

# L'AIR COMPRIMÉ ISOLE LES CÂBLES SOUTERRAINS

Pour le transport de grands courants électriques, on utilise jusqu'à présent des lignes aériennes ou des câbles souterrains isolés en plastique. Une nouvelle idée consiste à isoler les câbles souterrains avec une gaine de gaz plutôt qu'avec du plastique. De telles isolations gazeuses sont déjà répandues aujourd'hui dans les postes de distribution du réseau haute et moyenne tension. Dans le cadre d'un projet de démonstration soutenu par l'OFEN, un câble haute tension isolé à air comprimé a été testé pendant un an dans des conditions proches de la réalité. Des expériences ont été recueillies à cette occasion en vue de l'utilisation future de ces nouveaux câbles souterrains.



Partie de l'installation de démonstration pour les câbles à air comprimé au centre de commutation des CFF à Zurich-Seebach: on peut voir à droite de l'image que trois câbles à air comprimé sont logés dans le tube de protection. Chacun d'entre eux constitue une phase du câble haute tension triphasé. Même pendant les chaudes journées d'été et avec une intensité maximale de 2000 ampères, les câbles à air comprimé ne s'échauffaient pas à plus de 57°C. Photo : Hivoduct

Le réseau interurbain suisse est en grande partie constitué de lignes aériennes qui transportent de l'électricité à une tension élevée de 220 ou 380 kV. Ces lignes passent haut au-dessus du sol, à une distance sûre des personnes. Lorsque les lignes aériennes sont impossibles ou indésirables, il est possible de poser des câbles souterrains. Ceux-ci sont généralement isolés par une couche de plastique en VPE (polyéthylène réticulé). Comme alternative, on développe depuis quelques années des câbles souterrains dont la gaine de protection n'est pas en plastique, mais en gaz.

Jusqu'à présent, le gaz est surtout utilisé comme isolant dans les tableaux de distribution, mais il peut également être utilisé pour isoler les lignes. Pour cela, on utilise généralement de l'hexafluorure de soufre, plus connu sous sa formule chimique brute  $SF_6$ . Ce gaz n'est pas toxique et inerte à température ambiante, mais il est très nocif pour le climat. Un kilogramme de  $SF_6$  renforce l'effet de serre autant que 26'000 kg de  $CO_2$ . Dans ce contexte, il est souhaitable de remplacer le  $SF_6$  par un gaz qui n'agit pas comme un gaz à effet de serre.

### Un professionnel de la branche fonde une startup

C'est précisément l'objectif de la start-up Hivoduct (Kemptal/ZH). Le cofondateur et CEO est l'ingénieur autrichien en électrotechnique Walter Holaus, qui a obtenu son doctorat à l'École polytechnique fédérale (ETH) de Zurich et travaillé pendant plus de 15 ans dans le développement d'appareillages de commutation à isolation gazeuse pour des entreprises industrielles. En 2020, il a créé sa propre entreprise avec deux collègues dans le but de développer des câbles souterrains isolés à air comprimé pour le transport d'électricité. L'entrepri-



Avant la construction de l'installation de démonstration à Zurich-Seebach, les câbles à air comprimé avaient été testés dans le cadre d'un projet Innosuisse et en collaboration avec la Haute école spécialisée de Suisse orientale sur un banc d'essai de la Commission spécialisée pour les questions de haute tension (Versuchsanstalt Dänikon). Photo : Hivoduct

se, qui compte aujourd'hui dix collaborateurs, a entre-temps certifié des câbles pour des applications en moyenne tension (12 à 52 kV) et en haute tension (72 à 145 kV).

Un avantage du nouveau développement: en raison de la section plus importante des conducteurs, les pertes électriques sont jusqu'à dix fois inférieures à celles des lignes aériennes et deux à trois fois inférieures à celles des câbles souterrains à isolation synthétique. Les nouveaux câbles permettraient d'économiser des quantités considérables d'électricité; jusqu'à présent, jusqu'à dix pour cent de l'électricité du réseau de transport suisse sont en effet perdus en cours de route.

