

# Semi-conducteurs : inventaire

1<sup>ère</sup> partie : les chevilles ouvrières des réseaux  
électriques du XXI<sup>e</sup> siècle

CLAES RYTOFT, BERNHARD ESCHERMANN, HARMEET BAWA, MARK CURTIS – ABB fabrique des semi-conducteurs de forte puissance depuis des décennies. Ces composants essentiels se retrouvent au cœur de nombreuses technologies pointues d'ABB comme le transport d'électricité en courant continu à haute tension (CCHT) et la variation électronique de vitesse. En investissant dans les installations hyperspécialisées de son site suisse de Lenzbourg, ABB s'est donné les moyens de développer et de fabriquer toute une gamme de semi-conducteurs de puissance perfectionnés, qui profitent directement à son offre de produits en constante évolution.

Née de la découverte des semi-conducteurs, l'électronique de puissance a marqué une réelle rupture technologique en faisant de l'interrupteur statique\* la base de tout équipement destiné à modifier le courant électrique.

Un matériau est qualifié de « semi-conducteur », tel que le silicium, quand il se situe à mi-chemin entre le conducteur électrique (cuivre) et l'isolant (caoutchouc). Placé dans un circuit, c'est un isolant imparfait : le plus souvent, il bloque le flux d'électrons mais certaines conditions (agitation thermique, impuretés ou défauts, exposition aux champs électromagnétiques) peuvent le rendre conducteur. La conductivité d'un semi-conducteur pur, encore appelé « intrinsèque » ou « de type I » → 1a, change du tout au tout si on lui ajoute d'autres éléments ou « impuretés », par un procédé de « dopage ». Les matériaux utilisés pour doper un cristal de silicium sont constitués d'atomes possédant trois ou cinq électrons sur leur couche externe (« valence 3 ou 5 »), soit un de moins ou de plus que le silicium qui en compte quatre.

L'introduction de petites quantités de phosphore (valence 5), par exemple, modifie les propriétés du matériau brut de type I en dotant son orbite externe d'un cinquième électron isolé : on obtient alors un cristal de silicium à charge négative, de « type N » → 1b, qui peut conduire l'électricité. Ces électrons libres se déplacent relativement sans entrave à travers le réseau cristallin et facilitent la conduction en présence d'un champ électrique. Les propriétés d'un semi-conducteur de type I sont aussi modifiées en le dopant avec un peu de bore (valence 3) mais cette fois, au lieu de donner un électron libre supplémentaire comme le faisait l'atome de phosphore, chaque atome de bore crée une absence d'électron dans la structure cristalline du silicium, dont le quatrième électron

reste privé de liaison. Ces manques sont comblés par les électrons des atomes voisins, laissant des « trous » considérés comme des charges positives dans le semi-conducteur : on obtient un cristal de « type P » → 1c. Comme les électrons libres, ces trous positifs peuvent se déplacer dans la structure cristalline. Ce phénomène à répétition crée un flux d'électricité dans le semi-conducteur de type P. La conduction s'explique donc par le mouvement d'électrons libres (négatifs) ou la présence de trous (positifs). Les semi-conducteurs de type N et de type P se comportent comme des isolants qui bloquent le courant en-dessous d'une tension de seuil ; au-dessus, ils deviennent conducteurs. Ce seuil est fonction de la proportion d'atomes dopants dans le silicium : il est d'autant plus bas que le dopage est important. Si l'on veut contrôler le sens et l'intensité du courant nécessaire pour faire passer le semi-conducteur de l'état isolant à l'état conducteur, il faut juxtaposer deux cristaux, l'un de type P, l'autre de type N. La ligne de séparation entre ces zones forme une « jonction » dans laquelle les électrons négatifs du semi-conducteur N remplissent les trous positifs du semi-conducteur P. On obtient ainsi, à la frontière entre les régions P et N, une mince couche de type I, dépourvue d'électrons libres et de trous, que l'application d'une source de tension externe rend conductrice. C'est en modulant le potentiel appliqué à cette jonction P-N que l'on joue sur les propriétés électriques du composant. Les caractéristiques et la structure de ces semi-conducteurs dopés sont à l'origine du transistor qui constitue encore aujourd'hui les fondements de tout appareil électronique moderne.

