

# Électricité 2.0

## Une brève histoire des réseaux électriques

JOCHEN KREUSEL – L'électricité est partout, des applications quotidiennes banales aux systèmes les plus complexes. En un peu plus d'un siècle, elle s'est imposée comme le principal moteur de l'activité humaine et de l'économie. Sans électricité, pas d'approvisionnement sûr en eau ni en denrées alimentaires, et encore moins de technologies de l'information. La productivité serait insuffisante pour satisfaire aux besoins élémentaires de la population mondiale. L'extension constante du réseau électrique, tant par sa taille que par sa portée, est allée de pair avec le développement de systèmes qui garantissent la continuité et la fiabilité de la fourniture. En dépit des transformations radicales de la filière, depuis les premières infrastructures îlotées jusqu'aux grands réseaux triphasés en courant alternatif synchronisés de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les principes de base qui sous-tendent les systèmes électriques restent, pour l'essentiel, inchangés. Pour autant, de récents développements vont bouleverser le paysage électrique.



**A**u commencement était le courant continu (CC) et ses premières applications dans les communications, les transports et l'éclairage en basse tension. Sans surprise, les réseaux de distribution urbains de l'époque acheminaient également du CC. Il en fut de même de la toute première liaison électrique longue distance de 57 km entre Miesbach et Munich (Allemagne), inaugurée en 1882. Le courant alternatif (CA) triphasé ne fit son apparition que plus tard, d'abord en Europe, puis aux États-Unis sous l'impulsion de Nikola Tesla et de George Westinghouse.

La transition vers le système CA triphasé fut rendue possible par l'avènement des transformateurs, qui permirent d'abaisser l'électricité acheminée en haute tension (HT) avec de faibles pertes, à des niveaux acceptables pour sa consommation. On construisit alors de grandes centrales de production avec, à la clé, d'importantes économies d'échelle. Autre atout de l'alternatif : une meilleure coupure des courants de court-circuit. Aujourd'hui encore, les interrupteurs CC haute tension n'existent que sous forme de prototypes. Dernier avantage majeur du CA, la conversion aisée de l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa dans les machines asynchrones.

En 1891, lors de l'Exposition internationale d'Électrotechnique de Francfort (Allemagne), l'entreprise AEG et les ateliers Oerlikon expérimentèrent avec succès le transport CA triphasé sur 176 km entre Lauffen et Francfort. L'expérience fut menée sous la direction du pionnier du triphasé, Mikhaïl Osipovich Dolivo-Dobrovolsky d'AEG, aidé de Charles Eugene Lancelot Brown des ateliers Oerlikon, l'un des futurs fondateurs de la société Brown, Boveri et C<sup>o</sup> (BBC).

Aux États-Unis, le CA triphasé décolle véritablement en 1893 lorsque George Westinghouse remporte l'appel d'offre pour l'éclairage de l'Exposition universelle de Chicago, au détriment de Thomas Edison et de sa solution CC. Une victoire décisive dans « la guerre des courants ».

#### Émergence du grand transport

Au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les réseaux îlotés sont progressivement raccordés à des réseaux plus étendus, puis aux réseaux nationaux. Naît alors un modèle de système élec-

trique qui reste valable aujourd'hui : une infrastructure interconnectée → 1 composée d'un maillage de liaisons de trans-

## Au commencement était le courant continu et ses premières applications dans les communications, les transports et l'éclairage basse tension.

port HT, de réseaux régionaux de répartition également HT, de réseaux de distribution en moyenne et basse tension (MT/BT) qui alimentent les zones urbaines et rurales. Le raccordement des réseaux îlotés se justifie par le rendement plus élevé des grandes centrales électriques, les moindres besoins de capacités de réserve et l'utilisation de sources d'énergie (surtout hydraulique et charbon) dont le transport sous leur forme primaire n'est pas économique du fait de leur faible densité énergétique → 2. Consciente du poids économique de la filière élec-

#### Photo p. 46

Construction de la première ligne BBC de 110 kV entre Karlsruhe et Mannheim (Allemagne) en 1914

---

## Aux États-Unis, le décollage du courant alternatif triphasé date de 1893 lors de l'Exposition universelle de Chicago.

trique et de son statut de monopole naturel, la quasi-totalité des pays décida très tôt de la nationaliser ou de la réglementer.

