Client Préfecture du Nord - Bureau de l'environnement

Sujet PROJET DE RECONSTRUCTION DE LA LIGNE 400 KV AVELIN-GAVRELLE : REPONSES AUX QUESTIONS POSEES DURANT LA PHASE DE CONCERTATION

Commande Commande RTE n. 4500547131 / R0DI

Notes version originale en langue française

PAD B4023551 (2007737) - CONFIDENTIAL USE

Ce document ne peut pas être reproduit sauf dans sa version intégrale sans autorisation écrite de CESI

Nb de pages 74 **Nb de pages annexées :** 0

Date d'émission 16 octobre 2014

Prepared CSG - Colombo Enrico, CSP - Cova Bruno, CEC - Meregalli Sergio
B4023551 3421 AUT B4023551 2982 AUT B4023551 3615 AUT

Verified CCE - Ardito Antonio
B4023551 2935 VER

Approved CCE - The Manager - Ardito Antonio
B4023551 2935 APP

Mod. RAPP v. 01

Table des matières

1 AVANT-PROPOS 3

2 SOLUTIONS À CABLES POUR LE TRANSPORT DE L'ELECTRICITE 4

2.1 Expérience d'installation d'un siphon en CIS sur la ligne 400 kV Turbigo (Piémont) -Rho (Lombardie) 6
2.2 Câbles à isolation gazeuse (CIG) 9
2.2.1 Enjeux environnementaux des CIG 11
2.2.2 Coûts pour la réalisation des CIG 13
2.3 Comparaison entre les technologies CIS et CIG 14
2.4 Principales installations en câbles THT récemment achevées 17
2.5 Réponses et remarques aux questions posées sur l'utilisation des CIS et de CIG pour la ligne Avelin-Gavrelle 23

3 TECHNOLOGIE EN COURANT CONTINU (CC) ET EN COURANT ALTERNATIF (CA) 37

3.1 État de la technologie en CC 37
3.1.1 Maitrise de la technologie en CC 37
3.1.2 Évolution technologique 39
3.1.3 Ouvrages supplémentaires liés à la technologie en CC : postes de conversion 40
3.1.4 Lignes aériennes en CC 46
3.1.5 Câbles en CC 47
3.1.6 Schémas possibles de liaison en CC pour la ligne Avelin-Gavrelle 48
3.1.7 Coûts des ouvrages 51
3.2 Réponses et remarques aux questions posées sur l'utilisation du CC pour la ligne Avelin-Gavrelle 52

4 DIFFERENCES ENTRE UNE LIAISON AERIENNE ET UNE LIAISON SOUTERRAINE 56

4.1 Risques de rupture des lignes aériennes et souterraines 56

5 COMMENTAIRES GENERAUX SUR LES POSSIBLES SOLUTIONS POUR LA LIGNE AVELIN-GAVRELLE 58

6 REFERENCES 60

ANNEXE 1 - CABLES A ISOLATION SYNTHETIQUE (CIS) 61

A.1 Enjeux environnementaux des câbles enfouis en courant alternatif 61

ANNEXE 2 – COMPRARATIF ENTRE LIGNES AERIENNES ET CABLES ENFOUIS 66

ANNEXE 3 – NOUVELLE LIGNE 400 KV TRINO (PIEMONT)-LACCHIARELLA (LOMBARDIE) 70

© Copyright 2014 by CESI. All rights reserved - Activity code AE14CSP025

1 AVANT-PROPOS

La ligne à 400 000 V (400 kV) Avelin-Gavrelle représente un point de faiblesse dans le réseau de transport du nord-est de la France, sachant qu'il s'agit d'une ligne réalisée en circuit simple et non en circuit double, comme c'est le cas des autres lignes de transport à 400 kV de la région (Fig. 1-1). De ce fait, la capacité actuelle de transport de cette ligne est limitée à 1 500 MW.

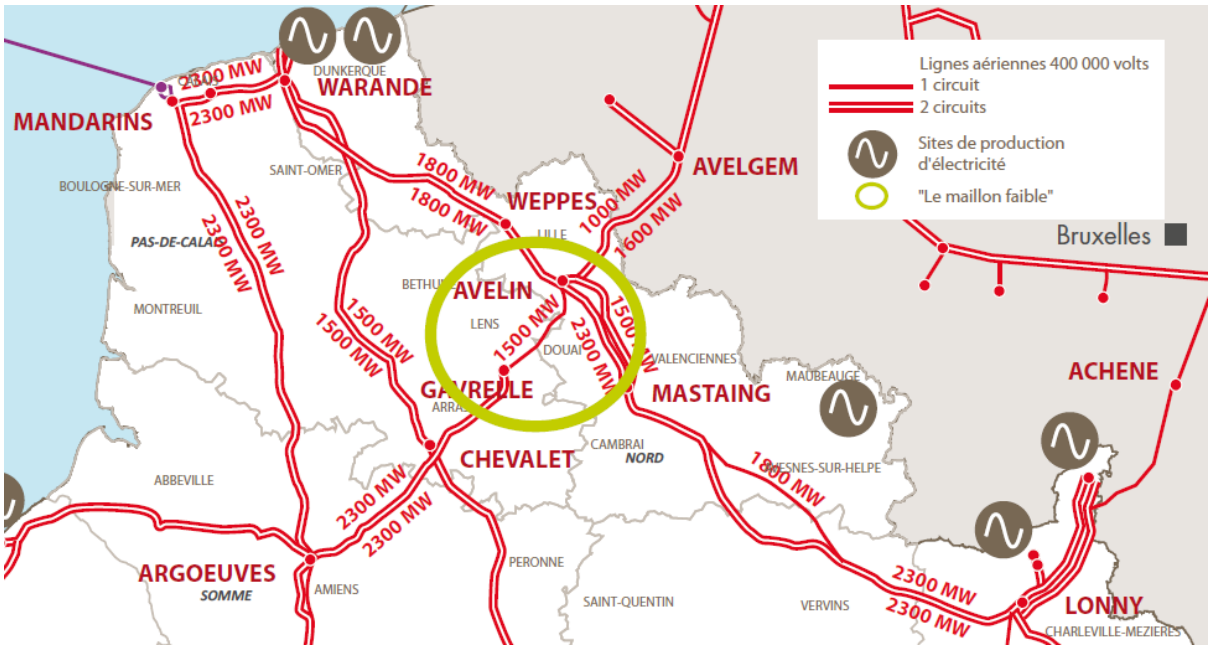


Fig. 1-1 – Schéma du réseau de transport dans le nord-est de la France (source RTE)

En tenant compte de l'importante augmentation des flux de puissance tant à l'intérieure de la France qu'avec les pays voisins, RTE a proposé de construire une nouvelle ligne en double circuit entre les postes d'Avelin (Nord -59-) et de Gavrelle (Pas de Calais -62-) de façon à augmenter la capacité à 4 600 MW. Une fois cette nouvelle ligne construite, la précédente, dont la construction originale remonte désormais aux années 60, sera démantelée. Pour obtenir cette capacité de transport, RTE a proposé la réalisation de deux circuits sur un même pylône en adoptant des conducteurs en faisceau quadruple.
La nouvelle ligne aurait une longueur de 28 à 30 km et serait réalisée à l'aide de 60 à 75 pylônes installés à une distance de 350 à 500 m les uns des autres. Cette nouvelle ligne traverserait des territoires contrastés marqués par des enjeux importants, notamment : l'Arrageois, le Bassin Minier et la Pévèle-Carembault.

Suite à la phase de concertation, des doutes ont été mis en évidence par les élus locaux et les habitants des communes concernées. En particulier, la possibilité d'un enfouissement partiel a été discutée. Par conséquent, durant l'été 2014, RTE a mené une étude complémentaire visant à examiner les contraintes techniques, les impacts environnementaux et les surcoûts d'un enfouissement partiel.
RTE a procédé à l'examen de trois cas d'enfouissement :

- n° 1 : 8 km de liaison souterraine,
- n° 2 : 16 km de liaison souterraine,
- n° 3 : 28 km de liaison souterraine (enfouissement de l'intégralité de la ligne).

Dans le cadre d'analyses plus spécifiques appliquées aux fuseaux identifiés pour la nouvelle ligne Avelin-Gavrelle, RTE a proposé 3 variantes d'enfouissement. Pour chacune d'elles, un poste aéro-souterrain est envisagé à 3 km au sud du poste d'Avelin, entre la commune de Tourmignies et le quartier du « petit Attiches ». Les variantes étudiées sont situées à l'intérieur des fuseaux ouest 1,2 et 3 dans la Pévèle et de l'unique fuseau du bassin minier :

- variante n° 1 : longueur 5 km, le 2ème poste aéro-souterrain serait situé à Mons-en-Pévèle, entre les hameaux de la Navette et de la Pétrie,
- variante n° 2 : longueur 7,5 km, le 2ème poste aéro-souterrain serait situé sur la commune de Moncheaux, à la limite de Leforest,
- variante n° 3 : longueur 10,5 km, le 2ème poste aéro-souterrain serait situé entre les communes d'Evin-Malmaison et Leforest, au sud de la voie ferrée.

Dans tous les cas étudiés par RTE, la technologie à courant alternatif a été prise en compte et des câbles à isolation synthétique (CIS) en cuivre de 2 000 mm^2 ont été proposés pour les solutions enfouies. Une section de 2 500 mm^2 a été proposée pour franchir les obstacles.

Plus récemment, d'autres questions ont été posées par les autorités locales du territoire et les habitants concernant les choix technologiques proposés par RTE.

De ce fait, une expertise indépendante a été demandée pour confirmer les choix de RTE ou pour mettre en évidence d'autres solutions possibles ayant un moindre impact sur le territoire tout en garantissant les performances techniques requises.

2 SOLUTIONS À CABLES POUR LE TRANSPORT DE L'ELECTRICITE

L'énergie électrique est produite à Moyenne Tension aux bornes des unités de génération, puis est transformée à Très Haute Tension (THT) dans les postes de transformation. Ceci permet de réduire les pertes par effet Joule dans la phase de transport. Une fois transportée vers les centres de consommation, l'énergie électrique est à nouveau transformée en moyenne tension pour les consommateurs de grande taille, et en basse tension pour les consommateurs de petite taille, par exemple pour les clients résidentiels.
Le transport de quantités massives d'électricité (de plusieurs 100 MW à quelques GW) sur de longues distances (de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres) est normalement effectué au moyen de lignes aériennes à THT : 220 000 V et 400 000 V en Europe.
En alternative aux lignes aériennes, il est possible de réaliser des liaisons à câbles enterrés pour le transport de l'électricité. Les lignes en câbles sont normalement utilisées pour les réseaux de distribution à basse et moyenne tension dans les agglomérations urbaines, tandis que les lignes en câbles sont de moins en moins utilisées lorsque le niveau de tension augmente. Ceci est confirmé par le rapport [9] du CIGRE[1] publié en 2007, lequel met en évidence que le taux d'enfouissement diminue fortement avec l'augmentation du niveau de tension, avec des valeurs de quelques dixièmes de pourcent pour les câbles du niveau de tension qui nous intéresse (400 kV). À titre d'exemple, si un peu plus de 6% du réseau de tension comprise entre 50 et 109 kV est enterré, ce type de liaison ne concerne que 0,5% des tensions comprises entre 315 et 500 kV.

[1] CIGRE : Conseil International des Grands Réseaux Électriques

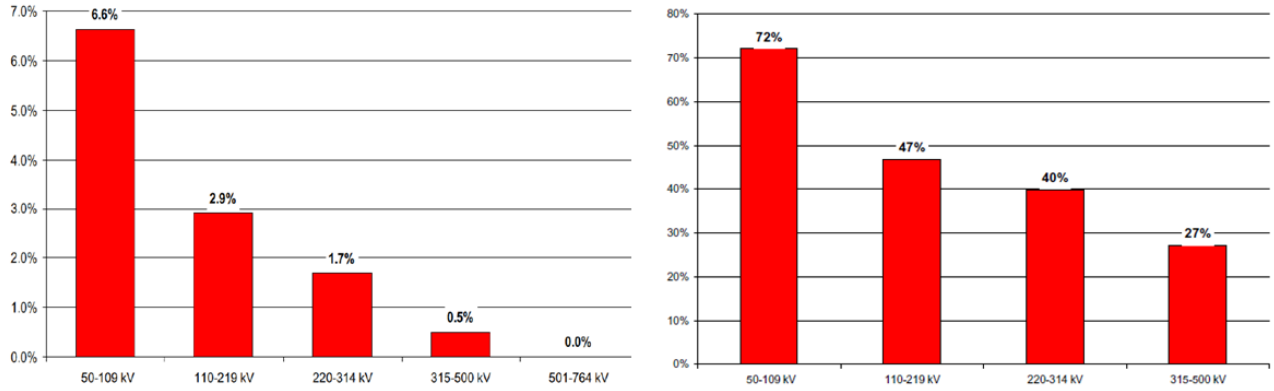


Fig. 2-1 Taux d'enfouissement des lignes en fonction du niveau de tension pour les principaux pays industrialisés(gauche) et taux des câbles à isolation extrudée (droite) (source [9])

L'utilisation de liaisons THT en câbles enfouis se limite encore aujourd'hui à des situations assez exceptionnelles, telles que la traversée de zones fortement urbanisées ou très sensibles du point de vue environnemental sur des distances qui se chiffrent presque toujours en quelques kilomètres. En effet, outre les coûts d'installations, plus élevés pour les câbles THT que pour les lignes aériennes, les liaisons en câbles enfouis présentent des inconvénients liés au contrôle de la tension. Ce problème est dû au fait que la constitution constructive et la disposition physique des conducteurs impliquent que la capacité des câbles est 15 à 20 fois supérieure à celle des lignes aériennes, avec une inductance 4 fois plus basse. Cette différence de paramètres électriques a une influence primordiale sur les longueurs admissibles des lignes aériennes et des câbles : en effet, concernant les niveaux THT, les lignes aériennes peuvent présenter des longueurs de plusieurs centaines de kilomètres (100 à 300 km) sans qu'aucun problème de niveau ou de profil de tension ne se pose. En revanche, dans le cas des câbles à isolation synthétique, les paramètres électriques impliquent une limitation de la longueur à quelques dizaines de kilomètres dans les cas les plus favorables relatifs aux réseaux « forts », c'est-à-dire ayant une puissance élevée de court-circuit.

Au-delà d'une longueur de câble de quelques km, il est nécessaire de prévoir des systèmes de compensation de courant (dit « réactif ») de charge-décharge de la capacité des câbles, constituée par des électrodes formées par le conducteur en tension, les écrans mis à la terre et un diélectrique formé par l'isolation du câble. À cet effet, il sera fait usage de « réactances de compensation » (ou selfs) qui, installées dans des postes jalonnant le parcours du câble ou connectées aux extrémités des câbles, fournissent localement la puissance réactive requise en réduisant les limitations de portée des câbles. La compensation du réactif est particulièrement importante lorsque les charges alimentées sont réduites (dans les périodes creuses). Il faut cependant dire que, en réalité, il n'existe aucune ligne THT en câble ayant une longueur impliquant l'utilisation d'un système de compensation le long de son parcours. Les lignes câblées les plus longues lignes en service sont uniquement compensées à leurs extrémités.

L'utilisation de câbles terrestres en courant alternatif (CA) limitée aux seuls cas exceptionnelles est également t confirmée par le plan de développement ENTSO-E[2] (TYNDP – Ten Year National Development Plan) publié pour consultation en juillet 2014 [7]. Ce plan de développement met en évidence les besoins de renforcement du réseau européen de transport d'ici à 2030 selon quatre scénarios différents. Les résultats de synthèse sont illustrés dans le diagramme ci-dessous, lequel indique une utilisation évidente de la technologie en ligne aérienne dans la quasi-totalité des nouveaux projets de liaisons terrestres de transport (environ 18 000 km de nouvelles lignes), face à quelques centaines de kilomètres en câbles terrestres CA. Dans d'autres projets, les câbles terrestres en courant continu (CC)

[2] ENTSO-E : the European Network of Transmission System Operators for Electricity

sont utilisés (plus de 1 000 km) sachant que la technologie de transport en CC se démocratisera toujours plus compte tenu des avantages qu'elle présente, à savoir un meilleur contrôle des flux de puissance par rapport aux liaisons en CA.
En revanche, les câbles, notamment en CC, sont utilisés pour les liaisons sous-marines, lesquelles devraient être de plus en plus nombreuses dans le futur en raison de la réalisation de fermes éoliennes « off-shore ».

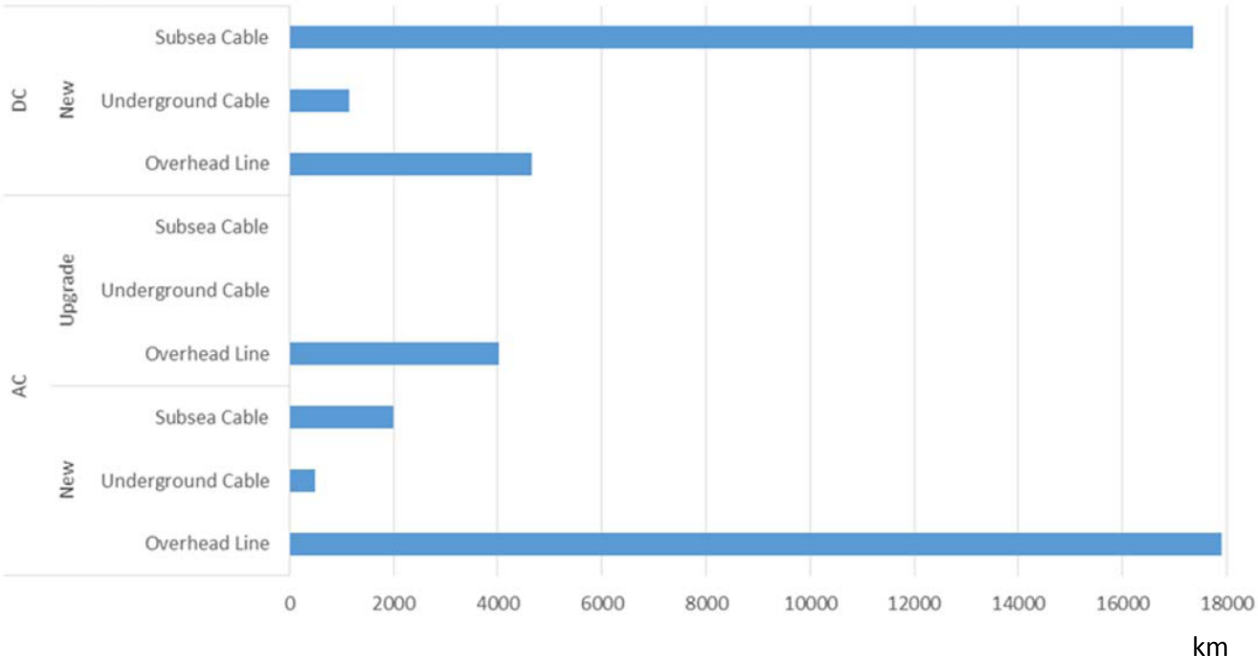


Fig. 2-2 – Prévision de nouvelles lignes et câbles dans le plan ENTSO-E (source ENTSO-E [7])

Les câbles terrestres en THT étaient réalisés en utilisant la technologie « Mass Impregnated », tandis qu'aujourd'hui, il est fait usage de câbles en isolation synthétique (CIS). Les caractéristiques techniques principales et les enjeux environnementaux sont rappelés en Annexe 1. L'expérience d'installation d'un siphon en CIS est présentée ci-dessous (§2.1).
Un aperçu général de la faisabilité et des aspects techniques de l'enfouissement partiel des lignes THT est présenté dans les documents ENTSO-E et Europacable [8].

En réalité, il existe également une autre technologie pour les câbles, à savoir des câbles à isolation gazeuse (CIG ou, en anglais, GIL - Gas Insulated Lines). Les CIG proposent des prestations techniques très différentes de celles des CIS ainsi qu'un impact environnemental différent. La présentation de cette technologie est illustrée au § 2.2, tandis qu'une comparaison entre les technologies CIS et CIG est fournie au § 2.3.

