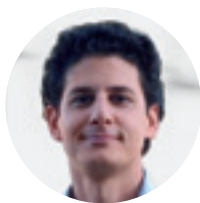


MUTATIONS

CCHT pour éolien marin : une technologie au point

L'éolien en mer est la filière de production d'énergie renouvelable qui connaît la plus forte expansion. Les parcs éoliens étant implantés loin des côtes, leur raccordement au continent nécessite des liaisons en courant continu à haute tension (CCHT), dont ABB a une longue expérience. Quels défis cette technologie a-t-elle dû relever ces dix dernières années pour arriver à maturité ?



Athanasios Krontiris
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Mannheim (Allemagne)

athanasios.krontiris@
de.abb.com

Avec un taux de croissance annuelle de 13 % en moyenne ces cinq dernières années et une puissance installée cumulée de 540 GW en 2017, l'énergie éolienne a indéniablement le vent en poupe →1,2. La progression est encore plus spectaculaire pour l'éolien en mer (+ 28 %), qui ne représente pourtant que 3,5 % de la capacité de production →3. Si les parcs marins (offshore) se concentrent en mer du Nord, les projets foisonnent partout dans le monde, notamment en Amérique du Nord, en Extrême-Orient et en Inde.



Peter Sandeberg
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Ludvika (Suède)

peter.sandeberg@
se.abb.com

La montée en puissance de l'éolien offshore a pour contrepartie des distances de plus en plus élevées au continent et aux points de connexion à terre.

Cette montée en puissance a sa contrepartie : les éoliennes offshore sont de plus en plus éloignées des côtes et des points de connexion à terre, compliquant la tâche des concepteurs et des exploitants.



—
01 La production éolienne en mer a progressé de presque 30 % en 2017.

Alternatif ou continu ?

Le choix du courant alternatif (CA) ou continu (CC) pour raccorder les parcs marins au réseau électrique dépend principalement de la puissance assignée, de la distance à la côte puis à un poste de raccordement suffisamment robuste (jusqu'à 100 km), le point d'atterrissage étant souvent situé au milieu de territoires peu peuplés pâtissant d'un réseau de transport faible.

Au premier avantage de l'alternatif, à savoir le faible coût du poste électrique, s'oppose l'inconvénient des pertes capacitives qui augmentent avec la tension et la longueur du câble. Au-delà d'une distance « critique », comprise entre 100 et 150 km selon le type de câble, il n'est plus possible de transférer de puissance active. La solution habituelle est d'élever la tension ; or la puissance réactive augmentant avec le carré de la tension, cela réduit d'autant la longueur de câble.

Le principal argument favorable aux liaisons en continu est le faible coût des câbles. Ces derniers n'étant chargés que lorsqu'ils sont sous tension, et la capacité totale de transit pouvant servir au transfert de puissance, les pertes en ligne sont, à partir d'une certaine distance, inférieures à celles de l'alternatif. Ces facteurs compensent le surcoût des convertisseurs.