L'émergence de ces vastes systèmes fut le point de départ d'un mode d'exploitation qui perdure pour tous les grands réseaux électriques du monde, suivant deux principes essentiels → 3 : l'équilibre entre production et consommation (gauche de la figure) et le maintien des paramètres de tension spécifiés aux points de couplage (droite).

Avant l'apparition des technologies modernes de communication, un système aussi vaste, complexe et disséminé était exploité en temps réel au moyen d'outils de planification globale (plans de production et répartition des charges) pour minimiser les aléas et les dérives. Ces derniers sont gérés en temps réel car la fréquence est connue quasi instantanément dans le système complet. Tout déséquilibre production-consommation est donc mesurable à partir de l'écart de fréquence, qui fournit ainsi un signal aux centrales pour adapter leur production et corriger le déséquilibre.

La conduite du réseau lui-même est largement indépendante de ce pilotage production-consommation. Elle utilise les valeurs de réglage des transformateurs HT-HT et HT-MT qui jalonnent le réseau ainsi que le réactif injecté par les centrales électriques pour ajuster le transit de puissance et les tensions du réseau. La régulation de tension s'arrête normalement au niveau MT. Les réseaux MT et BT sont raccordés par des transformateurs à rapports de transformation fixes.

Si, en principe, ces deux activités sont dissociées, il n'en est rien dans la pratique. En effet, d'une part la gestion de la puissance réactive se fait au niveau des centrales et, d'autre part, les goulets d'étranglement dans le réseau de transport obligent à exploiter les centrales hors optimum économique du système global.

---

## 2 Très localisée, la production hydro-électrique doit être transportée sur de longues distances.



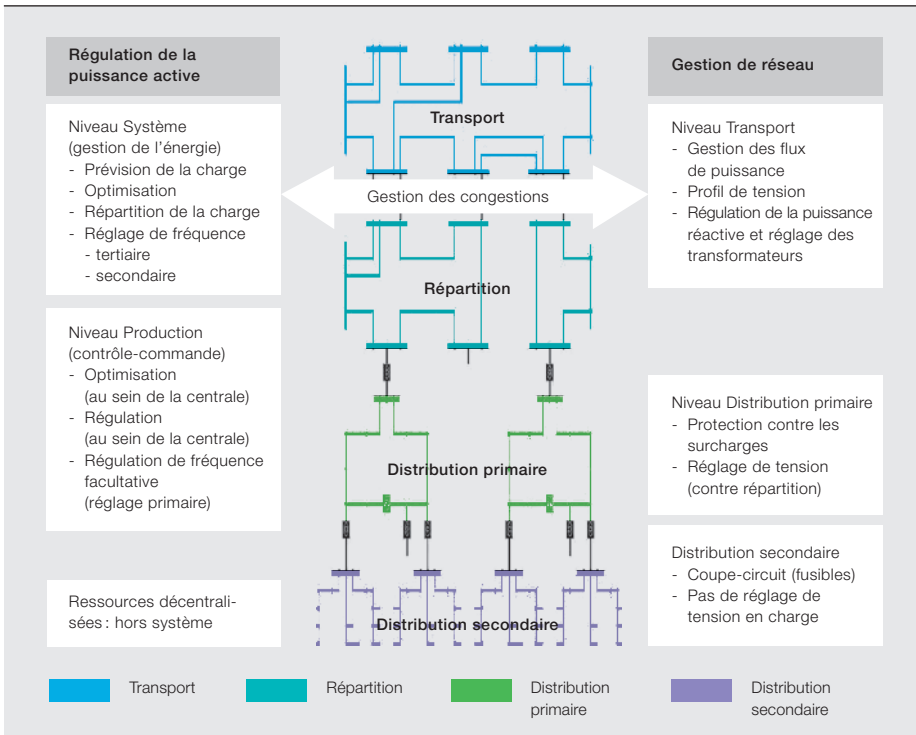
Dernière précision importante à la lecture de la figure → 3 : la gestion de grands réseaux synchrones interconnectés au niveau de la distribution primaire se fait avec un petit nombre d'ouvrages principaux (grandes centrales électriques et postes de couplage). Exemple : au sein des réseaux européens classiques, les

