

LORSQUE LE COURANT CIRCULE SANS RÉSISTANCE

Les supraconducteurs à haute température ont été découverts dans les années 1980. Depuis, des experts débattent sur l'utilisation commerciale de leurs caractéristiques dans l'alimentation électrique. Entre-temps, des champs d'application concrets se dessinent, dans lesquels les câbles électriques sans résistance et d'autres composants de réseau supraconducteurs peuvent faire valoir leurs avantages. Une feuille de route du programme international «Assessing the impacts of high-temperature superconductivity on the electric power sector» de l'Agence internationale de l'énergie, à laquelle des experts suisses ont largement contribué, présente les domaines d'application de cette technologie à court, moyen et long terme.



Photo du câble supraconducteur de 10 kV utilisé dans le centre-ville d'Essen d'avril 2014 à mars 2021. Ce projet innovant a suscité un vif intérêt de la part du public. Au cours des sept années, le transport de l'électricité s'est déroulé presque sans interruption et pratiquement sans perturbation, mais l'exploitation économique n'a pas été atteinte pendant le test pratique. À l'extérieur du bâtiment, à droite, se trouve le réservoir contenant le liquide de refroidissement, l'azote. Photo: Westenergie AG

Article spécialisé sur les conclusions d'un groupe d'experts sur la superconductivité à haute température qui travaille sous l'égide de l'AIE et qui est soutenu par l'Office fédéral de l'énergie. L'article a été publié, entre autres, dans le magazine spécialisé 'Bulletin SEV/VSE' (édition mars/mai 2022).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

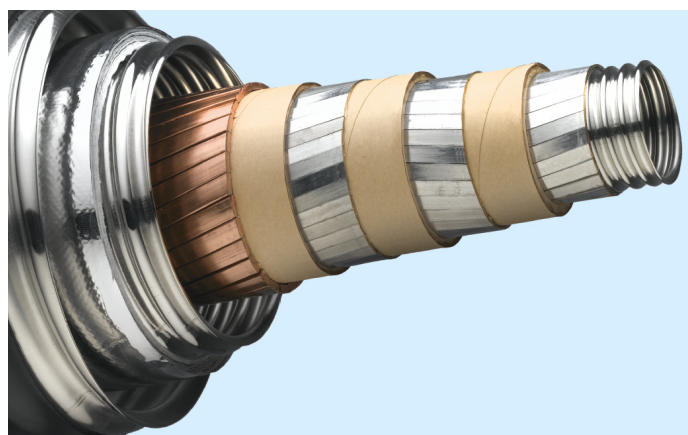
L'électricité parcourt souvent des centaines de kilomètres entre la centrale et le consommateur. «En raison des pertes de transmission, jusqu'à dix pour cent de la quantité d'électricité transportée se «perdent» sur le trajet, c'est-à-dire que l'électricité est transformée en énergie thermique, ce qui se traduit par un réchauffement des lignes électriques», explique Walter Sattinger, expert réseau auprès de la société nationale du réseau Swissgrid. Pour minimiser les pertes, l'électricité est transmise à des tensions élevées chaque fois que cela est possible. Ainsi, la même quantité d'énergie peut être transmise avec une intensité de courant plus faible. Cela permet de réduire les pertes, car celles-ci augmentent de manière quadratique avec l'intensité du courant.

«L'astuce» porte ses fruits: en Suisse, à peine un cinquième des pertes de transport sont imputables au réseau haute et très haute tension (220 kV, 380 kV). Mais dans l'absolu, ces pertes sont également importantes: par exemple, sur une ligne de 380 kV de 100 km, il peut y avoir près de 10 MW de perte de puissance en cas de forte charge. Cela correspond à la puissance de deux grandes centrales éoliennes.

La supraconductivité élimine les pertes

Afin de réduire les pertes de transmission, l'utilisation de câbles électriques supraconducteurs est discutée depuis longtemps et testée dans des installations d'essai. Les supraconducteurs ont la propriété de conduire l'électricité sans perte électrique notable. Pour que la résistance électrique diminue dans les conducteurs, ceux-ci doivent être fortement refroidis. Pour les applications commerciales, l'accent porte sur la supraconductivité à haute température (HTS), laquelle a beaucoup évolué au cours des 10 ou 15 dernières années. Elle repose sur des matériaux céramiques qui acquièrent des propriétés supraconductrices dès des températures relativement élevées de 77 Kelvin (- 196 °C). 77 kelvins est la température d'ébullition de l'azote (à pression normale). L'azote est un matériau idéal pour refroidir les supraconducteurs dans la mesure où il est facile à liquéfier et ne présente aucun danger.