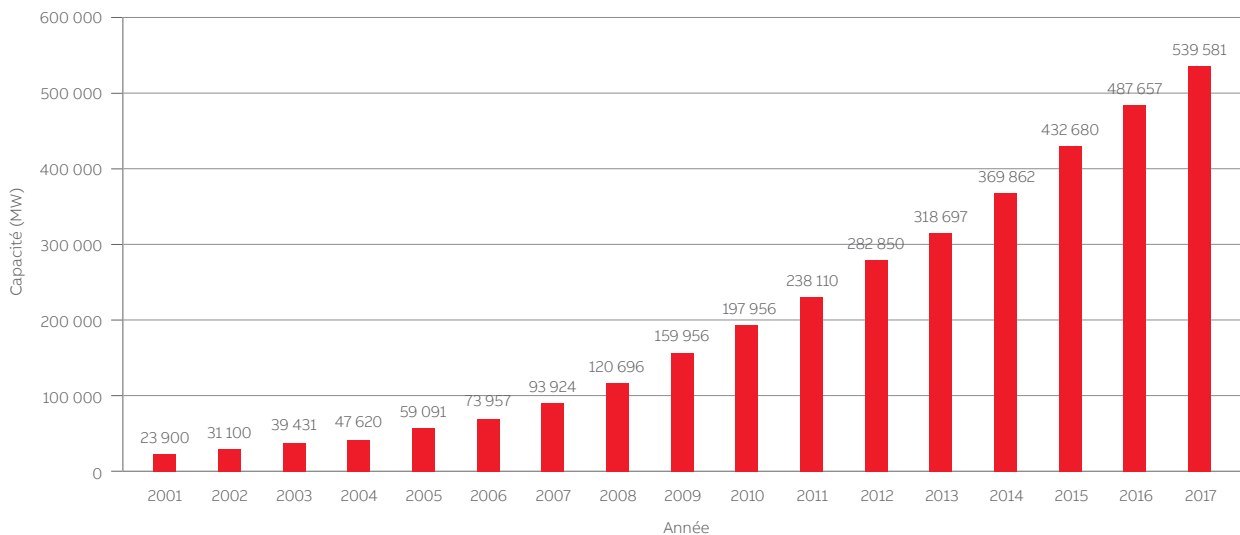
Autre atout : les câbles CCHT isolés au polyéthylène réticulé sont plus légers, donc plus faciles et moins chers à poser en mer. Leur faible masse linéaire permet de transporter de plus grandes longueurs, réduisant ainsi le nombre de jonctions, le temps d'installation et les risques de défauts.

Le transport CC pour accroître les puissances assignées et les distances est donc une solution concurrentielle, tant au plan de l'investissement initial que des coûts d'exploitation.

État des lieux

À l'heure actuelle, 40 des quelque 92 parcs offshore installés en Europe affichent une capacité nominale (puissance maintenue à pleine charge) supérieure à 200 MW et près du tiers est raccordé au réseau par une liaison CCHT, que ce soit de façon unitaire ou groupée. Sept connexions CCHT sont opérationnelles, et trois autres en cours de réalisation. Toutes sont situées au sud-est de la mer du Nord (baie Allemande) et exploitées par le gestionnaire de réseau de transport germano-néerlandais TenneT. D'autres projets essaient partout dans le monde, l'avenir à court et moyen terme du CCHT pour la connexion de l'éolien marin s'annonce radieux.





02

Configurations

La topologie la plus simple est le raccordement direct, en point à point, de deux convertisseurs, l'un en mer et l'autre sur le continent →4a. Jusqu'à présent, toutes les liaisons CCHT de l'éolien offshore étaient de ce type.

—
Un système hybride constitué d'une plate-forme ou *hub* mutualise la production de plusieurs parcs offshore pour interconnecter plusieurs réseaux terrestres.

Depuis quelque temps, l'intérêt se porte sur une nouvelle topologie →4b-4d : un système hybride constitué d'une plate-forme ou *hub*, voire d'une île artificielle, mutualise la production de plusieurs parcs offshore pour interconnecter, à partir de cette gigantesque « multiprise », des réseaux terrestres relevant d'une ou de plusieurs zones synchrones. Cette solution convient aussi bien aux connexions CA que CC, même si, en mer du Nord, les distances à la côte sont prohibitives en alternatif. En continu, la plate-forme est interconnectée au parc soit par plusieurs liaisons parallèles point à point →4b, soit par un système CCHT multiterminal →4c.

Avantages des réseaux intercontinentaux

Contrairement à une seule connexion de parc offshore à la côte, tributaire de l'intermittence du vent local, l'interconnexion avec d'autres réseaux électriques augmente considérablement l'utilisation de la liaison.

La coordination à l'échelle internationale de la mise en place de l'infrastructure de transport pourrait être un autre facteur de réduction des coûts. Les échanges d'électricité sur les marchés internationaux en seraient aussi facilités.

Enfin, la solution autorise une extension progressive du réseau et un ajout par phases de capacité de transport, pour accroître rapidement la fourniture d'énergie. Elle permet aussi de faire évoluer l'existant, d'incorporer de nouvelles technologies à mesure que le parc se déploie et d'échelonner les investissements.

