



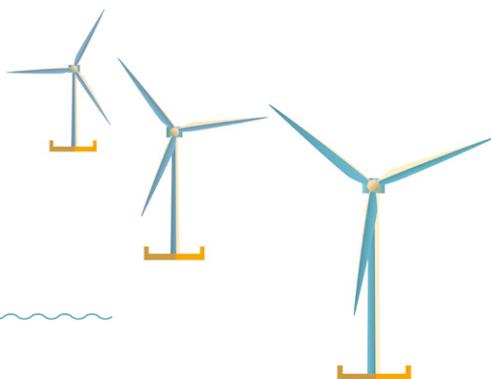
FICHE N°16

Comment raccorder les parcs éoliens flottants au réseau électrique ?

LES PRINCIPAUX POINTS ABORDÉS

Cette fiche présente les modalités techniques et les équipements qui permettront le raccordement des parcs éoliens au réseau électrique, de la mer jusqu'à la terre.

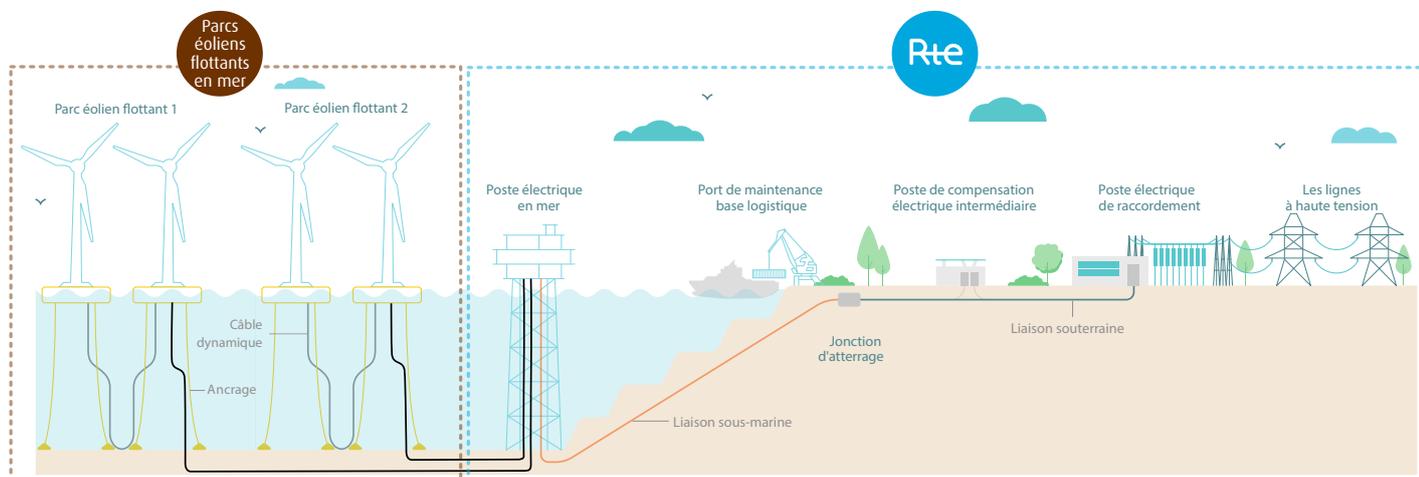
Responsable du réseau public de transport d'électricité en France, RTE est chargé de raccorder les futurs parcs éoliens au réseau électrique. Depuis la loi du 30 décembre 2017¹ et la procédure de mise en concurrence relative au parc éolien en mer au large de Dunkerque, RTE a vu son périmètre de responsabilité s'étendre : RTE est en charge de la construction, du financement, de l'exploitation et de la maintenance du poste électrique en mer. En lien avec l'État puis le(s) lauréat(s) producteur(s), RTE conduira une démarche d'évaluation environnementale pour concevoir et réaliser le raccordement tant dans sa partie maritime que terrestre.



¹ La loi n°2017-1839 du 30 décembre 2017, dite « hydrocarbures » a confié à RTE la réalisation du raccordement des parcs d'énergie renouvelable en mer pour les appels d'offres futurs, à partir de l'AO3 (attribué en juin 2019, pour un parc au large de Dunkerque).



