts de plusieurs gestionnaires de réseaux pour recommander les bonnes pratiques de localisation de défauts aussi bien à terre qu'en mer (publication septembre 2019).

4. Conseil International des Grands Réseaux Electriques



D) LA CONSTITUTION D'UN STOCK DE MATÉRIELS DE RÉPARATION

La constitution d'un stock de réparation et son maintien en bon état constituent un élément capital pour RTE.

I. Dimensionnement et approvisionnement du stock

RTE constituera des stocks de matériels de réparation qui permettront, en cas d'avarie, de pouvoir réaliser les opérations de réparation sans attendre un réapprovisionnement.

Le **volume de matériel de réparation** à stocker est étudié par RTE pour chaque raccordement ou lot de raccordements mutualisables, notamment en fonction des **risques et natures d'avaries possibles**, des **délais d'approvisionnement** des matériels, des **caractéristiques de chaque liaison** (profondeur d'eau, modes de pose et protection, systèmes de câble mis en œuvre et compatibilités, etc.) et des aléas possibles (plusieurs réparations à couvrir, sur-longueurs prises en compte et accessoires complémentaires).

L'approvisionnement du stock de réparation initial est contractualisé avec le câblage d'origine. À titre d'exemple, pour les premiers parcs éoliens, représentant une longueur cumulée de près de 132 km de liaisons sous-marines, RTE approvisionnera lors de la première mise en service :

- ▶ 6 km de câble tripolaire sous-marin dont 3 km compatibles pour les atterrages ;
- ▶ Un lot d'accessoires permettant de faire face notamment à 4 avaries en mer, ainsi qu'à des avaries sur la jonction à l'atterrage et sur le câble sur la plateforme.

RTE exige que les matériels composant le stock de réparation fassent l'objet d'une **garantie contractuelle** démarrant à leur réception. La durée de garantie sera identique à celle des matériels installés.

Un suivi de l'état du stock sera réalisé tout au long de l'exploitation de la liaison sous-marine et des réapprovisionnements seront effectués selon des seuils prédéfinis.

RTE reste à l'écoute du marché pour profiter d'éventuelles opportunités permettant de multiplier les moyens et solutions de réparations sur ses ouvrages.

II. Lieu et conditions de stockage

Le lieu de stockage des matériels de réparation doit permettre un accès aisé et rapide du matériel et garantir son maintien en condition opérationnelle.

Le stockage des câbles sous-marins fera l'objet d'une contractualisation avec un prestataire spécialisé et se fera :

- ▶ **à proximité d'un quai dans un port** avec accès direct et permanent à la mer pour un chargement rapide et sous contrôle à bord des navires de réparation,
- ▶ **dans un site protégé** (port ISPS – *International Ship and Port facility Security*, sécurisé, clos, aéré et à l'abri du rayonnement solaire).

La technologie des câbles tripolaires très haute tension impose généralement un stockage sur table tournante ou en cuvette. Les accessoires et kits d'outillage seront stockés en bâtiment.

Le fournisseur des matériels fournira ses préconisations pour le stockage des matériels sensibles et indiquera les dates de péremption de certaines pièces le cas échéant. Un suivi de ces dates et des contrôles visuels réguliers des emballages ou encore de l'état général des câbles seront effectués afin de disposer d'un stock opérationnel à tout moment.



4. Occurrences d'avaries et délais de réparations

A) PROBABILITÉ D'OCCURRENCE DES AVARIES

Il existe à l'heure actuelle peu de données sur les probabilités d'avaries des câbles électriques sous-marins de même nature et de niveau de protection équivalent à ceux prévus par RTE pour les raccordements des parcs éoliens en mer. RTE réalise une veille continue sur les avaries, leurs causes et les retours d'expériences.

À titre de comparaison, mais sur une technologie différente, l'interconnexion **IFA 2000** a subi 3 avaries sur 184 km de liaison⁵ sur une période de 35 ans : il en résulte pour cette installation un taux de moins de 0,05 avarie par an par 100 km de liaisons sous-marines.

Les **références internationales** en matière de taux d'avarie sur les liaisons sous-marines sont les **brochures CIGRE**⁶ TB379⁷ et TB815⁸ qui présentent les résultats d'enquêtes mondiales réalisées auprès de nombreux gestionnaires de réseaux. Elles présentent un taux d'avarie pour la technologie HVAC à isolation XLPE de 0,07 avarie par an par 100 km de liaisons sous-marines pour la première (années 1991 à 2005) et 0,18 avarie par an par 100 km de liaisons sous-marines pour la seconde (années 2006 à 2015).