Le premier « interconnecteur » offshore au monde est en construction en mer Baltique pour relier en courant alternatif les parcs éoliens danois Kriegers Flak A et B à leurs homologues allemands Baltic 1 et 2. La synchronisation des réseaux des pays scandinaves et de l'Europe continentale est assurée par une station de conversion CCHT dos à dos d'ABB →4d, au point d'atterrissage de Bentwisch (Allemagne). ABB fournit également le contrôleur maître chargé de piloter à l'optimum tous les actifs de la solution. Cette expérience opérationnelle devrait beaucoup contribuer au déploiement du concept.

—
02 Capacité installée cumulée dans le monde (2001-17)

—
03 Capacité offshore mondiale

03a Capacité cumulée par pays (2016-17)

03b Capacité annuelle cumulée (2011-17)

Réalisations ABB

La livraison réussie de trois liaisons CC pour l'éolien offshore →5 n'aurait pas été possible sans les immenses progrès réalisés par ABB et ses partenaires dans le développement du CCHT et la conception de la plate-forme.

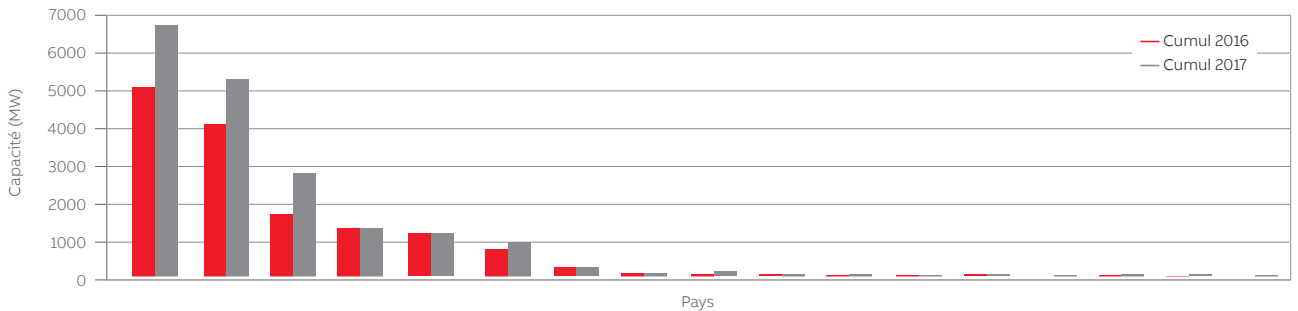
La compacité des équipements HVDC Light garantit l'efficacité économique de l'infrastructure au large.

La technologie HVDC Light® d'ABB à base de convertisseurs à source de tension a été déterminante : en régulant la tension et la fréquence du réseau CA îloté en mer, la station de conversion offshore transfère automatiquement au réseau CA terrestre le maximum de puissance

active produite par les éoliennes, tout en stabilisant la tension alternative et la fréquence du réseau marin. De même, la compacité des équipements HVDC Light garantit l'efficacité économique de l'infrastructure au large.