## PROJETS P+D DE L'OFEN

Le projet présenté dans le texte principal a été soutenu par le programme pilote et de démonstration de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Avec ce programme, l'OFEN encourage le développement et l'expérimentation de technologies, de solutions et d'approches innovantes, lesquelles contribuent de manière significative à l'efficacité énergétique ou à l'utilisation des énergies renouvelables. Les demandes d'aide financière peuvent être soumises à tout moment.

➔ [www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration](http://www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration)



Câble à air comprimé moyenne tension (36 kV) avec trois phases juxtaposées, posé dans un canal de câbles. Photo : Hivoduct

Les câbles à air comprimé sont également une alternative aux câbles souterrains supraconducteurs, qui ont été développés ces dernières années, mais qui ne se sont pas imposés jusqu'à présent. « Pour pouvoir lancer les câbles souterrains à isolation gazeuse sur le marché, nous devons démontrer leur performance et leur fiabilité dans un environnement pratique », explique Walter Holaus. Tel était le but d'un projet de démonstration cofinancé par l'OFEN, lequel s'est achevé à l'automne 2023.

### Installation de démonstration chez les CFF

Pour ce projet, un tronçon de 30 mètres d'une ligne de câble à air comprimé (pour 2500 A de courant) a été installé près du poste de couplage des CFF à Zurich-Seebach. Les CFF ont mis à disposition le site de test car ils ont grandement besoin de câbles souterrains, notamment dans les zones urbaines. Pour les CFF, il est également avantageux que les câbles à air comprimé ne provoquent environ trois à cinq fois moins de puissance réactive, ce qui permet une utilisation plus étendue sur le réseau par rapport aux câbles VPE. Pour le projet de démonstration, une tension de 145 kV a été choisie - une haute



En été 2023, le design des brides des câbles à air comprimé a encore été amélioré. Désormais, les tuyaux à air comprimé peuvent être posés de manière flexible et avec un angle pouvant atteindre 10 degrés, si nécessaire. Photo : Hivoduct

## L'AIR COMPRIMÉ ISOLE LES CÂBLES ÉLECTRIQUES

Comme dans le cas d'un câble électrique traditionnel, le courant électrique circule dans le câble à air comprimé à travers un conducteur métallique (voir illustration; anneau vert intérieur). Celui-ci se trouve dans un boîtier tubulaire rempli d'air comprimé d'un diamètre d'un peu plus de 20 cm pour une ligne de 145 kV (voir illustration; anneau vert extérieur). Le tube du boîtier fait office de réservoir sous pression, de circuit de terre et, en outre, de blindage efficace pour les champs électromagnétiques, de sorte que les nuisances environnementales sont fortement réduites.

L'air comprimé est utilisé parce qu'il isole encore mieux que l'air à pression normale. Une couche de 10 cm d'air comprimé à 10 bars isole à peu près aussi bien qu'un mètre d'air non comprimé. Dans le cadre du projet de démonstration de l'OFEN, des pertes de pression ont également été simulées : lors d'une chute de pression continue, un claquage de tension ne s'est produit dans une ligne de 145 kV avec une intensité de 2000 ampères qu'à une pression résiduelle de 1,8 bar. Cela montre que les câbles à air comprimé dont la pression est de 10 bars dispose d'une grande réserve.

À l'intérieur du tube d'air comprimé, des rondelles en plastique non conducteur assurent tous les 5 mètres que le conducteur est bien centré dans le tube. Le tube est mis à la terre, de sorte qu'une personne qui le toucherait ne craindrait pas une décharge électrique. Le diamètre d'un câble à air comprimé est plus grand qu'un câble haute tension souterrain classique avec un isolant en VPE (polyéthylène réticulé). L'illustration ci-jointe montre la comparaison de taille entre un câble d'air comprimé de 145 kV (2500 A) à gauche et un câble VPE (1000 A) à droite.