2.1 Expérience d'installation d'un siphon en CIS sur la ligne 400 kV Turbigo (Piémont) -Rho (Lombardie)

La nécessité d'adopter des solutions enfouies même pour les lignes à 400 kV en courant alternatif est plus importante dans les zones densément peuplées. C'est le cas, par exemple, de la Lombardie et, notamment des alentours de la ville de Milan[3] (Fig. 2-3). La section entre la Lombardie et le Piémont

[3] 3,2 millions d'habitants dans la ville et la banlieue.

étant remarquablement congestionnée, et ce depuis les années 1990, une nouvelle ligne aérienne de 380 kV avait été proposée. Il s'agit d'une ligne à simple circuit ayant une capacité de transport comprise entre 2 180 MVA, en hiver, et 1 900 MVA, en été. Suite à une longue phase de concertation, pour faire face aux contraintes environnementales à l'approche de la ville de Milan, la solution finale proposée par le gestionnaire du réseau italien, Terna, était une ligne aérienne à un seul circuit jusqu'aux alentours de la ville avec un siphon de 8,4 km de long. Afin de garantir une capacité de transport identique par rapport à la ligne aérienne, le nombre de tricâbles a dû être doublé, soit un circuit aérien couplé à deux tricâbles. Il a été fait usage de câbles en XLPE dont le conducteur pouvait être exploité jusqu'à une température de 90° C [10] et dont le « design » de dissipation thermique permettait de faire face à des surcharges prolongées. De façon plus détaillée, en partant d'une charge 80 % de la portée nominale, une surcharge de 180 % pendant 5 heures était tolérée.

Le tronçon souterrain réalisé en Italie devait franchir plusieurs obstacles (rivières, routes, gazoducs, voies ferrées et autres lignes électriques à moyenne tension). Cependant, il est important de noter la solution adoptée pour la pose des tricâbles : la majeure partie du tronçon enfoui passe le long des routes avec un tricâble de chaque côté de la route. Ceci permet d'exploiter la ligne, même si cela implique une réduction de la circulation, en cas de défaillance d'un des tricâbles. De plus, l'installation des tricâbles a comporté une perturbation modeste de la circulation routière (restriction d'une voie pendant les travaux, qui, du fait du grand nombre de véhicules, ne pouvait pas être interrompue, surtout le long de la route national du Simplon - Fig. 2-4). Une fois les travaux terminés, l'impact environnemental des tricâbles posés aux bords de la route nationale était pratiquement nul (voir Fig. 2-5).
L'ensemble de la liaison (ligne aérienne et siphon) a été mis en service en 2006.

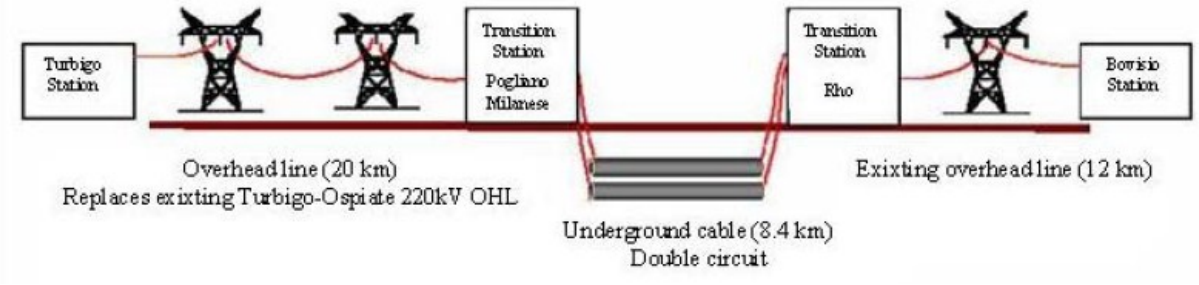


Fig. 2-3 - Siphon installé par Terna sur la nouvelle ligne 380 kV alternatif Turbigo (Piémont)-Rho (Lombardie) (source Terna)

Fig. 2-4 - Phase d'installation d'un tricâble au bord de la Route Nationale du Simplon. La restriction de la voie implique un ralentissement, mais n'empêche pas la circulation à double sens

Fig. 2-5 – Route National du Simplon et bord de la route après l'installation des câbles : ligne Turbigo-Rho, un tricâble 400 kV installé de chaque côté de la route

Il est important de noter que pour la réalisation du siphon le long de la ligne Turbigo-Rho, la construction de deux postes aéro-souterrains a été nécessaire. Ces postes ont à leur tour un impact environnemental en termes d'emprise sur le terrain et au niveau visuel (Fig. 2-6).

Fig. 2-6– Poste de transition aéro-souterrain le long de la ligne Turbigo-Rho

2.2 Câbles à isolation gazeuse (CIG)

Les câbles à isolation gazeuse (CIG) sont essentiellement des tubes métalliques (*Fig. 2-7*) contenant des conducteurs soutenus par des isolateurs de support. L'isolation est assurée par un gaz sous pression (normalement un mélange d'azote -80%- et de SF_6 -20%-).

Fig. 2-7 Tunnel contenant les câbles à isolation gazeuse à Genève

Les lignes à isolation gazeuse offrent une alternative intéressante en cas de subsistance de difficultés quant à trouver l'espace physique pour l'installation d'une ligne aérienne. En effet, cette technologie se caractérise par :

- **la valeur élevée de puissance unitaire transportable** (2 200 – 2 300 MW à 400 kV) permettant de réduire le nombre de lignes parallèles nécessaires pour le transport d'une certaine quantité d'énergie,
- **la possibilité de les installer dans des tunnels,** permettant ainsi de réduire l'impact visuel des lignes électriques utilisant cette technologie, en alternative les CIG sont posés sur le terrain et protégés contre les éventuels dommages externes,
- **la faible valeur de capacité linéaire** (environ 50 nF/km) permettant en théorie la réalisation de lignes de longueur importante (jusqu'à 100 km) sans besoin de compensation réactive (nécessaire pour les connexions en câble souterrain tous le 10-20 km),
- **une valeur de pertes par effet de Joule environ cinq fois inférieure** (résistance environ : 7-8 mΩ/km) par rapport aux lignes aériennes, tandis que les CIS offrent des pertes environ trois fois plus basses que dans une ligne aérienne de la même capacité ;
- **un niveau de champ électrique pratiquement nul et champ magnétique fortement réduit** par rapport aux autres technologies.

La réalisation de CIG est normalement basée sur des solutions monophasées, dans lesquelles chaque tube a un diamètre externe d'environ 500 mm en comparaison avec le diamètre d'un câble à isolation synthétique de 150÷180 mm pour une même puissance et tension de 400 kV. Par conséquent, l'emprise de la tranchée nécessaire pour les CIG par rapport à celle des câbles à isolation synthétique est plus large.

La mise en œuvre de cette technologie demeure aujourd'hui délicate : l'utilisation de tubes implique des tracés rectilignes ou avec des rayons de courbure relativement élevés (supérieurs à 400 m), ainsi que la présence de stations de compartimentage de gaz nécessaires tous les 1 000 mètres. Connus depuis seulement 1974, les câbles à isolation gazeuse représentent un total dépassant les 50 km triphasés au niveau mondial (essentiellement dans les postes de transport), la plus importante longueur en service étant de 3 300 mètres (Japon, 1998) (voir Tab. 2-5).

2.2.1 Enjeux environnementaux des CIG

Impact visuel

L'impact visuel est dû principalement aux nécessités de déboisement : il est donc réduit par rapport aux lignes aériennes. L'impact visuel est similaire à celui des liaisons en câble enfouis à isolation synthétique. Par conséquent, sachant que les CIG ont une capacité de transport supérieure aux CIS, à capacité de transport identique, un nombre inférieur de circuits est nécessaire. Notamment dans le cas de la ligne Avelin-Gavrelle, deux circuits en CIG seraient nécessaires par rapport aux six circuits en CIS selon une estimation de RTE.

Impact sur la surface de terrain occupée

La surface de terrain occupée représente une bande de 15-17 mètres de largeur, incluant la bande au-dessous des deux CIG (environ 11 m) et les espaces latéraux permettant un accès permanent (environ 4-6 m).

Ces éléments structuraux comportent une limitation d'utilisation du sol et constituent, avec celui sur la flore et la faune, l'impact principal de cette technologie sur l'environnement.

En phase de construction, la surface de terrain occupée par la construction de CIG est équivalente à un front d'environ 50 m avançant le long du tracé, et permettant l'excavation de la tranchée dans laquelle les tubes seront installés, le dépôt du terrain excavé et le terrain nécessaire pour la couverture des tubes.

Il s'agirait également de prévoir des aires destinées au dépôt définitif du surplus de terrain excavé représentant, pour une longueur de 30 km de ligne, un volume de l'ordre de 240 000 mètres cube (deux CIG).

Les tubes, présentés en tronçons de 15-20 mètres de long, doivent être soudés sur place dans des hangars à l'abri de la poussière (voir un exemple en Fig. 2-8).

Fig. 2-8 - Exemple de soudage des tronçons des tubes (source Siemens)

D'autre part, les routes existantes devront être adaptées au passage des poids lourds. La nécessité d'accès d'un nombre important de poids lourds implique toute une série d'impacts sur l'environnement tel que la disponibilité de routes adéquates (largeur, tenue au passage des poids lourds), la pollution atmosphérique et l'augmentation du bruit, même si cela ne concerne que les heures ouvrables.

Un exemple de section pour la tranchée de deux circuits CIG directement enfouis est présenté sur la figure Fig. 2-10. Pour les remarques concernant la phase d'installation et les contraintes permanentes sur le terrain, voir le § 2.5.

Impact sur l'atmosphère

L'utilisation du gaz SF_6, puissant gaz à effet de serre[4], comporte très certainement des risques pour l'atmosphère, particulièrement en cas d'accident ou de perte de gaz durant le cycle de vie de la liaison. L'expérience acquise grâce aux installations existantes nous apprend cependant que ces risques sont en réalité très modestes pour les installations en tunnel et au-dessous du sol. On a un retour d'expérience limité pour les installations enfouies qui sont plus rares.

De plus, en fin de vie utile, le gaz est récupéré et reconditionné. Cette action peut être effectuée loin de la zone concernée, diminuant ainsi les risques liés à la qualité de l'air.

Impact sur la végétation et la faune. Interférence avec les eaux superficielles et souterraines

S'agissant d'une technologie souterraine, les interférences avec les eaux superficielles et souterraines ne doivent pas être négligées, principalement dans des zones à haute exploitation des nappes aquifères à des fins agricoles. De plus, la traversée de cours d'eaux d'une certaine importance peut constituer un élément dont il faut tenir compte, non seulement d'un point de vue technique, mais également en termes des différentes utilisations possibles et de la présence d'une faune aquatique.

Toutefois, ces facteurs sont également valables en présence de câbles enfouis en isolation synthétique.

En revanche, avec un CIG installé en surface, aucune interférence avec les nappes d'eaux souterraines ne serait susceptible de se produire. Notons cependant que cela constituerait un barrage pour la faune.

Champs électromagnétiques

Concernant les champs électriques, la présence de l'enveloppe du CIG mise à la terre offre un blindage complet des champs électriques générés par le conducteur à haute tension. Le blindage persiste également durant les phases de transitoires de tension même si nous constatons que ces transitoires peuvent provoquer des augmentations du potentiel de terre à proximité du CIG.

Concernant les champs magnétiques, un CIG avec enveloppes monophasées, dans la quasi-totalité des cas, implique la mise à la terre aux deux extrémités du CIG avec installation d'enveloppes entre elles. Ceci détermine la circulation de courants dans les enveloppes, tendant à annuler le champ magnétique généré par le conducteur. En réalité, en raison de la disposition spatiale des phases, le blindage n'est pas total. L'induction magnétique à 1 m du sol pour une ligne CIG à 3 000 A n'atteint pas les 3 μT. À déjà 10 m de l'axe de la ligne, le champ magnétique présente des valeurs inférieures à 0,2 μT.

Le diagramme de la Fig. 2-9 illustre le niveau de champs magnétiques pour une même intensité de courant dans les trois solutions : CIS, ligne aérienne et CIG. Il est bien évident que dans le cas des CIG la pollution magnétique est pratiquement nulle.

[4] 1 kg de SF_6 est équivalent, en termes d'effet de serre, à environ 24 000 kg de CO_2

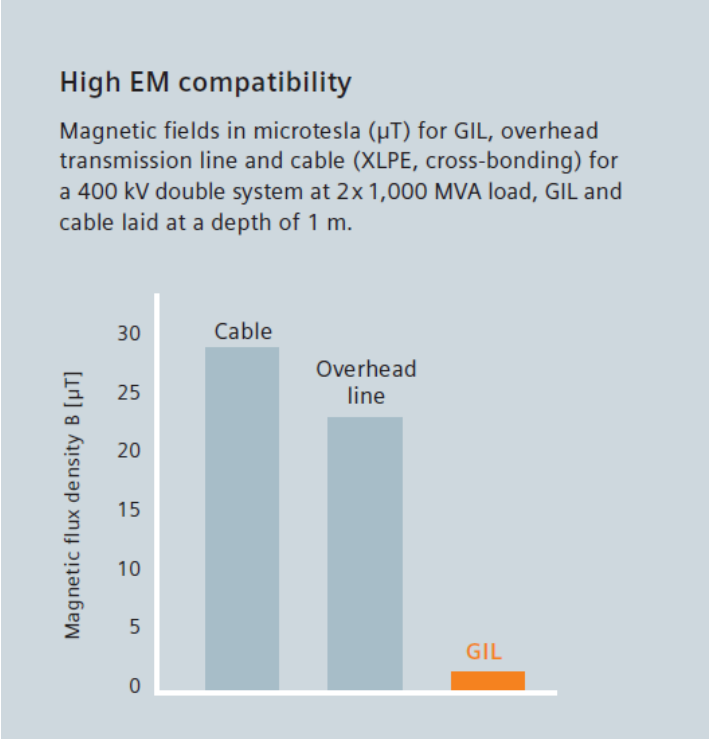


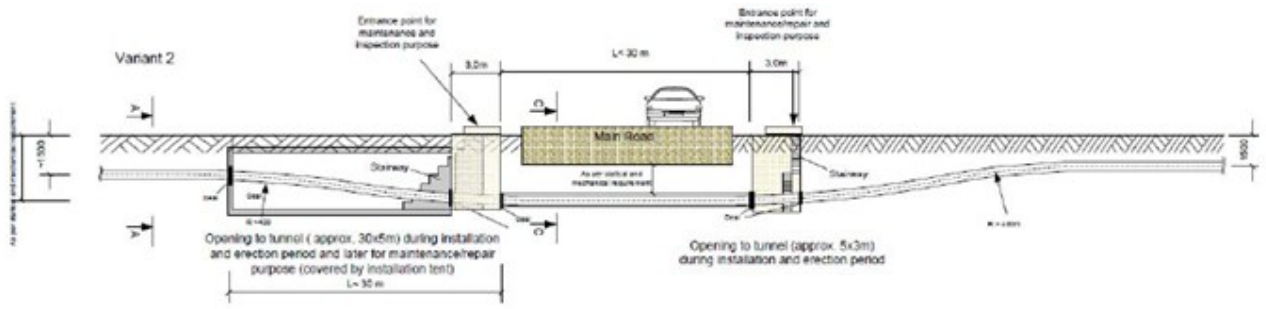
Fig. 2-9 – Comparaison des champs magnétiques en cas de CIS, lignes aérienne et CIG (source Siemens)

2.2.2 Coûts pour la réalisation des CIG

L'estimation des coûts unitaires pour la réalisation de deux circuits CIG (solution requise pour la ligne Avelin-Gavrelle) est la suivante :

- 2 systèmes triphasés de CIG en parallèle, incluant les éléments angulaires, les unités d'extension, les unités de surveillance du gaz, les supports en acier aux extrémités, la mise à la terre, le remplissage du mélange N_2-SF_6, l'emballage, la livraison : 5 M€/km
- supervision de l'installation et mise en service : 1 M€ pour chaque kilomètre
- fourniture d'outils spéciaux (grues, bulldozers, pelles mécaniques) en location (« rental basis ») : 0,4 M€ en considérant le temps nécessaire pour l'installation d'un kilomètre de 2 systèmes triphasés de CIG (*)
- ouvrages de génie civil : à partir de 1 M€/km par tranchée de 9-10 m. Cependant cette valeur dépend considérablement des conditions locales du terrain et de la présence d'éventuels obstacles à franchir. Pour franchir des obstacles on pourrait avoir la nécessité de devoir construire des tunnels dans le cas des CIG, au lieu que de faire des forages dirigés comme dans le cas des CIS. D'autres solutions consistent dans le passage des tubes métalliques (de 500mm diamètre) dans des tubes de l'enceinte en béton de dimensions intérieures d'environ ~ 800mm diamètre, comme dans le schéma montré ci-dessous à titre indicatif.

(*) Il s'agit d'une estimation très générale, puisque cet élément du coût est lié plus aux temps d'installation que à la longueur des CIG.



2.3 Comparaison entre les technologies CIS et CIG

Ce paragraphe présente une comparaison entre les caractéristiques des CIS et des CIG. Les aspects suivants sont analysés dans les comparaisons :

- performances électriques
- champs électromagnétiques
- autres facteurs concernant l'impact environnemental.

Performances électriques

Deux aspects doivent être pris en compte dans l'analyse des caractéristiques des lignes aériennes et des tronçons enfouis des lignes mixtes : la possibilité de surcharge et l'éventuelle nécessité de compensation de puissance réactive.

Concernant les lignes aériennes la possibilité de surcharge est très limitée (avec un maximum de 10 à 20% pendant quelques minutes) en raison de la faible capacité thermique et de l'allongement des conducteurs. En revanche, pour les câbles en isolation synthétique ou en gaz, une surcharge transitoire très importante est acceptée (jusqu'à 100% pendant plusieurs minutes voire quelques heures).

En ce qui concerne la compensation de puissance réactive, la solution en CIG est bien plus favorable que celle en CIS en raison de sa faible capacité vers la terre, soit seulement 4-8 fois plus grande que celle des lignes aériennes et environ 4 fois plus faible que celle des CIS.

En revanche, les CIS, et surtout les CIG, offrent une impédance très réduite par rapport aux lignes aériennes. Cet aspect est favorable en cas de connexion à antenne, mais dans un réseau s'étendant sur quelques kilomètres, l'installation d'une inductance longitudinale doit être prévue pour éviter un déséquilibre des flux de puissance susceptibles de générer des surcharges sur la liaison CIS ou CIG.

Les tableaux suivants fournissent une vision générale des paramètres électriques des CIG et CIS.

Tab. 2-1 – Paramètres de « séquence positive » des CIG et des CIS

A1) *Unipolaire* « ***solid bonded*** » *posé horizontalement - fréquence 50 Hz - température 65º C*

Type de câble	I_n [A]	Taille [GVA]	Résistance [Ω/km]	Inductance [mH/km]	Réactance [Ω/km]	Capacité [ηF/km]	Remarques
CIG (Φ= 500mm)	4341	3.0	0.0037	0.16	0.0503	110	*enfoui*

B1) Unipolaire « *cross bonded* » *posé horizontalement - fréquence 50 Hz - température 65º C*

Type de câble	I_n [A]	Taille [GVA]	Résistance [Ω/km]	Inductance [mH/km]	Réactance [Ω/km]	Capacité [ηF/km]	Remarques
XLPE (S= 1600mm²) [*]	1443	1.00	0.0160	0.610	0.192	180	*enfoui*
XLPE (S= 2000mm²) [*]	1804	1.25	0.0125	0.568	0.178	203	*enfoui*
XLPE (S= 2500mm²) [*]	2165	1.50	0.0100	0.550	0.173	220	*enfoui*

[*] = sans courant de retour dans les écrans

Étant donné les caractéristiques électriques rappelées ci-dessus, une comparaison entre les deux solutions est présentée dans la Tab. 2-2. Le Tab. 2-3 propose une comparaison des champs électromagnétiques.