Les lignes électriques performantes transportent aujourd'hui jusqu'à 3 GW pour les tensions utilisées en Europe. Avec les supraconducteurs, ce chiffre pourrait être multiplié par dix à l'avenir. Avec des quantités d'électricité aussi importantes, l'élimination des pertes de transmission permet d'économiser plus d'électricité qu'il n'en faut pour refroidir les supraconducteurs. «Les applications utilisant des supraconducteurs



Structure du câble HTS tel qu'il était utilisé jusqu'à 2021 dans la ville d'Essen: les trois couches supraconductrices (argentées) sont séparées par trois isolants (marron). Le blindage en cuivre est visible à gauche. Le tube composé de couches supraconductrices, d'isolations et d'un blindage en cuivre est entouré d'azote à l'intérieur et à l'extérieur et refroidi par celui-ci à -200 °C. Photo: Westenergie AG

bien isolés thermiquement prouvent que des gains d'efficacité sont possibles malgré le refroidissement nécessaire», explique le Dr Bertrand Dutoit, directeur du groupe de supraconductivité appliquée à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Le chercheur cite l'exemple de la ligne moyenne tension d'un kilomètre exploitée de 2014 à 2021 dans la ville allemande d'Essen par l'entreprise énergétique Westenergie. Grâce à elle, l'électricité a pu être transportée au centre-ville à une tension plus faible (10 kV au lieu de 110 kV). Le câble du projet AmpaCity a permis de transporter 39 000 MWh d'électricité par an. Le refroidissement a nécessité 45 MWh d'énergie pendant la même période.

Applications à haut degré de maturité technologique

Un groupe d'experts travaillant sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie et auquel la Suisse participe (voir encadré p.4) a évalué le niveau de développement des applications HTS pour le réseau électrique et les a rassemblées dans une «Application Readiness Map» (ARM). Ce document donne une vue d'ensemble du niveau de maturité technologique (Technology Readiness Level/TRL) de différentes applications HTS (cf. graphique p.3). Les expertes et experts de l'industrie et de la recherche ayant participé au projet ont identifié trois domaines dans lesquels la technologie HTS a déjà atteint un haut niveau de maturité: il s'agit notamment de câbles moyenne tension performants pour alimenter les centres-villes, comme ceux qui ont été utilisés à Essen, mais qui sont égale-

Niveau de maturité technologique : bas moyen élevé

	aujourd'hui	2025	2030	2035	2040	2045
Approvisionnement en énergie (réseau)						
Transfert (HT > 66 kV) Capacité plus élevée pour lignes haute tension (CA, CC) Transport de puissances supérieures sur de longues distances Limitation de courant de défaut réseau HT	Câble HT (CA)		Câble HT (CA)			
	Câble HT (CC)				Câble HT (CC)	
	Limiteur courant de défaut HT					
Sous-station Connexion sous-station (côté moyen tension) Limitation de courant de défaut réseau MT Remplacement des transformateurs traditionnels	Câble MT (CA)		Câble MT (AC)			
	Limiteur courant de défaut MT					
	Transformateur		Transformateur		Transformateur	
Répartition (MT < 66 kV) Alimentation des villes en haute puissance Modernisation des canaux de câbles existants	Câble MT (CA)					
	Câble MT (CA)		Câble MT (CA)		Câble (CA)	

«L'Application Readiness Map» pour les supraconducteurs à haute température dans le réseau électrique: un haut niveau de maturité technologique (vert) signifie qu'une application existe en tant que prototype ou une application déjà opérationnelle. Un niveau de maturité moyen (bleu) signifie que la technologie a été démontrée au laboratoire ou sur le terrain. En cas de bas niveau de maturité (rouge), une Proof of Concept est disponible. Illustration: IEA HTS TCP

ment testés en Corée du Sud, en Chine et au Japon. «Les supraconducteurs peuvent transporter jusqu'à cinq fois plus d'électricité que les câbles traditionnels de même taille, ce qui en fait une solution relativement bon marché pour l'approvisionnement des zones urbaines dont les besoins en électricité sont en constante augmentation», explique le professeur Carmine Senatore (Université de Genève), représentant de la Suisse au sein du comité d'experts de l'AIE.

Les appareils destinés à limiter les courants de court-circuit sur les réseaux moyenne et haute tension sont également prêts pour une application commerciale. Ces limiteurs de courant de défaut freinent les courants élevés, typiques des courts-circuits, sans toutefois interrompre le flux de courant. Lorsqu'un limiteur de courant de défaut supraconducteur est traversé par un courant élevé, il perd son caractère non résistif lorsqu'une quantité maximale de courant définie est

dépassée. Les premiers appareils de protection de ce type pour la haute tension sont en service commercial en Thaïlande et, depuis fin 2019, près de Moscou. Les appareils au niveau de la moyenne tension sont déjà plus répandus. Plus de 20 applications sont connues dans le monde. Les limiteurs de courant de défaut sont également utilisés pour la modernisation d'anciens réseaux électriques, en les protégeant contre les surcharges.