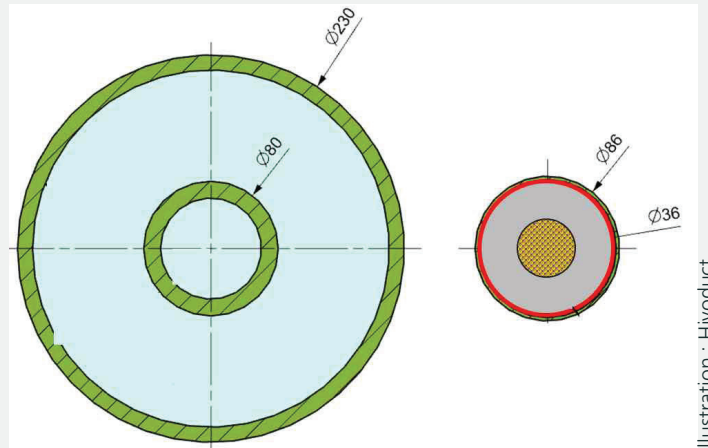
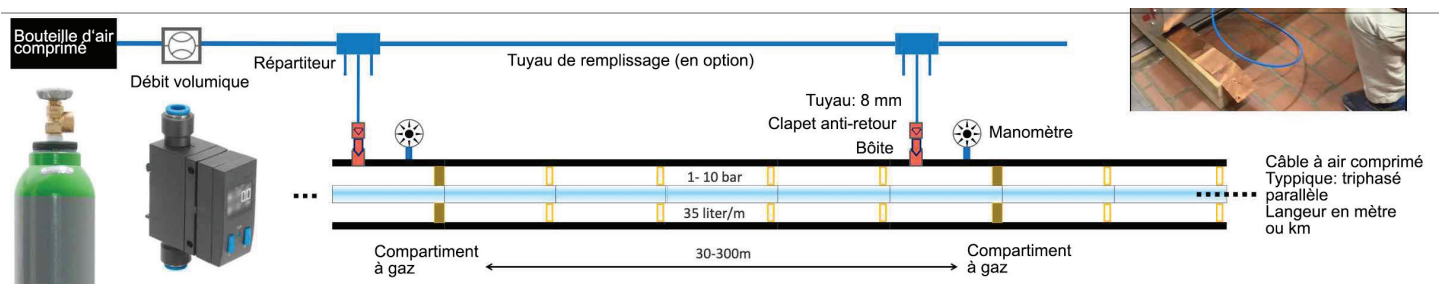


Illustration : Hivoduct



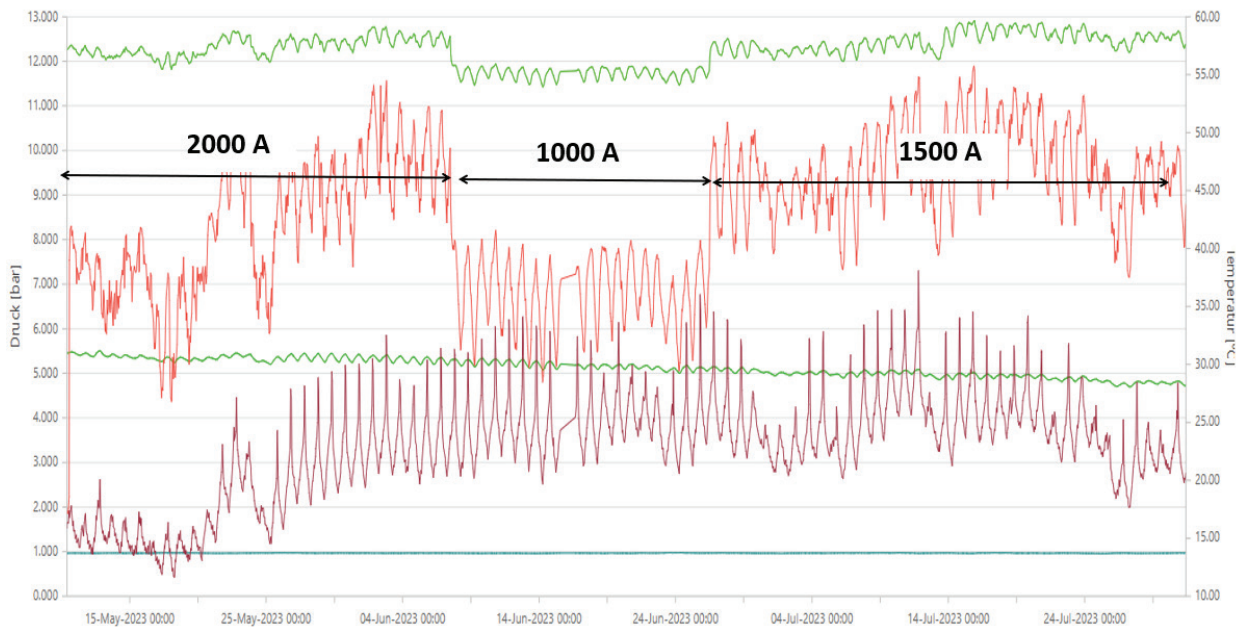
Selon les indications du fabricant, les câbles à air comprimé ne présentent aucune perte de pression pendant leur durée de vie de 40 ans. Il arrive toutefois que l'air comprimé doive être réalimenté après des dommages ou des travaux de révision. À cet effet, les conduites d'air comprimé sont équipées d'une alimentation en gaz à partir de bouteilles d'air comprimé. Illustration : Hivoduct

