



## **L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE**

UNE TECHNOLOGIE ESSENTIELLE  
ET STRATÉGIQUE POUR LA TRANSITION  
ÉNERGÉTIQUE ET L'ÉLECTRIFICATION  
DES USAGES

## SOMMAIRE

## RÉSUMÉ EXÉCUTIF

### p.3 RÉSUMÉ EXÉCUTIF

### p.4 PRINCIPALES RECOMMANDATIONS

#### p.6 1. L'électronique de puissance est une technologie essentielle et stratégique pour un système électrique bas carbone

- p.6 1.1 L'EP pour la production d'électricité à base d'ENR
- p.7 1.2 L'EP pour une consommation efficace de l'électricité
- p.7 1.3 L'EP pour le stockage de l'énergie
- p.7 1.4 L'EP pour le transport et la distribution de l'électricité

#### p.9 2. Développer une autonomie stratégique ouverte pour renforcer la résilience et la compétitivité européenne

- p.9 2.1 De nouveaux matériaux aux propriétés nouvelles pour la fabrication de semi-conducteurs
- p.9 2.2 Les atouts de l'Europe: R&D, industries et marchés en croissance
- p.10 2.3 L'électronique est au cœur d'enjeux stratégiques majeurs de résilience et compétitivité européenne
- p.10 2.4 Pour une industrialisation européenne de la fabrication des semi-conducteurs, convertisseurs de puissance et produits dédiés aux réseaux électriques

#### p.12 3. Standardiser les conditions de raccordement et accroître la participation de l'EP à l'exploitation du système électrique

- p.12 3.1 Des participations possibles à l'exploitation du réseau électrique
- p.12 3.2 Des impacts dynamiques mal connus et liés aux raccordements massifs d'EP
- p.13 3.3 Des besoins de standardisation

#### p.14 4. Évaluer l'impact environnemental de l'EP et développer des filières pour impulser la circularité

- p.14 4.1 Une recyclabilité à développer massivement
- p.14 4.2 Augmenter la soutenabilité de l'EP par des méthodes d'écoconception
- p.15 4.3 Un besoin fort de données fiables pour les Analyses de Cycle de Vie (ACV)
- p.15 4.4 Des impacts hors carbone qu'il reste encore à évaluer précisément

#### p.16 5. Amener la fiabilité de l'EP au même niveau que celle des matériels du réseau électrique

#### p.17 6. Appuyer des développements et services innovants de l'EP sur les réseaux de moyenne tension

- p.17 6.1 Développements applicatifs innovants et intérêt technico-économique
- p.17 6.2 Optimiser des gammes de convertisseurs pour des applications en moyenne tension (AC ou DC)
- p.17 6.3 Financer des projets démonstrateurs

#### p.18 7. Renforcer l'expertise de l'EP par un soutien important aux formations et à la recherche

- p.18 7.1 Anticiper un besoin massif en personnel formé et qualifié à ces nouveaux enjeux
- p.18 7.2 Des besoins à tous les niveaux d'étude
- p.19 7.3 Améliorer l'attractivité de ces filières technologiques
- p.19 7.4 Soutenir la formation continue du personnel existant à ces nouvelles techniques

Alors que la pression des enjeux climatiques et plus particulièrement la décarbonation de certains usages et process industriels se fait de plus en plus forte, l'Electronique de Puissance (EP), technologie de l'ombre, occupe une place de plus en plus importante au point de jouer un rôle stratégique dans la réussite de la transition énergétique et la résilience des chaînes d'approvisionnement de technologies « zéro net » en Europe.

**Les systèmes de conversion à base d'Electronique de Puissance jouent un rôle essentiel au sein des applications utilisant l'énergie électrique, de sa production à son utilisation, en passant par son transport et sa distribution.**

Ainsi, aujourd'hui, l'EP est une technologie centrale pour :

- le développement des énergies renouvelables (ENR),
- l'intégration de la mobilité électrique dans les réseaux,
- l'interconnexion des systèmes électriques européens,
- le stockage d'énergie,
- le fonctionnement opérationnel des réseaux électriques.

Ce manifeste montre l'apport clé de l'EP dans les réseaux électriques, et souligne son rôle capital qui nécessite une vigilance et prise de conscience absolue de **la part de la France et l'Europe quant à leur autonomie vis-à-vis de cette technologie.**

Il pointe également les évolutions nécessaires au niveau du réseau électrique liées au déploiement massif de cette technologie. Il met en évidence les défis et opportunités en matière de durabilité et d'empreinte environnementale qu'il faut anticiper avant une généralisation massive de l'EP.

Enfin, il se projette à moyen terme sur **une transformation en profondeur de la distribution électrique, en particulier dans le domaine de la moyenne tension, et alerte sur les besoins en formation et en recherche dans le domaine de l'EP.**

Ce document porte la vision de l'association Think Smartgrids. Sa rédaction a été pilotée par son Conseil scientifique.

Auteurs : Bruno FRANCOIS, David FREY, Sébastien CORNET, Mahana BERNIER, François GRUSON, Jean Luc SCHANEN, Michel BENA, Marc PETIT

Contributeurs : Remerciements à Radoslava MITOVA (Schneider Electric), Jean-Luc ROY (General Electrics), Yvan Avenas (G-INP UGA), Maud RIO (G-INP G-SCop), ...



## PRINCIPALES RECOMMANDATIONS

### Développer une autonomie stratégique ouverte pour renforcer la résilience et la compétitivité européenne

Portée par la demande croissante liée à la transition énergétique, l'Électronique de Puissance se retrouve au cœur d'enjeux stratégiques majeurs d'autonomie stratégique ouverte, de compétitivité et de résilience européenne. Ce secteur d'activité bénéficie de **recherches très dynamiques dans les laboratoires français notamment**, offrant un large éventail de solutions technologiques. On peut citer les nouveaux matériaux semiconducteurs à Grand Gap venant concurrencer le Silicium (SiC, GaN), mais également des travaux sur leur packaging, leur refroidissement... Cette « nouvelle donne » constitue une opportunité de développement d'une filière industrielle forte en Électronique de Puissance en France et en Europe.

### Standardiser les conditions de raccordement et accroître la participation de l'EP à l'exploitation du système électrique

L'électrification massive des usages accroît le nombre d'équipements connectés au réseau électrique au travers de l'EP. Les impacts dynamiques sur les matériels et le réseau sont aujourd'hui encore mal connus. Des standards assurant le fonctionnement correct à la fois du réseau électrique et des matériels raccordés doivent être adaptés et complétés.

Par ailleurs, l'EP permet d'envisager des participations possibles à l'exploitation du système électrique grâce à une contrôlabilité de la puissance électrique échangée avec le réseau.

### Évaluer l'impact environnemental et développer une filière de circularité

L'effet bénéfique sur la décarbonation de l'énergie qu'offre l'Électronique de Puissance ne dédouane pas cette technologie de la maîtrise de son empreinte environnementale développée lors de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des déchets générés en fin de vie. Les fabricants de convertisseurs doivent donc mettre en œuvre des stratégies d'écoconception, **dès la phase de conception, aborder les problématiques de circularité et documenter les bases de données, indispensables au chiffrage de l'empreinte environnementale des équipements électriques.**

### Amener la fiabilité de l'EP au même niveau que celle des matériels du réseau électrique

Le déploiement massif d'Électronique de Puissance nécessite d'amener cette technologie au même niveau de fiabilité que les autres matériels du réseau. **Or les contraintes électriques et thermiques induites sur les composants des convertisseurs sont bien plus sévères que dans l'électronique grand public.** Par ailleurs, compte tenu de cette plus grande fragilité, il est indispensable d'avoir des informations sur la durée de vie estimée des convertisseurs. Un effort de recherche conséquent doit être entrepris pour comprendre les mécanismes de défaillance, proposer des designs plus robustes, identifier des marqueurs pertinents et pouvoir en extraire un pronostic.