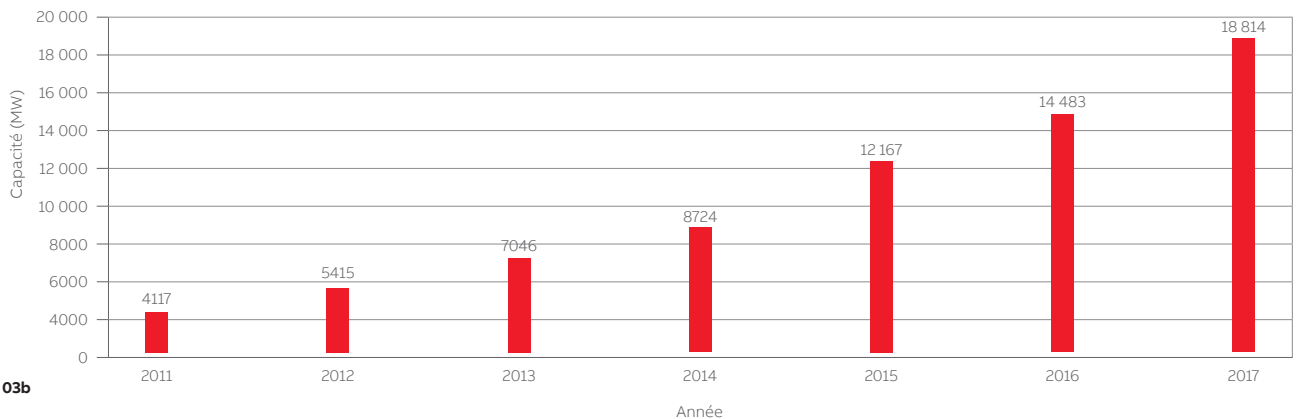
De pionnier à leader

Une implantation en mer a son lot de contraintes de conception spécifiques qui la distinguent des projets CCHT classiques : conditions climatiques, absence de référentiel normatif régissant les systèmes et composants CCHT offshore, accessibilité des parcs, limites de l'exploitation en milieu marin, gestion périlleuse des interfaces, entre autres. Sans compter qu'un réseau CA îloté est loin de se comporter comme un réseau de transport classique.



	Royaume-Uni	Allemagne	Chine	Danemark	Pays-Bas	Belgique	Suède	Vietnam	Finlande	Japon	Corée du Sud	États-Unis	Irlande	Taiwan	Espagne	Norvège	France	Total
Cumul 2016	5156	4108	1627	1271	1118	712	202	99	32	60	35	30	25	0	5	2	0	14 483
Progression 2017	1680	1247	1161	0	0	165	0	0	60	5	3	0	0	8	0	0	2	4331
Cumul 2017	6836	5355	2788	1271	1118	877	202	99	92	65	38	30	25	8	5	2	2	18 814

03a



03b

Environnement offshore

Nombreux sont les écueils du transport CCHT en mer : sollicitations mécaniques des ouvrages dues aux vibrations, températures extrêmes, humidité excessive, pollution saline, météo marine, difficultés d’acheminement, de stockage et de manutention des équipements. Autant d’obstacles qu’une conception soignée permet de surmonter.

—
ABB a développé et mis en œuvre avec succès des concepts novateurs de gestion du réseau offshore îloté en régime normal et perturbé.

Principes et règles de conception

Les deux premières plates-formes abritant les stations de conversion CCHT pour l’offshore reposaient sur une structure tubulaire classique (*jacket*) supportant les installations de surface (*topsides*). Le projet DolWin2 a bénéficié de l’étroite collaboration d’ABB et d’un chantier naval norvégien pour développer un concept innovant de plate-forme semi-submersible robuste, évolutive, facile à transporter →6, à installer et à exploiter sans lourds

engins de levage. Une fois en place, la structure gravitaire se dépose lentement sur les fonds marins par remplissage de ballasts avec l’eau de mer, à laquelle on substitue ensuite des graviers pour sceller l’ouvrage →7.

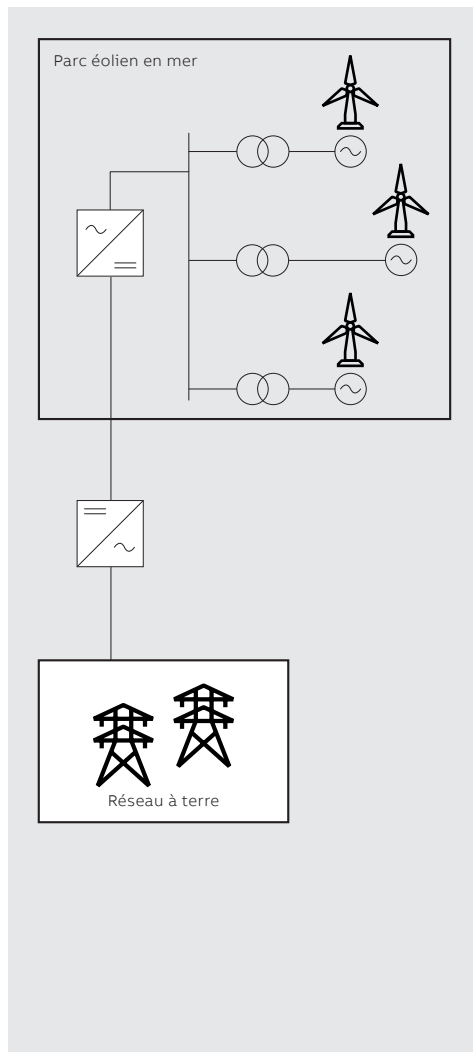
L’offshore a de strictes exigences de conception qui doivent être approuvées par un organisme de certification. Un étroit partenariat avec un concepteur de plates-formes reconnu est crucial pour écourter le chantier et réduire les risques.