tension répandue en Europe et également utilisée dans les réseaux des gestionnaires de réseaux de distribution suisses. L'exploitation pilote d'un an a permis de tester différents cas de fonctionnement - notamment des tests d'étanchéité, des tests de haute tension avec simulation de chute de pression, des tests d'endurance avec des courants élevés - le tout pendant des périodes de chaleur en été et de froid et de chutes de neige en hiver. Les câbles testés utilisent de l'air comprimé jusqu'à 10 bars. Lors des tests de rupture, ils ont dû prouver leur étanchéité jusqu'à des pressions de 50 bars. « L'opération pilote a confirmé l'aptitude à l'emploi et la robustesse des câbles à air comprimé », déclare Walter Holaus. « Il s'est éga-

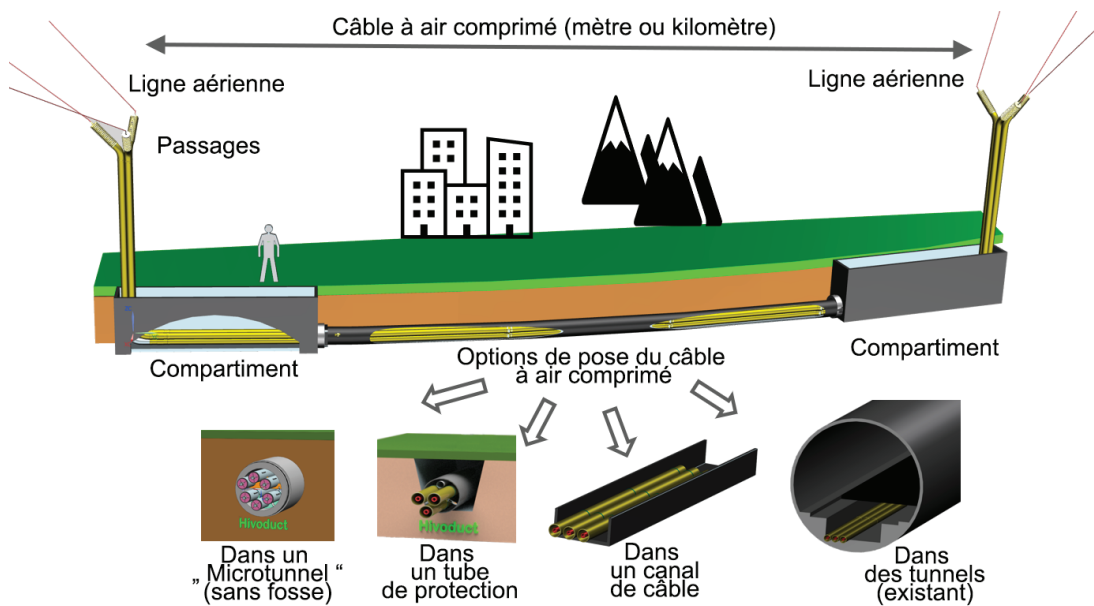
lement avéré que la surveillance continue à l'aide de capteurs de pression et de température fournit des données précieuses pour l'exploitant ».