### Appuyer des développements et services innovants de l'EP sur les réseaux de moyenne tension

Le domaine de la moyenne tension est un élément clé du développement des futures infrastructures électriques, **essentielle pour une intégration massive des nouvelles sources d'énergie renouvelable**, ainsi que pour l'électrification en substitution aux énergies carbonées. L'électronique de puissance est une technologie clé de ces futurs réseaux permettant des fonctionnalités nouvelles (réductions de contraintes électriques, augmentation des capacités d'accueil sur le réseau, utilisation de systèmes FACTS, réseaux ou lignes MVDC...).

### Renforcer l'expertise dans le domaine de l'EP par un soutien important aux formations et à la recherche

L'électrification et la conversion à base d'EP qui l'accompagne vont impliquer une augmentation très forte des besoins de recherche et de la demande en formation à tous les niveaux d'étude. Cela passe par la disponibilité des financements nécessaires, le développement de l'attractivité vers ces filières technologiques et un rapprochement fort avec l'écosystème industriel européen.

“ **L'électrification et la conversion à base d'EP qui l'accompagne vont faire exploser le besoin de recherche et la demande en formation à tous les niveaux d'étude.** ”

# 1. L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE EST UNE TECHNOLOGIE ESSENTIELLE ET STRATÉGIQUE POUR UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE BAS CARBONE



## 1.1 L'EP POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ À BASE D'ENR

Bon nombre de sources de production à base d'Énergie Renouvelable (ENR) délivrent l'énergie électrique sous forme continue (DC) ou sous forme alternative (AC) à fréquence variable. **Pour permettre leur raccordement aux réseaux électriques, l'électricité générée doit être obligatoirement mise en forme – grâce à des convertisseurs d'Électronique de Puissance (EP) – pour être compatibles avec le fonctionnement alternatif à fréquence de 50 Hz des réseaux électriques de distribution ou de transport.**

Associée à des lois de contrôle dynamique, l'EP permet de maximiser l'énergie injectée dans le réseau par les productions intermittentes. **La croissance des ENR dans les mix énergétiques entraîne automatiquement une augmentation du nombre de convertisseurs d'électronique de puissance raccordés aux réseaux électriques.**

## 1.2 L'EP POUR UNE CONSOMMATION EFFICACE DE L'ÉLECTRICITÉ

L'EP est massivement utilisée au quotidien pour nos besoins de consommation énergétique. **70% de l'électricité consommée est convertie par de l'électronique de puissance<sup>1</sup>.**

Sans EP, la recharge de véhicules électriques sous courant continu à partir d'un réseau électrique AC est impossible, ainsi que les nombreuses applications « sans fil ». Outre la conversion de l'énergie électrique, l'EP d'alimenter la majorité des

équipements électriques (alimentation des ordinateurs, TV, ...). Les fonctions de réglages intrinsèques au fonctionnement des convertisseurs électroniques sont aussi mises à profit pour le confort et la consommation économe d'électricité ; citons l'éclairage LED à intensité lumineuse variable, le démarrage progressif des pompes à chaleur pour éviter des pics de puissance, le réglage thermique des climatiseurs, ...

## 1.3 L'EP POUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Les réseaux électriques font face à des sollicitations de grandes variabilités, autant de la part des nouvelles charges électriques (véhicules électriques, pompes à chaleur, ...), que dû à la croissance des sources ENR dans le mix électrique.

Les dispositifs de stockage peuvent permettre d'améliorer les performances du système électrique en termes de gestion de l'énergie pour l'équilibrage global entre production et consommation d'électricité, la qualité de l'énergie et le comportement face à des défauts venant du réseau électrique. Leur rôle va devenir beaucoup plus important pour réussir la transition énergétique.

**L'EP permet de réaliser les interfaces essentielles pour les transferts bidirectionnels au temps de réponse rapide** (en charge et en décharge) d'énergie entre les unités de stockage et le réseau électrique et permettra de proposer des fonctions additionnelles de réglage telles que la production/consommation de puissance réactive, le maintien de la valeur efficace de la tension AC, le réglage rapide (primaire) de fréquence, la contribution à la stabilité du système, le filtrage actif d'harmoniques et la synthèse de réponse inertielle (inertie virtuelle).

## 1.4 L'EP POUR LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

Les caractéristiques physiques des lignes électriques ne sont pas adaptées au transport de très fortes puissances (> 1 GW) en courant alternatif sur des lignes aériennes longues (> 500 km), mais surtout sur des liaisons souterraines (ou sous-marines) de plus de 50 km.

Ainsi, le renforcement des réseaux de transport AC continentaux interconnectés passe souvent par des **liaisons souterraines en technologie à courant continu** (interconnexions France-Espagne, France-Angleterre ou France-Italie, mais aussi dans les projets allemands de liaisons Nord-Sud). Cela veut dire que des systèmes de conversion pour passer du AC au DC (et vice-versa) sont nécessaires. Cela est rendu possible grâce à l'EP.

Ces convertisseurs apportent également de nouveaux moyens de réglage de ces réseaux AC. ces évolutions touchent également les réseaux de distribution moyenne et basse tension : faire appel aux convertisseurs des unités de production pour

réduire les contraintes et augmenter les capacités d'accueil, et à une échelle très locale offrir des solutions de raccordement complémentaire en moyenne ou basse tension DC pour raccorder des producteurs PV ou des bornes de recharge de véhicules électriques.

**Toutes les applications évoquées ont comme caractéristique commune de s'appuyer sur une même technologie : l'électronique de puissance.** Son rôle est essentiel à la réalisation des objectifs de la transition énergétique. Bien que cette technologie soit arrivée à une certaine maturité, elle requiert encore aujourd'hui d'importants efforts de la part de nombreux acteurs, que ce soit pour l'intégration dans les systèmes électriques (les capacités de réglage qui peuvent être apportées par l'EP, les interactions entre ces dispositifs pour garantir une fiabilité globale), et l'amélioration des performances des composants électroniques afin de réduire les coûts et faire émerger de nouvelles applications.

1. <https://www.hitachienergy.com/news/perspectives/2021/08/power-electronics-revolutionizing-the-world-s-future-energy-systems>

### Le rôle de l'EP dans le Photovoltaïque et l'Eolien

Motivés par la nécessité de réduire le coût écologique et économique de l'électricité produite, les systèmes éoliens et PV ont réalisé une évolution technologique substantielle au cours des dernières décennies, grâce aux avancées des semi-conducteurs de puissance.

La puissance crête produite par un panneau photovoltaïque approche maintenant les 200 W/m<sup>2</sup> sous courant continu. **L'EP est essentielle pour générer une onde alternative adaptée au réseau électrique mais aussi pour adapter en temps réel le point de fonctionnement du panneau afin de maximiser la puissance générée.** Pour créer une centrale PV de grande puissance, de nombreux panneaux doivent être associés (en série et/ou parallèle). Dans de telles applications, un onduleur à base d'électronique de puissance connecté à un ensemble de panneaux PV permet de maximiser la puissance générée par cet ensemble. Une centrale PV peut ainsi utiliser plusieurs onduleurs dédiés chacun à un ensemble de panneaux PV. L'ensemble des panneaux peut être aussi raccordé à un unique onduleur (centralisé) de très forte puissance qui est alors, un onduleur central. Les deux techniques d'installation d'onduleurs sont largement adoptées dans la pratique.