---

## Au début du XX<sup>e</sup> siècle, naissait un modèle de système électrique qui reste valable encore aujourd'hui.

postes primaires représentent moins de 2 % de l'appareillage total.

Au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les réseaux nationaux furent interconnectés pour former des réseaux synchrones transfrontaliers dans un souci de rentabilité et de sécurité d'approvisionnement. En 1951, la création de l'Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Électricité (UCPTE) jetait les bases d'un système électrique européen synchrone. Le premier jalon technique fut l'interconnexion des réseaux français, suisse et allemand à l'« étoile de Laufenbourg » (Suisse) dès 1958, soit bien avant que naisse l'idée



La Chine possède actuellement le plus grand système électrique synchronisé au monde, qui évolue rapidement.

d'un marché européen de l'électricité. Aujourd'hui, un seul et même réseau transfrontalier synchrone s'étend du Portugal à la Pologne et des Pays-Bas à la Turquie. Il vient par ailleurs d'être synchronisé avec les réseaux marocain, algérien et tunisien → 4.

Parallèlement à cette interconnexion au cœur du continent européen, deux autres systèmes transfrontaliers virent le jour : le système scandinave Nordel et le système *IPS* (*Interconnected Power System*) reliant l'Union soviétique et ses pays satellites. À ce jour, ce dernier est le système synchronisé couvrant le plus grand territoire au monde. Une approche quelque peu différente fut retenue en Amérique du Nord : même si des systèmes synchrones relient plusieurs États, ils ne furent pas étendus à tout le continent. Aujourd'hui, on compte trois régions distinctes fonctionnant en synchrone et interconnectées par des liaisons haute tension en courant continu (CCHT). Enfin, la Chine possède actuellement le premier système électrique synchronisé (en termes de puissance) au monde, qui évolue rapidement. Les principales caractéristiques de quelques grands réseaux synchronisés figurent en → 5.

Les différences de tension maximale de ces réseaux s'expliquent par leur étendue géographique. Les transits de puis-

sance réactive limitant leur longueur pour des raisons de stabilité, le transport longue distance doit se faire soit en haute tension, soit à basses fréquences.