Le retour d'expérience à l'international et notamment au Royaume Uni⁹ a montré que de nombreux défauts entre 2006 à 2016 étaient liés à des désordres affectant les câbles optiques qui se propageaient aux câbles de puissance du fait de décharges électriques, de surchauffe

ou d'effets électrochimiques, mais ces problèmes sont désormais bien connus et pris en compte.

De fait, ces dernières années, les statistiques de défauts sur les raccordements offshore mettent en évidence des taux d'avarie à la baisse avec 0,10 avarie/an/100 km sur 2015-2019 plus précisément 0,06 avarie/an/100 km sur 2018-2019 selon une récente étude¹⁰.

À ce jour, l'évaluation des occurrences d'avarie retenue par RTE pour les liaisons sous-marines HVAC de raccordements d'installations de production en mer reste cohérente avec la brochure CIGRE TB379, à savoir qu'elle est proportionnelle à la longueur de liaison selon un taux de **0,07 avarie par an par 100 km**.

Sur cette base et en utilisant les lois statistiques, l'estimation de RTE des probabilités d'occurrence d'avaries sur 20 ans d'exploitation est donnée dans les graphiques ci-dessous pour deux exemples typiques de doubles liaisons sous-marines sur 15 km et 30 km de tracé.

Il convient de noter que les raccordements actuels des parcs éoliens maritimes posés sont conçus à partir de liaisons doubles et indépendantes. Dans ce cas une avarie sur l'une des deux liaisons n'entraînera généralement qu'une limitation partielle de l'évacuation de l'installation de production, grâce au maintien en exploitation de la liaison saine.

5. La liaison IFA 2000 est composée de 4 liaisons sous-marines de 46 km, et chaque liaison est composée d'une paire de câbles unipolaires.

6. Conseil International des Grands Réseaux Electriques

7. Update of service experience of HV underground and submarine cable systems, CIGRE, Décembre 2009

8. Update of service experience of HV underground and submarine cable systems, CIGRE, 2020

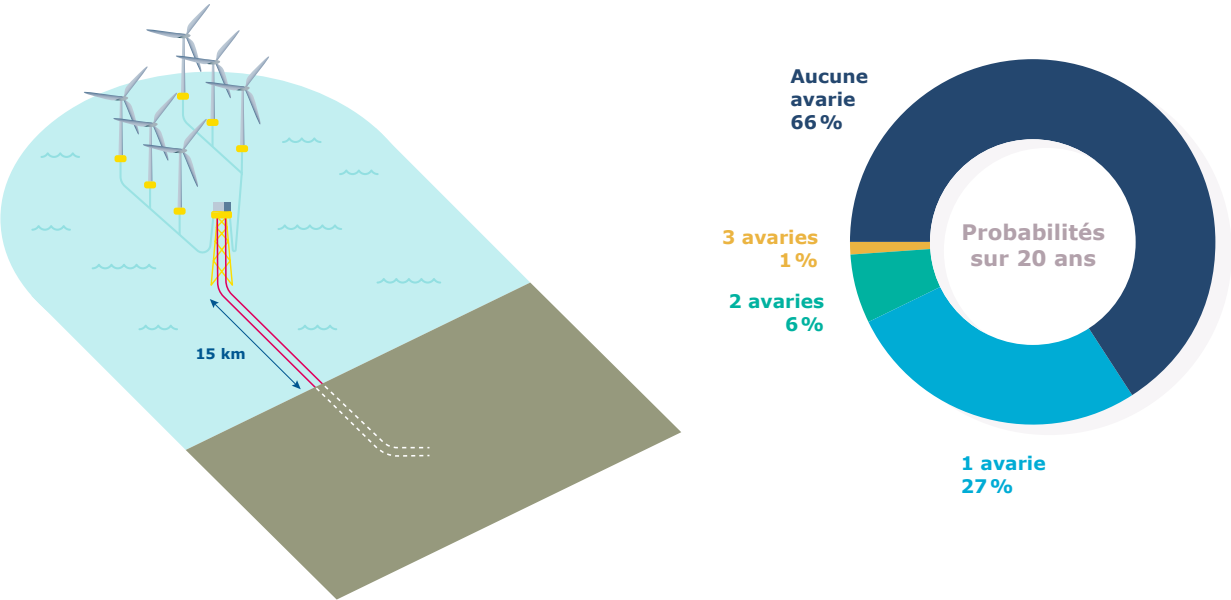
9. Export Cable Reliability, Description of Concerns, May 2017 (updated July 2017), Offshore Wind Programme Board

10. 4COffshore, Subsea Cable Insight Report - Analysis of Subsea Cable Failures, Janvier 2020.