Concernant les systèmes éoliens, ils sont passés d'une puissance nominale unitaire de 50 kW dans les années 1980 à une puissance pouvant atteindre 15 MW ces dernières années, avec la même tendance de montée en puissance de leur électronique de puissance embarquée pour la conversion d'énergie, la gestion contrôlée du transfert de puissance vers le réseau et les protections internes.

### Le contrôle des puissances par l'EP rend possible la participation au fonctionnement du système électrique

Une fonction commune des étages de conversion électronique d'un système ENR est de transférer l'énergie au réseau en fonction des caractéristiques dynamiques de la ressource ENR (la puissance délivrée est fonction des conditions ambiantes, par exemple la vitesse du vent, ou le niveau d'irradiance). Il s'agit donc d'optimiser la production d'électricité en fonction de la variabilité de l'énergie primaire, fonction connue sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracker).

**Le contrôle rendu possible des puissances échangées avec le réseau conduit au développement de fonctions logicielles permettant également d'améliorer les performances et l'intégration de nombreux équipements électriques dans le réseau existant.** Pour le contrôle du convertisseur connecté au réseau, son objectif est de garantir que des courants de haute qualité sont générés ou consommés (par exemple, faible taux de distorsion harmonique THD). Ainsi, dans de nombreuses applications, les courants échangés avec le réseau sont contrôlés grâce à l'électronique de puissance.

Enfin, aujourd'hui, les fonctions de réglage sont multiples et permettent de participer activement au fonctionnement du système électrique, tels que le réglage de la fréquence, l'injection ou la consommation dynamique de puissance réactive, etc.

### Des évolutions matérielles majeures pour l'EP pour les ENR mais toujours des défis à relever

Que ce soit pour les grandes fermes d'éoliennes ou PV, ou pour la production domestique d'électricité, la conversion de l'énergie doit être aussi efficace que possible pour réduire les coûts énergétiques.

**Grâce à l'augmentation de la densité de puissance des composants, la masse, le volume et les coûts baissent.** Par exemple, pour les éoliennes offshore, une densité de puissance plus élevée des semi-conducteurs induit une réduction des coûts d'installation, ce qui contribue à réduire le coût de l'énergie éolienne produite. Comme au début des réseaux AC, l'augmentation des tensions d'utilisation des convertisseurs permettra d'aller vers un optimum technico-économique. Ainsi, le fonctionnement sous tension élevée représente un défi supplémentaire en termes de topologies des convertisseurs de puissance, de conception et d'intégration des filtres passifs, et de contrôle, en particulier avec l'utilisation croissante des semi-conducteurs de type large bande (WBG Wide Band Gap) pour améliorer l'efficacité.

### Focus sur l'EP dans l'HVDC

Historiquement, les réseaux de transport HVDC utilisaient une configuration LCC (Line Commutated Converter) reposant sur des technologies de semi-conducteurs peu chers organisés en structures simples et pilotés par des impulsions décalées temporellement permettant la réduction d'harmoniques. Cependant, leur contrôlabilité est faible. Ces contraintes ont motivé le développement de convertisseurs électroniques à base de transistors qui présentent également une meilleure compacité. C'est un avantage pour les plateformes offshore où l'espace est limité et le coût du m<sup>2</sup> est prépondérant dans le coût global du projet.

**De nombreux dispositifs d'électronique de puissance sont utilisés pour élever puis abaisser le niveau de tension continue.** À cet égard, l'investissement dans les sous-stations HVDC rend plus cher le système HVDC par rapport au système HVAC. Cependant, sous le même niveau de puissance, les câbles d'un système HVDC requièrent moins de conducteurs électriques et sont moins coûteux que ceux d'un système de transmission HVAC. De plus, la technologie HVDC permet d'obtenir une meilleure dynamique (1 GW / 100 ms) et précision du contrôle des flux d'énergie, supprime le recours aux sous-stations intermédiaires pour la compensation de puissance réactive, et permet de maintenir la tension relativement constante dans la ligne. Enfin, la technologie HVDC est économiquement viable pour le transport d'énergie sur de longues distances, et est de plus en plus utilisée.

Cependant, les défis liés aux disjoncteurs à courant continu mais aussi les réseaux HVDC maillés (directement par d'autres convertisseurs d'EP) appelés multi terminaux ont encore besoin d'être traités, entre autres pour un besoin d'interopérabilité des solutions.

## 2. DÉVELOPPER UNE AUTONOMIE STRATÉGIQUE OUVERTE POUR RENFORCER LA RÉSILIENCE ET LA COMPÉTITIVITÉ EUROPÉENNE

### 2.1 DE NOUVEAUX MATÉRIAUX AUX PROPRIÉTÉS NOUVELLES POUR LA FABRICATION DE SEMI-CONDUCTEURS

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité électrique pilotable. Ils sont utilisés pour la fabrication de convertisseurs de puissance permettant de modifier et contrôler les flux d'énergie à leur point de connexion au réseau électrique et indirectement à travers tout le réseau.

L'utilisation de nouveaux matériaux conduit aujourd'hui à des évolutions technologiques significatives et rapides. Elle constitue ainsi une opportunité de développement d'une filière forte en Electronique de Puissance en Europe et en France.



### 2.2 LES ATOUTS DE L'EUROPE : R&D, INDUSTRIES ET MARCHÉS EN CROISSANCE

**La filière de l'électronique de puissance peut s'appuyer sur un écosystème français de recherche en électronique de puissance réputé au niveau mondial** dans des domaines d'expertises allant des matériaux semi-conducteurs de pointe au développement d'équipements et applications à échelle 1 pour les réseaux électriques. **Cependant, la présence des acteurs majeurs industriels dans le domaine des semi-conducteurs est très limitée** (STMicroelectronics). Au niveau européen on peut souligner la présence des fondeurs de composants semi-conducteurs sur les technologies SiC (Allemagne, Infineon), (Suisse, HITACHI), (Italie, STMicroelectronics), GaN (France, STM), (Belgique, BelGaN), (Allemagne, Infineon) et les substrats émergeant à grand Gap, France (SiC & GaN, Diamant), Allemagne (SiC, AlN), Suède (SiC, GaN), Pologne (Substrat GaN).

La maîtrise d'encapsulation de ces composants dans des boîtiers et modules appropriés est également très important pour leurs utilisations. Ce marché est dominé par des acteurs Allemands (Infineon, Semikron) ou Japonais (Mitsubishi, Fuji). La France manque d'acteurs industriels sur ces activités. Les fabricants de convertisseurs électroniques pour le domaine industriel et du transport et l'automobile sont beaucoup plus

nombreux et répartis en Europe. Les secteurs d'activités dans les domaines de la connectique, des circuits imprimés, l'édition de logiciels embarqués et d'outils logiciels pour la conception des systèmes électroniques contrôlés sont également bien couverts par un tissu de PME. **Cette filière est amenée à s'étendre par l'ouverture de nouveaux marchés en rapport avec une électrification décarbonée croissante dans le contexte de la transition énergétique.** Pour les systèmes électriques, les grands marchés en croissance et fortement demandeurs d'EP sont ceux liés à la recharge des Véhicules électriques (VE), aux transitions industrielles vers le vecteur électricité décarbonée, à la production d'électricité à partir d'énergie renouvelable intermittente, aux économies d'énergie par le déploiement de systèmes à variation électronique de vitesse. Pour les applications à haute tension en courant continu, les compétences en France restent rares.