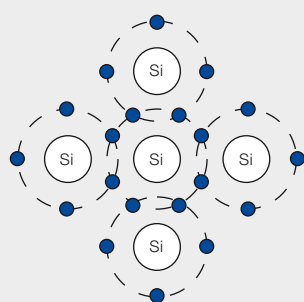
**Note**

\* Circuit ou équipement entièrement réalisé en matériau semi-conducteur, sans pièces mécaniques mobiles.

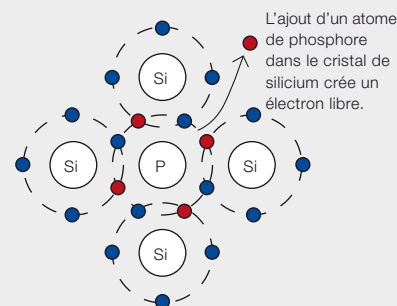
L'électronique de puissance se charge de maîtriser, d'adapter et de convertir l'énergie électrique, à l'aide de composants de commutation à semi-conducteurs, encore appelés « interrupteurs statiques » → 1. Les récents progrès de la discipline ont débouché sur un nombre toujours croissant d'applications. Les conséquences du réchauffement planétaire dû à la combustion des énergies fossiles jouent un rôle majeur dans le recours accru aux semi-conducteurs de puissance pour optimiser la production des énergies renouvelables (EnR) et améliorer la performance énergétique.

Même aux premières heures de l'électricité, le critère de l'efficacité du transport a dicté le choix du courant continu (CC) ou alternatif (CA). À l'origine, les systèmes électriques étaient majoritairement bâtis sur des circuits CC, malgré l'impossibilité d'en modifier les niveaux de tension, qui en limitait l'usage. On construisit alors des générateurs permettant de répondre aux besoins de la charge sur le circuit en adaptant, par exemple, le niveau de tension à l'éclairage, aux moteurs, etc. Pour autant, l'inefficacité du transport à ces basses tensions obligeait à installer ces générateurs à proximité des consommateurs.

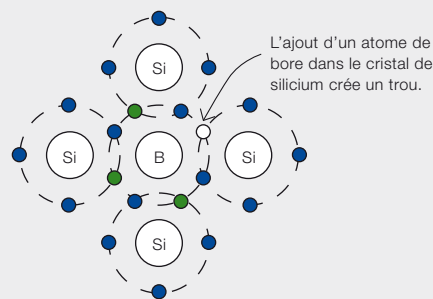
Le développement ultérieur des alternateurs et des transformateurs fut décisif pour porter cette tension à 110 kV ou plus,



1a Semi-conducteur de type I, non dopé

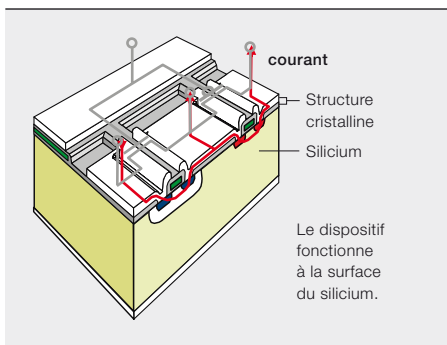


1b Semi-conducteur de type N, dopé au phosphore (charges négatives)



1c Semi-conducteur de type P, dopé au bore (charges positives)

## 2 Semi-conducteurs employés dans l'électronique grand public



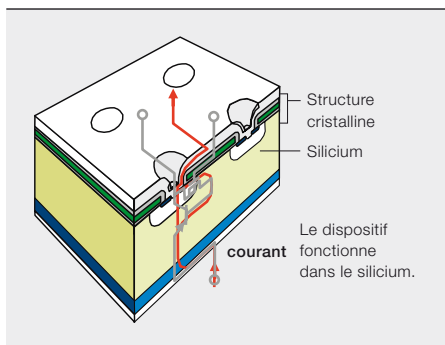
et améliorer ainsi le transport électrique sur de longues distances. Les générateurs pouvaient s'éloigner des lieux de consommation et s'affranchir de l'obligation d'adapter leurs niveaux de tension à la charge raccordée, des transformateurs « abaisseurs » accomplissant cette tâche. Ces premières avancées ont joué un rôle central dans le choix de la nature et de la topologie des réseaux de transport et de distribution.