Modes d’exploitation

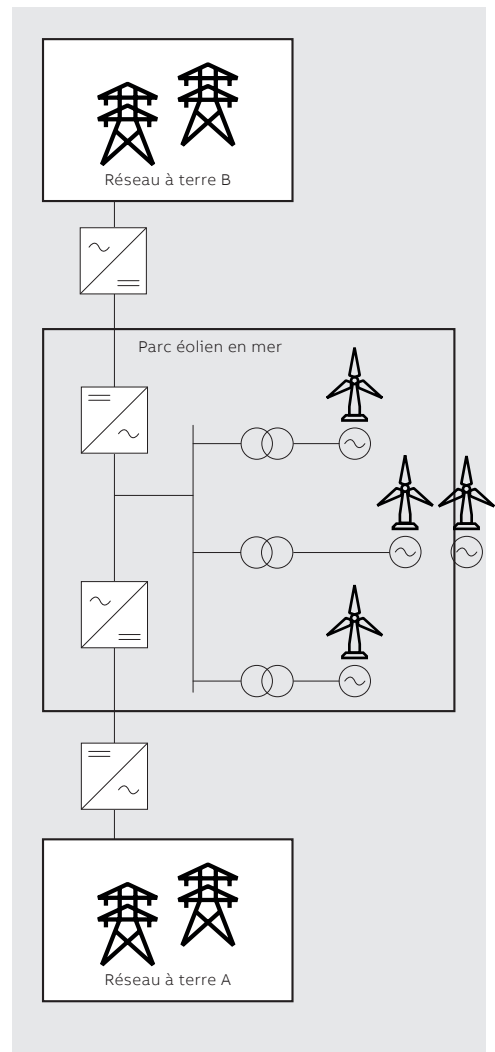
ABB a développé et mis en œuvre avec succès des concepts novateurs de gestion du réseau offshore îloté en régime normal et perturbé. L’une de ses innovations tient dans l’installation d’une imposante résistance de freinage à commande électronique (hacheur CC) pour stabiliser le réseau en mer en cas de perturbations dans le réseau à terre.

TenneT a su tirer les leçons des toutes premières connexions à l’éolien offshore pour améliorer les règles de raccordement au réseau. Le logiciel de régulation flexible et modulaire d’ABB pour les systèmes de transport en courant continu CCHT et en courant alternatif FACTS a facilité la mise en œuvre de ces nouveaux « codes réseau » sur les liaisons en service.

04a



04b



—
04 Différents schémas de raccordement de l'éolien marin

04a Liaison point à point

04b Plate-forme offshore à plusieurs liaisons CCHT

04c Plate-forme offshore à liaison CCHT à extrémités multiples

04d Plate-forme offshore à liaisons CA et stations CCHT dos à dos (interconnexion Danemark-Allemagne Kriegers Flak Combined Grid Solution)