**Au même moment, il est à noter des demandes pour le développement de fonctionnalités de communication et d'intelligence sur les convertisseurs électroniques** ou en lien avec leurs procédés pour satisfaire de nouveaux usages basés sur la maîtrise de l'énergie électrique.

### 2.3 L'ÉLECTRONIQUE EST AU CŒUR D'ENJEUX STRATÉGIQUES MAJEURS DE RÉSILIENCE ET COMPÉTITIVITÉ EUROPÉENNE

Cependant, les composants électroniques de base sont produits pour la grande majorité en Asie. **La pénurie apparue sur les semi-conducteurs pendant la crise sanitaire et qui s'est poursuivie après, a démontré les limites de leur chaîne de production fortement mondialisée et la forte dépendance de l'Europe et de la France en termes d'approvisionnement.** De par la croissance mondiale sur les technologies de l'énergie, de forts risques de pénurie sont encore à craindre face à cette demande exponentielle.

En outre, l'électronique de puissance fait face à des vulnérabilités et à des **enjeux de dépendance excessive à l'égard de pays à forte concentration d'approvisionnement en dehors d'Europe.** Les exemples passés de perte de autonomie stratégique et compétitive sont nombreux comme dans les panneaux photovoltaïques, les batteries lithium-ion, ou le raffinage de nombreux minéraux dits critiques.

Face à ces vulnérabilités avérées, il est essentiel que la France et l'Europe assurent leur propre maîtrise économique, technologique et industrielle des filières essentielles à sa transition énergétique.



### 2.4 POUR UNE INDUSTRIALISATION EUROPÉENNE DE LA FABRICATION DES SEMI-CONDUCTEURS, CONVERTISSEURS DE PUISSANCE ET PRODUITS DÉDIÉS AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Pour pallier les ruptures d'approvisionnement et la dépendance excessive aux importations, il est nécessaire de relocaliser en Europe une industrie compétitive de fabrication en électronique de puissance. Cela passe par l'identification des failles de marchés et des criticités en matières premières (Galium, ...) pour l'industrie électronique afin de prioriser la fabrication des composants semi-conducteurs les plus performants et prometteurs.

**Le risque comprend également l'approvisionnement des composants « annexes » nécessaires à la construction des équipements de conversion et aussi aux matériaux qui les composent.** Il est donc aussi important de soutenir la création et le renforcement des acteurs industriels dans ce domaine. Cela va faciliter la valorisation et le transfert des technologies développées au sein des laboratoires de recherche possédant une expertise mondiale comme dans le domaine de la technologie GaN.

Cette industrie fait face à des défis de compétitivité, mais aussi de réactivité et de flexibilité pour alimenter la demande qui évolue constamment au gré des technologies émergentes et de la variabilité des volumes demandés par les marchés. L'optimisation des chaînes d'approvisionnement passe par l'amélioration des processus de conception, production et distribution jusqu'à la livraison du convertisseur de puissance.

Enfin, la plupart des acteurs européens et français sont de petite taille et donc avec de plus faibles capacités d'investissement comparées aux concurrents américains et asiatiques. Un soutien aux investissements est indispensable pour créer un effet levier sur cette filière et répondre aux enjeux.

À l'image des gigafactories de batteries, ces projets de développement industriel nécessitent des cofinancements publics et des soutiens en termes d'implantation territoriale, sans lesquels ils ne pourraient voir le jour.

Les applications HVDC en réseaux de transport font figures d'exception par la présence en Europe des trois principaux fournisseurs et d'un retard manifeste de développement en Amérique du Nord.

“ **L'optimisation des chaînes d'approvisionnement passe par l'amélioration des processus de conception, production et distribution jusqu'à la livraison du convertisseur de puissance.** ”

#### L'arrivée rapide de nombreux acteurs à l'étranger

Actuellement l'Europe et les Etats-Unis produisent la majorité des composants de puissance à grand gap. Cependant, **les investissements de grande ampleur ces dernières années ont permis l'apparition des acteurs Chinois sur le marché des substrats et des composants de la troisième génération dont la compétitivité ne cesse de progresser très rapidement.**

Selon les prévisions, la part de marché de ces nouveaux concurrents risque d'augmenter très fortement **de moins de 5% jusqu'à 50% dans les prochaines années.**

#### De nouvelles technologies de semi-conducteurs

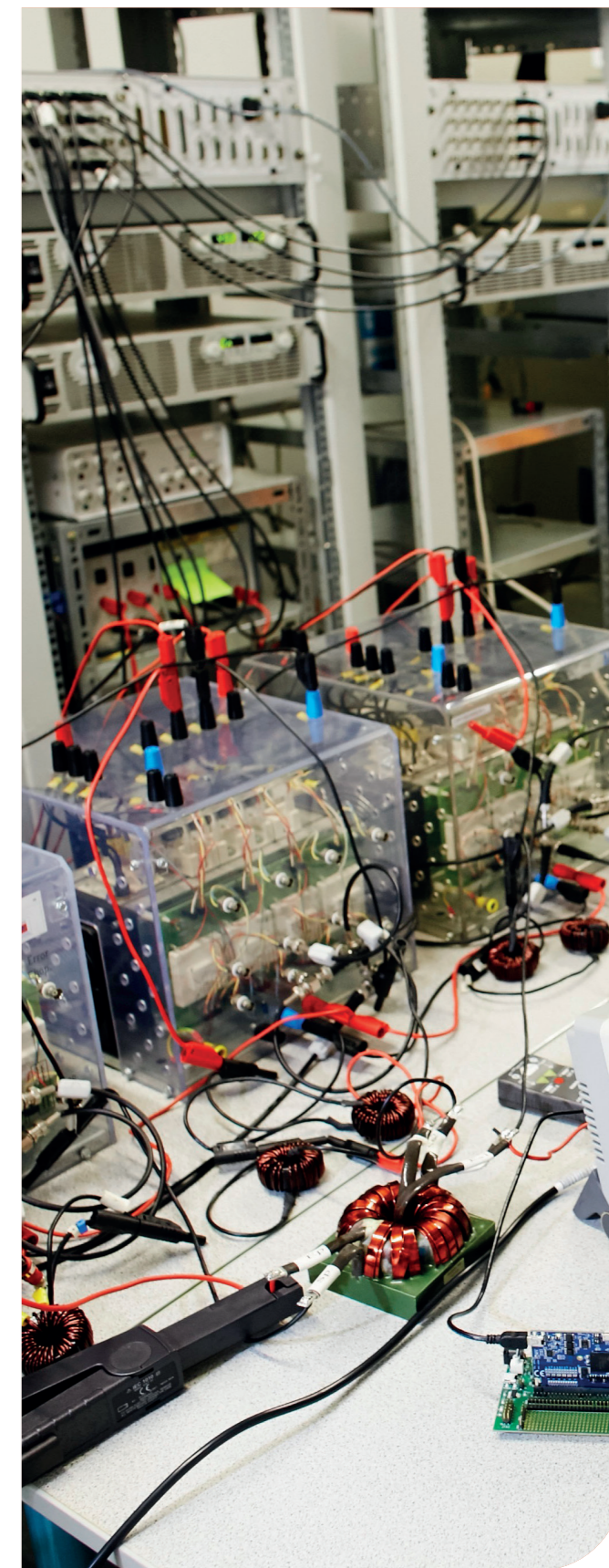
Le silicium est le matériau utilisé historiquement pour la fabrication des composants électroniques actuels : IGBT et MOSFET. Cependant, l'utilisation des matériaux semi-conducteurs à large bande (wide band gap) permet de fabriquer des composants électroniques avec une très faible résistance électrique interne et des temps de commutation (passage de l'état passant vers l'état bloqué, et vice versa) extrêmement rapides. Ces deux propriétés conduisent à la fois à des meilleurs rendements (en conduction et en commutations) et à une plus grande miniaturisation des composants passifs associés et donc du convertisseur fabriqué.