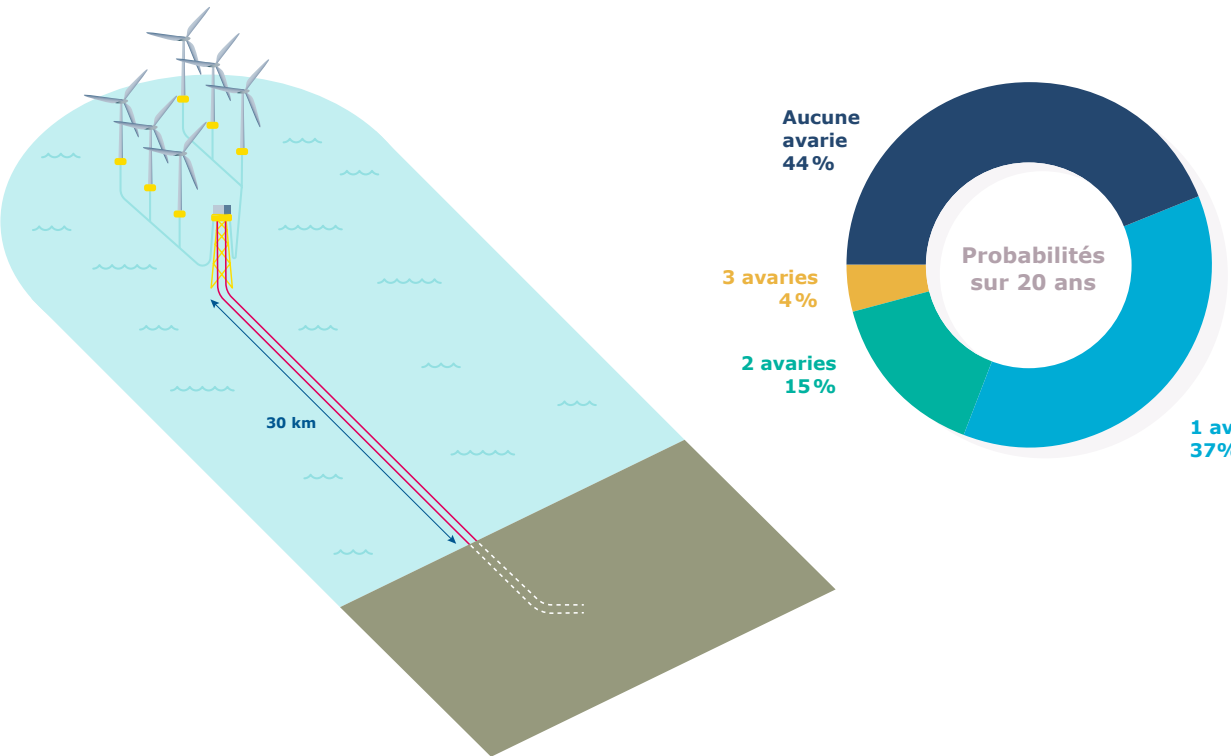


Figure 9 Estimation de probabilités d'occurrence d'avaries sur les liaisons sous-marine HVAC sur 20 ans d'exploitation

Cas d'un parc raccordé au réseau par une liaison sous-marine double 2 x 15 km



Cas d'un parc raccordé au réseau par une liaison sous-marine double 2 x 30 km



B) MEILLEURE ESTIMATION DE LA DURÉE D'INDISPONIBILITÉ SUITE À UNE AVARIE

Malgré l'organisation mise en place par RTE et décrite en section 3, les délais de réparation restent soumis à de nombreux aléas, notamment sur :