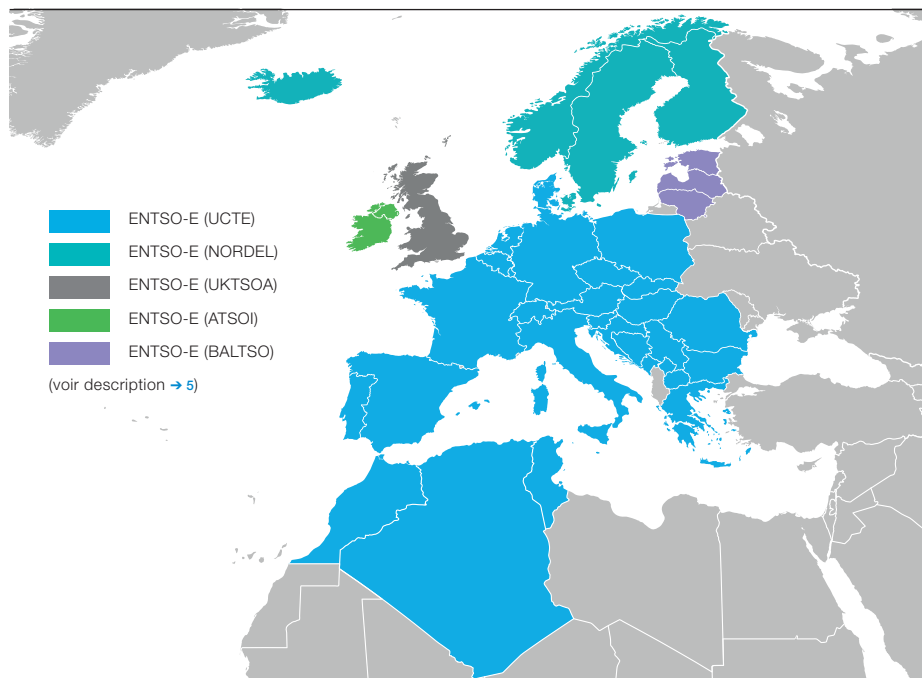
#### Transport CCHT

Si les avantages du transport CA sont à l'origine de sa généralisation, ses inconvénients ressurgissent avec la taille croissante des réseaux synchrones. On approche ainsi des limites de stabilité des systèmes, surtout dans le transport par lignes aériennes, obligeant à injecter du réactif fortement capacitif. Le grand nombre de câbles sous-marins dans les pays scandinaves conduisit ces derniers à s'intéresser au transport CCHT dès les années 1920. August Uno Lamm, pionnier de cette technologie, travailla plus de 20 ans chez ASEA à relever les défis du CCHT. La première liaison commerciale fut mise en service en 1954 entre l'île de Gotland en mer Baltique et le réseau national suédois → 6.

Au cours des décennies suivantes, le CCHT s'imposa pour le transport massif d'électricité sur de longues distances. La construction de centrales hydroélectriques géantes demeurent le principal vecteur de développement du CCHT → 7. Citons, notamment, la liaison Cahora Bassa entre le Mozambique et l'Afrique du Sud, celle d'Itaipu au Brésil et, depuis les années 1990, plusieurs projets d'enver-

Au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les réseaux nationaux furent interconnectés pour former des réseaux synchrones transfrontaliers.

#### 4 Principaux réseaux synchronisés d'Europe ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)



#### 5 Caractéristiques de quelques réseaux synchronisés

Réseau	Année et sources bibliographiques	Production nette installée (GW)	Charge de pointe (GW)	Consommation annuelle (TWh)	Tension de transport maxi (kV)
ENTSO-E (ATSOI <sup>1</sup> )		16,5	6,2 <sup>2</sup>	34,9	400
ENTSO-E (BALTSO <sup>2</sup> )		9,4	4,6	26,0	330
ENTSO-E (UCTE <sup>3</sup> )	2013 [1]	816	420	2553	400 (750 <sup>7</sup> )
ENTSO-E (NORDEL <sup>4</sup> )		87,4	66,1	350	400
ENTSO-E (UKTSOA <sup>5</sup> )		84,2	66,7	366	400
IPS	2007 [2]	337	215	1285	750 (1150 <sup>8</sup> )
USA (Western)	2012 [3]	326	151	885	500
USA (Eastern)	2011 [4]	743	578 <sup>6</sup>	1069	765
USA (ERCOT)	2010 [5]	108	65	358	345
Chine	2010 [6]	966	673	4200	1000

##### Notes

- Réseau synchronisé insulaire d'Irlande, raccordé en asynchrone à UKTSOA.
- Réseau synchronisé des pays baltes, raccordé en asynchrone à IPS.
- Union pour la Coordination du Transport de l'Électricité en Europe, créée à la libéralisation du marché de l'électricité européen et intégrée à l'ENTSO-E depuis 2009.
- Réseau synchronisé des pays scandinaves, raccordé en asynchrone à BALTSO et UCTE.
- Réseau synchronisé de Grande-Bretagne (Angleterre, Pays de Galles et Écosse), raccordé en asynchrone à ATSOI et UCTE.
- Somme des charges de pointe des pays participants (ENTSO-E) ou des systèmes régionaux (interconnexion orientale)
- Liaison 750 kV de 471 km, raccordée à IPS.
- Liaison Ekibastus-Kokshetau au Kazakhstan