**Au final, l'augmentation obtenue de la densité de puissance des convertisseurs réalisés permet d'en réduire la taille et la masse avec un rendement de conversion plus élevé.**

Le nitrure de gallium (GaN) se distingue surtout par ses performances à très haute fréquence (au-delà de 100 kHz) et est particulièrement adapté aux applications en basse tension (650 V). Cependant, des efforts en R&D permettent l'extension de cette limite de tension jusqu'à 1200 V. Quant au carbure de silicium (SiC), en forte croissance grâce au marché de recharge de véhicule hybride et électrique, il pourrait également s'imposer pour les convertisseurs sous haute tension et pour les applications fortes puissances.

En termes de R&D, la transition vers des substrats de taille supérieure (8 pouces pour le SiC et 12 pouces le GaN) et l'exploration des propriétés de nouveaux matériaux à ultra wide band gap est en évolution permanente comme, par exemple pour l'oxyde de gallium Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nitrure d'Aluminium (AlN) ou le Diamant et leurs propriétés intéressantes de semi-conducteur à grand gap permettant de fabriquer des composants encore plus performants en terme de vitesse de commutation et des pertes réduites.

La miniaturisation et l'élévation des rendements s'accompagnent de la mise en œuvre d'innovations sur les composants passifs telles des techniques nouvelles de bobinage, des types nouveaux de transformateurs comme les transformateurs planars, des matériaux magnétiques inédits et spécifiques provenant des fabricants de ferrites.



### 3. STANDARDISER LES CONDITIONS DE RACCORDEMENT ET ACCROÎTRE LA PARTICIPATION DE L'EP À L'EXPLOITATION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

#### 3.1 DES PARTICIPATIONS POSSIBLES À L'EXPLOITATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Les convertisseurs d'électroniques de puissance sont commandables et peuvent imposer ou modifier les flux d'énergie à leur point de raccordement selon les besoins nécessaires à l'exploitation correcte du réseau électrique. Les services nécessaires au bon fonctionnement du système électrique qui pourront être rendus par l'électronique de puissance sont encore incertains. Des solutions existent (comme le pilotage de la puissance réactive des onduleurs photovoltaïques), mais les enjeux portent principalement portés sur les raccordements des sources connectés au réseau via de l'EP : compréhension ; modélisation ; mesure et maîtrise des impacts ; identification des emplacements et des capacités de réglages optimales.

Les convertisseurs électroniques actuellement raccordés (en majorité des onduleurs PV) sont pilotés pour se comporter comme des injecteurs de puissance (« grid feeding/following »)

au travers du courant qu'ils injectent. La participation au réglage du système électrique (fréquence/tension) de ces derniers est restreinte **puisque'ils nécessitent une tension respectant des standards à leurs bornes pour permettre de se synchroniser. Il est donc nécessaire d'avoir dans ce cas des alternateurs conventionnels pour apporter de l'inertie au système.**

Des travaux ont été développés depuis une décennie pour les piloter en source de tension et donc de fréquence (mode de fonctionnement dit « grid forming »). Ce mode de fonctionnement peut ainsi renforcer le système en augmentant les plages de stabilités de ce dernier tout en apportant une inertie par le contrôle des convertisseurs. Ce mode nécessite donc des adaptations logicielles de la loi de commande et de la protection en surintensité du convertisseur.

#### 3.2 DES IMPACTS DYNAMIQUES MAL CONNUS ET LIÉS AUX RACCORDEMENTS MASSIFS D'EP

Les convertisseurs électroniques ont des performances et caractéristiques différentes des matériels conventionnels actuels. Un fort taux de raccordement par EP nécessite de pouvoir assurer des impacts sur le réglage proche du temps réel de la fréquence, de la tension, la stabilité et les systèmes de protection qui assurent la sécurité des personnes et des équipements.

**En matière de R&D, cela nécessitera de disposer d'outils de modélisation dynamique précis et représentatifs de ces impacts afin de préserver la sûreté du système électrique aussi bien en régime permanent, transitoire qu'en restauration du réseau.**



#### 3.3 DES BESOINS DE STANDARDISATION

**Le raccordement massif d'équipements électriques connectés via de l'EP est à l'origine de perturbations potentiellement importantes sur le fonctionnement du système électrique qui distordent l'onde de tension alternative 50 Hz.**

Afin de pouvoir respecter les niveaux de qualité acceptables pour les grandeurs électriques, il est indispensable d'assurer que les normes de CEM (Compatibilité Electro-Magnétique) des appareils (émission / immunité / compatibilité / mesures) et de qualité de la tension sont toutes cohérentes avec les situations

réelles du réseau électrique, sans amener à de la sur-qualité et des coûts non justifiés. Une attention doit être portée sur les développements nouveaux autour des Smart Grids (par exemple utilisation des CPL (Courants Porteurs en Ligne) sur la bande de fréquence 2 – 150 kHz pour la transmission d'information, tout en assurant le transfert sécurisé de données). Pour le gestionnaire du réseau, le traitement d'une situation de non-qualité sur le réseau est complexe et onéreux. **Des standards assurant le fonctionnement correct à la fois du réseau et des matériels connectés doivent être adaptés et complétés.**



##### Vers une virtualisation des comportements dynamiques souhaités sous forme de lois de commande

A mesure que de plus en plus de générateurs synchrones électromécaniques sont retirés et remplacés par des systèmes connectés par de l'électronique de puissance, l'inertie électromécanique équivalente du réseau et les puissances de court-circuit diminuent. Ils rendent par conséquent le système électrique moins stable et plus sensible aux incidents.

Des fonctionnalités supplémentaires de contrôle peuvent néanmoins être réalisées telles que la synthèse d'une réponse dynamique inertielle (de façon à se comporter comme un alternateur classique), le maintien de la connexion sous des défauts temporaires provenant du réseau (par exemple des chutes de tension) et même une contribution au rétablissement de la tension du réseau.

Cependant, ces nouvelles fonctions ont un impact sur le dimensionnement, la dissipation thermique et le coût de l'électronique de conversion.

##### Exemple de stratégies avancées de contrôle dans les réseaux

De plus en plus de gestionnaires de réseau exigent que les grandes centrales éoliennes et photovoltaïques soient capables d'amortir les oscillations de puissance et de participer à la reconstruction du réseau (black start) en cas d'écroulement (Black-out). Ce souhait améliore la stabilité transitoire du système électrique et en même temps, la disponibilité des systèmes de production d'énergies renouvelables.

##### Des causes liées au fonctionnement intrinsèque

Ce sont à la fois les caractéristiques non linéaires des composants d'électronique de puissance et les lois de commande des convertisseurs qui sont les causes des composantes indésirables de tension et de courant à plus haute fréquence (**harmoniques**, c'est-à-dire distorsions de l'onde de tension alternative). Même si chaque matériel connecté respecte les normes en vigueur, l'accroissement de leur nombre conduit à des interactions entre les différents dispositifs entraîne des résonances parallèles ou séries selon les impédances du réseau électrique.

