



## Décarbonation de l'énergie : comment les convertisseurs électroniques de puissance vont transformer les réseaux électriques

### Introduction

**Marc Petit**

Professeur à CentraleSupélec

**Bruno François**

Professeur à Centrale Lille

**Jean-Luc Schanen**

Professeur à Grenoble INP

Le vecteur électricité est au cœur des stratégies de décarbonation, que ce soit au travers du développement des énergies renouvelables ou de l'électrification massive de nombreux usages. La force de ce vecteur énergétique c'est la facilité de transformation et de conversion de l'électricité, en particulier grâce aux convertisseurs électroniques de puissance qui deviennent une brique clé des stratégies d'électrification.

### L'électronique de puissance omniprésente dans les EnR et les usages

Afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050, la France prévoit un fort développement des énergies renouvelables (EnR) au côté d'une filière nucléaire, le tout accompagné d'une électrification massive des usages. La Programmation

Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) a fixé la part des EnR à 40 % d'ici 2030, puis à 50 % en 2035. Au-delà des caractères variables et incertains, les unités de production renouvelables sont – technologiquement – fondamentalement différentes des centrales classiques car il n'y a pas la traditionnelle machine synchrone – élément clé du fonctionnement des réseaux alternatifs – qui est raccordée

directement au réseau électrique. Qu'il s'agisse d'installations photovoltaïques ou d'éoliennes, on y trouve toujours un ensemble de convertisseurs électroniques de puissance pour faire le raccordement au réseau. Ils permettent l'utilisation optimale de la ressource primaire (irradiation ou vent) via des commandes dites MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) et aussi l'indispensable conversion en alternatif

(AC) dans le cas du photovoltaïque qui est nativement en continu (DC). Dans le cas de l'éolien offshore plus éloigné il y aura aussi un transport d'électricité en courant continu et non plus en alternatif entre la sous-station offshore et le poste électrique sur le continent. Actuellement les projets offshore français n'étant pas trop éloignés, l'impédance des câbles ne rend pas indispensable le raccordement en HVDC <sup>1</sup>.

Du côté de la demande, le changement va s'accélérer avec des sites industriels qui pourront produire électriquement tout ou partie de leurs besoins de chaleur par des pompes à chaleur pilotées grâce à des convertisseurs électroniques, avec le développement de la production d'hydrogène par électrolyse (encore une utilisation de convertisseurs), et sans oublier les centres de données dont les serveurs et unités de stockage de données sont nativement en DC. A l'échelle des secteurs tertiaires et résidentiels, on trouve également une forte croissance des équipements nativement en DC (matériel informatique) ou pilotés par des moteurs entraînés par des variateurs électroniques (climatisation, ventilation, chauffage). Le développement de la mobilité électrique contribuera également à cette croissance. La batterie de stockage étant en DC, il y aura toujours un convertisseur AC/DC soit embarqué (charge lente ou intermédiaire) soit dans la borne (charge rapide ou très rapide).

### L'électronique de puissance omniprésente dans les nouveaux projets de liaisons électriques

A partir du début du XX<sup>ème</sup> siècle, les systèmes électriques se sont développés en technologie alternative (AC) car cette technologie offrait le meilleur optimum économique pour transporter de la puissance sur une distance suffisante, mais surtout permettait une réduction des pertes grâce à l'abaissement ou l'élévation de la ten-

<sup>1</sup> High Voltage Direct Current

## ” Face à la difficulté de construire des lignes aériennes à haute tension, l'enfouissement peut conduire à opter pour des technologies HVDC (liaisons France-Espagne, France-Italie). ”

sion par les transformateurs. Toutefois la solution AC a commencé à montrer ses limites lorsqu'il a fallu construire des liaisons sous-marines pour interconnecter certaines zones (d'abord en mer Baltique, ou entre la France et l'Angleterre). Actuellement, la zone Europe cherche à renforcer les interconnexions électriques pour permettre une meilleure circulation des flux de puissances afin de mieux partager la production électrique d'origine EnR et d'aller vers une meilleure intégration des marchés électriques. Face à la difficulté de construire des lignes aériennes à haute tension, l'enfouissement peut conduire à opter pour des technologies HVDC (liaisons France-Espagne, France-Italie). De plus, lorsqu'il s'agit de traverser la Manche ou la Mer du Nord, alors la solution HVDC est la seule qui convienne. A l'échelle du réseau de transport on passe progressivement d'un réseau AC maillé où les flux se répartissent selon les impédances des lignes, à un réseau mixte (dit aussi hybride) avec certains flux qui sont contrôlés par les convertisseurs.

### Des nouvelles technologies d'électronique de puissance à développer et à fiabiliser

Le déploiement de ces nouvelles technologies est rendu possible par l'amélioration continue des performances des composants électroniques (Si silicium, puis SiC carbure de silicium, et à terme le GaN nitrure de gallium). Ces performances sont obtenues grâce aux travaux de R&D qui permettent d'envisager des niveaux de tension et courant plus élevés pour transporter les puissances requises, tout en garantissant un niveau de pertes faibles (< 2%). Par ailleurs, les travaux de recherche se pour-

suivent pour caractériser le vieillissement de ces composants, pour garantir un meilleur contrôle (pilotage) de ces convertisseurs, et l'intégration optimale dans le système électrique qui est par nature un système complexe à grande dimension. La fiabilisation de ces nouveaux équipements ainsi que le maintien de la sûreté du système électrique dans cette nouvelle configuration hybride est donc essentielle pour envisager un déploiement massif. Les opérateurs de réseaux attendent des durées de vie proches de celles des équipements actuels (souvent plusieurs décennies) avec des besoins et coûts de maintenance qui ne doivent pas exploser.