## Les progrès de ces dernières décennies dans le domaine des semi-conducteurs ont considérablement influencé l'architecture des systèmes électriques du monde entier.

Si les systèmes électriques se heurtent aujourd'hui à de nouvelles contraintes (rendement énergétique, écocompatibilité, etc.), la technologie reste le principal moteur de leur évolution.

Ces dernières décennies, les progrès accomplis dans le domaine des semi-conducteurs ont considérablement influencé l'architecture des systèmes électriques du monde entier. Parmi les innovations qui en ont bénéficié, citons le transit massif d'électricité sur CCHT, l'introduction de la vitesse variable dans la motorisation d'une chaîne cinématique (source d'économies d'énergie), le passage d'une fréquence à l'autre en cou-

## 3 Semi-conducteurs employés dans l'électronique de puissance



rant alternatif (50/60 Hz ou  $50/16^{2/3}$  Hz) et l'avènement des systèmes de transport flexibles en courant alternatif « FACTS » (*Flexible AC Transmission Systems*) pour stabiliser le réseau et en accroître la capacité de transfert.

### Domaines d'application

La grande majorité des dispositifs à semi-conducteur a fait de l'électronique grand public son domaine de prédilection : ordinateurs, lecteurs de DVD, téléphones mobiles, électroménager, consoles vidéo... autant de produits qui fonctionnent généralement à des puissances de la gamme des milliwatts et des nanowatts. Leur course à la miniaturisation s'accompagne d'une complexité accrue qui oblige à loger sur des « micro-puces » des centaines de millions d'interrupteurs commutant au niveau du nanowatt. La fonction de ces composants est habituellement gravée en surface du matériau semi-conducteur → 2.

De plus, de nombreux semi-conducteurs de faible puissance servent aujourd'hui à modifier la forme du courant électrique, c'est-à-dire sa tension ou sa fréquence :

- Convertisseurs continu-continu généralisés dans la plupart des appareils nomades (mobiles, MP3, etc.) dont ils maintiennent la tension à une valeur fixe, quel que soit le niveau de charge de la batterie ;
- Convertisseurs alternatif-continu (« redresseurs ») pour raccorder un appareil électronique au secteur (ordinateurs, téléviseurs, consoles de jeu, etc.) ;
- Convertisseurs alternatif-alternatif, que l'on retrouve dans les adaptateurs de courant, les variateurs d'éclairage... pour modifier le niveau de tension ou la fréquence ;
- Convertisseurs continu-alternatif (« onduleurs ») permettant d'alimenter

les équipements CA d'une voiture, par exemple, à partir d'une batterie CC.

De nos jours, ces composants commutent des mégawatts (MW) ! Généralement au silicium, ils ont pour fonction de bloquer ou de conduire le courant électrique en utilisant les trois dimensions du semi-conducteur → 3. Souvent moins emblématiques que leurs minuscules cousins de l'électronique grand public, ils s'appuient sur les mêmes principes pour modifier la tension et la fréquence, mais à une échelle industrielle. Ils constituent les robustes interrupteurs de grande puissance à deux états stables, « passant » ou « bloqué ».

Même si l'électronique de puissance se contente d'un segment relativement modeste du marché des semi-conducteurs, l'explosion de la demande en composants de forte puissance, ces cinq dernières années, lui a permis de grignoter des parts pour répondre à de nouvelles applications aujourd'hui bien établies. ABB compte parmi les grands producteurs et développeurs mondiaux de semi-conducteurs de forte puissance. Cette position de choix lui permet d'élargir leur champ d'application, grâce à une gamme de produits visant à doper l'efficacité énergétique.