DÉBAT PUBLIC
PROJET D'ÉOLIENNES FLOTTANTES
EN MÉDITERRANÉE ET LEUR RACCORDEMENT



LES OUVRAGES DE RACCORDEMENT D'UN PARC ÉOLIEN AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Le parc d'éoliennes flottantes sera raccordé en courant alternatif. Le choix de technologie entre le courant continu ou le courant alternatif se fait notamment au regard du couple puissance/distance : le courant continu est en général envisagé pour des liaisons avec les pays étrangers ou des raccordements d'une longueur totale supérieure à 100 à 130 km et/ou une puissance supérieure à 1 GW. Les procédures administratives et autorisations liées à la création de ces ouvrages sont décrites dans **la fiche 23** ➡.

<p>Domaine maritime</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Un ou plusieurs postes électriques en mer : un raccordement mutualisé sur une seule plateforme sera recherché pour y raccorder le premier parc de 250 MW puis le second pouvant aller jusqu'à 500 MW ; • Plusieurs liaisons sous-marines 225 kV reliant le poste électrique en mer à la zone d'atterrage. Le nombre de liaisons 225 kV à créer dépend de la puissance de production du parc éolien à raccorder : une par tranche d'environ 250 MW.
<p>Atterrage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs chambres de jonction d'atterrage (une par liaison), pour réaliser la transition entre les câbles sous-marins et les câbles terrestres ; • Plusieurs points d'atterrages pourraient être nécessaires selon la configuration des sites, pour prévoir un espacement suffisant entre les câbles.
<p>Domaine terrestre</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs liaisons de 225 kV (autant que de liaisons sous-marines) ; • Raccordement à un poste électrique 225 kV ou 400 kV existant, ou création d'un nouveau poste électrique 225 kV ou 400 kV ; • En fonction de la longueur totale de la liaison souterraine et sous-marine, un poste électrique intermédiaire de compensation entre l'atterrage et le poste de raccordement peut être nécessaire ; • Un fuseau de passage pour chaque liaison souterraine, mais qui pourrait faire l'objet d'une mutualisation par endroits.



© Copyright RTE / La Cen / Ham&Juice

LES OUVRAGES EN MER

Le poste électrique en mer

Le poste électrique situé sur une plateforme en mer permet de stabiliser et d'élever la tension de l'énergie produite par les éoliennes (66 kV vers 225 kV), de réduire les pertes électriques potentielles et de réduire le nombre de câbles nécessaires pour transmettre l'électricité au réseau public de transport d'électricité. Avec plus de 50 réalisations en Europe depuis 2002, la technologie du poste en mer est bien maîtrisée. Un poste électrique en mer est généralement composé d'une plateforme de trois à cinq étages, et de sous-structures pouvant être de différents types : monopode appelé monopile, treillis métallique appelé jacket, ou base gravitaire en béton armé. Les structures de fondation du poste en mer dépendent de la nature des sols et de la profondeur d'eau. Les éventuels ancrages de fondations (nécessaires pour les fondations monopile et jacket) pourront être des pieux battus ou forés dans le sol ou encore des caissons à succion.

La sous-structure émerge au-dessus du niveau de l'eau à environ 20 à 25 m. Au niveau du sol marin, l'emprise représente une surface d'environ 55 m x 55 m, et d'environ 25 m x 25 m sur sa partie émergée.

La plateforme qui permettra d'accueillir à terme la production de 750 MW occupe une surface de 65 m de long par 50 m de large pour une hauteur atteignant les 25 m.

À ce jour, la solution envisagée pour les premiers parcs éoliens en Méditerranée est la technologie de poste électrique posé.

À l'heure actuelle, la technologie de poste électrique flottant n'est pas suffisamment mature pour être retenue comme solution de référence car elle se heurte notamment à deux verrous techniques. En effet, il n'existe pas encore de câbles dynamiques (partie du câble située dans la colonne d'eau, entre le sol marin et la plateforme du poste électrique) au niveau de tension 225 kV. De même, les transformateurs de puissance conçus de manière à supporter des effets de houle ne sont pas disponibles industriellement.

De nombreux projets de recherche sont en cours pour lever ces verrous techniques et des solutions pourraient être trouvées dans les prochaines années.

Le projet LISORE a permis de caractériser les verrous et les solutions potentielles, et le projet MOSSIS vise à qualifier le suivi en service des composants électriques et mécaniques (structure et ancrage) afin d'optimiser les coûts liés aux phases d'opération et de maintenance².