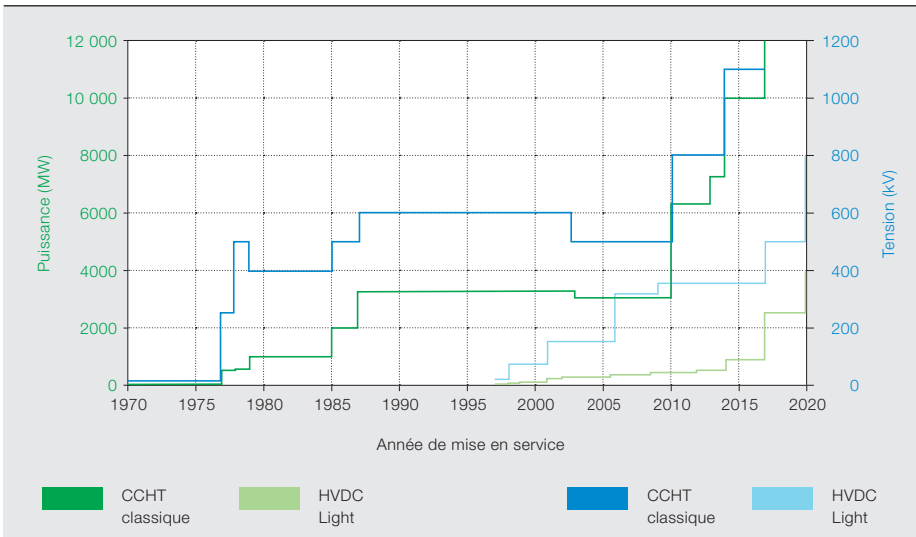
##### Bibliographie

- ENTSO-E Statistical Factsheet 2013, ENTSO-E, Bruxelles, 25 avril 2014.
- Luther, M., « Lessons learned from the UCTE-IPS/UPS Feasibility Study », Regional Transmission Network Development: Implications for Trade and Investment, Istanbul, 11–12 novembre 2009.
- « 2012 State of the Interconnection », Western Electricity Coordinating Council, juillet 2013.
- « Market structures and Transmission Planning Processes in the Eastern Interconnection », Christensen Associates Energy Consulting & Energy Policy Group for EISPC and NARUC, juin 2012.
- « State Electricity Profile: Texas », U.S. Energy Information Administration, 1<sup>er</sup> mai 2014.
- Liu, Z., « Electric power and energy in China », Jon Wiley & Sons Singapour, 2013.



L'ouverture du marché de l'électricité à la concurrence entraîna la séparation des activités de production et de gestion des réseaux.

## 7 Développement de la technologie CCHT



gure en Chine. Les valeurs maximales atteignent aujourd'hui 6400 MW, 2500 km et 1100 kV CC, dans des systèmes distincts.

### Ouverture du marché de l'électricité

Vers la fin du siècle dernier, de nombreux pays commencèrent à remettre en cause l'intégration verticale de l'industrie électrique. Le débat surgit d'abord aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Scandinavie, où il se conclut par l'ouverture du marché à la concurrence. L'Australie et l'Union européenne leur emboîtèrent le pas. Les entreprises publiques d'électricité de certains pays furent privatisées pour diverses raisons : attirer les investissements privés, améliorer la qualité de la fourniture et réduire les prix de l'énergie par le jeu de la concurrence.

Les activités de production d'électricité et de gestion des réseaux électriques furent dissociées. Alors que ces derniers continuaient d'être traités comme des monopoles naturels, donc régulés par les autorités publiques, la production s'ouvrit à la concurrence avec des modalités différentes selon les pays. Si en Europe, les consommateurs peuvent directement mettre en concurrence leurs fournisseurs, ce n'est pas le cas en Amérique du Nord où des monopoles géographiques persistent au niveau de la distribution, la concurrence étant limitée au marché de gros.