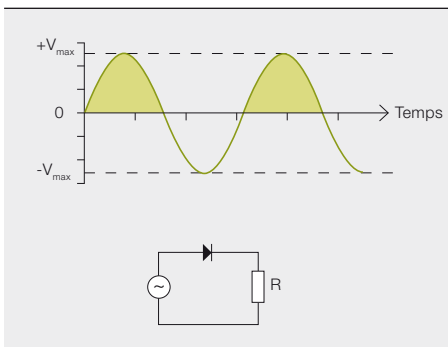
### Principaux composants

Le premier semi-conducteur de puissance – une diode de 7 kW – voit le jour au début des années 1950. Ce dispositif a pour particularité de ne laisser circuler le courant que dans le sens « direct » → 4. Les sociétés mères du Groupe ABB, ASEA et BBC, ont tout de suite décelé le potentiel des semi-conducteurs en électronique de puissance et joué un rôle de premier plan dans leur développement et leur fabrication depuis le milieu des années 50. Les diodes à semi-conducteurs ont d'ailleurs équipé les premiers redresseurs statiques. Au tout début, les diodes haute tension produites par les devancières d'ABB servaient à redresser le courant alternatif dans l'électrometallurgie de l'aluminium. Ces travaux précurseurs ont contribué à hisser ABB au premier rang des fournisseurs mondiaux de semi-conducteurs de forte puissance.

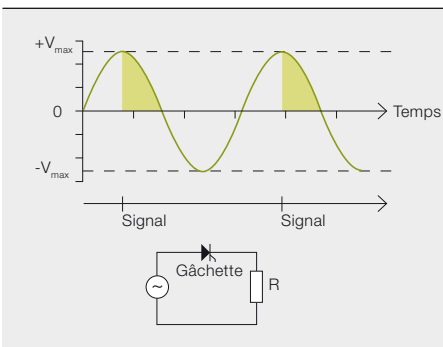
La fin des années 1950 voit l'avènement d'un nouveau semi-conducteur bipolaire, le thyristor. Il s'apparente à la diode puisqu'il bloque le courant dans le sens



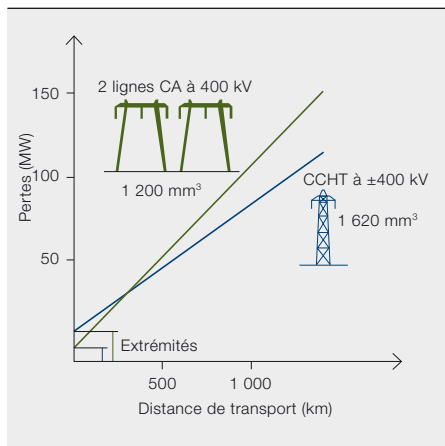
#### 4 Diode de redressement



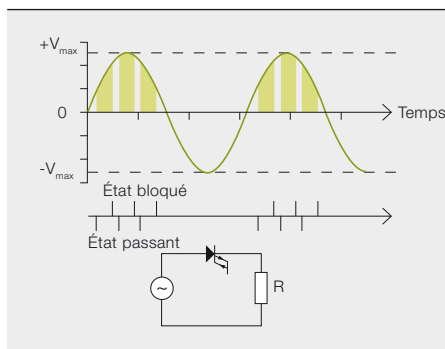
#### 5 Thyristor amorcé par un signal de gâchette et bloqué au zéro de courant.



#### 6 Comparaison des pertes de transport sur lignes aériennes CA et liaison CCHT



#### 7 Thyristor GTO commandable à l'amorçage/extinction par un signal HF.



inverse, mais il empêche aussi le flux d'électrons dans le sens direct, tant qu'il n'a pas reçu d'impulsion de commande. Ainsi la puissance ou le courant fournis à une charge peuvent-ils être contrôlés en déclenchant la conduction à un instant donné d'une période, en un point de la forme d'onde. Une fois amorcé (fermeture du contact), le thyristor reste conducteur

diode. Capable de commuter plusieurs MW, il peut convertir le courant alternatif en continu et vice-versa pour le transport CCHT. En 1954, ASEA installe la première liaison CCHT au monde; longue de 96 km et d'une puissance de 20 MW, elle alimente l'île de Gotland en 100 kV. Même si, à l'origine, ce système utilise exclusivement des redresseurs à vapeur de mercure,

en 1970, les stations de conversion sont complétées de valves à thyristors que l'on raccorde en série aux valves à vapeur de mercure pour porter la tension à 150 kV et la puissance de transport à 30 MW. Les systèmes CCHT actuels, équipés de thyristors en série, sont capables d'acheminer

6 400 MW sur plusieurs milliers de kilomètres, constituant des méthodes de transport efficaces de l'énergie électrique, des groupes de production distants aux grands centres de consommation. Autre

avantage: pour une même capacité de transit, les liaisons CCHT présentent des pertes inférieures à celles des lignes CA optimisées. Il faut bien sûr ajouter à cela les pertes dans les stations de conversion. Pour autant, celles-ci ne dépassant guère 0,7% de la puissance transitée dans chaque station, les pertes totales du CCHT s'avèrent globalement inférieures à celles de l'alternatif, au-delà d'une certaine distance (environ 500 km pour les lignes aériennes) → 6. De plus, le CCHT est l'unique solution viable pour les liaisons sous-marines de plus de 70 km.