- ▶ le temps nécessaire pour la localisation du défaut (pré-localisation et localisation fine du défaut en mer) ;
- ▶ les éventuels délais administratifs : accord sur étude UXO, accord autorités portuaires, accord et information pour "déport" du trafic maritime ;
- ▶ les éventuelles mesures conservatoires à mettre en œuvre avant d'intervenir (exemple : déminage ou passage d'une caméra/d'une drague pour identifier la présence de mines et nettoyer le nouveau couloir de pose) ;
- ▶ la disponibilité des moyens maritimes ;
- ▶ la disponibilité des câbliers (monteurs) pour réparation ;
- ▶ la réalisation d'éventuelles opérations spéciales à proximité de la plateforme ou sur zone d'enrochement ;
- ▶ les conditions météo-océaniques selon la période de l'année (certaines opérations sont soumises à des conditions limites d'opérabilité des moyens nautiques et ne peuvent pas être réalisées quand les vagues sont trop hautes ou les courants trop forts par exemple sur la durée prévue des opérations) ;
- ▶ la réalisation de l'opération de réparation elle-même (dés-ensouillage, coupe du câble sur le fond marin, première remontée, expertise et jonction à une extrémité avec le câble de réparation, seconde remontée, expertise, coupe éventuelle et jonction de la seconde extrémité au câble de réparation, dépose du câble sur le fond marin, ensouillage ou protection, essais électriques) ;

- ▶ les essais et la remise en service : avant la remise en service finale, il est nécessaire de procéder à un essai de tension sur la liaison complète réparée depuis le poste électrique RTE avec le risque que si la réparation comporte un défaut, cet essai causera une nouvelle avarie sur la liaison sous-marine.

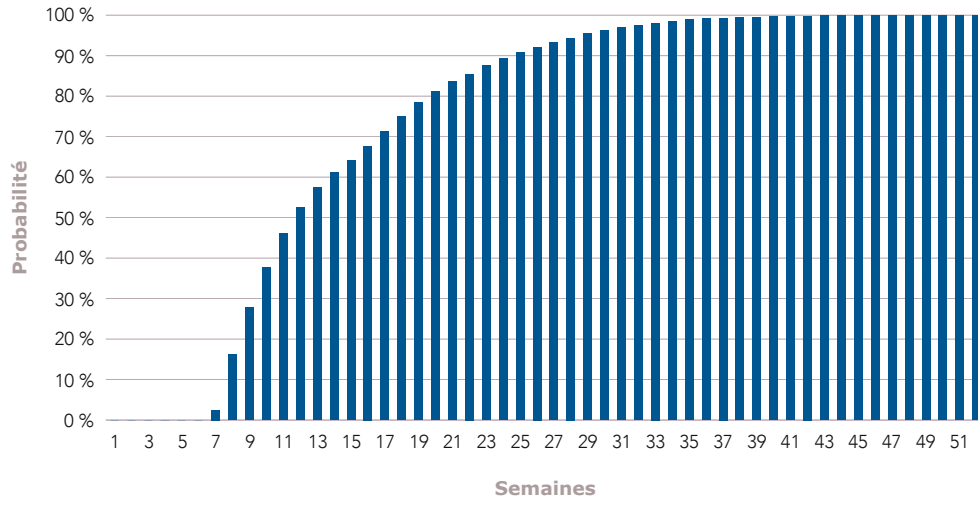
Compte-tenu de ces aléas, RTE ne peut donner qu'une estimation du délai de réparation après une avarie sous la forme d'une **distribution de probabilités**. Cette distribution construite avec la **meilleure estimation de RTE des délais nécessaires à chaque étape d'une réparation et des aléas** décrits ci-dessus est représentée dans le graphique ci-dessous avec une vision moyennée sur les sites (certains aléas comme ceux sur les conditions météo-océaniques dépendent du site du raccordement).

Il est précisé que les estimations ci-dessus ne prennent pas en compte les aléas comme les oppositions à travaux, les grèves, les dégradations, vols ou vandalisme sur le matériel de réparation sur le site de stockage malgré les dispositifs de sécurisation mis en place, défaillance des contractants ou sous-traitants, endommagement, collision en mer ou naufrage du navire de réparation, etc. qui peuvent rallonger les délais de réparations de 1 à quelques mois.

Il convient de noter qu'en présence de liaisons doubles et indépendantes, une avarie sur l'une des deux liaisons n'entraînera généralement qu'une limitation partielle de l'évacuation de l'installation de production, dans la limite de la capacité d'évacuation de la liaison saine.

La veille réalisée dans le domaine ainsi que le retour d'expérience de RTE permettra de mettre à jour si nécessaire ces estimations.

Figure 10 Probabilité de réparer une avarie an moins de n semaines





Le réseau
de transport
d'électricité

RTE

Immeuble WINDOW - 7C Place du Dôme,
92073 PARIS LA DEFENSE CEDEX
www.rte-france.com