Dès que cette technologie sera opérationnelle, elle pourra être proposée comme une alternative à la technologie de poste électrique posé. Il conviendra alors de comparer les deux technologies au regard des aspects technico-économiques d'une part, et des impacts sur l'environnement d'autre part.

² LISORE (<https://www.france-energies-marines.org/projets/lisore>) et MOSSIS (<https://www.france-energies-marines.org/projets/mosiss>)



DÉBAT PUBLIC PROJET D'ÉOLIENNES FLOTTANTES EN MÉDITERRANÉE ET LEUR RACCORDEMENT

S'agissant des premiers parcs éoliens dans le golfe du Lion, la bathymétrie rencontrée sur une très grande emprise des macro-zones (environ 100 mètres de profondeur) permet de situer le poste électrique en mer en technologie posée au plus près des parcs même si ces derniers se trouvent éloignés de la côte.

Toutefois, la technologie de poste électrique en mer flottant pourrait bénéficier d'avancées techniques dans les prochaines années. RTE est engagé dans son développement afin de favoriser le recours à terme d'émergence de solutions alternatives susceptibles d'apporter des gains pour la collectivité à la fois en termes économiques et environnementaux.

La mutualisation des plateformes

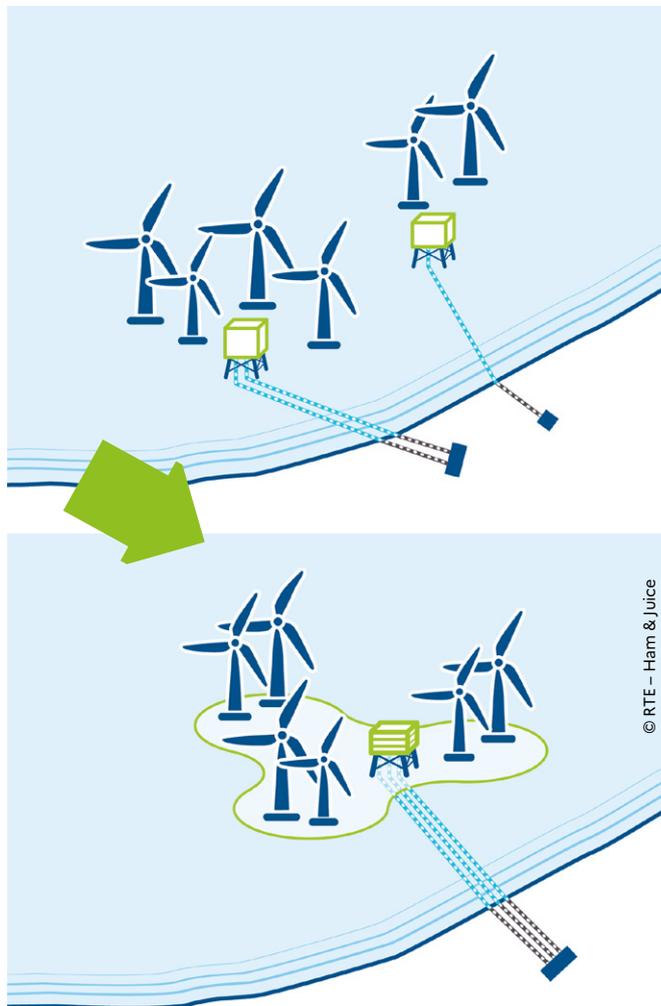
Les récentes mesures réglementaires issues de la loi du 30 décembre 2017 ouvrent la possibilité pour RTE de développer des plateformes de grande taille mutualisables, à l'instar de la dynamique engagée par les pays autour de la mer du Nord.

Des parcs éoliens spatialement proches et issus d'une ou plusieurs procédures de mise en concurrence peuvent ainsi être raccordés à une même plateforme en mer. C'est ce qui est prévu dans le cas des projets flottants à construire en Occitanie et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, avec deux premiers parcs de 250 MW puis deux autres de 500 MW chacun, à créer ultérieurement dans le prolongement des premiers parcs.

Outre l'avantage économique, une telle mutualisation permettra de réduire les délais de raccordement, l'impact sur l'environnement et de favoriser la coexistence des usages de la mer.

Selon la configuration des futurs parcs et les délais entre projets, RTE pourra proposer un développement modulaire (voir illustration ci-contre) et par étapes de la plateforme en mer. La structure est alors dimensionnée dès le départ à la puissance visée, et les équipements nécessaires seront installés à mesure que les parcs viendront s'implanter. Ces opportunités de mutualisation sont explicitées dans le schéma décennal de développement du réseau de RTE³.