Tab. 2-2- Comparaison entre les solutions CIS et CIG : performances électriques

Performances électriques		
	CIS	***CIG***
Capacité de transport	➢Limitée à environ 1,2 GVA à 400 kV ➢Puissance active transportée très affectée par la puissance réactive produite par la capacité des câbles.	➢Jusqu'à 2,2 à 2.3 GVA à 400 kV
Compensation de puissance réactive	➢Nécessité de compensation de puissance réactive en fonction de la longueur du câble et de la valeur de la puissance de court-circuit aux extrémités du câble	➢Aucune compensation de puissance réactive n'est nécessaire pour les longueurs actuellement utilisées (de l'ordre de quelques kilomètres)
Pertes	➢Pertes réduites, environ trois fois inférieures à une ligne aérienne de même capacité	➢Pertes très réduites, environ cinq fois inférieures à une ligne aérienne de la même capacité
Surcharges	➢Bonne capacité de surcharge transitoire, même jusqu'à 100% de la capacité nominale pour une durée limitée (plusieurs minutes/quelques heures). Cependant, ce niveau dépend des conditions précédentes de charge du câble (et donc de sa température)	➢Bonne capacité de surcharge transitoire, même jusqu'à 100% de la capacité nominale pour une durée limitée dépendant de la conception et des requis
Ré-enclenchement suite aux pannes	➢Le ré-enclenchement n'est pas possible ➢Donc, ligne hors service en permanence suite à une panne, même transitoire	➢Possibilité de ré-enclenchement suite à une panne
Paramètres électriques	➢Capacité vers la terre environ 10-15 fois supérieure aux lignes aériennes, impliquant des difficultés dans le contrôle de la tension ➢Inductance environ 25%-30% inférieure aux lignes aériennes, impliquant un risque de surcharge des câbles dans les réseaux maillés en cas de câbles très longues ➢Résistance : environ un tiers de celle d'une ligne aérienne équivalente	➢Capacité vers la terre 4-8 fois supérieure aux lignes aériennes. Pas de difficultés dans le contrôle de la tension ➢Inductance environ 70%-80% inférieure à celle typiquement rencontrée sur une ligne aérienne. L'insertion des CIG dans un réseau maillé perturbe considérablement les flux de puissance ➢Résistance : environ 5 fois inférieure à une ligne aérienne

Tab. 2-3- Comparaison des caractéristiques électromagnétiques des CIS et CIG

Champs électromagnétiques		
	CIS	***CIG***
Champ magnétique	➢Le champ magnétique à 1 mètre du sol ne dépasse les 10 µT à l'aplomb du câble avec un courant de 2 000 A, mais il décroît très rapidement dès qu'on s'en éloigne (divisé par 5 à 5 mètres et par 15 à 10 mètres). ➢Le champ augmente en direction du sol	➢Très réduit, pratiquement nul.
Champ électrique	➢L'effet d'écran exercé par les gaines conductrices des câbles permet d'annuler le champ électrique.	➢Pratiquement nul grâce à l'enveloppe du CIG mise à la terre.

En ce qui concerne l'impact environnemental, notamment l'impact visuel, les postes de transition aéro-souterrains, etc., les solutions en CIS et CIG sont similaires.
Il est cependant important de noter une majeure difficulté quant au franchissement des obstacles en cas de CIG. Par exemple, traverser une route ou une voie ferrée implique obligatoirement la construction de tunnels à la place de forages orientés dans le cas de CIS.

2.4 Principales installations en câbles THT récemment achevées

Ce chapitre donne un aperçu des principaux projets déjà réalisés dans le cadre de liaisons avec câbles THT à courant alternatif (Tab. 2-4 et Tab. 2-5). Les observations suivantes peuvent être faites :

- la majorité des installations est réalisée en milieu urbaine où il est très difficile trouver des passages pour les lignes aériennes,
- les installations sont généralement effectuées par le biais de tunnels,
- dans la grand majorité des cas, il s'agit de lignes mixtes (aériennes avec siphon).

Une description complète des principales installations avec câbles THT à l'échelle mondiale est disponible dans la brochure CIGRE n° 338 [9].

Pour ce qui est des CIG, on a fait référence notamment aux installations de Siemens, qui a mis à la disposition les données clés de ses installations.

Tab. 2-4 – Caractéristiques des principales installations à câbles THT à isolation synthétique (CIS) (partie 1)

Emplacement	***Tension [kV]***	***Capacité [MVA]***	***Longueur géographique [km]***	***Notes***
Berlin (Allemagne)	400	1 100	6.3	Deux tricâbles (2 x 1 600 mm^2) en tunnel, installés en décembre 1998. Possibilité de surcharge jusqu'à 1 x 1 600 MVA pendant 2 heures ou 2 x 1 100 MVA pendant 6 semaines (température du câble 90° C). En juillet 2000, un second tunnel a été réalisé à Berlin et une nouvelle ligne de 5,4 km de long a été mise en service.
Copenhague (Danemark)	400	975	12+9 km (2 tronçons, sud ville)	Tricâble (1 600 mm2) posé directement dans une tranchée de 1,5 m de profondeur. Présence de compensation de la puissance réactive. En service depuis fin 1997.
Copenhague (Danemark)	400		10 km (nord ville)	Tricâble (1 600 mm2) posé directement dans le sol. En service depuis 1999.
Barajas-Madrid (Espagne)	400	2 x 1 700	12	Deux tricâbles (2 x 2 500 mm^2) posés en tunnel. En service depuis février 2004.
Londres : projet Estree (Angleterre)	400	1 600	20	Câbles (2 500 mm^2) posés en tunnel ventilé pour accroître la capacité de transport de puissance. En service depuis juillet 2005.
Nunthorpe-Newby (Angleterre)	400	2 418/ 2 430	5.7	Deux tricâbles (2 x 2 500 mm^2) directement enterrés en milieu extra-urbain. En service depuis 2004.
Pogliano-Rho (Italie)	400	1 600	8.4	Deux tricâbles (2 x 2 000 mm^2) directement enterrés. Solution nécessaire en raison de l'impossibilité de trouver un passage pour une ligne aérienne à 400 kV dans la banlieue de Milan. En service depuis 2006

Tab. 2-5 – Caractéristiques des principales installations à câbles THT à isolation synthétique (CIS) (partie 2)

Emplacement	***Tension [kV]***	***Capacité [MVA]***	***Longueur géographique [km]***	***Notes***
Vienne	400	600/1 040	5.2	Deux tricâbles (2 x 1 200 mm^2) en tunnel. La capacité des câbles peut être augmentée de 600 MVA à 1 040 MVA grâce à un système de refroidissement avec tubes d'eau. En service depuis novembre 2005
Aalborg-Arhus : projet ELTRA (Denmark)	400	1 000	14.5 (3 siphons de : 2.5, 4.5 et 7.5 km)	Ligne mixte aéro-souterraine avec trois siphons. Tricâble (1 200 mm^2) directement enterré. Notons que la capacité totale des siphons est inférieure à celle de la ligne aérienne (2 000 MVA). En service depuis août 2004.
Nieuwe Waterweg et Calandkanaal crossing (Pays Bas)	380	1 645	2.25	Deux tricâbles (2 x 1 600 mm^2) avec pose en tunnel sous-marin et refroidissement avec circulation d'eau. Solution à câble choisie en raison de l'impossibilité de construire des lignes aériennes dans le port de Rotterdam. En service depuis 2005
Goldisthal centrale de pompage (Allemagne)	380	4 x 400	0.4	Quatre tricâbles (4 x 630 mm^2) avec pose en tunnel pour connecter la centrale de pompage (1060 MW) de Goldisthal (Thueringen) au reste du réseau de transport allemand. En service depuis 2002 (1ère phase) et achèvement en 2004.
Shinkeiyo Toyosu (Japon)	500	2 x 900	39.8	Double circuit de câbles (2 x 2 500 mm^2). En raison de la longueur de la liaison, des réactances pour la compensation du réactif ont été nécessaires. En service depuis 2001.
Mendrisio (Switzerland) – Cagno (Italy)	400	560	8	Ligne marchande d'interconnexion directement enterrée. En service depuis 2008
Kirky-Lister Drive (Royaume Uni)	400	750	10	Ligne de fourniture d'électricité de la ville de Liverpool en solution mixte : enfouissement direct et tunnel. En service depuis 2010

Tab. 2-6– Caractéristiques des principales installations en câbles THT à isolation gazeuse (CIG) –

Emplacement	***Projet/Utilisateur***	***Année de mise en service***	***Capacité [MVA]***	***Tension [kV]***	***Longueur géographique [m]***	***Notes***
Arabie Saoudite	SEC, Rabig	2015	2290	420	500	2 systèmes
Royaume Uni	National Grid	2014	2910	420	85	3 systèmes sur sol bridés
Malaisie	TNB, Air Tawar Janamanjung	2014	3810	550	270	2 systèmes sur sol bridés
Chine	China Three Gorges Project Corporation, Xiluodu	2013	. 4300	550	**607**	**la plus grande capacité** (avec **500mm** diamètre du tube) 7 systèmes verticaux 4300 MVA chacun installation caverne 100% SF6
Chine	Yalong River Hydrop. Development. Co. Jinping I	2013	3810	550	367	3 systèmes installation caverne vertical (230m)
Allemagne	SWM Munchen Langwield	2013	2910	420	400	2 systèmes Tunnel
Arabie Saoudite	SEC-COA, Shoaibah	2013	2290	420	47	6 systèmes sur sol bridés
Dubaï	Dubai Electricity and Water Authority, series reactors	2012	2910	420	122	3 systèmes sur sol bridés
Dubaï	Dubai Electricity and Water Authority, LM station	2012	2910	420	467	1 système sur sol bridé
USA	Northeast Utility Service Co, Agawam	2012	1790 820	345 115	64 111	4 systèmes tunnel bridés
USA	Northeast Utility Service Co, Bloomfield	2012	1790	345	74	1 système tunnel bridés
Royaume Uni	National Grid, Stella West	2010	2910	420	140	3 systèmes sur sol bridés
Allemagne	Amprion, Kelsterbach, Frankfurt airport area	2010	2x2255	420	1000	2 systèmes directement enterrés dans une tranchée

						80%N2, 20%SF6
Autriche	Austria Hydro Power Limberg II	2010	727	420	160	1 system tunnel soudé
Arabie Saoudite	Saudi Consolidated Electricity Co, S/S 9023	2010	2290	420	1750	4 systèmes sur sol bridés
Dubaï	Dubai Electricity and Water Authority, TRSD	2010	1820	420	62	3 systèmes sur sol bridés
Dubaï	Dubai Electricity and Water Authority Car Complex	2010	1820	420	99	3 systèmes sur sol bridés
Allemagne	RWE, Kelsterbach	2009	2000	420	900	2 systèmes enterré soudé
Chine	Huanghe Laxiwa	2009	5540	800	458	**le premier CIG à 800 kV** 2 systèmes tunnel (vertical 209m) 100% SF6
Dubaï	Dubai Electricity and Water Authority, Warsan	2007	1820	420	338	4 systèmes sur sol soudés
Inde	Tehri Hydro Develop Corp. Tehri Hydro Project	2006	1450	420	758	2 systèmes tunnel bride
Royaume Uni	Hams Hall	2005	2230	420	500	dans l'air sur structures en acier, puis enterré 80%N2, 20%SF6
Egypte	Electric Power Co Cairo North	2004	1340	245	308	2 systèmes dans l'air sur structures en acier soudé 100% SF6
Royaume Uni	National Grid Transco Elstree, London	2004	2910	420	125	2 systèmes en partie dans l'air et en partie souterraine
Arabie Saoudite	PP9	2004	8x870	420	708	8 systèmes 5m-dessus du sol sur structures en acier 100% SF6

Installations antécédentes à l'année 2014						
Thaïlande	Electric Generating Authority of Tahiland Sai Noi, Bangkok	2002	3800	550	525	2 systèmes sur sol soudés 40%N2, 60%SF6
USA	Baxter Wilson PP	2001	4290	550	625	2 systèmes dans l'air au-dessus du sol sur structures en acier 100% SF6
Suisse	Alpiq PalExpo, Halle 6, Genève	2001	760	220	**633**	**le premier mélange gazeux N2 / SF6** dans le monde 2 systèmes tunnel soudés 80% N2, 20%SF6
Japon	Shin-Meika Tokai line	1998	2850	275	**3300**	**l'installation la plus longue** 2 systèmes tunnel 100% SF6
Egypte	Egyptian Electricity Authority Itay el Baroud	1993	530	245	112	2 systèmes sur sol bridés
Singapour	Public Utilities Board Senoko	1993	850	245	67	2 systèmes tunnel bridés
Indonésie	Perusahaan Umum Listrik Negara PLN Gresik Power Plant	1992	1000	150	383	2 systèmes sur sol bridés
Allemagne	Stadtwerke München HKW Nord	1990	727	420	267	1 système tunnel soudé
Arabie Saoudite	Saudi Consolid. El. Co. in the West. Region Rabigh Ext.	1988	1820	420	83	2 systèmes sur sol bridés
Canada	Ontario Hydro Bowmanville	1985-87	3810 6000 7620	550	**383** **141** **534**	**la plus grande capacité** (avec un diamètre de tube de **600mm**) 3 systèmes au-dessus du sol sur structures en acier bridé

						100% SF6
Allemagne	NecKarwerke Altback	1985	727	420	267	1 système tunnel soudé
Arabie Saoudite	Saudi Consolid. El. Co. in the West. Region Yanbu	1984	1820	420	167	2 systèmes sur sol soudés
Arabie Saoudite	Saudi Consolid. El. Co. in the West. Region Rabigh	1984	1820	420	56	3 systèmes sur sol soudés
Allemagne	Badenwer, Steampower station unit 7	1982	727	420	267	1 système tunnel
Norvège	Statkraft (NVE) RoD	1981	1636	300	37	1 système sur sol
Arabie Saoudite	SNEC Jeddah	1981	1820	420	50	2 systèmes sur sol
Libye	Deutsche Babcock AG for Ministry of Electr. Homs PS	1980	340	245	67	4 systèmes sur sol
USA	Joshua Falls	1978	502	145	567	1 système **la première enterré** 100% SF6
Namibie	Swawek Windhoek Ruacana	1976	500	362	133	2 systèmes verticaux (115 m) soudés 100% SF6
Allemagne	Schluchseewerk AG Wehr	1975	1820	400	667	2 systèmes tunnel soudé 100% SF6
Iran	Atomic Energy Organization Nuclear PS Iran 1	-	1160	420	617	2 systèmes tunnel
Longueur totale (m)					**20368**	

2.5 Réponses et remarques aux questions posées sur l'utilisation des CIS et de CIG pour la ligne Avelin-Gavrelle

L'utilisation de solutions en câbles pour la reconstruction de la ligne Avelin-Gavrelle en alternative à un double circuit aérien comporte :

- Câbles à isolation synthétique : installation de six circuits de câbles
- Câbles à isolation gazeuse : installation de deux circuits de câbles afin de garantir des conditions de sécurité N-1 identiques à celles de la ligne aérienne en double circuit[5].

La première solution a été examinée en détail par RTE en [5].

Une évaluation de l'utilisation d'un tronçon en CIG le long de la ligne Avelin-Gavrelle est fournie ci-dessous en référence aux questions posées durant la phase de concertation.

ÉTAT ACTUEL DE MATURITE DE LA TECHNOLOGIE CIG

En raison de ses caractéristiques, la technologie CIG implique d'importantes marges concernant les surtensions et les surcharges par rapport aux valeurs de dimensionnement. La technologie s'est montrée fiable pendant près de 39 ans, avec de très bonnes performances et les premières installations construites sont encore en service. En effet, cette technologie ne présente pas de parties actives tels que des disjoncteurs, etc., et le système ne change pas beaucoup durant les décennies. Selon le retour d'expérience, les défaillances sont très rares, et si elles se produisent, elles sont généralement liées à des erreurs faites au moment de l'installation, ou résultant de causes externes. Par conséquent, la technologie CIG peut être considérée comme mûre.

En termes de niveau de maîtrise lors de l'installation, des instructions guident le travail du responsable et de l'équipe. Les résultats des travaux sont vérifiés en appliquant un plan d'assurance qualité avec enregistrements obligatoires. Ceci inclut des essais de routine chez les sous-fournisseurs et dans les usines (ex : contrôles des matériaux, essais électriques, essais de décharges partielles appliquées à des isolateurs individuels, etc.), essais sur site accompagnant l'installation des composants (ex : vérification de la qualité de soudage par essai de couture à 100%, liste des numéros de série pour re-traçabilité des matériaux, etc.), et même des essais sur site et réception finale (incluant les vérifications de la conductivité des conducteurs, les essais HT, les contrôles de décharges partielles etc.).

Durant le fonctionnement, la philosophie de contrôle adoptée par l'opérateur peut être adaptée en proposant différents systèmes de surveillance, comme par exemple :

- surveillance en temps réel des décharges partielles
- surveillance de la température
- surveillance de la densité du gaz
- capteurs de SF_6.

Cependant, la décision du niveau de contrôle à adopter relève de l'opérateur, c'est-à-dire de l'investissement qu'il est prêt à prendre en charge sachant que tous les systèmes de surveillance doivent être entretenus plus souvent que les CIG. L'entretien des CIG peut se limiter à des contrôles externes tous les 9 ans. L'échantillon de gaz sera prélevé à l'extérieur et le CIG pourra rester en fonctionnement sans besoin d'être ouvert pour l'entretien régulier.

[5] En cas de panne d'un CIG la puissance peut transiter sur l'autre câble, de façon similaire à la situation d'un défaut sur l'un des deux circuits de la ligne aérienne.

ÉVOLUTION DE LA TECHNOLOGIE CIG

La première génération de CIG doit être entendue comme une solution dans laquelle les câbles sont complètement isolés au moyen de SF_6, avec unités élémentaires soudées ou bridées mais sans capacité élastique des tubes d'aluminium. La première application de cette génération remonte à 1975 avec une longueur de 700 m à 420 kV pour 2 000 A installée dans un tunnel. Le CIG a été construit pour relier la station de pompage de Schluchseewerke (Allemagne) au réseau électrique. Ce système est encore en fonctionnement aujourd'hui.

En 1994, le développement de la deuxième génération commence, avec des solutions techniques et d'installation permettant de réduire le coût global de 50% par rapport à la première.

La deuxième génération présente des câbles isolés par mélange gazeux de N_2 et SF_6, avec unités élémentaires pouvant être soudées ou bridées et une capacité de courbure élastique jusqu'à un rayon minimum de 400 m.

La première application de la deuxième génération CIG remonte à 2001, avec l'installation Palexpo à Genève.
Le Tab. 2-6 illustre les principales installations CIG de Siemens, actuellement le plus grand producteur du marché pour cette technologie ainsi que le plus référencé.

En examinant la liste des installations, on constate que la production de CIG totalise à ce jour environ 150 km d'unités monophasées, tandis que celle des 10 dernières années est d'environ 97 km.

UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE POUR LA GESTION DES RESEAUX ELECTRIQUES DE TRANSPORT

La liste des applications fournie dans le tableau ci-dessus montre le degré d'utilisation de la technologie CIG en matière de transport de l'énergie dans les réseaux de transport.

La distribution des longueurs (en mètres) de CIG installées par zone géographique résulte la suivante :

Région	1F* [m]	3F** [m]	Longueur géographique [m]
Moyen-Orient	67368	22456	5486
Europe	28869	9623	5448
Asie	50616	16872	6735
Amériques	9897	3299	2499
Afrique	1602	534	200
Total	158352	52784	20368

** longueur totale des tubes individuels*
*** ternes équivalentes*

La répartition des longueurs des tubes par zone géographique, en pourcentage (%), est donc :

	Moyen-Orient	Asie	Europe	Amériques	Afrique
ternes équivalentes	43%	32%	18%	6%	1%
longueur géographique	27%	33%	27%	12%	1%

Dans les zones géographiques indiquées les pays suivants sont inclus:

- Afrique: Libye, Namibie
- Amériques: Canada, USA
- Asie: Chine, Inde, Indonésie, Japon, Malaisie, Singapour, Thaïlande
- Europe: Allemagne, Autriche, Royaume Uni, Norvège, Suisse
- Moyen-Orient: Arabie Saoudite, Dubaï, Egypte, Iran.

Les installations CIG sont réparties selon la distribution suivante :

- selon le type d'installation:

	ternes équivalentes	longueur géographique
sur sol	50 %	43 %
en tunnel	41 %	45 %
enterré dans une tranchée	9 %	12 %

- selon le nombre de connexions parallèles:

Nombre	1	2	3	> 3
%	10 %	50 %	1 %	39 %

On observe que la configuration la plus commune, soit 50% des cas, est celle consistant en deux lignes CIG installées en parallèle, tandis que celles contenant plus de trois branches en parallèle, comprenant jusqu'à un maximum de 8, représentent environ 40%.