La libéralisation du marché fit également émerger de nouveaux acteurs tant économiques (optimisation des coûts et relation client) que techniques (stabilité du système). La figure → 8 reflète cette évo-

lution tout en reprenant les fonctions techniques inchangées. Cette ouverture mit un terme à la planification intégrée des centrales et des réseaux électriques en matière de développement et d'exploitation. Une véritable concurrence entre producteurs nécessite, d'une part, de disposer de capacités de transport plus importantes qu'avant et, d'autre part, de coordonner l'action des différents acteurs et de normaliser leur coopération.

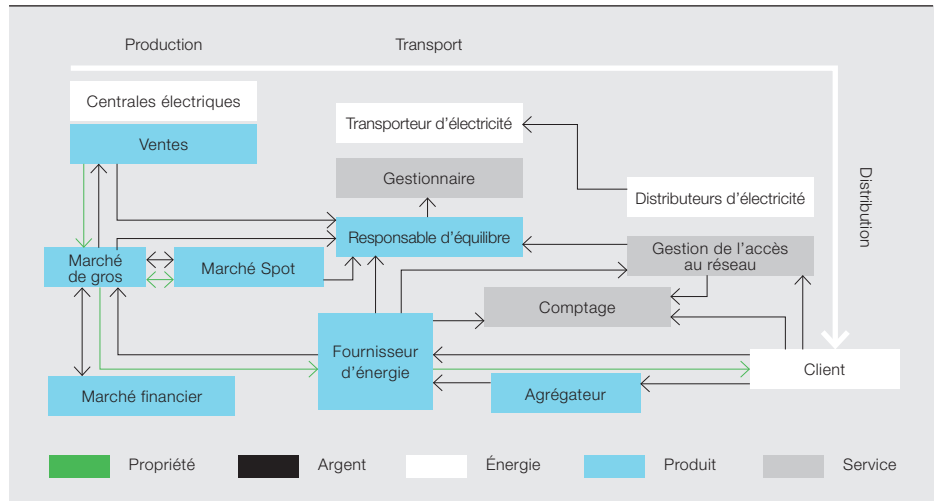
### Changement de paradigme

Depuis le début des années 2000, de nombreux pays soutiennent activement le développement des énergies renouvelables, solaire et éolien en tête → 9. Si cet essor rapide pose des défis techniques aux réseaux électriques, il tire également vers le bas les coûts énergétiques, surtout dans le photovoltaïque (PV). Conséquences : dans un nombre croissant de pays, cette énergie est moins chère que celle facturée aux consommateurs sur le réseau BT. Le coût de revient quasi linéaire du PV (pas d'économies d'échelle importantes dans les dépenses d'investissement) a un impact fondamental sur le modèle économique du secteur électrique et, donc, sur sa structure. Du point de vue du système, les bouleversements techniques sont triples :

- Une séparation géographique accrue entre production et consommation est introduite dans les systèmes précédemment construits autour de centrales thermiques ou nucléaires où l'équilibre production-consommation se faisait au niveau régional. Cette évolution est principalement due à la

Depuis le début des années 2000, de nombreux pays soutiennent le développement des énergies renouvelables, solaire et éolien en tête.

## 8 Acteurs techniques et économiques d'un marché de détail de l'électricité totalement concurrentiel



## 9 La forte croissance du solaire et de l'éolien pose de nouveaux défis.



- production renouvelable très localisée (éolien et hydraulique) ;
- Une hausse de la production décentralisée (PV et cogénération, au premier chef) fait qu'un très grand nombre de petites unités produit une part importante d'électricité ;
  - Une production intermittente (éolien et solaire) accélère et amplifie les fluctuations peu prédictibles de la fourniture.

De ces trois bouleversements de l'offre et de la demande d'électricité → 10, deux sont particulièrement notables : d'une part, l'importance croissante des grands réseaux de transport intelligents et, d'autre part, la montée en puissance du « produire localement pour consommer localement » (gestion active de la consommation).