Postes électriques en mer et raccordements non-mutualisé et mutualisé



© RTE - Ham & Juice

Les liaisons sous-marines

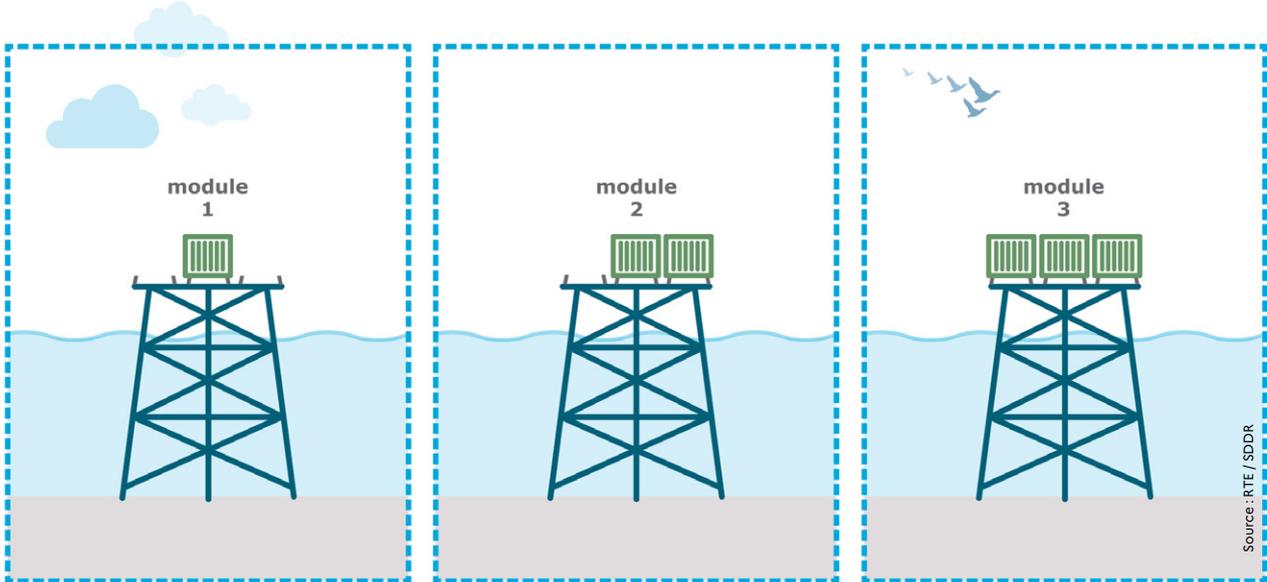
Raccordement avec un poste en mer posé

Les câbles sous-marins, en provenance des éoliennes ou à destination du continent pour évacuer l'énergie produite, remontent dans des tubes métalliques (J-tube) fixés le long de la sous-structure jusqu'à la plateforme, le « top-side » qui abrite l'ensemble des équipements électriques. Ces J-tubes protègent les câbles électriques qui ne nécessitent pas de dispositions constructives particulières, contrairement aux câbles dynamiques disposant d'une armature renforcée et utilisés sur des structures flottantes. Libres dans la colonne d'eau, ces câbles dynamiques sont soumis à des efforts très importants (houle, vagues, poids, etc.).

Les liaisons sous-marines permettent de relier le poste en mer à l'atterrage. Suivant la nature des fonds, et afin d'assurer la sécurité de l'ouvrage, celles-ci seront préférentiellement ensouillées dans le sédiment marin (posées dans une tranchée créée dans le sol à l'aide d'outils

³ Schéma décennal de développement de réseau de RTE, chapitre 6, p. 174 et suivantes.

Développement modulaire de la plateforme



adaptés à la nature des fonds) ou recouvertes par une protection externe. Ces dispositions éviteront le risque d'endommagement des câbles par les ancres des navires ou engins de pêche et permettront le maintien des activités en mer, au-dessus des câbles. Les moyens maritimes utilisés dépendent de la longueur de câble à poser, de la nature et de la profondeur des fonds marins. Les câbles de la liaison sous-marine peuvent être installés par un navire câblé ou une barge, qui déroule et dépose le câble sur les fonds marins.