En ce qui concerne le type d'installation, la solution la plus courante, soit 50% des cas, est en extérieur, suivi par des installations en tunnel, et finalement en tranchées.

Parmi les raisons impliquant le choix d'une connexion CIG, on peut citer les suivantes :

- connexion entre centrale hydroélectrique et poste de transformation
- ligne passante sous ligne aérienne dans un poste de transformation
- protection contre conditions environnementales très difficiles des zones désertiques
- remplacement de ligne aérienne
- traversée de rivière.

POURCENTAGE DE SF_6 ET D'AZOTE DANS LE CIRCUIT

L'espace entre le conducteur et l'enveloppe métallique est rempli d'un gaz électriquement isolant à une pression de 0,7-1 MPa.

Le gaz isolant contient de l'hexafluorure de soufre (SF_6) et un gaz inerte, non toxique, non inflammable : l'azote (N_2). La rigidité diélectrique du SF_6 est d'environ trois fois celle de l'air à pression atmosphérique. Dans un CIG, le SF_6 est aujourd'hui principalement utilisé en mélange avec de l'azote. L'addition de 20% en volume de SF_6 à l'azote produit un mélange de gaz isolant qui, avec une augmentation de pression de 45%, est comparable à celle du SF_6 pur.

Dans le cas d'un système à 400 kV avec une enveloppe de 500 m de diamètre, environ 13,9 tonnes de SF_6 pur à 0,55 MPa sont nécessaires par kilomètre. Un mélange gazeux N_2 / SF_6 composé de 80% N_2 et 20% SF_6 à 0,8 MPa donnant une rigidité diélectrique identique ne nécessite qu'environ **4 tonnes/km** de SF_6, à savoir 29% de SF_6 par rapport à une isolation entièrement obtenue avec du SF_6.

En raison de l'étanchéité de l'enveloppe métallique, du recyclage et de la réutilisation du mélange de gaz isolant de SF_6 et N_2 en fin de vie utile, l'impact environnemental est négligeable.

CARACTERISTIQUES DES CIG POUR LE TRANSPORT DE 4600 MW

Compte tenu des caractéristiques électriques de la connexion 4 600 MW à 400 kV, une solution CIG susceptible de répondre aux besoins serait un système constitué de deux lignes parallèles de 2 300 MW à 400 kV chacune avec :

- conduit enveloppe métallique (tube) externe en aluminium de 500 mm de diamètre
- conducteur de puissance en aluminium de 180 mm de diamètre
- enveloppe de 8 mm d'épaisseur
- conducteur de 8 mm d'épaisseur
- mélange de gaz contenant 20% de SF_6 et 80% de N_2 à 0,7 MPa de pression.

Les tronçons devant être installés et présentant les caractéristiques ci-dessus ont généralement un poids de 25 kg/m pour 20 m de longueur. L'élasticité des matériaux permet un rayon de courbure intrinsèque pouvant atteindre 400 m.

Dans le cas d'un CIG enterré, une configuration type de tronçon de tranchée pour la pose de deux lignes triphasées est représentée sur la figure ci-dessous (fournie par Siemens).

La tranchée destinée à la pose des conduits présente une section trapézoïdale de 10,6 m x 6,8 m et une profondeur 1,92 m. Les 6 conducteurs sont posés à une profondeur de 1,7 m en respectant une distance de 1,1 m entre eux.

Au cours de la phase d'installation, une voie d'accès pour les véhicules de chantier sera nécessaire en bordure de la tranchée dans laquelle seront installés les CIG. Un espace supplémentaire sera nécessaire pour le stockage intermédiaire des terres excavées. Cet espace sera libéré une fois l'installation achevée.

Dans le cas de systèmes CIG enterrés, les contraintes dont il faut tenir compte sont identiques à celles des CIS. La surface au-dessus de la ligne peut être exploitée avec des plantes à racines peu profondes. Les plantes à racines profondes doivent quant à elles être décalées au-delà d'une bande de protection, comme indiqué sur la Fig. 2-10.

Si le terrain au-dessus du CIG doit être labouré, le CIG doit alors être installée plus en profondeur. Ceci est possible en théorie mais peut avoir une influence sur la valeur assignée au courant maximum (à calculer en tenant compte des caractéristiques du terrain).

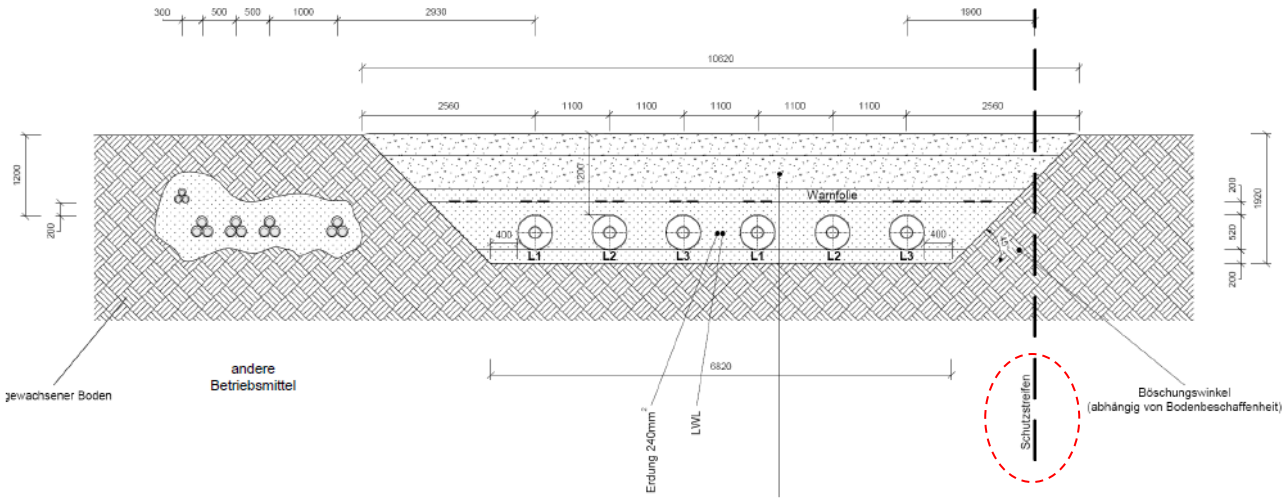


Fig. 2-10 - Enfouissement d'un double tricâble en isolation gazeuse (source Siemens)

COUTS D'EQUIPEMENTS AMONT E/OU AVAL

Le § 2.2.2 contient une présentation des coûts budgétaires pour les deux systèmes triphasés CIG. Cependant, lorsque le CIG fait partie d'une ligne aérienne, des postes de transition doivent être prévus aux extrémités. Ces postes sont très simples, caractérisés par les traversées air/gaz en gaz et protégés par des parafoudres, tandis que les disjoncteurs ne sont pas nécessaires (Fig. 2-11).

L'évaluation des coûts doit prendre en compte les éléments suivants :

- traversées
- parafoudres
- cadres en acier pour CIG
- cabines de surveillance et équipement pour la transmission de données
- éclairage et disponibilité d'une petite quantité de puissance.

En général, le coût d'un poste transition air-CIG devrait être inférieur à celui d'une solution air-CIS de puissance équivalente à cause d'un nombre inférieur de terminaux (2 ternes contre 6).

Fig. 2-11 – Exemples de postes de transitions aérien-CIG

DIFFERENCE EN TERMES D'EMPRISE PAR RAPPORT A UN PROJET AVEC CIS

Le tableau suivant présente une comparaison entre les deux technologies.

Différence en termes d'emprise : CIS contre CIG		
Travaux de chantier	***CIS***	***CIG***
largeur de la tranchée	pour accueillir les six ternes CIS : 13-14 m	pour accueillir les deux ternes CIG* : 11 m
transport sur site / réalisation de la voie d'accès	dépend de la taille des bobines du câble et le moyen de transport. Si l'on suppose un transport de bobines de câbles de 1 000 m de long (afin de réduire le nombre de joints), des bobines de dimension (bride x longueur) 4 000 mm x 3 100 mm et poids d'environ 20 tonnes de charge pourraient être utilisées, avec utilisation conséquente d'un semi-remorque traditionnel comme représenté sur la Fig. 2-12	dépend de la taille de l'unité de raccordement : en cas de choix d'unités de 15 – 20 m la longueur du semi-remorque (13 m sur la Fig. 2-12) doit être adaptée en conséquences
travaux pour l'installation des unités de connexion le long du parcours	creusement de la tranchée, remplissage avec matériaux thermiquement adaptés, remplissage complet (après la pose des câbles)	creusement de la tranchée, remplissage avec matériaux thermiquement adaptés, pose des tubes, remplissage complet
réalisation des jonctions	*Creusement et enfouissement* - positionner la bâche pour la réalisation des jonctions - armer et installer un système d'échelle pour le déplacement entre les différents niveaux et l'évacuation rapide en cas d'urgence. - réaliser des voies d'évacuation en appliquant des scellements étanches à l'eau autour à la chambre *Rangement* - protection des passages de câbles à travers les parois du caisson - sectionnement et mise à la terre des gaines métalliques des câbles avec configuration en « liaison croisée » (« cross bonding »)	Pour la description de la technologie de connexion, voir note 1. - positionner la bâche pour la réalisation des connexions - mise à la terre des enveloppes métalliques
tirage des unités d'installation le long du parcours et réalisation des terminaux dans les postes de transitions	Les équipements spécifiques nécessaires aux activités de pose comprennent des treuils, des rouleaux motorisés	Pour la description de la technologie de pose, voir note 2.

	(caterpillar), des bobines de déroulement et des équipements destinés au tirage des câbles. L'installation se fait en évacuant e l'espace sur le site d'installation ou dans la zone environnante si l'élément est facilement déplaçable au sein du site de l'installation	
la réalisation du poste de transitions aéro-souterrain à l'extrémité du tronçon	La production d'énergie réactive d'un circuit CIS est environ 20 fois supérieure à celle d'un circuit aérien. Des selfs (réactances) de compensation (consommant de l'énergie réactive) sont donc nécessaires dès que les circuits CIS dépassent une certaine longueur. Pour donner une idée de grandeur, on peut évaluer les besoins d'un poste de compensation tous les 10 à 15 km de circuit CIS. Il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur et chaque cas doit être spécifiquement étudié. Un poste de compensation s'apparente à un poste électrique, son emprise totale est d'environ 5 000 m². Pour éviter la mise en œuvre de ces postes de compensation, il est alors indispensable de limiter la longueur des circuits CIS à quelques kilomètres	Postes très simples avec les traversées air/gaz de gaz et protégés par des parafoudres. (Fig. 2-11)

** chaque circuit : enveloppe métallique externe de 500 mm de diamètre*

*** Dans l'hypothèse de tronçons de câbles de 1 000 m de long, sur les 30 km pour les 18 câbles (6 tricâbles), un total de 30 x 18, soit 540 jonctions, doivent être prévues !*

Note 1

Les technologies de connexion disponibles pour un CIG sont :

- brides avec boulons et joints toriques (comme dans le cas des GIS)
- soudage
- serrage.

Les brides sont utilisées pour assembler les enveloppes métalliques et former des compartiments de gaz sous pression.

Pour de longues distances, un système de soudage orbital automatisé permet une manipulation moins manuelle sur site et une meilleure qualité répétitive, sans oublier un système d'assurance qualité à ultrasons.

La technique de soudage peut être utilisée pour des jonctions d'enceinte étanches au gaz et pour les connexions électriques des tubes de conducteurs.

Le serrage peut être utilisé pour le raccordement électrique des conducteurs.

Une nouvelle technologie très robuste pour une application sur site des composants en aluminium est la technologie dite « friction-stir welding » (FSW). Ce processus utilise une action de malaxage (« stir ») pour générer chaleur, faire fondre l'aluminium et établir une connexion holomorphe. Les avantages de cette technologie sont une vitesse plus élevée (40% de gain de temps) pour la réalisation des soudures et pratiquement aucun impact de l'humidité et de l'air en mouvement.

La nature du solide de FSW conduit à de nombreux avantages par rapport aux processus de soudage par fusion, car les problèmes associés à la phase de refroidissement du liquide sont évités. Les problèmes tels que la porosité, la redistribution des solutés (by products of the fusion), la fissuration de solidification et la fissuration de liquation ne se posent pas avec la FSW. En général, la technologie FSW est appliquée pour générer le moins de défaillances possibles et parce qu'elle tolère très bien les variations de paramètres et de matériaux.

Note 2

L'installation d'un CIG directement enterré est similaire à la pose de pipelines. Elle consiste en une pose continue en tranchée ouverte avec un site de pré-montage à proximité permettant l'assemblage des différentes sections. Le rayon de courbure élastique de 400 m permet au CIG de suivre les mouvements du paysage.

Une fois posé dans le sol, le CIG est ancré en continu permettant ainsi d'éviter la compensation supplémentaire des dilatations thermiques.

L'enveloppe métallique est protégée contre la corrosion par un revêtement polymère. La technologie de revêtement est obtenue à partir de celle des gazoducs et des oléoducs, pour laquelle l'expérience acquise permet d'obtenir de bons résultats.

Après l'installation, la couverture minimum du sol requise est de 1 m afin de pouvoir exploiter les champs situés en surface à des fins agricoles, bien qu'avec des limitations.

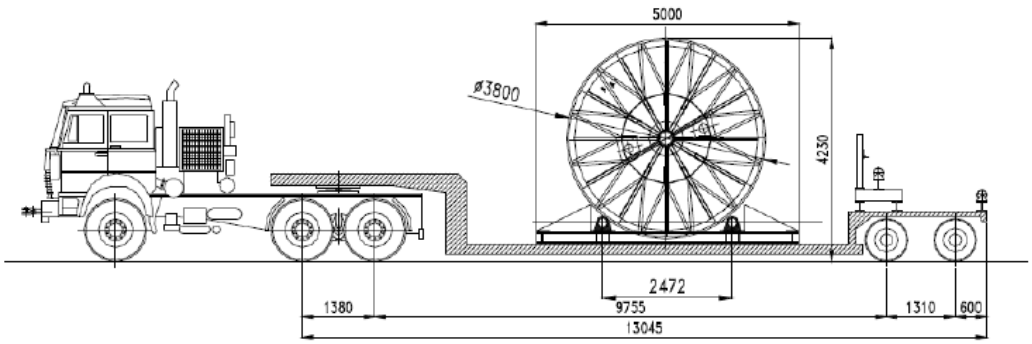


Fig. 2-12 - Taille des moyens de transport des bobines

CONTRAINTES PERMANENTES SUR LE TERRAIN CAUSEES PAR LES OUVRAGES DE CIG ET IMPACT DE L'EXPLOITATION.

Compte tenu de la nature de l'installation, souterraine en tranchées, les deux solutions CIS et CIG, présentent, en principe, les mêmes impacts environnementaux.

En ce qui concerne les contraintes permanentes sur le terrain, il est important de tenir compte de l'effet de séchage éventuel du terrain le long du parcours des câbles. Cet effet de réchauffement est dû aux pertes Joule au niveau des câbles. L'étendue réelle de cette contrainte doit être évaluée en fonction du type de sol (conductivité thermique, utilisation agricole souhaitée), l'installation (profondeur

d'enfouissement) et les caractéristiques de fonctionnement (courant, pertes). Sur ce point, notons que le système CIG génère moins de pertes qu'un système CIS.

En termes de dimension de la zone affectée par cet effet, les deux solutions présentent une empreinte similaire.

MAINTENANCE A PREVOIR

Vue du centre de dispatching (système de contrôle), la connexion CIG pourrait être gérée comme une ligne aérienne.

Le mélange de N_2 + SF_6 permet, même en cas d'apparition d'un arc électrique à l'intérieur d'un tube, de procéder à un ré-enclenchement automatique. En fonction des règles de fonctionnement du réseau, le temps de pause doit être suffisant pour dé-ioniser le mélange gaz en cas de défaillance transitoire.

L'exploitation du CIG est pris en charge par les systèmes de surveillance de bord, généralement constitués de :

- un densimètre pour chaque compartiment. Ces capteurs sont équipés d'un écran de contrôle visuel destiné à l'inspection, et proposent plusieurs niveaux d'alerte de pression minimum en cas de fuite ou de perte de gaz. Ces alarmes peuvent être transmises à distance au système de contrôle et/ou alerter le personnel. La sensibilité des densimètres et la détermination des seuils d'alarme doivent être soigneusement étudiées en fonction de l'importance du volume de gaz par compartiment
- un détecteur et un localisateur de défaillance interne, en fonction de la mesure de temps de transit de l'impulsion générée par la défaillance, entre le point de défaillance et les bornes du CIG équipées d'une antenne de réception synchronisée GPS.

Il est important de rappeler que le principal problème et le plus facilement concevable concernant le système CIG est la perte de gaz. Celle-ci peut résulter d'un événement important et soudain tel qu'une rupture de l'enveloppe, ou une fuite lente par manque d'étanchéité du tube.

Une fuite de gaz lente peut être mesurée directement par les densimètres montés sur les enveloppes, ou indirectement par les détecteurs de gaz SF_6. La localisation de ces fuites microscopiques est beaucoup plus difficile et nécessite un recours systématique à des détecteurs de SF_6 ou à des examens radiographiques et échographiques.

L'expérience montre que les points à contrôler de façon prioritaire sont les soudures, à savoir :

- soudures en spirale, effectuées dans l'usine de fabrication des tubes
- points de soudure pour la fixation du piège à particules métalliques à l'intérieur du tube
- soudures orbitales d'assemblage des sections du tube, ces soudures sont réalisées sur site.

L'inclusion d'un contrôle par ultrasons de chaque soudure dans le plan de qualité lors de l'installation est recommandée.

En ce qui concerne l'entretien, les CIG nécessitent théoriquement très peu d'interventions. Cependant, le peu d'expérience existant concernant cette technologie pousse les propriétaires à une attitude prudente et à des mesures d'entretien préventif. Les mesures d'entretien préventifs suivantes peuvent être mentionnées :

- ronde d'inspection périodique: la fréquence doit être fixée à 1 fois par semaine en début d'exploitation à 1 fois par mois en exploitation normale
- contrôle de la pression avec manomètres de précision et mesure de la qualité du gaz (humidité) : 1 fois par an. Ce travail nécessite l'arrêt de l'installation
- étalonnage des densimètres : tous les 5 ans, le travail implique l'arrêt de l'installation
- nettoyage des isolateurs aériens (traversées, parafoudres,) du poste de transition, en fonction du niveau de pollution du site.

Il faut considérer qu'un arc interne dans une enveloppe métallique avec une épaisseur minimum de paroi de 6 mm, utilisant un mélange à 80% de N_2 et 20% de SF_6 ne provoque pas la perforation de l'enveloppe si la longueur du compartiment de gaz est adaptée.

Le processus de réparation comporte les actions suivantes :

- identification du site de réparation
- retrait du gaz
- coupe et enlèvement de l'enveloppe et du conducteur
- installation du conducteur et de l'enveloppe de remplacement
- remplissage du gaz et essais à haute tension.

La durée de la réparation est d'environ 2 semaines, incluant la préparation et les essais finals.

Dans tous les cas, la réparation des tubes implique le traitement de grandes quantités de gaz (vider, stocker, traiter, remplir). Il est donc indispensable de disposer d'une infrastructure appropriée et cela prend généralement beaucoup de temps. Afin de garantir les conditions de sécurité du personnel chargé des interventions, un système d'extraction du gaz doit être mis en place.

COMPARAISON ENTRE LES TECHNOLOGIES CIS ET CIG

Une première comparaison entre les technologies CIS et CIG permettant de comparer les performances électriques et les champs électromagnétiques est présentée dans les Tab. 2-2 et Tab. 2-3. Il s'agit ici d'une comparaison des aspects d'ingénierie, du processus d'assemblage et des deux technologies en général.