**L'absence de standardisation adaptée à cette situation conduit à des procédures de raccordements complexes pour les différents acteurs (aussi bien clients, fabricants ou gestionnaire de réseaux de distribution).**

Il y a de forts enjeux de simplification et d'accélération de ces procédures, avec la nécessité de protéger les réseaux d'une évolution non maîtrisée des perturbations.

“ **L'absence de standardisation adaptée à cette situation conduit à des procédures de raccordements complexes pour les différents acteurs (aussi bien clients, fabricants ou gestionnaire de réseaux de distribution).** ”

## 4. ÉVALUER L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'EP ET DÉVELOPPER DES FILIÈRES POUR IMPULSER LA CIRCULARITÉ

Utilisée pour réduire les pertes énergétiques, intégrer des sources d'énergie renouvelable dans le système électrique et optimiser la qualité de l'énergie, l'électronique de puissance a un rôle essentiel dans la transition énergétique et optimiser l'usage de certaines ressources intervenant dans les infrastructures mobilisées.

Cependant, les systèmes d'électroniques de puissance ont leur propre empreinte environnementale lors de leur cycle de vie, qu'il s'agisse des émissions de gaz à effet de serre ou encore de l'importante consommation d'énergie lors de leur fabrication, de leurs performances lors de l'usage, mais aussi de l'impact environnemental et social, dès les phases d'extraction de matières premières nécessaire, jusqu'au traitement des déchets générés en fin de vie.

### 4.1 UNE RECYCLABILITÉ À DÉVELOPPER MASSIVEMENT

Du fait des forts besoins en matières premières utilisées, le recyclage des matériaux à la fin du cycle de vie d'un convertisseur est nécessaire pour réduire la pression sur la demande de matériaux et ainsi limiter les impacts associés à leur extraction, bien que cela constitue aussi une source d'impacts à anticiper.

Dès la conception, il est intéressant d'optimiser la durée de vie fonctionnelle des systèmes, d'augmenter la circularité en facilitant leur démontage, réparabilité, réemploi total ou partiel (reconditionnement), désassemblage pour refabrication. Cependant, après la collecte, cette filière de recyclage reste à construire et organiser à l'échelle du développement massif de l'EP.



### 4.2 AUGMENTER LA SOUTENABILITÉ DE L'EP PAR DES MÉTHODES D'ÉCOCONCEPTION

Introduire des exigences environnementales encouragerait l'éco-conception des produits à base d'EP ainsi qu'une économie circulaire qui leur est propre. L'intégration de méthodes d'éco-conception dès les phases amont du processus de conception des systèmes peut permettre d'intégrer l'ensemble des exigences.

Le développement de méthodes fondées sur une analyse fonctionnelle des systèmes peut aider les concepteurs à faire le lien de corrélation entre les choix techniques qu'ils prennent dès les phases de définition des topologies des systèmes, et les conséquences, en **minimisant les impacts environnementaux et les risques sociaux induits**.

Enfin, le développement des systèmes électriques est soumis à un ensemble de réglementations européennes (ex : Critical Raw Material Act, Ecodesign for Sustainable Products Regula-

tion) traduites en **normes européennes et internationales** qui contraignent les spécifications des dispositifs EP et des systèmes à écoconcevoir pour autoriser leurs mises sur le marché.

L'ensemble de ces exigences évolue relativement rapidement dans un contexte de transition écologique tendus sur le plan du marché international.

“ **L'intégration de méthodes d'éco-conception dès les phases amont du processus de conception des systèmes peut permettre d'intégrer l'ensemble des exigences.** ”

### 4.3 UN BESOIN FORT DE DONNÉES FIABLES POUR LES ANALYSES DE CYCLE DE VIE (ACV)

La comptabilisation des impacts environnementaux, dont celui du bilan carbone intégrant les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes, c'est-à-dire de l'extraction des ressources nécessaires à leur fabrication jusqu'à la fin de vie est essentielle à l'éco-conception.

De fait, les ACV utilisent plusieurs catégories d'indicateurs d'impacts environnementaux et plusieurs étapes du cycle de vie des systèmes conçus. Elles sont calculées en fonction des entrants (ressources matérielles et énergétiques) et des émissions et déchets à chaque étape de chaque procédé industriel impliqué.

A ce jour, peu d'ACV sont fournies par les fabricants par manque de données ou de traçabilité (incertitude) sur ces données.

Elles sont pourtant essentielles pour répondre à des questions politiques majeures vis-à-vis de la transition : au bout de combien kWh convertis le CO2 initialement émis pour la conception du système de conversion est compensé par les réductions d'émissions à l'usage, et **est-ce « justifiable » face aux autres impacts sociaux et environnementaux irréversibles et aux conséquences encore floues ?**

Les futurs réseaux électriques vont avoir une dépendance systémique vis-à-vis des systèmes d'EP. **De fait, les outils et méthodes d'analyse de la durabilité de tels écosystèmes devront être développés, harmonisés dans le futur et adaptés à ces contextes scientifiques.**

### 4.4 DES IMPACTS HORS CARBONE QU'IL RESTE ENCORE À ÉVALUER PRÉCISÉMENT

L'EP génère également d'autres impacts environnementaux, tels que l'épuisement des ressources en raison de la pression accrue sur les matériaux critiques. Ces contraintes sont encore augmentées par les challenges et réponses technologiques présentés précédemment.

La forte croissance de la demande en EP pourrait induire des déséquilibres sur les marchés, des risques d'approvisionnement et plus globalement de dépendance vis-à-vis de pays tiers.

**Il est donc nécessaire d'évaluer la criticité des matériaux utilisés afin de privilégier les technologies de convertisseurs les moins impactantes.**

L'extraction et le raffinage des matériaux critiques ont également de nombreux impacts sociaux et environnementaux sur les conditions de travail dans les mines, sur les ressources en eau, la pollution engendrée localement, qu'il convient d'intégrer dans les politiques de RSE.





## 5. AMENER LA FIABILITÉ DE L'EP AU MÊME NIVEAU QUE CELLE DES MATÉRIELS DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Les matériels des réseaux de transport et de distribution électrique ont des durées de vie de plusieurs dizaines d'années.

Avant que les convertisseurs statiques n'atteignent une telle durée de vie, il reste de nombreux défis techniques à relever. Plusieurs études ont montré que les éléments les plus fragiles étaient les condensateurs et les composants semi-conducteurs.