L'ensouillage peut être réalisé par différents types d'engins selon la nature des fonds :

- ~ dans les matériaux meubles, le câble peut être ensouillé au moyen d'une charrue tractée à partir du navire câblé ou d'un autre navire ; la charrue ouvre un sillon d'environ 0,5 m de large dans lequel le câble est déposé et le sillon se referme par gravité ou nivellement par la charrue, quasi simultanément ;

- ~ dans les matériaux sableux, le câble peut être ensouillé au moyen d'une charrue à injection d'eau (*jetting*), qui injecte de l'eau à haute pression pour assouplir la couche sédimentaire et permettre l'ensouillage naturel du câble par gravité, la couche de sédiments se redéposant et se recomposant naturellement ensuite ;

- ~ dans les matériaux plus durs, une trancheuse mécanique peut être utilisée. Il s'agit d'un engin autottracté à chenilles (tracteur à chenilles), équipé d'une roue trancheuse pour des fonds durs ou une chaîne à pic ou à godet pour des fonds sédimentaires compacts.

En cas de difficultés d'ensouillage ou d'un besoin de protection complémentaire, une solution de protection externe peut être envisagée, par matelas béton, par enrochement, ou par mise en place de coquilles en fonte autour du câble.



Engins de water jetting

Source : RTE, avec l'autorisation de Global Marine



Pose d'un câble en mer

Source : RTE, avec l'autorisation de Prysmian Group - Navire Câble Entreprise



Trancheuse mécanique

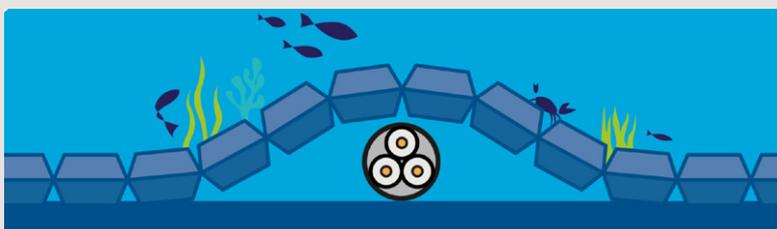
Source : ASSO Subsea, avec l'autorisation de ASSO Subsea



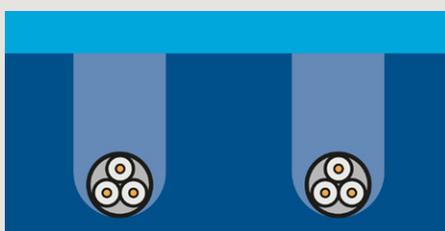
Ensuillage - protection extérieure



1 . Enrochements



2 . Protection par matelas



3 . Ensuillage

Source : RTE

Chaque liaison sous-marine à 225 000 volts est composée d'un câble tripolaire, d'un diamètre de l'ordre de 25 à 27 cm et pesant environ 80 à 130 kg au mètre linéaire. Chaque câble intègre un à deux câbles de télécommunications à fibres optiques sous son armure.

En Méditerranée, la capacité de transport de chaque câble est d'environ 250 MW, et dépend de nombreux paramètres tels que la distance à parcourir, l'environnement thermique, le type de conducteur et d'armure, la tension d'exploitation, etc. La pose des câbles dans des tranchées distinctes est impérative pour éviter l'échauffement mutuel des câbles, et ainsi maximiser la capacité de transport par câble. Le schéma ci-dessous détaille les caractéristiques techniques de chacun des câbles sous-marins.

Schéma de principe d'un câble sous-marin tripolaire

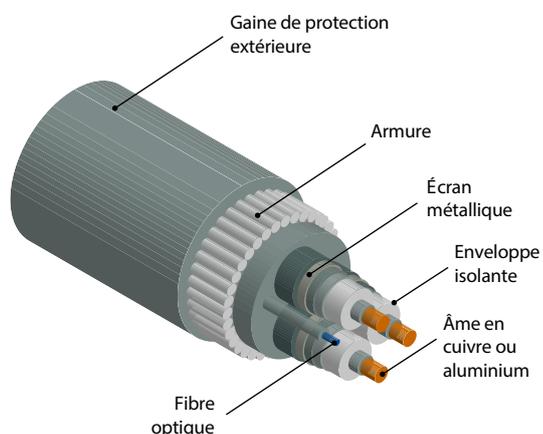
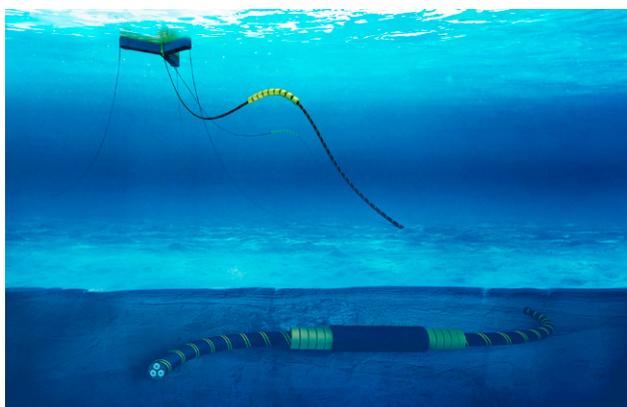