Éléments distinctifs entre les deux technologies concernant les aspects d'ingénierie et processus d'assemblage

Processus	CIS	CIG
Conception/Ingénierie	Les systèmes de câbles avec isolation synthétique sont de conception mûre et trouvent une large application permettant d'établir des statistique de défaillance correspondant aux tensions, tant pour les câbles que pour les jonctions. Ces statistiques sont en vérité relativement limitées pour les CIS en THT (500-600 kV en CA et 320 kV en CC) en raison de leur récente installation. Un des aspects délicats en phase d'ingénierie concerne l'insertion des câbles dans un réseau maillé.	Les systèmes de câbles isolés au gaz sont de conception simple. Ils ne sont pas encore appliqués en grande nombre ni depuis assez longtemps pour disposer de statistiques d'exploitation. Cependant les installations déjà réalisées ont toujours montré de bonnes performances en accord avec les standards définis en phase de conception / projet. Les CIG trouvent application sur les systèmes de transmission allant jusqu'à 800 kV en CA. Aborder et surmonter les problèmes liés au tracé de l'installation peut représenter un défi en termes d'ingénierie du système.
Fabrication	Il existe plusieurs lignes de fabrication des CIS au niveau international et un marché concurrentiel.	Il existe plusieurs lignes de production de postes en isolation gazeuse : GIS (Gas Insulated Switchgear), mais très peu en termes de tubes pour application CIG. Notons que, même si la technologie CIG rappelle celle des GIS, elle diffère en termes de longueurs et de conséquences quant à la fiabilité de l'ensemble du système, et en raison de nombreuses soudures à effectuer sur place. Sachant qu'un seul fabricant de CIG représente la référence de base en termes d'installation, le marché de cette technologie est (encore) considéré comme non-concurrentiel

Construction/mise en œuvre du tronçon câblé	Dans le contexte environnemental de la ligne Avelin-Gavrelle, essentiellement agricole dans la région de la Pévèle, aucune difficulté insurmontable relative à la construction des tranchées pour câbles n'est prévue. Une attention particulière doit être accordée au choix des longueurs de bobines de câbles pour le transport sur site, en fonction de la capacité du transport routier.	Aucune difficulté particulière ne se pose pour la construction des tranchées destinées aux tubes. Une attention particulière doit être accordée au choix des longueurs de tubes pour le transport sur site, en fonction de la capacité du transport routier.
Pose	Une attention particulière doit être accordée à l'exécution sur site de nombreuses jonctions nécessaires pour les six circuits câblés (ou quatre circuits[6])	Une attention particulière doit être accordée à l'exécution sur site des nombreuses soudures nécessaires aux deux circuits CIG.
Essais	Les activités d'essai, conséquents en termes de durée et de coût, sont nécessaires pour la certification du système enfoui. La certification d'un système CIS prend beaucoup de temps, environ un an, incluant les essais de vieillissement thermique-mécaniques	La certification d'un système CIG suit le processus d'essai et inclut un essai de vieillissement thermique-mécanique
Exploitation	L'exploitation d'un CIS nécessite l'utilisation d'un système de compensation réactive.	L'exploitation du CIG nécessite l'utilisation d'un système de surveillance du gaz.
Entretien/Maintenance	Un CIS nécessite peu d'entretien	Un CIG nécessite peu d'entretien

Éléments susceptibles de permettre une distinction entre les technologies CIS and CIG et ayant un impact sur les coûts

Sujet	Caractéristiques	Commentaire
Conditions environnementales	La température, la poussière et l'humidité influencent le type d'équipements (bâches, chauffage, climatisation) nécessaires pour effectuer l'installation.	Les deux technologies impliquent des processus nécessitant l'exécution des opérations sur site et en environnement contrôlé : • CIS : durant la réalisation des jonctions (3 jonctions pour chaque circuit tous les 700 - 1 000 m)

[6] La possibilité de poser quatre ternes de CIS au lieu de six devrait être examinée plus en détail.

		• CIG : durant la réalisation des soudures des tubes, chaque section unitaire d'une longueur de 60 – 80 m doit être interrompue par des soufflets et des « plug-in contacts » conçus pour absorber les dilatations thermiques ainsi que les contractions de l'enceinte et du tuyau de contact, respectivement
Accessibilité au site et restrictions de transport	L'accessibilité au site a un impact sur la longueur des câbles/tubes transportables et donc sur le temps et le coût de construction Les restrictions de transport sur les sites influencent la longueur des câbles/tubes, mais également le nombre maximum de tubes transportables par poids lourds. Le rayon de braquage des poids lourds a grand impact.	Les câbles d'un système CIS sont livrés en bobines de 800 – 1 000 m de longueur, soit un poids d'environ 20 tonnes. En revanche, les tubes d'un système CIG sont des unités de 15 – 20 m. On peut estimer que le nombre de tubes transportables en un seul voyage par poids lourds, en tenant compte de la capacité de transport pour un lot normal (16,5 x 2,5 x 4 m) est d'environ 40 unités, pour un poids total d'environ 21 tonnes.
Stockage sur place	Les CIS et les CIG nécessitent un grand volume de stockage. Le stockage est nécessaire pour équilibrer/synchroniser la pose avec la disponibilité des câbles/tubes. Outre les câbles/tubes, toutes les unités accessoires (jonctions/unités extensibles) doivent être stockées en entrepôt. La zone de stockage doit être choisie en fonction de la possibilité d'optimiser la synchronisation entre la quantité en stock des bobines de câbles (CIS) ou des tubes (CIG) avec l'avancement des travaux sur le chantier et la production de ces câbles/tubes	
Usine d'assemblage sur le site	La taille de l'usine d'assemblage, dans laquelle les unités à installer sont préparées dépendent de la planification du projet. Le nombre d'unités par jour permet de définir les besoins de main-d'œuvre et d'équipement.	Pour les CIG une attention particulière devra être accordée aux opérations sur site devant être effectuées dans des conditions de nettoyage compatibles avec la très haute tension de l'équipement.
Zone de pose	Les facteurs importants sont l'accès à proximité du point d'installation et le nombre de ces zones de pose. Ces éléments auront une influence sur la vitesse de pose et le coût.	La même observation est valable pour les CIG
Disponibilité des matériaux et des personnels qualifiés	La grande quantité de câbles nécessaire pour cette liaison peut réduire le coût en raison du volume commandé, mais elle pourrait également augmenter le coût si les capacités disponibles sont trop faibles.	La même observation est valable pour les CIG.
Matériaux	Les matériaux utilisés sont le cuivre ou les alliages d'aluminium, et le prix dépend de la prévision du volume et	La même observation est valable pour les CIG

	de l'indice des matériaux de Londres	
Gestion sur le site	Des outils de levage et de positionnement sont nécessaires aux emplacements d'installation. La vitesse de pose dépend de la méthode d'assemblage et de l'organisation du processus de traitement sur place. Les opérations peuvent être menées en parallèle à des endroits différents pour accélérer le processus d'installation	La même observation est valable pour les CIG
Processus d'installation	À noter : les structures de soutien, les soudures de la structure sur les sites de sous-groupes de montage, l'espace de travail	Pour les CIG, il faut de plus tenir compte du traitement du gaz sur site
Points de connexion / zone de transition aéro-souterrain	Le passage du tronçon aérien à celui souterrain nécessite la mise en place d'un poste dédié : - pour les CIS : une travée de ligne complète - pour les CIG : une travée de ligne réduite, sans disjoncteurs	

3 TECHNOLOGIE EN COURANT CONTINU (CC) ET EN COURANT ALTERNATIF (CA)

3.1 État de la technologie en CC

Le transport de puissance en courant continu a vu un développement remarquable durant ces dernières années en raison de plusieurs facteurs parmi lesquels :

- Nécessité de transporter de grandes quantités de puissance (plusieurs GW) sur de longues distances (de l'ordre de milliers de kilomètres) : voir projets en CC en Chine, au Brésil et en Inde
- Nécessité de construire des liaisons sous-marines, pour lesquelles la seule solution technique est représentée par le CC car il ne comporte aucun inconvénient en termes de contrôle de la tension en raison de l'absence de production de puissance réactive
- Liaisons entre systèmes ayant une fréquence différente ou ne pouvant pas être exploitées de manière synchrone pour des raisons d'instabilité
- Nécessité de garantir les services auxiliaires du système, tels que le « black start » et le contrôle du profil de la tension, en utilisant la nouvelle technologie VSC (Voltage Source Converter)
- Garantie d'augmentation de la capacité nette de transport (NTC) dans les projets de lignes transfrontalières, notamment dans le cas de « lignes marchandes » (« merchant lines »)
- Réalisation de liaisons enfouies sur de moyennes-longues distances pour faire face à des contraintes environnementales
- En général, amélioration du niveau de fiabilité des postes de conversion CA/CC.

3.1.1 Maitrise de la technologie en CC

Nous pouvons affirmer que la technologie de transport en CC est aujourd'hui bien maîtrisée. Les scénarios de développement de long circuit (année horizon 2050) prévoient en effet la réalisation d'une « supergrid » composée d' « autoroutes de l'énergie » en CC pour le transport de l'électricité sur de grandes distances. Ces scénarios et la possible structure d'un réseau européen en CC ont été récemment étudiés par d'importantes associations internationales telles que Medgrid [11], Desertec Industrial Initiative [12] et Friends of the Supergrid [13].

En Europe, le projet en CC « Süd Link », proposé en Allemagne par les gestionnaires Tennet et TransnetBW, représente un premier exemple d'« autoroute de l'énergie ». La liaison « Süd Link », ayant une longueur de 800 km, a pour but de connecter les pôles de production éolienne offshore situés dans la Mer du Nord aux centres de consommation du Baden-Württemberg et de la Bavière.

En Chine, trois liaisons de grandes tailles, jusqu'à 8 GW, ont déjà été mises en service (Fig. 3-1). Ces liaisons ont été réalisées en appliquant la technologie LCC (Line Commutating Converters) et par voie aérienne. Le gestionnaire du réseau State Grid Corporation of China prévoit la réalisation de 25 nouvelles liaisons en CC à THT dans les années à venir (Fig. 3-2).

La réalisation de projets de taille et longueur similaires sont également en cours au Brésil et en Inde.

Les liaisons en CC ont pour avantage de pouvoir réguler le flux de courant à l'aide de systèmes de contrôle installés dans les postes de conversion. Cependant, en cas d'insertion d'une liaison en CC dans un réseau maillé, comme ce serait le cas pour la ligne Avelin-Gavrelle, il est important de s'assurer que les conditions de sécurité « N-1 » sont respectées. En effet, face à la panne d'un pôle de conversion ou d'un câble en CC, la puissance est automatiquement transférée sur les autres circuits en CA du réseau. En revanche, la panne d'un circuit CA produit le transfert de puissance sur les autres circuits CA conformément à la loi de Kirchhoff, mais pas sur la liaison CC, à l'exception de présence de signaux spécifiques dans les systèmes de contrôle du redresseur et de l'onduleur.

Un autre avantage important est l'absence de champs magnétiques variables. En revanche, les liaisons en CC ne permettent pas d'augmenter le « lien synchronisant » entre le réseau en amont et en aval et, pour fonctionner, deux réseaux suffisamment forts en termes de puissance de court-circuit sont nécessaires. Cependant, ce dernier aspect ne pose pas de problème pour la ligne Avelin-Gavrelle, laquelle est située dans une zone du réseau transport bien maillé et électriquement « fort ».

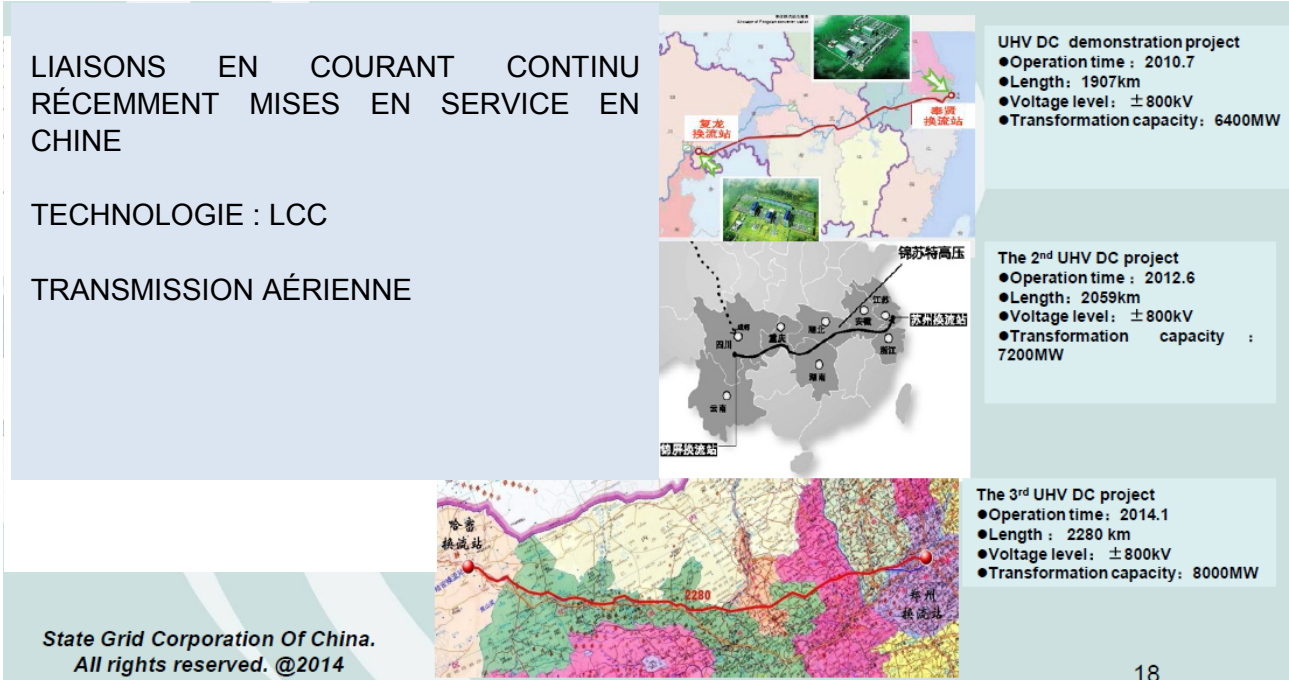


Fig. 3-1 – Projets en CC récemment achevés en Chine (source : State Grid Corporation of China – atelier de travail CESI, Mai 2014)

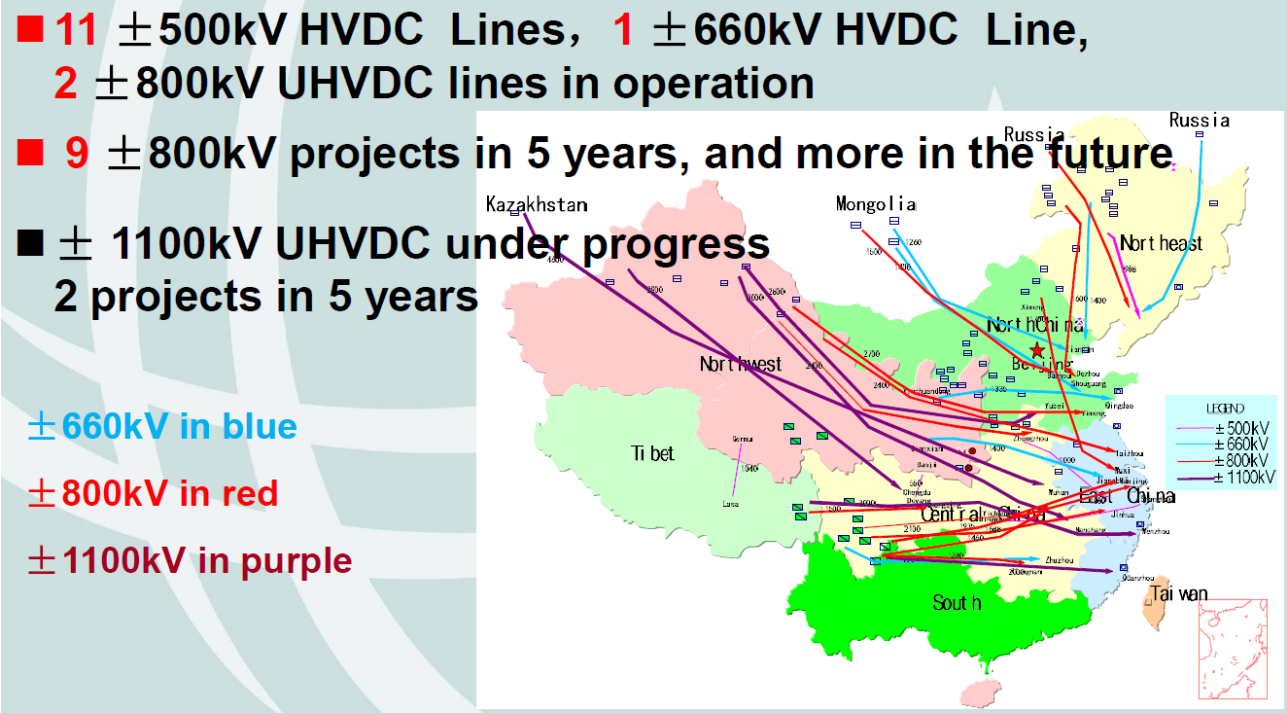


Fig. 3-2 – Projets de grande taille en CC planifiés en Chine (source : State Grid Corporation of China - atelier de travail CESI, Mai 2014)

3.1.2 Évolution technologique

Durant ces dix dernières années, les aspects suivants de la technologie en CC ont évolué :

- Tailles des postes de conversion CA/CC en technologie LCC avec thyristors. Comme indiqué ci-dessus, des tailles jusqu'à 8 GW avec tensions CC jusqu'à ±800 kV ont déjà été atteintes. Un projet en CC à ± 1 100 kV est en cours de réalisation en Chine et d'autres projets sont à l'étude. Le transport est effectué par voie aérienne
- Évolution de la technologie en VSC (Voltage Source Converter) basée sur les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ayant atteint une taille de 1,0 à 1,2 GW avec tension maximum de ± 320 kV. La perspective d'évolution est d'atteindre une capacité de transport allant jusqu'à environ 2 GW en utilisant des câbles en MI à ± 500 kV. Le transport est effectué par câbles souterrains. Il existe actuellement un seul exemple par voie aérienne : le lien Kaprivi en Namibie.

Le tableau suivant illustre les différences substantielles entre un système HVDC-LCC et un système HVDC-VSC.

	LCC	***VSC***
Taille maximum réalisable déclarée par les fabricants	8 000 MW ± 800 kV / ± 1100 kV (aérien)	1 200 MW ± 500 kV (câble en MI) Récemment (août 2014) ABB a déclaré la disponibilité de câbles XLPE à ± 525 kV ayant une capacité de 2 200 / 2 600 MW
Taille maximum de projets déjà réalisés	8 000 MW ± 800 kV (aérien)	1 000 MW ± 320 kV (câble) – en cours de réalisation
Temps de livraison moyen	36 mois	24 mois
Puissance active minimum	± 0,1 puissance Nominale (Pn)	Jusqu'à zéro MW
Inversion de puissance	Inversion de polarité CC	Inversion du courant continu
Nécessité de réseau actif	Oui	Non, fonctionnement également sur réseau faible ou passif (en îlot)
Comportement face à des perturbations de réseau : problème de défaillance de commutation	Oui, blocage temporaire du convertisseur côté onduleur	Non
Black start	Non	Oui
Puissance réactive absorbée par le convertisseur	Environ 50% de la puissance active transmise	Le convertisseur VSC n'a pas besoin de puissance réactive pour fonctionner
Puissance réactive échangée avec le réseau	De façon discontinue en raison de l'activation/désactivation des filtres et en fonction de la puissance active transmise	De façon continue et en fonction des dimensions du système de conversion et de la tension de réseau
Fonctionnement en modalité « compensation de puissance réactive » : StatCom	Non	Oui
Contrôle indépendant de P et Q	Non	Oui
Filtres CA	Nécessaires et très encombrants	Non.
Pertes (par rapport à la puissance nominale Pn)	≈ 0,7 % Pn	≈ 1-1,2% Pn
Transformateur	de « Conversion »	« Standard » en configuration

		unipolaire symétrique, de « Conversion » dans les autres configurations
Tap-changer (Prise de transformation)	Quasiment toujours adopté	Évitable
Fonctionnement en ligne aérienne (comportement en cas de pannes transitoires)	En cas de pannes temporaires, le système de contrôle du convertisseur peut garantir l'extinction de la panne sans déclencher le disjoncteur CA	Pour garantir l'extinction de la panne temporaire, il est nécessaire d'utiliser le disjoncteur CA
Électrode (si présente)	Typiquement non réversible	Typiquement réversible
Entretien programmé [h/an]	Typiquement < 1%	Typiquement < 0,5%-1%
Espaces	40÷60 m^2/MW (en référence à une taille de 1 000 MW, 400 kV)	20÷30 m^2/MW (en référence à une taille ± 320 kV – 600 MW)

Concernant les espaces, notons que la zone occupée par le poste de conversion dépend, outre la puissance, des facteurs suivants :

- technologie de conversion choisie : par exemple les systèmes de conversion VSC de nouvelle génération ne nécessitent pas de filtres CA ou d'autres dispositifs de compensation, en revanche, les VSC utilisent des selfs de conversion
- disposition des composants : la zone occupée dépend de la disposition adoptée pour les composants notamment en fonction des espaces disponibles
- isolation en fonction de la tension CA et CC et du degré de pollution du site et des autres contraintes environnementales (ex : limites du bruit acoustique)
- configuration (unipolaire, bipolaire, outdoor, indoor, etc.)

