



Modélisation 3D d'une plate-forme éolienne posée en mer - Source RTE.

Les câbles électriques de puissance, une clé pour la transition énergétique

Bruno MEYER

Consultant
Membre émérite SEE et Fellow IEEE

Introduction

La transition énergétique est un sujet bien connu. La part croissante de l'énergie éolienne ou solaire y est immédiatement associée. Mais pour que cette transition réussisse, une technologie fondamentale est nécessaire : les câbles électriques. Les câbles sont souterrains ou sous-marins, ils raccordent les pays entre eux et permettent de raccorder les parcs éoliens au réseau. Ils doivent transiter de fortes puissances à haute tension. Le présent dossier dresse un panorama des principales avancées dans ce domaine, en les illustrant par des projets précis : interconnexions internationales, raccordement des éoliennes en mer tant posées que flottantes, ou encore un éclairage sur la supraconductivité.

Depuis le début du siècle, la transition énergétique redessine le paysage électrique dans la plupart des pays. Dans sa quête d'un *mix* énergétique plus sobre en émission de CO₂, le monde favorise le développement des énergies nouvelles et renouvelables. L'essor de l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que des éoliennes leur donne désormais une part substantielle dans la part de l'électricité produite. Pour l'éolien, le gigantisme que permet les installations en mer (ou *offshore*) a métamorphosé le *mix* énergétique de certains pays d'Europe du Nord devenus leaders mondiaux en la matière (voir le dossier dédié dans REE 2018-4). Ainsi, le Royaume-Uni a-t-il déjà mis en service un parc *offshore* de plus de 10 GW et le gouvernement britannique affiche une ambition d'atteindre une capacité d'éolien en mer de 40 GW à l'horizon 2030.

Les parcs éoliens peuvent chacun atteindre une capacité de plusieurs GW. A titre de comparaison, une tranche nucléaire a une capacité de l'ordre du GW. Mais il faut bien sûr se rappeler que l'éolien est affecté d'un facteur de charge dépendant du vent. Ces parcs de grande capacité doivent être raccordés au réseau principal national. Pour cela, différentes technologies sont possibles : le courant continu à haute tension (ou HVDC, pour *High Voltage Direct Current*) ou le courant alternatif (AC pour *Alternative Current*). Les choix dépendent de l'éloignement des parcs, ou de la profondeur des fonds marins. Mais dans tous les cas, les capacités électriques des câbles sont importantes.

L'Europe représente 80 % du parc mondial d'éolien *offshore*, avec une croissance annuelle de 30 %. L'essentiel de cette filière est constitué d'éoliennes posées sur les fonds marins. Mais l'éolien flottant, technologie encore en développement il y a peu, connaît une croissance notable. L'installation d'éoliennes plus loin des côtes permet souvent une énergie éolienne plus forte et plus régulière.

En revanche les fonds marins trop profonds rendraient la pose trop onéreuse. Ce qui justifie la croissance des éoliennes flottantes. A noter que la technologie flottante est déjà maîtrisée dans la prospection gazière et pétrolière maritime. Si les puissances des éoliennes flottantes sont pour le moment de l'ordre de la dizaine de MW, des projets lancés indiquent une croissance spectaculaire. Ainsi en Espagne où des éoliennes flottantes d'une capacité de 200 MW devraient être mises en service en 2024. Et des projets plus importants encore sont prévus en Corée du Sud.

Les éoliennes *offshore* flottantes offrent comme avantage complémentaire que leur construction soit faite pour l'essentiel à terre, avant qu'elles ne soient ensuite remorquées vers leur destination finale. Ceci représente un avantage par rapport aux travaux d'ingénierie complexes requis pour assembler des éoliennes géantes posées, avec pour celles de 12 MW chacune, des hauteurs de 250 mètres avec des pales de 100 mètres de longueur. En revanche, le raccordement des éoliennes flottantes nécessite le développement de nouveaux câbles dynamiques, susceptibles de supporter des efforts mécaniques en mer.

La part croissante des parcs de production intermittents amène naturellement au renforcement des liaisons d'interconnexions entre systèmes électriques. Certes, les interconnexions internationales étaient présentes dès l'émergence des réseaux de grand transport électrique, dans les années 1920, mais celles-ci se sont renforcées continuellement depuis. Depuis les échanges d'électricité conçus initialement pour garantir des se-

cours mutuels, des liaisons se sont renforcées et multipliées pour échanger de l'électricité d'un système à un autre en fonction des différentiels de prix de marché. Ainsi, la France a-t-elle longtemps été exportatrice nette auprès de ses voisins, désireux de s'approvisionner sur un marché aux prix bas de l'électricité, grâce à un parc nucléaire performant.

Désormais, les capacités intermittentes changent la donne. Au cours d'une journée, un système électrique peut être fortement exportateur si sa production éolienne ou solaire est forte, et *a contrario* importateur s'il est confronté à un déficit de vent ou de soleil. Mais les écarts de prix peuvent parfois être tels qu'ils compensent les investissements nécessaires pour développer de nouvelles liaisons.

Que ce soit pour raccorder des dispositifs *offshore*, renforcer les interconnexions, les grands projets nécessitant des investissements de câbles se multiplient de par le monde.