Même si les thyristors connectés en série peuvent commuter des puissances de plusieurs milliers de MW, il suffit d'un dispositif de ce type, à 10 MW, pour modifier la fourniture de tension et de courant, par l'intermédiaire d'un variateur moyenne tension, et réguler efficacement la vitesse d'un moteur industriel. Selon les estimations, les applications pilotées par des moteurs électriques absorbent 65% de l'énergie utilisée dans l'industrie, dont une part considérable est consommée en pure perte par les méthodes traditionnelles de régulation de la vitesse des moteurs. Or, en utilisant des

**Les sociétés mères du Groupe ABB, ASEA et BBC, ont décelé le potentiel des semi-conducteurs en électronique de puissance et joué un rôle de premier plan dans leur développement et leur fabrication depuis le milieu des années 50.**

et ne revient à l'état bloqué (ouverture du contact) qu'une fois par cycle, par extinction naturelle, au passage à zéro suivant du courant → 5. À l'état passant, il se comporte fondamentalement comme une



## Semi-conducteurs de puissance ABB

Dispositifs	Assemblages	Applications
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- CCHT</li> <li>- Dispositifs FACTS</li> <li>- Convertisseurs éoliens</li> <li>- Variateurs</li> <li>- Redresseurs</li> <li>- Convertisseurs ferroviaires</li> <li>- Systèmes d'excitation</li> <li>- Électromobilité</li> </ul>

### 8 L'usine ABB de semi-conducteurs à Lenzbourg



Usine	Début production : 1978 (bipolaire) Ajout BiMOS : 1997 Achèvement extension : 2010/2011 Effectif : env. 500 employés
Fabrication	Composants bipolaires Tranches BiMOS Modules BiMOS
Spécialisation	Composants bipolaires (PCT [ <i>phase controlled thyristors</i> ], IGCT, diodes, GTO), plage 1,6 kV–8,5 kV Tranches BiMOS (diodes, IGBT), plage 1,2 kV–6,5 kV Modules IGBT (boîtiers HiPak™ et StakPak™), plage 1,7 kV–6,5 kV Modules de puissance

semi-conducteurs de puissance pour moduler la tension et la fréquence, on peut adapter la vitesse d'un moteur à courant alternatif tout en diminuant fortement ses pertes. La vitesse variable

L'avènement du transistor bipolaire à grille isolée « IGBT » marque un tournant dans les progrès de l'électronique de puissance. Réputé pour sa rapidité de commutation, il peut contrôler le courant électrique et modifier efficacement sa forme d'onde et sa fréquence.

permet de réduire en moyenne de 30 à 50 % la consommation d'énergie.

Les progrès accomplis dans le domaine des semi-conducteurs ont débouché sur le thyristor blocable par la gâchette « GTO » (*Gate Turn-Off thyristor*) qui, contrairement au thyristor simple, peut

être commandé à l'ouverture en un point arbitraire de la forme d'onde pour mieux contrôler la fourniture de puissance → 7. Le GTO est aujourd'hui courant dans les convertisseurs qui adaptent la fréquence du réseau électrique national à celle de la traction ferroviaire (trains et métros). Les deux premiers convertisseurs de fréquence utilisant des GTO, d'une puissance unitaire de 25 MVA, furent mis en service en 1994, à Giubiasco (Suisse). Ces appareils ont essaimé dans le monde entier pour adapter l'électricité fournie par le réseau aux besoins du rail.

Le GTO ne tarda pas être concurrencé par le thyristor intégré commuté par la gâchette « IGCT » (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*). Comme le GTO, l'IGCT peut basculer à l'état passant ou bloqué, mais son extinction beaucoup plus rapide lui permet de commuter à des fréquences bien supérieures à celles de son prédécesseur. Il peut gérer de rapides élévations de tension en affichant des pertes par conduction plus faibles. Aujourd'hui, des milliers de variateurs de vitesse embarquent des IGCT. L'IGCT peut à lui seul commuter des puissances à de hauts niveaux de tension, ce qui lui vaut d'être un composant essentiel du compensateur statique de puissance réactive<sup>1</sup> et d'autres constituants du réseau électrique.