Par conséquent les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus sont indicatives.

3.1.2.1 Fiabilité

Un autre facteur important dans le choix de la technologie est la fiabilité, laquelle dépend du taux d'interruptions forcées par an (dues aux pannes). Pour évaluer la disponibilité (« availability ») de la liaison, il faut tenir compte des interruptions forcées (voir la fiabilité) et non forcées (entretiens programmés).

Le tableau ci-dessous reprend les données concernant le taux d'interruptions forcées, les indisponibilités et disponibilités déclarées par un fabricant pour une liaison HDVC (à l'exclusion du câble) en configuration unipolaire. Les valeurs indiquées dans le tableau se réfèrent à des solutions en LCC et VSC déjà réalisées.

Tab. 3-1 - Paramètres de fiabilité pour une liaison HVDC en configuration unipolaire (source ABB)

	LCC	VSC
Forced outage rate	*3 - 4 outages/year*	*1 - 2 outages/year*
Forced unavailability	*0,3 - 0,5 %*	*0,3 - 0,5 %*
Unforced (scheduled) unavailability	*< 1%*	*< 0,4 %*
Availability	*> 98,5 %*	*> 99 %*

3.1.3 Ouvrages supplémentaires liés à la technologie en CC : postes de conversion

Le transport de la puissance en CC implique de transformer le courant alternatif en courant continu à une extrémité, et le courant continu en courant alternatif à l'autre extrémité. Il est donc nécessaire de

réaliser deux postes de conversions dans lesquels installer le redresseur d'un côté et l'onduleur de l'autre. De plus, il est indispensable de prévoir tous les équipements supplémentaires pour le fonctionnement des postes de conversion, à savoir les filtres en cas de technologie LCC, les réactances de conversion en cas de VSC, les transformateurs de conversion, systèmes de protection, de commande et de contrôle, etc.
Le schéma de principe d'une connexion en courant continu est illustré sur la Fig. 3-3. Le réseau en amont est relié au réseau en aval par le biais d'une connexion CC (ligne aérienne ou câble enfoui ou mixte).
Outre les postes de conversions, la liaison en CC comporte également une ligne aérienne ou un câble de connexion dans lesquels passe le courant. Une connexion de retour est nécessaire pour assurer la fermeture du circuit et donc le flux de courant dans les systèmes unipolaires ou en conditions d'urgence dans les systèmes bipolaires (en cas de panne d'un pôle de conversion).

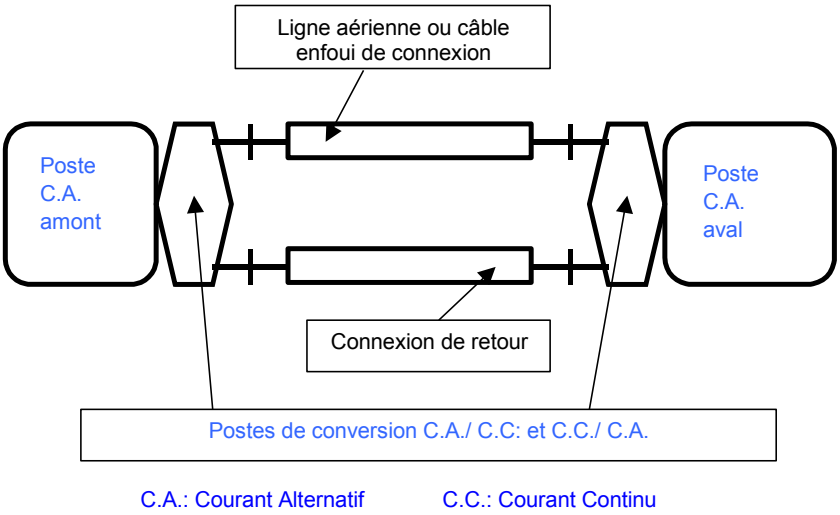


Fig. 3-3 – Schéma d'une liaison en courant continu

Les Fig. 3-4 et Fig. 3-5 montrent le poste de conversion courant continu-courant alternatif des Mandarins, soit l'extrémité française de la liaison en CC établie entre la France et l'Angleterre (2 000 MW avec une configuration bipolaire ± 270 kV et avec la technologie LCC).

Fig. 3-4 – Poste de conversion courant continu-courant alternatif des Mandarins : extrémité française de la liaison France-Angleterre (source Alstom)

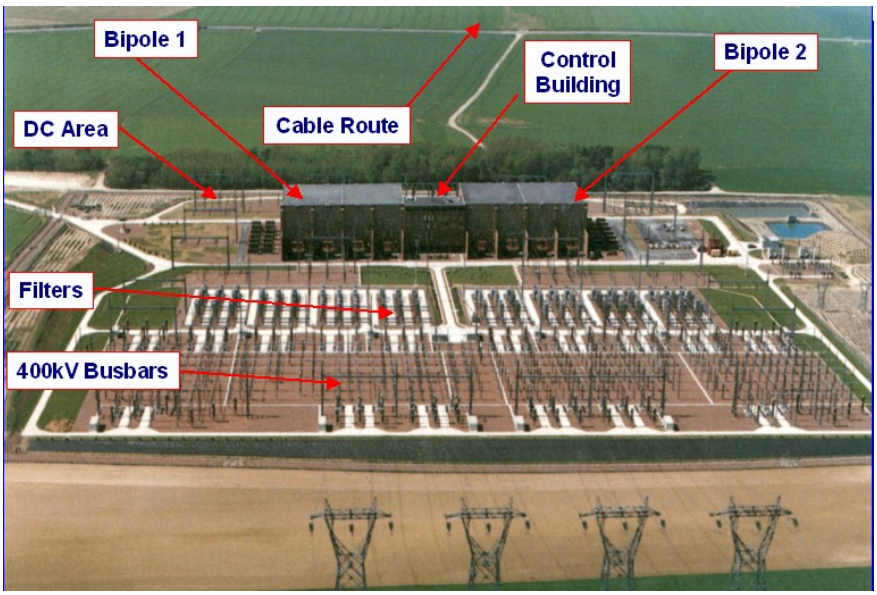


Fig. 3-5 –Poste de conversion courant continu-courant alternatif des Mandarins avec indication des composants principaux (source Alstom)

En général, pour les solutions en LCC, la moitié de l'espace du poste de conversion est occupée par les filtres. Ceci est mis en évidence sur la photo du poste des Mandarins (France) *Fig. 3-5*. D'autres vues de postes de conversion en LCC récemment réalisés ayant une capacité comparable à celle de la nouvelle ligne Avelin-Gavrelle sont présentées sur la Fig. 3-6, avec le poste de Yunnan–Guangdong (Chine), et sur la Fig. 3-7, avec le poste des Trois Gorges (Chine).

Fig. 3-6 Poste de conversion : Yunnan–Guangdong 5 000 MW 800 kV (Siemens)

Fig. 3-7 Vue aérienne du poste de conversion LCC des Trois Gorges (China): 3000 MW / 500 kV (source ABB).

D'autres exemples de postes de conversion en LCC en cours de réalisation sont :

- liaison 2 000 MW Éthiopie-Kenya où le poste de conversion occupe une aire de 400 x 600 m (24 hectares)
- Liaison 3 500 MW du centre-ouest de l'Arabie Saoudite où le poste de conversion occupe une aire de 500 x 300 m (30 hectares)

La technologie en VSC présente bien plus d'avantages que celle en LCC en termes d'espace. Par exemple, pour la nouvelle liaison Savoie-Piémont (2 blocs de 600 MW), l'aire nécessaire est de 150 x

150 m (un peu plus de 2 hectares) (Fig. 3-8). En général, en optimisant les espaces (si le terrain le permet), il est possible d'estimer une aire de 160 x 160 m pour un poste de conversion VSC à 2 blocs de 1 000 MW chacun (Fig. 3-9). Il est toutefois important de rappeler que cette technologie n'a jamais été utilisée jusqu'à maintenant pour des puissances supérieures à 1 000 MW. En effet, dans le cas de la nouvelle interconnexion entre la France et l'Espagne, pour atteindre une capacité de 2 000 MW, il a été décidé de construire deux liaisons en CC VSC en parallèle de 1 000 MW chacune (Fig. 3-10).

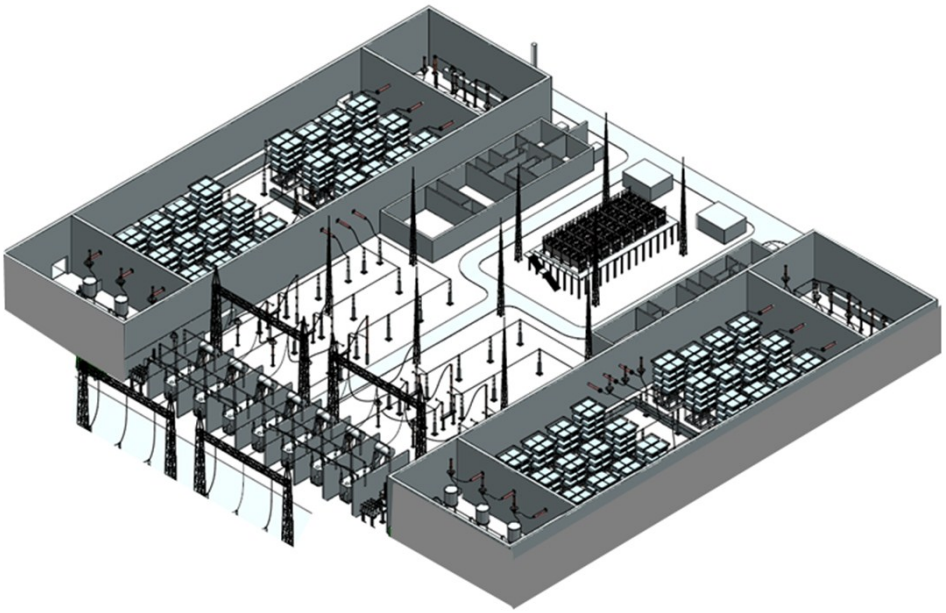


Fig. 3-8– Schéma d'un poste de conversion en VSC : 2 blocs de 600 MW chacun

Fig. 3-9 Disposition type d'un poste de conversion VSC à 1 000 MW (source ABB)

Fig. 3-10 Vue aérienne du poste de conversion VSC de 2 x 1 000 MW de la liaison France-Espagne (source Siemens)

3.1.3.1 Pertes Joule

Les pertes par effet Joule générées dans les postes de conversion ne sont pas négligeables avec environ :

- 0,7% de la puissance nominale (Pn) en fonctionnement à la Pn en cas de technologie LCC
- 1% de la puissance nominale (Pn) en fonctionnement à la Pn en cas de technologie VSC.

Cela signifie que les deux postes de conversion présentent des pertes de l'ordre 1,4%-2% de Pn en fonction de la technologie appliquée.

Si l'on tient également compte des coûts de construction des postes de conversion, une liaison terrestre en CC est justifiée uniquement en cas de longueurs ne dépassant pas quelques centaines de kilomètres ou en cas d'obstacles sur le territoire, rendant la construction d'une nouvelle ligne aérienne très difficile, comme dans le cas de la ligne en CC 2 000 MW France-Espagne (franchissement des Pyrénées), ou la ligne en CC 1 000 MW France-Italie (franchissement des Alpes).

3.1.3.2 Postes de conversion : impact environnemental

Les contraintes environnementales posées par les postes de conversion concernent :

- l'occupation du sol
- l'impact visuel
- la création de champs électromagnétiques (en tenant également compte des lignes aériennes CA connectées aux postes de conversion)
- le bruit
- les harmoniques côté CA et CC, ainsi que les possibles interférences avec les lignes téléphoniques.

Parmi les aspects mentionnés ci-dessus, l'occupation du sol est certainement le plus critique. Normalement l'emprise sur le terrain est d'environ 50 m^2/MW pour la technologie LCC et en moyenne 25 m^2/MW pour la technologie VSC. Cependant cette technologie implique actuellement une limite de

taille à 1 000 – 1 200 MW, signifiant que 4 liaisons VSC sont nécessaires pour la nouvelle ligne Avelin-Gravrelle.
En cas d'utilisation de la technologie LCC pour une taille de 4 600 MW, chaque poste de conversion occuperait une aire d'environ 20 hectares. L'emprise du poste de conversion peut être réduite en utilisant la solution en VSC, mais ceci impliquerait l'utilisation de plusieurs blocs de conversions pour obtenir une puissance de 4 600 MW.
En termes d'impact visuel, il est important de tenir compte la hauteur du bâtiment abritant les thyristors, soit environ 20 m. Cependant, notons que les postes de conversion CA/CC sont situés aux abords du poste CA 400 kV d'injection (poste en amont) et de triage (poste en aval).
Finalement, en ce qui concerne le bruit, les postes de conversion génèrent un niveau de bruit d'environ 80 dbA en fonctionnement normal, dû au fonctionnement des filtres. Cependant, la gêne possible rencontrée à partir de la clôture du poste de conversion CA/CC est bien en dessous de la limite nocturne admissible (<44 dbA[7]). En général, le bruit résiduel d'un poste (c'est-à-dire le bruit lié au fonctionnement de l'appareillage) peut être réduit virtuellement à zéro au moyen de systèmes de protection. Le seul bruit ne pouvant pas être corrigé est celui lié à l'effet de couronne dans la section en courant alternatif (en courant continu l'effet de couronne n'existe pas en tant que tel, mais se traduit en une sorte de petit claquage périodique).

3.1.4 Lignes aériennes en CC

Les lignes aériennes en CC sont constituées des mêmes éléments de base que celles en CA : les pylônes (normalement « treillis »), les chaînes d'isolateurs, les conducteurs et les accessoires mécaniques. Les conducteurs sont en nombre réduit par rapport à ceux d'une ligne en CA. Par exemple, une ligne CA en double circuit contient 6 conducteurs, tandis qu'une ligne en CC n'en a que 2 (un bipolaire) ou 4 (double bipolaire), plus éventuellement le conducteur de retour du courant en urgence (celui-ci n'est pratiquement jamais utilisé).
De ce fait, il est constaté qu'un pylône en CC est normalement plus petit qu'un pylône d'une ligne CA avec capacité de transport identique.
Néanmoins les caractéristiques techniques de chaque composant sont spécifiques aux applications en CC à raison des différentes capacités de tenue diélectrique.
Pour limiter les pertes tout en tenant compte de la capacité de transport de 4 600 MW pour la ligne Avelin-Gavrelle, il est possible d'utiliser des niveaux de tension CC de ± 600 kV.
L'adoption d'une ligne en CC avec tension ± 600 kV comporte la construction de pylônes d'une hauteur de 35 à 50 m environ et d'une largeur de plus ou moins 16 m, en comparaison avec la solution en CA proposée par RTE où le pylône à une hauteur de 50 m et une largeur de 33 m.
La solution avec ligne aérienne CC à ± 600 kV a été récemment appliquée au Brésil pour le projet Rio Madeira : 2 375 km de long pour une capacité de 3 150 MW.

Contrairement à ce qui se passe pour les lignes conventionnelles, les lignes CC ne présentent pas de champ magnétique à basse fréquence mais uniquement un champ statique du même ordre de grandeur que le champ magnétique naturel terrestre.

[7] Ex : selon la loi italienne, la limite nocturne admissible dans les zones « mixtes » comprenant les zones résidentielles, est de 44 dbA.

3.1.5 Câbles en CC

En ce qui concerne les câbles enterrés, les technologies disponibles sont les suivantes :

- **Câbles à isolation solide** (« Mass Impregnated ») : il s'agit de câbles dont le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange dense. Ce type de câble a été employé pour la réalisation des interconnexions sous-marines en courant continu entre l'Italie et la Grèce (liaison à 400 kV 500 MW longueur 160 km, mise en service en 2000) et entre la Sardaigne et le continent (liaison à 500 kV 1000 MW longueur 440 km, mise ne service en 2009/2010). Cette même technologie de câble CC sous-marin sera également utilisée pour la nouvelle interconnexion entre l'Italie et le Monténégro dont l'achèvement est prévu pour 2016.
- **Câbles à isolation mixte papier-polypropylène** (PPL) : il s'agit de câbles dont le système d'isolation est constitué de papier haute densité imprégné d'un mélange visqueux, mais dont les couches sont séparées par des films de polypropylène. Par rapport à la solution à isolation solide, celle-ci permet un gain de 25 à 50 % de puissance transportée ou une réduction de 30% des dimensions pour un même transit. Cet atout permet une réduction de 10% du diamètre et de 20% du poids. L'utilisation de ce type de câble permet donc d'avoir des tronçons plus longs et de porter 25% de câble en plus en plate-forme de pose par rapport à la technologie à isolation solide.
- **Câbles à isolation extrudée :** la plus part de ces câbles utilisent comme isolant le cross-linked polyéthylène (XLPE).
  Un des avantages du XLPE utilisé comme isolant pour câbles de moyenne et haute tension est sa faible perte diélectrique. Le facteur de perte diélectrique est environ dix fois inférieur à celui des câbles isolés en papier imprégné (« MI ») et légèrement inférieur par rapport aux câbles PPL. Puisque la constante diélectrique est également plus avantageuse, la capacité mutuelle des câbles XLPE est elle aussi inférieure, réduisant ainsi le courant capacitif (« charging current ») et les courants de fuite à la terre (« earthing-leakage currents ») dans les réseaux sans mise à la terre du « starpoint ».
  De plus ces câbles sont économiquement concurrentiels par rapport aux câbles à isolation solide, en raison d'un processus de fabrication plus rapide.
  L'excellente résistance à la déformation thermique et les excellentes propriétés de vieillissement du câble XLPE lui permet de transporter de grands courants en conditions de exploitation normales (température jusqu'à 90° C), d'urgence (130º C) ou en conditions de court-circuit (250° C).

Jusqu'à présent, les câbles en CC avec capacité de transport maximum de 1 000 MW à ± 500 kV étaient normalement utilisés. Cependant nous assistons ces dernières années à une évolution technologique importante.
Par exemple, dans le nouveau projet Westernlink entre l'Angleterre et l'Écosse (Fig. 3-11), des câbles à ± 600 kV (1830 A) en MI avec capacité de transport de 2 200 MW sont utilisés (fabricant : Prysmian) ([15]). La solution adoptée est bipolaire. Il est important de rappeler que cette solution est presque entièrement sous-marine.

Récemment (août 2014), ABB déclarait la disponibilité d'utiliser des câbles extrudés à 525 kV avec la technologie VSC dans le cadre de solutions terrestres. La capacité de transport est de 2 200 – 2

300 MW, avec adoption d'un conducteur de cuivre de 2 500 mm^2 ([14]). Des solutions futures envisagent des conducteurs en cuivre de 3 000 mm^2 avec une capacité de 2 600 MW.

Une récente évolution de la technologie des câbles CC en PPL est également fournie par Prysmian avec des câbles présentant des capacités de transport jusqu'à 1 500 MW à ± 500 kV et, dans un futur proche, à ± 600 kV, permettant ainsi de baisser les pertes face à un même transit de puissance.

Fig. 3-11 Trajectoire de la liaison Westernlink Angleterre- Écosse ([15])

3.1.6 Schémas possibles de liaison en CC pour la ligne Avelin-Gavrelle

Dans la mesure où qu'il s'agirait d'une liaison terrestre en CC, les schémas suivants de connexion peuvent être pris en compte :

A1) Technologie en LCC - bipolaire avec câble de retour à moyenne tension.