Contenu du dossier

Ce bouleversement du paysage ne peut se faire sans des innovations dans le domaine des câbles électriques à haute tension, permettant de transiter de grandes puissances sur de longues distances. Le présent dossier présente les principales évolutions dans la technologie des câbles en précisant les innovations qui permettent désormais la réalisation de ces projets innovants et nécessaires.

Les puissances en jeu sont importantes, les contraintes environnementales et de fiabilité dominantes. Les différents articles proposés dans ce dossier donnent une

“ Les éoliennes *offshore* flottantes offrent comme avantage complémentaire que leur construction soit faite pour l'essentiel à terre, avant qu'elles ne soient ensuite remorquées vers leur destination finale. ”

“ Pour les câbles souterrains, l'utilisation de nouveaux câbles extrudés HVDC a été développée, permettant d'aller jusqu'à 600 kV DC. ”

●●● vision multiple et concrète des défis qui ont été relevés et des développements qui se poursuivent. Les cinq articles du dossier offrent au lecteur une vision de différentes réalisations et technologies en France et à l'international. Quatre d'entre eux sont rédigés par des constructeurs mondiaux (Sumitomo Electric Industries, Borealis, Prysmian et Nexans) et un autre par le gestionnaire de réseau de transport français, RTE. Ils présentent des réalisations concrètes, soulignent les progrès technologiques accomplis, les défis auxquels ils ont été confrontés et ceux qui restent à poursuivre.

Les auteurs de l'article de Sumitomo, **Shinia Asai, Takuya Miyazaki, Satoshi Nishikawa** et **Tsugoshi Igi** décrivent le raccordement NEMO, mis en service fin 2019 entre la Belgique et la Grande-Bretagne. Cette liaison sous-marine de 130 kilomètres en courant continu de 400 kV transite 1 050 MW.

A de tels niveaux de tension, les isolants existants n'auraient pas été adaptés. C'est le cœur de l'article proposé par **Marc Bailleul, Villgot Englund, Wendy Loyens** et **Ulf Nilsson** de la Société Borealis, qui présente les innovations qui depuis une vingtaine d'année ont permis de développer ces nouveaux isolants, en particulier l'isolant à base de polyéthylène réticulé XLPE. Utilisés déjà pour des liaisons à courant alternatif, une application de ces isolants extrudés a permis des réalisations comme certaines de celles présentées dans le présent dossier.

Antoine Chrétien, de RTE, développe les enjeux et les défis attendus dans le domaine des câbles dynamiques, dans le cadre du raccordement des éoliennes flottantes ; ceux-ci se trouvent détaillés dans les articles de Prysmian et Nexans.

Pour la Société Prysmian, **Adrian Dumont, Marzia Mangoni** et **Marco Marelli** dressent un panorama de la technologie HVDC, depuis les liaisons souterraines jusqu'aux nouvelles liaisons sous-marines. Les liaisons sous-marines sont notamment utilisées pour le raccordement de parcs éoliens flottants éloignés des côtes et à des grandes profondeurs. La technologie d'isolation extrudée (propylène HPTE) permet la réalisation de câbles dynamiques avec armures synthétiques. Pour les câbles souterrains, l'utilisation de nouveaux câbles extrudés HVDC a été développée, permettant d'aller jusqu'à 600 kV DC.

Enfin **Maxime Toulotte** et **Frédéric Lesur**, de la Société Nexans, donnent un aperçu de projets futurs ou en cours de développement avec leurs défis technologiques spécifiques associés. Les cas de raccordement d'éoliennes *offshore* sont rapportés, de même que des liaisons d'interconnexion. Ainsi de la plus longue interconnexion du monde (720 km) en cours de construction entre la Norvège

L'auteur



Bruno Meyer est consultant. Entré à EDF en 1985. Il y a occupé différentes fonctions pour l'essentiel à EDF R&D, dans le domaine des réseaux électriques. Il rejoint RTE en 2009. Après avoir été directeur général de la filiale télécoms de RTE, ARTERIA, il retourne à RTE pour y suivre des projets de valorisation avant d'intégrer l'Inspection générale. Il est membre émérite de la SEE et Fellow IEEE.

et l'Angleterre, le projet North Sea Link (NSL). L'article donne également un éclairage sur les liaisons supraconductrices qui appartiennent également aux scénarios d'intégration des énergies renouvelables à l'échelle continentale.

Ce dossier offre un large tour d'horizon des différents progrès dans le domaine des câbles électriques à haute tension, en expliquant en quoi ils concourent à la réussite de la transition énergétique qui est partie intégrante des visions d'avenir de nombreux Etats, et qui est attendue par la planète tout entière. ■

Les articles

NEMO link, the world first DC 400 kV XLPE cable link (UK-Belgium)	p.53
Nouvelle génération d'isolants DC « XLPE » : un élément fondamental du transport d'électricité de demain	p.61
Enjeux et défis des câbles dynamiques pour les éoliennes flottantes	p.67
Des systèmes de câbles toujours plus compétitifs et écologiques pour le transport d'électricité	p.73
Avancées récentes des systèmes de câbles isolés pour la transition énergétique	p.82