La production renouvelable à grande échelle permettra d'équilibrer les différentes sources d'énergie primaire sur de vastes territoires, comme l'illustre le raccordement à l'Europe des réseaux d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient [1]. Un tel « super-réseau » de transport transcontinental viendra se superposer aux réseaux HT existants. En introduisant son disjoncteur CC en 2012, ABB a fait sauter le dernier verrou technique majeur à la création de ce réseau en technologie CCHT [2].

À l'avenir, la décentralisation de la production aura probablement les effets les plus radicaux. L'injection d'une part importante de cette production se faisant au niveau distribution, les gestionnaires du système doivent en tenir compte. De surcroît, la forte variabilité du

## 10 Incidence des principaux leviers de changement sur différents maillons de la chaîne électrique

Levier	Système concerné				
	Production classique	Transport	Distribution	Fonctionnement du système	Application
Production centralisée		- FACTS <sup>1</sup> - Transport primaire - Réseau superposé, CCHT		- Stabilisation par FACTS <sup>1</sup>	
Production décentralisée			- Automatisation - Régulation de tension	- Communication - Contrôle-commande - Centrales virtuelles	
Production intermittente	- Charge partielle - Flexibilité	- Nivellement inter-régional - Réseau superposé, CCHT - Stockage de grande capacité	- Stockage distribué	- Gestion dynamique de la charge - Centrales virtuelles - Mesure de phaseurs/ Surveillance à grande échelle	- Stockage - Maîtrise de la demande en énergie
Nouvelles charges (écomobilité)			- Infrastructure de recharge	- Gestion dynamique de la charge	

**Note**  
1 Flexible AC Transmission Systems : systèmes flexibles de transport en courant alternatif

PV oblige à gérer les congestions à ce niveau. Une coordination active nécessitera d'ajouter trois ordres de grandeur aux systèmes antérieurs. C'est ici que les technologies de l'information et de la

retour en force de la distribution en CC. Conscient de cela, ABB propose des solutions pour les *datacenters* [3] et les navires [4]. L'hybridation CA-CC du secteur électrique est donc en marche dans le transport comme dans la distribution.

## Les systèmes comptent aujourd'hui de plus en plus de dispositifs alimentés en courant continu ou indifférents à la fréquence.

Tous ces développements bouleversent les fondements de l'industrie électrique et ses principes restés inchangés depuis les premiers temps du CA. On peut, sans exagération, parler d'une « révolution électrique 2.0 ».

communication entrent en jeu. La collecte efficace de données et leur utilisation méthodique dans la planification, l'exploitation et la maintenance seront déterminantes pour la rentabilité des réseaux décentralisés.

Un autre changement se profile, non plus lié aux énergies renouvelables, mais au progrès technique. Alors qu'au début de l'électrification, le CA triphasé dominait à la fois côté production et côté consommation, les systèmes comptent aujourd'hui de plus en plus de dispositifs qui doivent être alimentés en CC ou ne sont pas tributaires de la fréquence. Côté charge, citons les appareils électroniques, les diodes électroluminescentes (LED), les batteries et les moteurs commandés en vitesse variable et, côté production, les cellules solaires. C'est le

### Jochen Kreusel

ABB Smart Grids  
Mannheim (Allemagne)  
jochen.kreusel@de.abb.com

### Bibliographie

- [1] *Desert Power: Getting Started*, Dii GmbH, Munich, juin 2013.
- [2] Häfner, J., Jacobson, B., « Proactive Hybrid HVDC Breakers – a key innovation for reliable HVDC grids », Cigré Symposium, Bologne (Italie), 13–15 septembre 2011.
- [3] Schärer, A., « Lignes continues : architecture courant continu basse tension », *ABB review*, 4/13, p. 16–21.
- [4] Communiqué de presse ABB, *Breakthrough order for DC technology*, 22 février 2012.