### Des améliorations constructives

L'année d'exploitation a confirmé que les câbles n'avaient pas présenté de pertes de pression pendant douze mois. Les concepteurs partent du principe que l'étanchéité des câbles est garantie pendant toute leur durée de vie, soit pendant 40 ans. Cela est notamment possible grâce à de nouvelles brides qui relient les différents tuyaux d'air comprimé d'une longueur de 5 m. Les brides sont constituées d'une connexion



Le câble d'air comprimé de la couche de démonstration a été soumis à des courants permanents de différentes intensités (2000 A, 1000 A, 1500 A) pendant plusieurs semaines d'essai au cours de l'année de fonctionnement continu. La courbe rouge supérieure indique la température maximale du câble à air comprimé (tube du boîtier), la courbe rouge inférieure la température ambiante. Malgré des températures extérieures élevées à cette époque de l'année, la température du boîtier du câble à air comprimé n'a jamais dépassé 57°C, même à 2000 A, et est donc toujours restée inférieure à la valeur limite de 65°C. La courbe verte supérieure montre l'évolution de la pression pendant la phase de courant fort, qui présentait des pressions jusqu'à 12,5 bars en raison de la pression de remplissage maximale et de l'échauffement dû au courant continu. La courbe verte inférieure montre le pire cas de figure d'une pression réduite de moitié en phase de haute tension, confirmant ainsi le fonctionnement continu même après une fuite extrême. Graphique : Hivoduct



Représentation schématique d'une ligne à haute tension dont un tronçon est un câble souterrain à air comprimé. Quatre designs différents sont disponibles pour le passage des câbles. Illustration : Hivoduct

annulaire solidaire à double joint, développée et brevetée par l'entreprise, qui se passe complètement de vis.

Grâce à l'expérience acquise dans le cadre du projet de démonstration, les tuyaux à air comprimé ont pu être améliorés entre-temps: ainsi, les points de contact entre les composants argentés et les pièces en aluminium se sont révélés sensibles à la corrosion lors d'une utilisation en plein air; ils sont désormais protégés par un cache. Le projet de démonstration a également permis à la startup de jouer pour la première fois le processus complet de production et d'installation. Il a notamment été possible d'optimiser les outils nécessaires à l'assemblage des différents tubes pour former une longue ligne de câbles à air comprimé.

### Une homologation progressive

Les câbles à air comprimé Hivoduct jusqu'à 145 kV sont désormais certifiés et peuvent par conséquent être installés sur le réseau électrique suisse. Les câbles pour les deux très hautes tensions du réseau de transport suisse (220 kV, 380 kV) pourraient bientôt suivre, mais ils ne sont pas encore autorisés pour le moment. Pour la commercialisation des câbles isolés à air comprimé, Hivoduct se concentre sur la moyenne tension (12 kV à 52 kV) et la basse haute tension (52 à 145 kV) : « Nous démarrons sur cette plage de tension parce que ces projets peuvent être mis en œuvre rapidement », explique Halaus. En Allemagne, une installation pilote sera mise en service en 2024 sur un réseau urbain de moyenne tension (36 kV).

« Nous voyons le domaine d'application des câbles à air comprimé principalement lorsque de nouvelles lignes électriques doivent être construites et font appel à des câbles souterrains, ou bien lorsque des lignes aériennes existantes doivent être remplacées par des câbles souterrains », explique Halaus. Selon lui, les coûts des câbles à air comprimé avec des courants élevés de plus de 1500 A se situent déjà aujourd'hui au niveau de ceux des câbles souterrains isolés en plastique. Par rapport aux lignes aériennes, les coûts d'investissement pour les câbles à air comprimé sont 1,5 à 10 fois plus élevés. Pour une comparaison équitable des coûts, il faudrait ici prendre en compte les pertes de transmission et la maintenance, explique Walter Halaus.

- Le **rapport final** du projet « Installation de démonstration de câbles à air comprimé 145 kV » est disponible sur: [www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=50061](http://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=50061)
- Roland Brüniger ([roland.brueeniger@brueniger.swiss](mailto:roland.brueeniger@brueniger.swiss)), directeur 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 des technologies de l'électricité sur [www.bfe.admin.ch/ec-electricite](http://www.bfe.admin.ch/ec-electricite).