Schéma de principe d'un câble dynamique



© RTE-La Cen-Ham&Juice

Raccordement avec un poste en mer flottant

Pour relier un poste en mer flottant aux câbles statiques ensuillés ou posés sur le sol marin, des câbles « dynamiques » à très haute tension (225 000 volts) sont nécessaires. Ils doivent être conçus pour se déformer, de façon à suivre le poste électrique flottant dans ses mouvements à la surface d'une mer parfois très agitée. Le câble dynamique est alors raccordé au câble statique grâce à une jonction en mer. Ce câble statique est ensuite protégé selon les principes détaillés ci-dessus (ensuillage, protection externe...).

Ce type de câbles « dynamiques » existe pour des niveaux de tension 33 000 ou 66 000 volts. Ils permettront de relier les éoliennes entre elles et au poste en mer. Comme indiqué précédemment, il n'existe pas d'offre industrielle de câbles dynamiques de tension 225 000 volts. Cependant, de nombreux projets de recherche sont en cours pour lever les verrous techniques et des solutions pourraient être trouvées dans les prochaines années.

L'atterrage

L'atterrage désigne le lieu de la côte où les câbles sous-marins sont raccordés aux câbles souterrains. En raison des différences existantes entre les câbles sous-marins et les câbles souterrains, et pour permettre d'assurer la continuité électrique (en 225 000 volts), le changement technologique de la liaison sous-marine à la liaison terrestre se fait au sein d'une chambre de jonction appelée chambre d'atterrage. Ces ouvrages (une par circuit) dont les dimensions sont approximativement de 16 m x 3 m, sont maçonnés et enterrés à 2 m de profondeur en fond de fouille environ. Après raccordement des câbles, les chambres sont recouvertes par des dalles en béton armé puis remblayées. Elles sont donc invisibles et ne peuvent pas être visitées.

L'atterrage est souvent un point limitant de la liaison sous-marine en matière de capacité de transport, du fait que l'environnement thermique n'est pas aussi favorable qu'en mer (la température du milieu ambiant et la résistivité thermique du sol y sont plus élevées).

Deux modes de pose sont possibles pour les liaisons à l'atterrage, selon sa configuration :

- ~ via une tranchée dans laquelle sont déposés les câbles ;
- ~ via un forage dirigé pour passer en dessous de dunes pouvant aller jusqu'à l'estran.

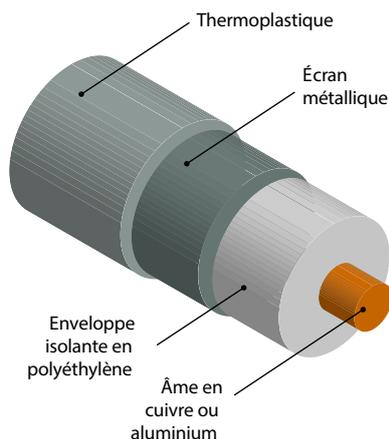
Ainsi, il est essentiel pour maximiser les capacités de transport, que le ou les sites d'atterrage réunissent les conditions suivantes :

- ~ possibilité d'espacer suffisamment les câbles et les chambres d'atterrage pour éviter les échauffements mutuels (idéalement une dizaine de mètres entre chaque liaison) ;
- ~ présence d'un sol favorable à l'évacuation de la chaleur (faible résistivité thermique).

Les ouvrages à terre

Les liaisons souterraines

Chaque circuit est composé de trois câbles unipolaires indépendants, d'un diamètre d'environ 13 cm, accompagnés d'un à deux câbles de télécommunications à fibres optiques.