Raccordement de centrales éoliennes offshore

Selon l'estimation des experts, il existe trois domaines d'application pour les câbles supraconducteurs présentant actuellement un niveau de maturité technologique moyen: il s'agit notamment de lignes à haute tension pour le transport de courant alternatif qui pourraient remplacer les lignes aériennes actuelles, mais également de nouvelles lignes à haute tension pour le transport de courant continu sur de longues

distances. Des installations d'essai souterraines de quelques centaines de mètres ont vu le jour au cours de la dernière décennie en Chine, en Corée et au Japon. Un câble 20 kV de 2,5 km devrait en outre être achevé fin 2021 à Saint-Pétersbourg. La construction de longues lignes supraconductrices est techniquement exigeante. Sur terrain plat, elles doivent être équipées d'une station de refroidissement tous les 10 à 25 km.

Jochen Kreusel n'est pas partenaire du programme de l'AIE, mais il a une grande expérience de l'équipement des réseaux électriques en tant qu'expert en réseaux électriques de Hitachi Energy - une coentreprise des groupes Hitachi et ABB, composée essentiellement de l'ancienne division réseaux électriques ABB. «La fascination pour la supraconductivité n'est pas récente», affirme Kreusel, «mais aujourd'hui, nous sommes dans une situation où cette technologie pourrait effectivement faire une percée». Il fait référence aux projets



Photo du projet de câble HTS à Chicago, dans l'État américain de l'Illinois. Photo: AMSC

LA SUISSE S'ENGAGE

Derrière l'abréviation IEA HTS TCP se cache un groupe d'experts de composition internationale travaillant sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). L'AIE gère environ 40 'Programmes de collaboration technologique' (TCP), dont le programme 'Superconductivité à haute température' (HTS). Outre la Suisse, huit autres pays sont représentés dans le groupe d'experts, dont les États-Unis, le Japon et l'Allemagne. Le groupe affirme s'être engagé à «évaluer le statut et les perspectives d'utilisation future de la HTS dans le secteur de l'électricité des pays développés et en développement, et à communiquer ces résultats aux décideurs des gouvernements, du secteur privé et de la communauté en matière de recherche et développement (R&D)». Les représentants suisses au sein du TCP IEA HTS sont le professeur Carmine Senatore (Université de Genève) et Roland Brüniger (R. Brüniger AG - Engineering & Consulting). BV

➤ Plus d'informations sur <https://ieahs.org>.

d'extension des parcs éoliens en mer du Nord jusqu'à une puissance totale de 450 GW. «Amener de si grandes quantités d'électricité à terre nous place devant de nouveaux défis. Certes, cela est également possible avec la technologie actuelle des câbles, s'ils utilisent des câbles suffisamment grands, mais des câbles supraconducteurs performants auraient ici un domaine d'application idéal», explique l'expert industriel.

Un potentiel de modification massif

Les experts ont identifié d'autres domaines d'application dans lesquels la technologie HTS pourrait être utilisée à moyen ou long terme: par exemple, la connexion de plusieurs réseaux moyenne tension pour augmenter la sécurité d'approvisionnement, l'utilisation de câbles moyenne tension pour la modernisation de câbles souterrains existants, ainsi que la construction de transformateurs d'un nouveau type.

Des obstacles techniques, économiques et réglementaires doivent encore être surmontés avant que les câbles et composants supraconducteurs ne soient prêts pour une utilisation commerciale à grande échelle dans les réseaux électriques. Malgré tout, Jochen Kreusel de Hitachi Energy est convaincu que la feuille de route touche une corde sensible: «La supraconductivité est en route vers une application tech-



Point final d'un câble supraconducteur à courant continu d'une tension de 80 kV en Corée du Sud. Photo: KEPCO

nique à grande échelle. En tant qu'entreprise industrielle produisant des tableaux de distribution et des transformateurs, nous suivons cette évolution de très près, car si la technologie supraconductrice s'impose, elle a un potentiel de changement massif pour l'ensemble de l'approvisionnement en énergie électrique».

- L'«Application Readiness Map» est disponible en anglais sur: <https://ieahts.org/publications/>
- Roland Brüniger (roland.brueeniger@brueniger.swiss), directrice externe du programme de recherche sur les technologies de l'électricité de l'OFEN, communique des informations à ce sujet.
- Vous trouverez plus d'articles spécialisés concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine de la mobilité sur www.bfe.admin.ch/ec-electricite.