Particularités offshore

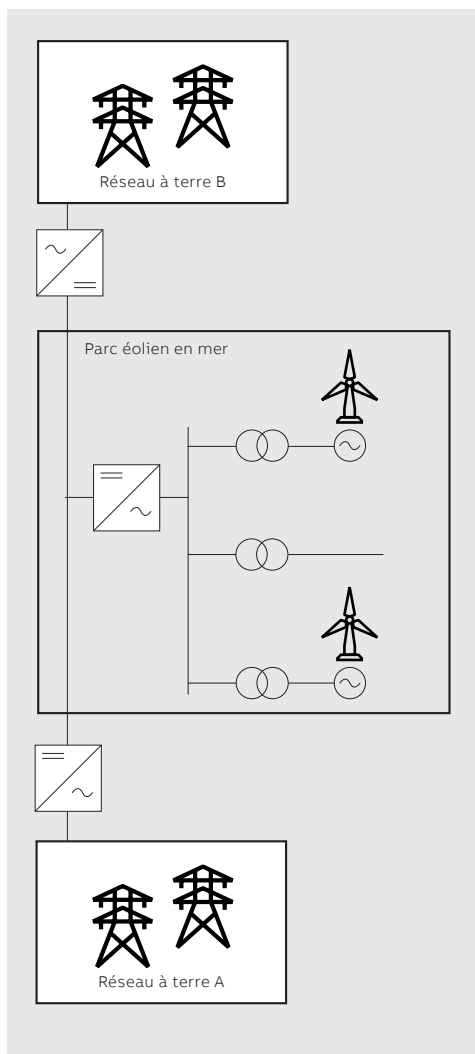
Un réseau CA en mer se différencie des réseaux électriques classiques, avec leurs lignes de transport, leurs charges et leurs grosses génératrices synchrones, par la présence de machines asynchrones, de câbles sous-marins et de nombreux transformateurs élévateurs et aérogénérateurs rapprochés.

—
Le logiciel de régulation flexible et modulaire d'ABB pour les systèmes CCHT et FACTS a facilité la mise en œuvre de nouveaux « codes réseau » sur les liaisons en service.

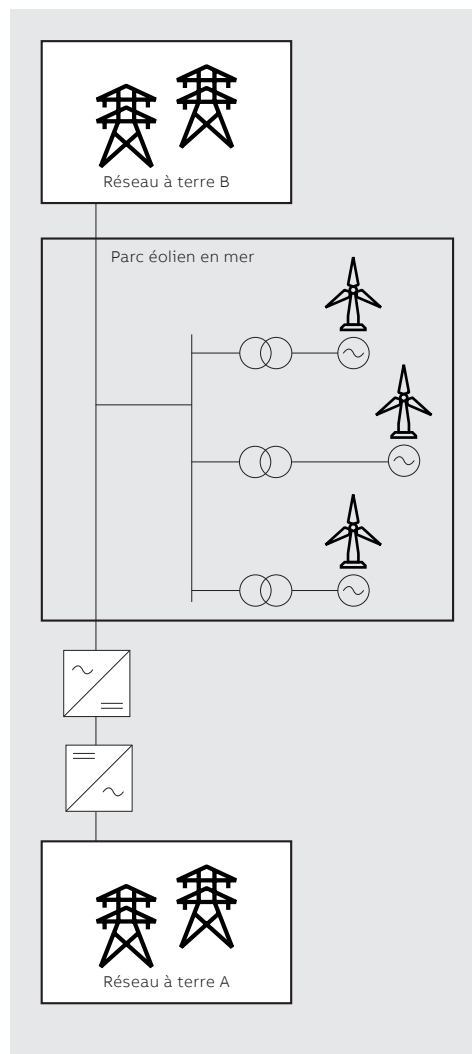
L'absence de machines synchrones fait que l'inertie du système est faible, voire nulle. Celui-ci peut alors subir de fortes excursions de fréquence et de déphasage en cas de délestage de charge consécutif à un défaut CA en mer ou à terre.

D'où la difficulté pour la boucle à verrouillage de phase des commandes d'aérogénérateurs de suivre avec précision la tension du réseau. Si un défaut se produit dans le réseau terrestre, le hacheur CC fait rempart en absorbant l'excédent de puissance éolienne impossible à rapatrier à terre, évitant la propagation du défaut en mer. Associé à la régulation de fréquence et de tension du convertisseur CCHT offshore, le dispositif garantit la stabilité du réseau marin. Pour parer aux défauts survenant au large, il importe de concevoir avec soin la commande de la liaison CCHT et des aérogénérateurs.