Il y a une vingtaine d'années, une variante en apparence simple du MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) de puissance au silicium amorçait



un tournant dans l'électronique de puissance avec la création du transistor bipolaire à grille isolée « IGBT » (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*). En 1997, ABB commence à investir dans la production de tranches pour IGBT, à Lenzbourg → 8. Basé sur la technologie BiMOS (*Bipolar-Metal-Oxide-Semiconductor*), l'IGBT est réputé pour ses performances et sa rapidité de commutation, basculant de l'état passant à l'état bloqué et inversement, plusieurs fois par cycle. Assemblés de multiples façons, les IGBT modifient la tension ou la fréquence pour une kyrielle d'applications, du transport en courant continu à haute tension HVDC Light® → 9 à la vitesse variable basse tension → 10. Ces deux domaines font certes appel à des redresseurs et des convertisseurs. Néanmoins, comme dans toute application, c'est le mode d'assemblage de ces composants à semi-conducteurs qui conditionne leur puissance de fonctionnement.

Les différentes familles de semi-conducteurs et leur assemblage déterminent leur adéquation à une application donnée. L'encapsulation de chaque composant vise non seulement à préserver son intégrité et ses performances, mais aussi à garantir sa sécurité de fonctionnement et sa longévité en environnements difficiles. Les modules HiPak™ d'ABB, par exemple, se destinent aux rudes milieux de la traction électrique et de l'industrie. Ils sont appelés à fonctionner dans une vaste plage de température et d'hygrométrie, ou dans des conditions de vibra-

tions ou de chocs intenses. Ils doivent aussi endurer de forts cycles thermiques. Les modules HiPak équipent des engins de traction, variateurs et aérogénérateurs. Autre type de boîtier, le StakPak™, exclusivité ABB, convient tout particulièrement au raccordement en série fiable des nombreux modules d'IGBT nécessaires aux applications haute tension.

Les semi-conducteurs de puissance sont indissociables d'un nombre croissant de produits et systèmes ABB investissant la quasi-totalité des applications électriques. Ils assurent la commande en vitesse variable de moteurs de 10 W à plusieurs centaines de MW et le transport de fortes puissances (jusqu'à 6 GW) sur des lignes CCHT à 800 kV. Ils permettent aux trains, engins de levage et ascenseurs de fonctionner sans à-coups, et aux énergies renouvelables, comme l'éolien et l'hydroélectrique, de se raccorder au réseau. Sans oublier les systèmes radar des aéroports qui en font les infailibles « pilotes » de la navigation aérienne. La prépondérance d'ABB dans la conception, le développement et la fabrication de semi-conducteurs lui a permis de conserver son rang de numéro un mondial des convertisseurs à électronique de puissance pour quantité d'applications. Le déploiement continu de son usine suisse, de même que l'acquisition du Tchèque Polovodice a.s., confortent son *leadership* et son implication dans la course à l'efficacité énergétique et à la productivité, dans un large éventail de secteurs industriels.



Cet article est le premier d'une série consacrée au rôle primordial des composants semi-conducteurs, au bénéfice d'ABB et de la filière énergétique.

#### Claes Ryttoft

Responsable Technologies des systèmes d'énergie  
ABB Power Systems  
Zurich (Suisse)  
claes.ryttoft@ch.abb.com

#### Bernhard Eschermann

Responsable Semi-conducteurs de puissance  
ABB Power Systems  
Lenzburg (Suisse)  
bernhard.eschermann@ch.abb.com

#### Harmeet Bawa

Responsable Communication  
Power Products and Power Systems  
Zurich (Suisse)  
harmeet.bawa@ch.abb.com

#### Mark Curtis

Rédacteur technique  
Revue ABB  
Zurich (Suisse)  
mark.curtis@ch.abb.com

#### Note

1 Dispositif basé sur la technologie des condensateurs commutés par thyristors, des inductances commandées par thyristors et des filtres d'harmoniques, capable de fournir et d'absorber du réactif pour améliorer la stabilité de la tension.