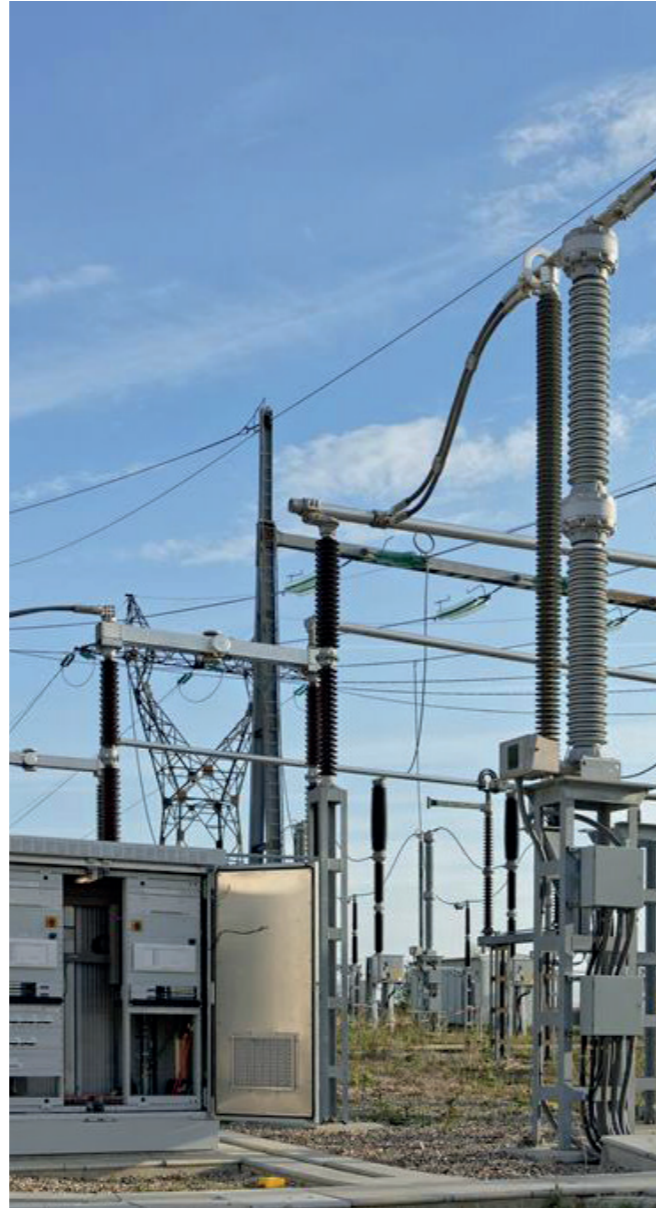
A calibre identique, les semi-conducteurs à grand gap présentent des surfaces plus petites que les composants en silicium ce qui génère des stress thermiques et thermo-mécaniques accrus. **Il est important de comprendre les phénomènes physiques liés aux modes de dégradations. Des travaux sur l'analyse des contraintes mécaniques et sur la physique de la fracture sont nécessaires.**

Afin d'éviter une mise hors service d'un système pendant un temps trop long et de pouvoir la planifier, il est nécessaire de mettre en place des moyens de suivi de l'endommagement permettant une maintenance prédictive. Dans cet objectif, plusieurs verrous doivent être levés.

**Il faut tout d'abord identifier des indicateurs d'endommagement fiables :** ces derniers sont en général des grandeurs électriques ou thermiques qui sont fortement couplées entre elles ce qui rend difficile la mise en place d'outils de suivi d'état de santé. Sous forte tension et avec des dynamiques plus élevées, les grandeurs électriques des composants semi-conducteurs ont une forte tendance à varier avec le temps ou en fonction des conditions d'utilisation.

Deux voies peuvent alors être explorées : identifier d'autres méthodes physiques de suivi des endommagements (utilisation des ultrasons, de méthodes optiques...) ou encore bien comprendre les phénomènes de variations des indicateurs électriques pour les composants à grand gap.

**Il faut ensuite mettre en place des algorithmes permettant de faire du pronostic et ainsi estimer la durée de vie restante des composants.** L'Intelligence Artificielle pourrait être utilisée avec intérêt dans cette optique.



### Une intégration des semi-conducteurs à grand gap qui reste à améliorer

La taille réduite des composants semi-conducteurs diminue drastiquement la place pour connecter les fils de bonding (amenées de courant) qui voient alors une densité de puissance plus importante.

Des efforts technologiques doivent être donc menés pour déterminer des solutions plus robustes et à coût raisonnable en utilisant des dispositifs avec des formes différentes (clips à la place des bondings par exemple) ou encore des matériaux avec des coefficients de dilatation plus faible..

## 6. APPUYER DES DÉVELOPPEMENTS ET SERVICES INNOVANTS DE L'EP SUR LES RÉSEAUX DE MOYENNE TENSION

### 6.1 DÉVELOPPEMENTS APPLICATIFS INNOVANTS ET INTÉRÊT TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Dans le secteur de la production d'énergie, l'augmentation de la taille et de la puissance des centrales éoliennes ou PV, potentiellement associées à des systèmes de stockage massif, nécessite des systèmes de conversion qui doivent eux aussi monter en puissance pour gagner en efficacité et compétitivité.

Dans le domaine des usages, la même tendance conduit à des systèmes de conversion de plus forte puissance pour accompagner une électrification qui se doit d'être fiable, flexible et efficace.

L'intensification croissante et la plus grande diffusion des utilisations de l'électricité vont requérir des infrastructures de distribution locales capables de supporter une densité de puissance plus élevée. Le MVDC (Courant Continu Moyenne Tension) est actuellement examiné de près comme une solution pour ré-

pondre à cette exigence, permettant ainsi de réduire globalement les coûts de l'infrastructure électrique interne, communément appelée « Balance of Plant », de ces installations.

Le MVDC est également envisagé pour renforcer les réseaux dans des zones où les solutions traditionnelles rencontrent des difficultés. Il peut être cité ici l'exemple du projet Angle-DC en Ecosse où le remplacement d'une liaison MVAC par une liaison MVDC permet d'augmenter la puissance transitée et d'améliorer la stabilité du réseau avec un encombrement identique, voire réduit. Par ailleurs, certains renforcements du réseau coûteux et longs à construire pourraient être évités en installant des solutions d'électronique de puissance à des points stratégiques du réseau tels que par exemple les systèmes de la famille des FACTS (Flexible Alternating Current Transmission).

### 6.2 OPTIMISER DES GAMMES DE CONVERTISSEURS POUR DES APPLICATIONS EN MOYENNE TENSION (AC OU DC)

Pour faciliter le déploiement massif, durable et acceptable de ces infrastructures électriques, il sera nécessaire de disposer de systèmes de conversion de puissance qui soient fiables, performants, flexibles et compétitifs.

Des efforts substantiels de recherche et développement sont indispensables pour ces gammes de puissances et tension faiblement explorées. En effet, il reste encore beaucoup à construire pour définir les solutions globales les plus efficaces, intégrant de manière optimale les composants d'électronique de puissance, les architectures des convertisseurs et leur contrôle.

**Un exemple concret de ces priorités de développement porte sur les convertisseurs DC/DC, qui seront au cœur de briques technologiques indispensables dans de nombreuses applications.**

Il s'agit notamment du développement des structures modulaires et optimisées de conversion de puissance pour répondre aux futurs besoins industriels d'installations massives de stockage, de production d'hydrogène ou autres.

### 6.3 FINANCER DES PROJETS DÉMONSTRATEURS

La recherche et le développement actuels visant à mettre au point ces futures briques technologiques se déroulent principalement en laboratoire, impliquant des maquettes de convertisseurs ou des sous-composants. **Étant données les puissances et tension en jeu, la réalisation d'essais à échelle 1 reste rare et est limitée par des contraintes budgétaires.**

Pourtant, étant donné la complexité de ces systèmes, qui combinent plusieurs sous-composants soumis à des contraintes électriques, thermiques et environnementales croisées, il est impératif de les tester à une échelle réelle. Il est donc crucial de disposer de budgets et moyens adéquats pour franchir avec

succès l'étape suivante du développement et du niveau de TRL (Technology Readiness Level).