Exemple de pose de liaison souterraine

Schéma de principe d'un câble souterrain unipolaire

Dans le cadre des études de détails, les investigations et analyses de sol permettront de déterminer plus précisément la ou les méthode(s) à employer le long du tracé pour la pose et la protection des liaisons souterraines. Les câbles sont en général déroulés dans des fourreaux, d'un diamètre d'environ 25 cm, en polychlorure de vinyle (PVC) enrobés de béton ou en polyéthylène haute densité (PEHD) selon le milieu traversé. La profondeur de fond de fouille est d'environ 1,70 m, mais peut varier selon la nature du sol.

Chaque tranche de 250 MW nécessitera la création d'une liaison souterraine 225 000 volts. Dans l'hypothèse de plusieurs liaisons souterraines parallèles, celles-ci doivent être suffisamment espacées les unes des autres pour limiter



DÉBAT PUBLIC
PROJET D'ÉOLIENNES FLOTTANTES
EN MÉDITERRANÉE ET LEUR RACCORDEMENT



Exemple d'un poste de raccordement 225 KV existant



Exemple de matériel de compensation

© RTE - Robine d'Inductance Shunt 80 MVAR
Poste de Romainville

le phénomène d'échauffement mutuel des liaisons.

Selon les possibilités de tracés terrestres, les liaisons pourraient être rassemblées au sein d'un unique fuseau, les câbles de raccordement devant rester espacés d'environ 6 à 10 mètres entre eux, ou alors répartis sur deux tracés distincts. La première option est fréquemment mise en œuvre à l'étranger pour des liaisons terrestres de ce type.

Les câbles conducteurs sont déroulés dans les fourreaux sur des tronçons de 800 à 1 200 m environ, puis raccordés entre eux dans des chambres de jonction. Ce sont des ouvrages maçonnés de dimensions de 12 m x 2 m, enterrés à 2 m de profondeur en fond de fouille environ. Après raccordement des câbles, les chambres sont recouvertes par des dalles en béton armé puis remblayées. À l'instar des chambres d'atterrage, ces ouvrages ne se voient pas et ne sont pas visitables.

Il existe également plusieurs techniques dites « en sous-œuvre », permettant de franchir toutes sortes d'obstacles tels que les routes, les cours d'eau, etc. En effet RTE a régulièrement recours aux techniques de forage dirigé, de fonçage et de micro-tunnelier.

Les postes de raccordement au réseau terrestre

Afin d'accueillir sur le réseau à 225 000 volts l'énergie produite par les futurs parcs éoliens, un poste électrique de raccordement est nécessaire. S'il est possible de se raccorder à un poste existant, et si du foncier est disponible en proximité immédiate, une extension de ce poste est réalisée.

Si ce n'est pas le cas, la création d'un nouveau poste est envisagée. Un poste de raccordement au réseau électrique à 225 000 volts représente une emprise foncière de l'ordre de 5 à 7 ha.

Les premières études réseaux indiquent la possibilité, pour les quatre zones considérées, de raccorder les parcs

d'éoliennes flottantes en Méditerranée en réalisant des extensions de postes existants.

Les liaisons électriques sous-marines et souterraines génèrent de la puissance dite « réactive » qui entame leur possibilité de transit de puissance « active » (utile pour nos usages). Lorsque la longueur totale du raccordement (terrestre et en mer) est importante, la construction d'un poste supplémentaire dit « de compensation » est nécessaire sur le tracé de la liaison pour pouvoir, au travers d'équipements électriques spécifiques, compenser cette puissance réactive.

Dans la plupart des configurations envisagées (longueur des ouvrages de raccordement) pour chacune des zones d'étude, un poste de compensation intermédiaire devrait être nécessaire.

L'emprise nécessaire à la création d'un poste de compensation serait d'environ de 2 hectares, plus ou moins 1 ha selon les distances de raccordement considérées en mer et à terre.

Plus la longueur est importante, et plus les moyens de compensation requis seront importants.

Les moyens de compensation nécessaires peuvent par ailleurs être répartis entre le poste en mer, le poste de compensation intermédiaire et le poste de raccordement, en fonction notamment de l'emprise foncière disponible.

Toutefois, la place disponible sur un poste en mer est extrêmement limitée et les possibilités d'y installer des matériels de compensation sont très réduites et très onéreuses, notamment en raison des coûts de la maintenance tout au long de la vie des ouvrages.

Les moyens de compensation seront donc préférentiellement installés à terre, soit dans un poste de compensation intermédiaire, soit dans le poste de raccordement, ou encore réparti dans les deux.