04c



04d



	BorWin1	DolWin1	DolWin2
Client (pays)	TenneT (Allemagne)	TenneT (Allemagne)	TenneT (Allemagne)
Mise en service	2009	2013	2014
Puissance assignée (MW)	400	800	916
Tension CA en mer (kV)	155	155	155
Tension CC (kV)	±150	±320	±320
Tension CA à terre (kV)	380	380	380
Longueur des câbles terrestres (km)	2 x 75	2 x 90	2 x 90
Longueur des câbles sous-marins (km)	2 x 125	2 x 75	2 x 45
Constructeur de la plate-forme	Heerema Fabrication Group (Pays-Bas)	Heerema Fabrication Group (Pays-Bas)	Aibel AS (Norvège)
Conception	Fondation type <i>jacket</i>	Fondation type <i>jacket</i>	Structure gravitaire
Parcs raccordés	Bard Offshore 1	Borkum West II MEG Offshore 1 Borkum Riffgrund 1	Merkur Offshore Trianel Borkum Borkum Riffgrund 1

05

Autres difficultés : les résonances engendrées par la capacité élevée des câbles sous-marins et par l'inductance des câbles et des transformateurs sont mal amorties, en particulier au tout début de la mise sous tension du système CA, lorsque la production éolienne est faible ou inexistante.

— Le hacheur CC absorbe l'excédent de puissance éolienne offshore impossible à rapatrier à terre, évitant la propagation du défaut en mer.

De même, la proximité électrique des transformateurs, source d'interaction en phase de mise sous tension des appareils au démarrage du

06



—
05 Systèmes CCHT d'ABB pour le raccordement de l'éolien offshore

—
06 La plate-forme CCHT DolWin2 en route vers sa destination, à 45 km des côtes allemandes

—
07 Plate-forme installée

parc, peut induire des surtensions harmoniques temporaires, accroître les contraintes sur les enroulements et faire dysfonctionner les protections différentielles et contre les surintensités. La mise en route d'un réseau offshore CA n'a donc rien de facile. En partenariat avec TenneT, ABB a mis au point des remèdes à ces instabilités : commutation commandée (en un point donné de l'onde), filtrage des harmoniques au niveau du convertisseur CCHT offshore, ajout de filtres, etc.

—

Force est de maintenir l'équilibre entre une conception robuste et éprouvée, et des innovations propres à réduire encore le coût de l'éolien en mer.

L'intérêt de la normalisation

Au cours de la dernière décennie, l'industrie a tiré de nombreux enseignements de la conception et de l'exploitation des liaisons CCHT pour l'éolien offshore, qui ont abouti à une collection de recommandations et de codes réseaux.

Si la normalisation est un puissant moyen d'harmoniser les meilleures pratiques des fournisseurs, elle ne doit pas entraver les avancées techniques qui font aujourd'hui débat comme le raccordement direct des aérogénérateurs au convertisseur CCHT offshore sans passer par les transformateurs élévateurs installés sur les plates-formes. Force est de maintenir l'équilibre entre une conception robuste et éprouvée, et des innovations propres à réduire encore le coût de l'éolien en mer.

Dans le sillage du vent

La rapide progression de l'éolien offshore ces dix dernières années est appelée à se poursuivre, à la faveur d'économies d'échelle dopées par la fourniture d'aérogénérateurs et de parcs toujours plus puissants, qui réclameront davantage de liaisons CCHT. La maturité technologique de la filière, confortée par les retours d'expérience positifs des systèmes en exploitation, permet de réduire les risques et de sécuriser la mise en œuvre efficace et opportune des connexions au réseau. De son côté, ABB poursuivra son rôle d'innovateur du CCHT pour construire des réseaux plus robustes et plus performants, dans le respect de l'environnement. ●

07