Ces systèmes interagissent étroitement avec les environnements dans lesquels ils sont intégrés. Ainsi, il est tout aussi essentiel de passer des tests individuels à des tests en situations représentatives, voire réelles, en utilisant des démonstrateurs. Cette transition permet d'évaluer la performance des systèmes dans des conditions réelles et de mieux comprendre leur comportement dans des contextes complexes, contribuant ainsi à une mise en œuvre plus robuste et efficace des technologies développées.

## 7. RENFORCER L'EXPERTISE DE L'EP PAR UN SOUTIEN IMPORTANT AUX FORMATIONS ET À LA RECHERCHE

### 7.1 ANTICIPER UN BESOIN MASSIF EN PERSONNEL FORMÉ ET QUALIFIÉ À CES NOUVEAUX ENJEUX

Le développement massif des systèmes d'Electronique de Puissance couplé à la volonté de réindustrialiser et de se réappropriation l'expertise technologique va engendrer des besoins très importants en personnel à haute technicité.

En effet, les évolutions des composants semi-conducteurs et le développement du contrôle numérique, mais aussi les diverses contraintes en termes de compacité ou de fiabilité entre autres, ont radicalement transformé le métier d'électronicien de puissance.

En outre, toutes les phases du cycle de vie seront concernées, aussi bien dans le domaine de la conception, de la fabrication de systèmes dans une approche de réindustrialisation mais

aussi pour la maintenance afin d'assurer le bon fonctionnement de ces systèmes et pour terminer son recyclage en fin de vie.

Pour les réseaux HVDC de transport d'électricité, un rapprochement fort des industriels européens de l'électronique de puissance autour de la formation permettrait de constituer un socle fort d'expertises « terrain » profitable à toute la filière. La hausse des besoins est différente selon les secteurs. A titre d'exemple, certains changent drastiquement leur modèle économique, comme les véhicules électriques – évolution de 4000 à 10 000 millions de dollars de valeur sur le marché de 2022 à 2028, confirmant le besoin massif de formation sur un délai très court<sup>2</sup>.



### 7.2 DES BESOINS À TOUS LES NIVEAUX D'ÉTUDE

Tous les niveaux d'études de BAC+2/+3 jusqu'au niveaux ingénieur et docteur seront concernés, ce qui nécessitera d'améliorer significativement l'attractivité de ces filières et du domaine technologique en général auprès du grand public, mais plus spécifiquement des jeunes lycéens et lycéennes.

Si l'on veut avoir des acteurs industriels capables de relever ses défis technologiques, réaliser les objectifs « zéro net » dans les meilleurs délais et assurer la compétitivité de l'Europe, il sera nécessaire d'avoir un nombre conséquent d'ingénieurs et de chercheurs formés aux techniques de pointe.

**Cela ne pourra se faire qu'avec un soutien important des divers acteurs aux formations de niveau Master/Ingénieur et aux organismes de recherche.** Nous relevons un besoin important de compétences pour la rédaction de spécifications

techniques des convertisseurs électroniques sur la bases de besoins exprimés (niveaux de tension/courant, température, encombrement, interfaces analogiques et numériques, pertes, etc...), pour le paramétrage et l'interfaçage numérique des convertisseurs, pour la maîtrise des méthodes et outils liés à la conception (choix d'architectures de conversion de puissance et dimensionnement), pour la rédaction de cahier des charges sur la base de connaissances des normes des réseaux électriques mais aussi technologies et produits des fournisseurs.

Par ailleurs, l'exploitation et la maintenance de ces nouveaux systèmes va nécessiter un personnel de maintenance formé aux techniques de l'électronique de puissance. Cela nécessite un fort soutien aux formations de type BTS ou BUT afin de développer ou adapter les filières dans ces domaines.

2. Rapport Yole, mai 2023

### 7.3 AMÉLIORER L'ATTRACTIVITÉ DE CES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES

Il sera nécessaire d'améliorer la visibilité et l'attractivité de la filière afin d'attirer les jeunes et les jeunes femmes vers le domaine des sciences et technologies qui est en souffrance depuis plusieurs années. Cela sera d'autant plus critique, que ces besoins viendront s'ajouter à ceux liés au développement des systèmes de production électrique décarbonée.

En effet, rien que dans le domaine photovoltaïque, les projections liées à une relocalisation des filières amènent à des estimations de plusieurs milliers d'emplois au niveau technicien/ingénieurs d'ici 2030. **Des pôles technologiques déjà bien identifiés en France font état d'un besoin de près de 3000 embauches à l'horizon 2027, et ce uniquement sur les pôles Grand-Est et PACA.**

Le secteur du transport (interdiction de la vente de véhicules thermiques d'ici à 2035) va également amplifier la demande.

On peut également citer l'habitat (croissance des pompes à chaleur) et le numérique (alimentation des serveurs): il est évident que le mouvement de l'électrification et de la conversion à base d'EP qui l'accompagne fait exploser la demande en formation à tout niveau.

Certaines technologies, comme les convertisseurs, vont voir leur valeur de marché fortement augmenter de 2023 à 2028 grâce aux véhicules électriques en Europe (les chargeurs DC appellent à un bond de valeur de 22,3%) et EnR<sup>3</sup>.

### 7.4 SOUTENIR LA FORMATION CONTINUE DU PERSONNEL EXISTANT À CES NOUVELLES TECHNIQUES

Enfin, il ne faudra pas oublier de tenir compte du personnel qui assure actuellement la maintenance dans les réseaux électriques. En effet, le passage de systèmes essentiellement électromécaniques à des systèmes fortement électroniques et contrôlés, induit des besoins de connaissances et méthodologies nouvelles.

Dans le domaine seul du photovoltaïque, qui est corollaire de la croissance des besoins de développement de l'EP, les plus de

5000 embauches nécessaires à l'horizon 2027 sur le territoire métropolitain impliquent un budget moyen de 1900 euros par personne formée<sup>4</sup>.

Plus globalement, CHIPS of Europe estime que l'EU Chips Act va également demander une augmentation de la demande d'employé.e.s qualifié.e.s pour l'industrie des semi-conducteurs – si aucune action n'est prise, **la filière fera face à une pénurie de 350 000 travailleur.se.s. horizon 2030<sup>5</sup>.**



3. Status of the Power Electronics Industry 2023 report, Yole Intelligence, 2023

4. Projet CAP PV, données recueillies auprès d'un consortium multirégional (instituts de la Transition Énergétique, sites industriels, équipementiers, réseaux des acteurs de la formation initiale et continue, campus des métiers et des qualifications)

5. Communiqué de presse CHIPS of Europe, projet cofondé par l'UE (Digital Europe), ECPE European Center for Power Electronics, juin 2024

# L'ASSOCIATION THINK SMARTGRIDS

L'association Think Smartgrids fédère un écosystème d'acteurs qui contribuent à la décarbonation des réseaux : les opérateurs de réseau RTE et Enedis, les principaux industriels et équipementiers français du secteur de l'énergie, de grandes entreprises de services numériques, de nombreuses PME, ETI et startups françaises à la pointe des technologies de l'énergie et du numérique, sans oublier le monde universitaire et de la recherche.

## MEMBRES ASSOCIÉS



## MEMBRES OBSERVATEURS



## MEMBRES PARTENAIRES



## Écoles, centres de recherches et laboratoires



Think Smartgrids – Tél : +33 1 42 06 52 50 – [contact@thinksmartgrids](mailto:contact@thinksmartgrids).  
[www.thinksmartgrids.fr](http://www.thinksmartgrids.fr) - [@ThinkSmartgrids](https://twitter.com/ThinkSmartgrids)