Tension : V= ± 500 kV
Nb de câbles en MI par pôle : 4
Nb de câbles de retour : 4
Nb total de câbles : 12

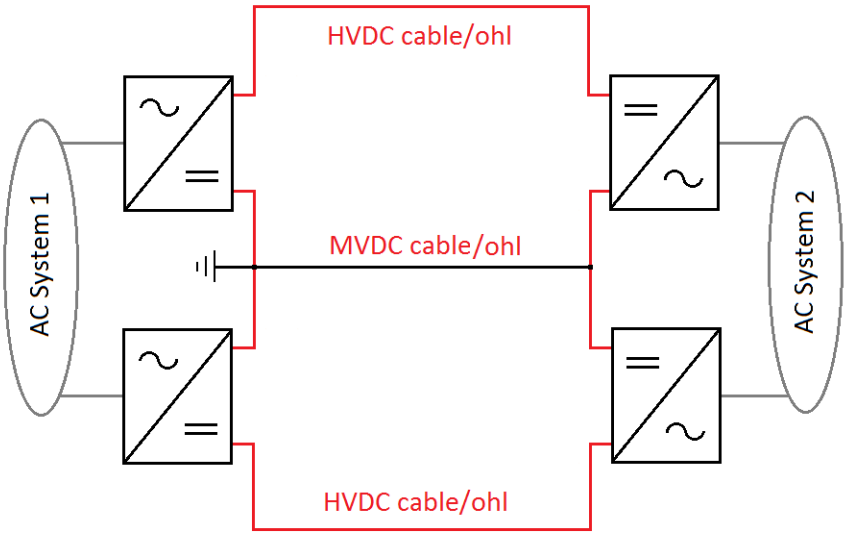


Fig. 3-12 – Configuration bipolaire avec câble à moyenne tension

A2) Technologie LCC - bipolaire rigide (sans câbles de retour)
Cette solution est déconseillée car l'intégralité de la liaison serait mise hors service en cas de panne sur un pôle.

Tension : V = ± 500 kV
Nb de câbles en MI par pôle : 4
Nb total de câbles : 8

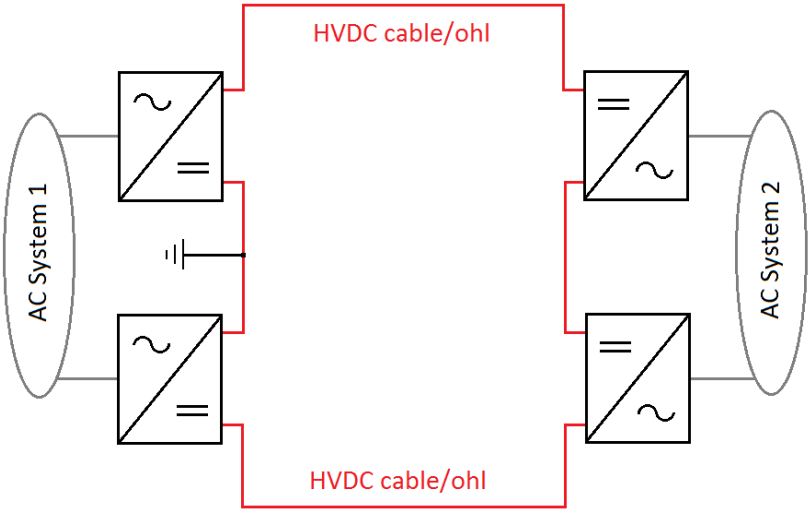


Fig. 3-13 – Configuration bipolaire rigide

Note : les solutions bipolaires avec électrodes sont à exclure afin d'éviter des conditions de fonctionnement d'urgence avec retour du courant au sol.

A3) Technologie LCC - bipolaire et liaison CC aérienne avec conducteur de retour à moyenne tension
Tension : V = ± 600 kV
Ligne : 2 conducteurs à 4 ou 6 faisceaux (à optimiser) + un conducteur de retour de la même taille mais isolé à une tension d'environ 20 kV

A3) Technologie LCC - bipolaire et liaison CC aérienne sans conducteur de retour à moyenne tension

Tension : V = ± 600 kV
Ligne : 2 conducteurs à 4 ou 6 faisceaux (à optimiser)

Note : le retour de courant par la terre au moyen d'électrodes situées dans les postes pourrait être envisagé en conditions transitoires d'urgence. La faisabilité de cette solution est à vérifier en phase de conception. Dans le cas contraire, en présence d'une panne d'un composant (ex : un pôle dans l'onduleur ou le redresseur), l'intégralité de la liaison sera mise hors service.

B1) Technologie en VSC - bipolaire avec câble de retour à moyenne tension.

Tension : V = ± 500 kV
Nb de câbles en MI par pôle : 4
Nb de câbles de retour : 4
Nb total de câbles : 12

Si disponibles sur le marché au moment de l'appel d'offres :
Tension : V = ± 500 kV / ± 525 kV
Nb de câbles extrudés par pôle : 2 ou 3
Nb de câbles de retour : 2 ou 3
Nb total de câbles : 6 ou 9

Note : rappelons qu'il n'existe aucune expérience opérationnelle d'exploitation de liaisons CC en VSC de taille aussi importante, ni avec un niveau de tension de 500 kV ou présence de câble neutre de retour.

B2) Technologie en VSC - bipolaire sans câble de retour à moyenne tension.
Tension : V = ± 500 kV
Nb de câbles en MI par pôle : 4
Nb total de câbles : 8

Si disponibles sur le marché au moment de l'appel d'offres :
Tension : V = ± 500 kV / ± 525 kV
Nb de câbles extrudés par pôle : 2 ou 3
Nb total de câbles : 4 ou 6

Note : les considérations similaires illustrées dans le cas B1) sont valables.

Notons que des liaisons en CC avec plusieurs câbles en parallèle n'ont jamais été réalisées. Dans certains cas, pour atteindre la capacité de transport souhaitée, il a été procédé à la construction de systèmes bipolaires en parallèle, comme par exemple dans le cas de la liaison à 2 000 MW entre la France et l'Espagne, où deux systèmes en parallèle à 1 000 MW chacun sont en cours de réalisation.
L'adoption de cette solution pour la ligne Avelin-Gavrelle impliquerait la réalisation d'au moins 4 systèmes bipolaires en parallèle avec un impact encore plus important en termes d'emprise des postes de conversions.

3.1.7 Coûts des ouvrages

Concernant les coûts d'investissement, les ouvrages les plus chers sont constitués par les postes de conversions. Une estimation budgétaire des coûts unitaires est fournie ci-dessous :

POSTES DE CONVERSION EN LCC :

- Investissement : 160 k€/MW (*) (**)

(*) valeur unitaire pour les deux postes de conversion en amont et en aval, en tenant compte de la taille (4 600 MW). Pour des ouvrages de plus petite taille, les coûts unitaires sont plus élevés, jusqu'à 190 k€/MW

(**) pour les solutions en VSC, le surcoût estimé est 1,6 fois supérieur au coût d'une installation en LCC

CABLES

- Investissement : 500 k€/km pour les câbles à 500 kV.
  400 k€/km pour les câbles à moyenne tension.
  Cependant, ce coût est strictement lié aux conditions d'installation, d'accès au chantier et de caractéristiques du terrain. Il faut de plus ajouter à ces coûts, ceux relatifs aux jonctions, environ tous les 700 – 1 000 m, et ceux nécessaires pour franchir les obstacles (routes, voies ferrés, cours d'eau).

Concernant la solution B1) en LCC avec postes de conversion de 4 600 MW et 12 câbles, une estimation très générale et préalable du coût d'investissement de la liaison en CC enfoui serait d'environ 900 M€, soit un coût extraordinaire pour une ligne de 28 km.
Il faut de plus ajouter les coûts d'expropriation pour la construction des postes de conversion et les coûts de franchissement des obstacles (ex : voie SNCF de la ligne Lille –Douai, ligne à grande vitesse LGV Nord, autoroute A1, route départementale RD643, rocade minière, canal de la Deûle).

Il faut également tenir compte du temps de réalisation des jonctions sachant que chaque chambre de jonctions comprendrait 4 jonctions dans le cas d'une solution enfouie en CC pour la liaison Avelin-Gavrelle. Le temps de réalisation de chaque groupe de 4 jonctions à THT est d'environ 2 semaines pour les câbles extrudés[8], tandis que pour les temps sont négligeables pour les jonctions de câbles en MT (quelques heures par jonction). Pour la solution proposée, il s'agirait de construire 480 jonctions[9] (dont 160 en MT). Cela demanderait donc la disponibilité de plusieurs équipes de travail engagées en parallèle ainsi qu'une synchronisation avec les travaux de pose des tronçons de câbles.

Concernant les coûts d'exploitation, les coûts fixes et variables doivent être pris en compte. Une estimation possible est fournie ci-après :

POSTES DE CONVERSION EN LCC :

- Entretien (coûts fixes) : 0,3% par an du coût d'investissement
- Pertes (coûts variables) : 0,7% de Pn par poste de conversion à la puissance nominale
  0,12% de Pn par poste de conversion à la puissance nominale à vide (« no load »)

[8] Ces délais doublent pour les jonctions des câbles en MI

[9] Hypothèse : longueur de la ligne : 28 km - jonctions tous les 700 m - 12 câbles.

CABLES EN LCC :

- Entretien (coûts fixes) : les coûts d'entretien sont tout à fait similaires à ceux des câbles CA et consistent en l'inspection périodique des chambres de jonctions et essais d'intégrité de la gaine externe. Il s'agit de coûts relativement bas.
- Pertes (coûts variables) : les pertes sont certainement plus faibles grâce à l'absence de l'« effet peau » (« skin effect ») dans le cas du CA, et grâce à l'absence de pertes dans les écrans causées par les courants induits et celles associés au diélectrique. À égalité de puissance transportée (ex : 1 GW), les pertes en CC peuvent être de l'ordre de 30% inférieures par rapport à celles dans le cas triphasé CA (à titre indicatif : 80 W/m pour un système bipolaire au lieu de 120 W/m pour un câble CA triphasé). Bien entendu, un calcul plus précis nécessite un dimensionnement optimisé du câble.

3.2 Réponses et remarques aux questions posées sur l'utilisation du CC pour la ligne Avelin-Gavrelle

Comme ceci a été vu précédemment, l'utilisation de la technologie en CC pour le transport d'électricité a subi en essor remarquable ces dernières années. Cependant l'utilisation de cette technologie est liée à des facteurs ne s'appliquant pas à la ligne Avelin-Gavrelle, à savoir :

- transport de grandes quantités de puissance (plusieurs GW) sur de longues distances (de l'ordre de centaines ou milliers de kilomètres),
- liaisons sous-marines (ex : en Europe, connexion de fermes éoliennes offshore situées dans la Mer du Nord et Baltique à la terre ferme)
- liaison entre des systèmes de fréquence différente
- autres facteurs liés à la fourniture de services auxiliaires de système, etc. (voir également le § 3.1).

De plus, les liaisons terrestres en CC sont généralement construites par le biais de lignes aériennes.

Si nous nous en tenons aux conditions spécifiques de la reconstruction de la ligne Avelin-Gavrelle et aux questions posées en phase de concertation, les observations suivantes peuvent être faites sur l'utilisation du courant continu pour cette ligne.

ÉTAT DE MAITRISE DE LA TECHNOLOGIE

Cette technologie est très bien maîtrisée tant concernant la solution LCC (Line Commutated Converters basés sur thyristors), que pour la solution VSC (Voltage Source Converters basés sur IGBT). Durant cette dernière décennie, la taille des postes de conversions a considérablement augmenté atteignant jusqu'à 8 000 MW en LCC et 1 000 MW en VSC.

Cependant, dans le cas de liaisons enfouies, des limitations persistent quant à la capacité de transport des câbles, actuellement d'environ 1 000 MW. Également dans ce domaine, des progrès sont en cours (§3.1.5) et de nouveaux câbles d'une portée allant jusqu'à 1 500 – 2 000 MW seront utilisés, même si pour la plus part sous-marins.

Pour plus de détails sur la maîtrise de cette technologie, consulter le § 3.1.1.

ÉVOLUTION DEPUIS 10 ANS

La technologie en CC a fortement évolué depuis ces 10 dernières années en termes de taille des postes de conversion, tant pour la en solution LCC que pour la solution VSC.

Rappelons que dans ce dernier cas, la nouvelle génération de postes en CC VSC a permis d'obtenir une baisse des pertes de 1,7% à 1% de la puissance nominale par poste de conversion, soit une valeur très proche des pertes en LCC (0,7%).

Des informations plus détaillées concernant ces deux technologies et les évolutions récentes et attendues sont fournies au § 3.1.2.

TRAVAUX SUPPLEMENTAIRES

En cas d'adoption du CC, les travaux supplémentaires sont liés à la nécessité de construire deux postes de conversion aux extrémités de la liaison. Ces postes impliquent une occupation du sol très importante, principalement pour une solution en LCC, ainsi que des coûts d'investissement extraordinaires difficilement justifiables compte tenu de la longueur modeste de la ligne concernée.

Une description détaillée de ces travaux supplémentaires est fournie au § 3.1.3. Pour ce qui est de leurs coûts, se référer au § 3.1.7.

DIFFERENCE EN TERMES D'EMPRISE DES TRANCHEES ET D'EMPRISE TOTALE ENTRE CABLES EN CC ET EN CA

L'emprise de la tranchée pour l'enfouissement des câbles est essentiellement liée aux nombres de câbles et à la caractéristique du terrain (notamment sa résistivité).

En supposant une solution en câbles CC à isolation solide (« Mass Impregnated ») (*solution A1) par. 3.1.6*) ayant une capacité de transport en bipolaire de 1000 MW, il faudrait alors prévoir la pose de 12 câbles, en comparaison avec les 6 circuits tricâbles en CA posés en trèfle proposés par RTE. Sachant que les câbles en CC doivent être posés à une distance d'environ 40 cm les uns des autres pour permettre une dissipation de la chaleur produite par effet Joule, la largeur de la tranchée destinée à la pose des câbles serait d'environ 9-10 m. La Fig. 3-14 montre une possible solution de pose des câbles en CC.

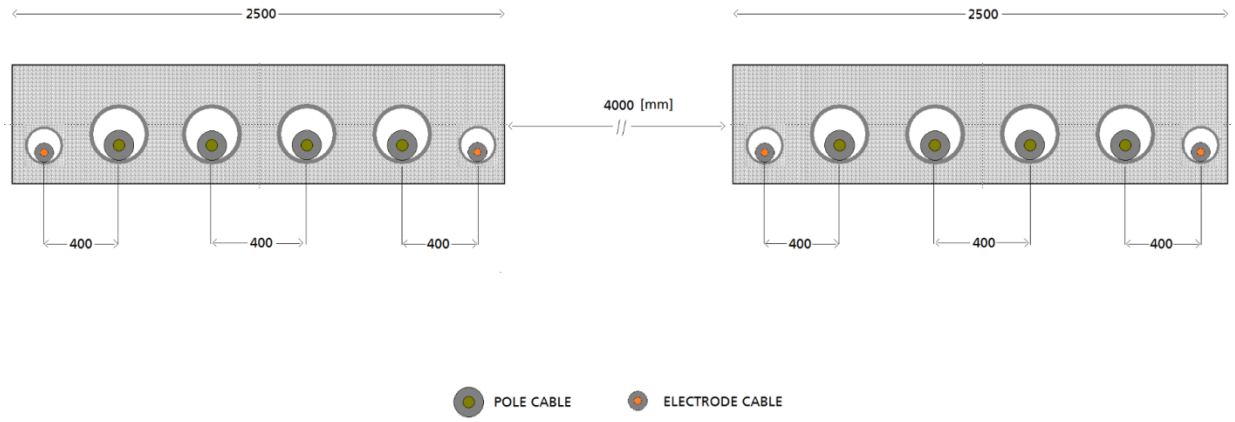


Fig. 3-14 Schéma d'une possible solution de pose des câbles en CC incluant les câbles de retour (« electrode cables »)

En ce qui concerne les jonctions, les chambres de jonction des liaisons enfouies en CC correspondent normalement à 2/3 de celles des câbles en CA, puisqu'il s'agit d'assembler les deux câbles des deux pôles (positif et négatif). Dans notre cas, sachant qu'il y aurait plusieurs câbles côté pôle positif, négatif et de retour, les chambres de jonctions auront une dimension de l'ordre de 4-5 m de largeur et 15-20 m de longueur. Elles seront plus petites pour les câbles de retour.

Enfin, les jonctions sont à prévoir tous les 700 – 1 000 m, comme dans le cas des câbles en CA, avec des contraintes de transport identiques à celles des tourets chargés sur poids lourds.

Note : les observations ci-dessus sont des idées générales sur une possible solution en CC enfouie, décrites sans avoir développé le projet en détail.

Étant donné la nécessité d'accès des poids lourds sur le chantier et en tenant compte de l'emprise de la tranchée, il n'existe pas de différences remarquables entre la solution en CC et en CA en phase d'installation des câbles.

En revanche, les câbles en CC permettent de réduire les pertes (environ 30%) par rapport aux câbles en CA à égalité de puissance active transportée, constituant donc un avantage pour le terrain.

FIABILITE DE L'INSTALLATION EN CABLES ENTERRES

Concernant la fiabilité des installations en câbles enterrés, il est fait référence à la Brochure Technique du CIGRE n° 379 "Update of service expérience of HV underground and submarine cable systems", rédigée en 2009. Ce document examine les câbles terrestres et sous-marins en exploitation.
L'analyse de la partie terrestre, soit celle nous concernant dans ce cas précis, est basée sur les données provenant de circuits CA de 33 000 km de long et de circuits CC de 800 km de long. Les statistiques des pannes se réfèrent à la période 2001-2005.
Pour les câbles CA extrudés à 220-500 kV, le taux de défaillance pour des raisons internes aux câbles est de 0,067 défaillance/(an*100 km de circuit) et de 0,026 défaillance/(an*100 composants) pour les jonctions. En revanche, concernant les câbles en huile OF (Oil Filled)[10], les statistiques enregistrent un taux de 0,107 défaillance/(an*100 km de circuit) et 0,010 défaillance/(an*100 composants) pour les jonctions.
Concernant les câbles en CC enterrés, les données ne sont pas significatives car il existe très peu de liaisons CC terrestres en câbles traditionnels (MI), et celles en câbles extrudés sont très récentes et présentent des niveaux de tensions limités (150 kV CC). Par conséquent, le rapport CIGRE invite à interpréter ces données avec prudence.
Des observations plus intéressantes peuvent être faites sur les câbles CA :

- les taux de défaillance (tant pour câbles extrudés que OF) sont jugés cohérents avec ceux attendus en phase de projet,
- les câbles extrudés ont un taux de défaillance pour raisons internes inférieur à ceux en OF,
- c'est en revanche le contraire pour les jonctions,
- la moitié des pannes est due à des causes externes,
- concernant les causes externes, les câbles directement enfouis sont 10 fois plus « exposés » (c'est-à-dire qu'ils subissent 10 fois plus de pannes) que ceux protégés en fourreau ou en tunnel
- la durée d'arrêt pour mise hors service des câbles extrudés et OF est respectivement de 20 et 29 jours.

Note : pour les CIG il n'y a pas d'études similaires sur les statistiques de défaillances et les causes qui les ont produites.

ENTRETIEN A PREVOIR

Entretien « correctif »

Concernant l'entretien, on peut affirmer l'entretien « correctif » des câbles CC est similaire à celle requise pour les câbles en CA. En effet, en se référant aux travaux de réparation sur câbles ou jonctions, aucune différence significative entre technologie extrudée, MI ou OF pour les câbles CC ou CA n'est constatée.

[10] Câbles presque plus utilisés de nos jours.

Entretien « préventif »

Concernant l'entretien « préventif », les câbles CA ont vu un développement remarquable des systèmes de diagnostic (en particulier les accessoires) en termes de mesure des décharges partielles. Ces systèmes sont encore en phase de prototype pour le CC en raison du stress diélectrique différent se reflétant dans la capacité de mettre en évidence les éventuelles défaillances.

En outre, certains contrôles sont communs à tous les câbles CA et CC :

- pour tous les câbles, il est de bonne pratique de vérifier (normalement une fois par an) l'intégrité de la gaine externe pour détecter d'éventuels dommages externes,
- pour tous les systèmes en câbles, il est possible d'utiliser les systèmes DTS (Distributed Temperature Sensor) pour la détection de la température le long du câble,
- la surveillance visuelle (patrouille de route de câble : « cable route patrol ») le long du tracé doit être effectuée périodiquement.