Nous sommes au début d'une nouvelle ère qui fait dès à présent de l'électronique de puissance la brique fondamentale de la décarbonation de l'énergie que ce soit dans les réseaux électriques, que dans les systèmes embarqués pour le transport, ou pour l'électrification en zones isolées. Les besoins sont immenses à tous les niveaux de la chaîne de valeur avec une compétition forte qui nécessite de se préparer en renforçant les actions de R&D et d'innovation (industrielles et académiques), et de formation <sup>2</sup>.

### Le contenu du dossier

Le présent dossier vise à donner un éclairage sur la transformation des réseaux électriques sous l'effet d'un recours massif aux convertisseurs électroniques de puissance. Il met aussi en lumière les défis technologiques à relever au niveau des convertisseurs et de leurs composants pour ●●●

<sup>2</sup> L'association ThinkSmartGrid va publier prochainement un manifeste sur les enjeux de l'électronique de puissance

- permettre une fiabilité des réseaux de demain. Ce dossier s'articule autour de quatre articles afin d'aborder l'utilisation de l'électronique de puissance et la gestion de réseaux hybrides AC et DC depuis les réseaux de transport jusqu'au réseau de distribution moyenne et basse tension, en passant par les solutions à développer pour soutenir cette évolution technologique.

## Quels impacts d'une massification de l'électronique de puissance pour les réseaux ?

**Sylvie Perrin, Yannick Vernay, Adrien Guironnet**

En tant que garant de la sûreté du système électrique et principal gestionnaire de réseau de transport d'électricité en Europe, RTE doit se préparer et s'adapter aux évolutions en cours et notamment au fort développement de systèmes connectés par de l'électronique de puissance. Il est important d'analyser les impacts de ce changement sur la stabilité du réseau, les possibles interactions entre convertisseurs, ainsi que les évolutions de la réglementation pour résoudre ces problèmes. Ces transformations impactent également la gestion opérationnelle avec l'utilisation plus intensive d'outils de simulation temps réel qui permettent de tester le comportement de briques physiques (par exemple des contrôleurs physiques).

## Développer des briques technologiques nécessaires à l'avènement des réseaux HVDC multi-terminaux et MVDC

**Loïc Leclere**

Cet article présente les travaux menés au sein de SuperGrid Institute depuis 10 ans pour concevoir des solutions innovantes afin de favoriser le développement des réseaux à courant continu, d'abord en HVDC (transport à haute tension) puis désormais en MVDC (distribution moyenne tension). Positionné à l'interface entre les acteurs industriels et les laboratoires académiques, SuperGrid Institute peut s'appuyer sur des moyens expérimentaux qui permettent de concevoir et tester des prototypes avec des niveaux de tension et courant dans la gamme kV et kA.

## “ En tant que garant de la sûreté du système électrique et principal gestionnaire de réseau de transport d'électricité en Europe, RTE doit se préparer et s'adapter aux évolutions en cours et notamment au fort développement de systèmes connectés par de l'électronique de puissance. ”

## Concevoir les réseaux de distribution du futur avec une forte insertion de convertisseurs électroniques

**Vincent Debusschere**

Cet article présente le projet collaboratif DC-Architect (2023-2028) qui vient de démarrer et rassemble 16 laboratoires académiques – dont les activités de recherche et compétences sont complémentaires – afin de répondre aux défis inhérents à l'évolution des réseaux de distribution vers des systèmes hybrides AC et DC. Il est financé dans le cadre du plan d'investissement « France 2030 » et plus spécifiquement par les programmes PEPR (Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche) qui ont pour ambition de construire ou de consolider le leadership français dans des domaines jugés stratégiques. Parmi ces domaines il y a celui des Technologies Avancées pour les Systèmes Énergétiques (TASE). Ce projet académique se focalise sur l'introduction de technologies MVDC dans les réseaux moyenne tension, et vise à atteindre un niveau de maturité technologique qui permettra

ensuite de passer à l'échelle d'un démonstrateur.

## Vers des réseaux de distribution basse tension hybrides

**Frédéric Raymond-Laruina**

Cet article présente un travail de recherche mené dans le cadre d'un partenariat entre EDF R&D, Enedis, Socomec et le laboratoire GeePs. Il s'agit de présenter un concept de poste de distribution basse tension hybride qui a été conçu pour répondre à un cahier des charges défini conjointement par les partenaires. Ce poste hybride intègre un convertisseur AC/DC afin de pouvoir déployer un départ à courant continu qui permettrait de raccorder des équipements nativement en courant continu (panneaux solaires, bornes de recharge de véhicules électriques, ...) ou de réaliser une distribution basse tension DC dans des bâtiments. Le cœur de l'étude a porté sur le comportement du convertisseur en cas de défauts sur le réseau et dans le respect d'un plan de protection qui doit garantir une sélectivité entre les différents organes de coupure. ■

## Les articles

<b>Quel est l'impact d'une massification de l'électronique de puissance pour les réseaux ?</b> .....	p.47
<b>Développer des briques technologiques nécessaires à l'avènement des réseaux HVDC multi-terminaux et MVDC</b> .....	p.55
<b>Concevoir les réseaux de distribution du futur avec une forte insertion de convertisseurs électroniques</b> .....	p.61
<b>Vers des réseaux de distribution basse tension hybrides</b> .....	p.67