Tout ce qui précède est bien entendu valable pour les câbles présentant une même isolation (extrudé, MI ou OF). Les câbles isolé par huile fluide (OF) nécessitent une surveillance continue de la pression, indépendamment de la tension CA ou CC, en raison de la présence d'huile sous (faible) pression.

COMPARAISON ENTRE LE TRANSPORT EN CC ET LE TRANSPORT EN CA

Tab. 3-1- Comparaison entre transport en CA et le transport en CC

Câbles enfouis	
CA	***CC***
➢ Capacité vers la terre très élevée : difficulté de contrôle du profil de tension ➢ Nécessité de compensation de la puissance réactive pour des tronçons dépassant quelques kilomètres	➢ Pas de production de puissance réactive ➢ En théorie, pas de limitation de longueur des liaisons, La limitation est due au nombre de jonctions
➢ Pertes plus élevées des câbles CC à parité de puissance transportée	➢ Pertes majoritairement réduites par rapport aux câbles CA
➢ Présence de champs magnétiques au-dessus du câble	➢ Absence de champs magnétiques
➢ Bon retour d'expérience sur la fiabilité	➢ Expérience plus limitée sur la fiabilité en raison du petit nombre d'installations de longueur similaire à celle de la ligne Avelin-Gavrelle

4 DIFFERENCES ENTRE UNE LIAISON AERIENNE ET UNE LIAISON SOUTERRAINE

Une comparaison entre une ligne aérienne à 400 kV à double circuit (capacité de transport 4 000 MW) et une liaison souterraine a été présentée par CESI dans les rapport A8021930 « Synthèse actualisée des différentes technologies envisageables pour le projet « Cotentin-Maine » », préparé pour la Préfecture de la Manche - Bureau de l'environnement. La comparaison tenait compte des éléments suivants :

- Impact permanent sur l'environnement
- Impact transitoire sur l'environnement en phase de chantier
- Champs électromagnétiques
- Coûts complets : investissements, exploitation (fixes et variables) et démantèlement
- Autres aspects, tels que : expériences précédentes, fiabilité attendue, franchissement des obstacles, intégration dans les ouvrages existants.

Cette comparaison, extraite du rapport CESI mentionné ci-dessus, est présentée en Annexe 2.

4.1 Risques de rupture des lignes aériennes et souterraines

Les cas de rupture de lignes aériennes sont très rares puisque le dimensionnement des lignes, et notamment les pylônes et les ancrages des conducteurs, est effectué en tenant compte des conditions météo extrêmes dans les différentes régions[11].

Sur la base d'un recueil de données collectées sur 10 ans (2003-2013) concernant les défaillances des lignes aériennes, les pannes susceptibles d'être associées à des défaillances mécaniques représentent 0,46% du total, et se répartissent comme suit :

Cause du défaut	nb	% du total des défaillances mécaniques	% sur le total des défaillances des lignes
rupture du conducteur de ligne	320	29,6	0,14
rupture de la corde de garde	238	22,0	0,10
affaissement de la fondation	156	14,4	0,07
rupture de la chaîne de suspension	147	13,6	0,06
rupture / effondrement du soutien	136	12,6	0,06
Interruption de la bretelle	84	7,8	0,04
Total	**1081**	**100**	**0,46**

Note : données se référant à une longueur totale de lignes 400-220 kV de 22 000 km.

[11] Ex : l'Italie est divisée en deux zones pour le projet de lignes aériennes.

Concernant les câbles, voir le § 3.2. Les défaillances pour causes internes représentent environ 50% du total, le reste étant dû à des causes externes : typiquement la rupture des câbles pendant les travaux de creusement.
Rappelons que, contrairement aux lignes aériennes où les pannes peuvent être réparées en quelques heures, au plus quelques jours en cas d'effondrement du pylône, les installations en câbles impliquent des temps d'arrêt plus longs de l'ordre de plusieurs semaines.

5 COMMENTAIRES GENERAUX SUR LES POSSIBLES SOLUTIONS POUR LA LIGNE AVELIN-GAVRELLE

Sur la base des éléments illustrés dans les chapitres précédents, il est possible de faire les commentaires suivants :

- *Solution en CC*

  L'adoption de la technologie en CC pour la construction de la nouvelle ligne Avelin-Gavrelle peut être difficilement justifiée. Aucune des conditions justifiant normalement ce type de technologie n'est présente ici (longueurs très importantes, fréquences différentes aux extrémités, présence de la mer, franchissement d'obstacles tels que des chaînes de montagnes).

  Les coûts d'investissements seraient énormes, sans parler des coûts additionnels durant l'exploitation liés aux pertes dans les postes de conversion (1,4% de la puissance nominale en cas de technologie LCC).

  De plus, cette solution serait défavorable du point de vue environnemental en raison de la nécessité de construire deux postes de conversions aux extrémités de la ligne, lesquels occuperaient une aire allant jusqu'à 20 hectares (technologie LCC). Pour pouvoir garantir une capacité de transport de 4 600 MW, la solution enfouie devrait utiliser 4 câbles par pôle et 4 câbles pour le retour en CC. Ceci comporte un effort extraordinaire en termes de réalisation des jonctions et un impact relativement important sur le territoire, tant en phase de chantier qu'après la mise en service.

  Naturellement, cette solution présente des avantages en raison de l'absence de champs magnétiques et de gêne visuelle en cas d'enfouissement total. En outre, les postes de conversions permettent de contrôler la puissance transportée en agissant sur les systèmes de contrôle.

- *Solution en CIG*

  Les câbles en isolation gazeuse (CIG) proposent de très bonnes performances électriques. Pour les longueurs étudiées ici, ils ne nécessitent aucune compensation de puissance réactive, à l'inverse des câbles en isolation synthétique (CIS). Leurs pertes sont également bien inférieures à celles des lignes aériennes et des CIS.

  En raison de leur modeste impédance, les systèmes CIG et CIS nécessiteraient l'installation d'une inductance à une extrémité afin d'équilibrer les flux de puissance dans le réseau maillé.

  Les CIG sont bien adaptés à transporter de grandes quantités de puissance et dans le cas de la nouvelle ligne Avelin-Gavrelle, deux systèmes triphasés en CIG suffiraient.

  Les coûts d'investissement sont modérés, bien que plus élevés que dans le cas de ligne aérienne, et peuvent actuellement être chiffrés à environ 7 à 8 M€/km pour les deux systèmes triphasés. Donc, par rapport à la solution en CIS, la solution en CIG présente des coûts inférieurs.

  Encore, il est à souligner que les CIG offrent des champs magnétiques pratiquement nuls, même si la technologie est en CA.

  Notons cependant que :

- Jusqu'à présent, les CIG ont été utilisés sur des distances très courtes, à savoir de quelques centaines de mètres à trois kilomètres [12]
- Les CIG ont été utilisés en conditions relativement exceptionnelles, par exemple en présence d'une montagne entre la centrale électrique et le réseau de transport ou d'obstacles en zones densément urbanisées
- Tout comme dans le cas des CIS, les CIG nécessitent un poste de transition aéro-souterrain aux extrémités
- La plupart des CIG sont installés en tunnel, même s'il ne s'agit pas là d'une contrainte d'installation des CIG
- Les CIG présentent des difficultés plus importantes que les CIS en termes de franchissement d'obstacles
- Compte tenu du nombre d'installations encore modeste dans le monde, surtout pour ce qui est des installations en tranchée, le retour d'expérience concernant la fiabilité est limité
- L'Europe compte pratiquement un seul fabricant de CIG, ce qui pourrait causer des difficultés en phase de passation du marché et de négociation des prix. Il n'existe donc pas de contexte de marché compétitif.

Dans le cas spécifique de la ligne Avelin-Gavrelle, il est possible d'envisager une solution en CIG pour un tronçon de petite longueur (3-5 kilomètres) au sud du poste d'Avelin, lequel ne présente pas d'obstacles à franchir.

Un examen plus détaillé des avantages et inconvénients par rapport à la ligne aérienne serait cependant nécessaire, en tenant compte des impacts environnementaux spécifiques de la région.

➢ *Autres remarques*

Les lignes aériennes représentent la solution classique appliquée aux réseaux de transport en THT. La gêne visuelle causée essentiellement par les pylônes est cependant évidente. Afin de réduire cet inconvénient, les pylônes de nouvelle conception, dont la silhouette et les dimensions de base sont réduites, sont aujourd'hui de plus en plus utilisés. À titre indicatif, l'Annexe 3 fournit quelques exemples de pylônes à impact environnemental réduit, utilisés sur la nouvelle ligne 400 kV entre le Piémont et la Lombardie, mise en service en janvier 2014 et ayant une capacité de transport de 3 650 MW en hiver et 3 325 MW en été (taille comparable à celle de la nouvelle ligne Avelin-Gavrelle). La ligne, en double circuit a une longueur de 84 km et s'étend sur un territoire agricole de valeur (culture du riz, mais, blé, présence de bois de peupliers, franchissement du parc fluvial du Tessin).
Ces pylônes à faible impact environnemental ont un coût de réalisation variable compris dans une fourchette allant de 1,5 à 3 supérieurs à ceux des pylônes classiques en treillis, en fonction de leur silhouette.

[12] La ligne de transmission en CIG la plus longue ne fait que 6,5 km (ligne Shinmeika-Tokai à 275 kV, deux circuits en parallèle, d'une longueur de 3,25 km chacun, mise en service au Japon en 1998 pour relier la centrale thermoélectrique de Shin-Nagoya au poste de Tokai situé dans le centre-ville de Nagoya).

6 REFERENCES

[1] RTE, « *Concertation sur le projet de reconstruction de la ligne à 400 000 Volt entre Avelin et Gavrelle - Dossier d'informations* », Octobre 2012

[2] RTE, « R*econstruction de la ligne de grand transport d'électricité entre Avelin et Gavrelle - Note d'information générale* », Octobre 2012

[3] RTE, « R*econstruction de la ligne de grand transport d'électricité entre Avelin et Gavrelle - Note d'information générale* », Octobre 2012

[4] RTE, « *Projet de* r*econstruction de la ligne électrique à 400.000 Volt entre Avelin et Gavrelle - Choix du fuseau de moindre impact* », Mai 2014

[5] RTE, « *Étude de la technique souterraine appliquée au projet Avelin--Gavrelle - Résumé* », 2014

[6] RTE, « *Concertation sur le projet de reconstruction de la ligne à 400 000 Volts entre Avelin et Gavrelle – Synthèse de l'étude d'un siphon aéro-souterrain dans la Pévèle* », Septembre 2014

[7] ENTSO-E, "*Ten-Year Network Development Plan 2014 - Executive Summary*", Bruxelles, Juillet 2014

[8] ENTSO-E, Europacable, "Joint paper: feasibility and technical aspects of partial undergrounding of extra high voltage power transmission lines", Bruxelles, Décembre 2010

[9] CIGRE WG B1.07 Brochure 338 : "*Statistics of AC underground cables in power networks*" – Décembre 2007

[10] R. Rendina et alii, "*The new Turbigo-Rho 380 kV transmission line: an example of the use of underground XLPE cables in a meshed transmission grid*", CIGRE General Session 2006, Paris, August 2006, paper: B1-302

[11] H.Pouliquen, J.Kowal, P.Adam, P.Lahirigoyen, M.Chammas, "Opportunities and solutions for the development of a Mediterranean grid", CIGRE General Session 2014, Paris, Aug. 2014, paper C1-303

[12] Desertec Industrial Initiative, "*Desert Power: Getting Connected*"; München, June 2014

[13] Friends of the Supergrid, "*FOSG report on the preparatory phase of a Supergrid*", Bruxelles, March 2014

[14] A.Gustafsson, M.Saltzer, A.Farkas, H.Ghorbani, T.Quist, M.Jeroense, "*The new 525 kV extruded HVDC cable system World's most powerful extruded cable system*", ABB, August 2014

[15] "*Westernlink project*", National Grid & Scottish Power, www.westernhvdclink.co.uk, 2013

ANNEXE 1 - CABLES A ISOLATION SYNTHETIQUE (CIS)

Un câble à isolation synthétique (Fig. 0-1) est composé par :

- une *âme en cuivre* (conducteur) qui assure le transit du courant ; le matériel qui la constitue et ses dimensions (section) influencent la capacité de transit du câble ; dans les applications de forte puissance on utilise des âmes de section 1600 à 2500 mm^2 qui garantissent le passage du courant tout en limitant les pertes par effet Joule et l'échauffement qui en résulte;
- un *écran semi-conducteur interne* qui permet de rendre uniforme le champ électrique dans la partie interne de l'enveloppe isolante et assume la fonction d'interface entre l'isolant et les électrodes;
- une *enveloppe isolante* qui permet d'isoler le conducteur par rapport au milieu externe ; le matériel de base de l'isolation est le polyéthylène réticulé, une matière plastique complexe de formulation récente pour les applications en très haute tension ;
- un *écran semi-conducteur externe* qui permet de rendre uniforme le champ électrique sur la surface externe de l'enveloppe isolante.
- un *écran métallique* qui contribue au confinement du champ électrique, assure la circulation des courants de court-circuit, recueille la composante capacitive du courant, joue le rôle de référence pour le potentiel de terre et empêche la pénétration d'eau vers l'enveloppe isolante ;
- une *gaine isolante* extérieure qui protège le câble contre les possibles dommages environnementales et mécaniques externes et isole l'écran métallique en assurant la protection des tiers contre le contact direct .

Il est à rappeler qu'une liaison en câble enfoui est constituée aussi par les composants suivants :

- les **extrémités** qui servent au raccordement du câble au réseau électrique;
- les **jonctions** pour connecter les tronçons de câble tous les 500-1000 m.

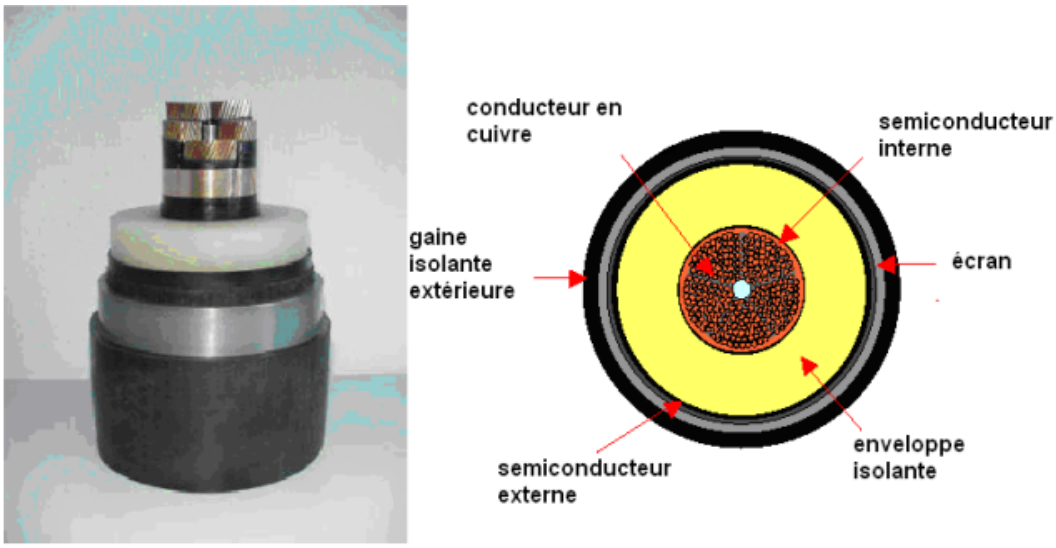


Fig. 0-1 Eléments constitutifs d'un câble 400 kV à isolation solide

A.1 Enjeux environnementaux des câbles enfouis en courant alternatif

L'adoption de câbles à isolation extrudée (ou synthétique) avec polyéthylène ou résines au lieu de câbles à huile fluide a permis de réduire les coûts aussi bien que les pertes diélectriques, mais surtout d'éliminer le danger de pertes d'huile des circuits hydrauliques dans le terrain. Néanmoins l'impact sur l'environnement des câbles, bien que pour certains aspects plus réduit par rapport aux lignes aériennes, n'est pas nul, notamment pour l'occupation du terrain et son aménagement après la pose des câbles.

Impact visuel

L'impact visuel est dû principalement aux nécessités de déboisement : il dépend donc de la nature du terrain rencontré (faible en prairie, important en zone forestière).

Impact sur la surface occupée de terrain

L'occupation du sol suite à l'installation des câbles représente une des contraintes les plus évidentes. Cependant à la fin des travaux de construction, le terrain occupé se réduit à un front de 3 à 13 mètres (pour un jeu de deux doubles tricâbles), qui peut être divisé en deux couloirs d'environ 3 mètres chacun en bordure d'une voie de circulation ou d'une voie de service. La principale conséquence réside dans l'impossibilité d'avoir des plantations à racines profondes sur une bande d'au moins 2 mètres de chaque côté du câble. La *Fig. 0-2* montre les dimensions relatives d'une ligne aérienne en double circuit et d'une ligne enterrée de capacité comparable.

De plus, pour des distances de plus de quelques kilomètres il faut, enfin, prévoir la présence de postes de compensation du réactif. L'emprise sur le terrain d'une station de compensation du réactif type est montrée dans la Fig. 0-3 (dans le cas de figure on considère une station dimensionnée pour 250 MVar). Il faut prendre en compte que, pour garantir la flexibilité de gestion du réseau, la compensation de la puissance capacitive des câbles est normalement répartie aux deux extrémités de la connexion. Pourtant quand une compensation est nécessaire, deux postes de compensation sont normalement utilisés.

L'impact le plus lourd sur le territoire se vérifie lors de la pose des câbles. La surface de terrain occupée par la construction de la ligne souterraine est équivalente à un front de largeur variable de 5 m (pour la pose d'un tricâble THT directement enterré en trèfle) à près de 30 m (pour la pose d'un jeu de quatre tricâbles en nappe) qui avance le long de tout le tracé. Ces dimensions de front comprennent la route de service, l'excavation de la tranchée dans laquelle les câbles seront posés et le dépôt du terrain excavé et du terrain à conductibilité thermique contrôlée utilisé pour la couverture des câbles. Il faut, en outre, prévoir des aires pour le dépôt définitif du surplus de terrain excavé, qui a un volume de l'ordre de 3000 mètres cubes par kilomètre de ligne.

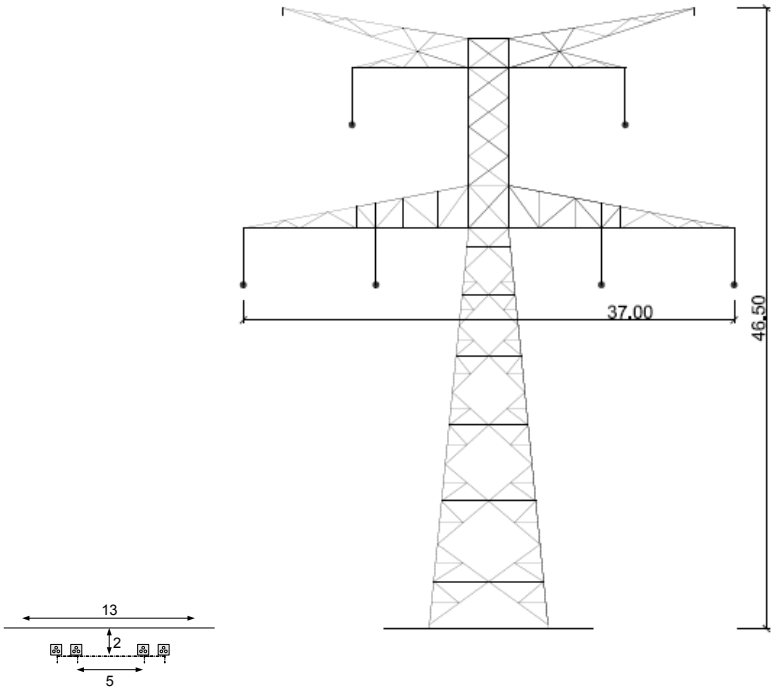


Fig. 0-2 Comparaison géométrique entre une ligne THT double terne et son équivalent en câble souterrain

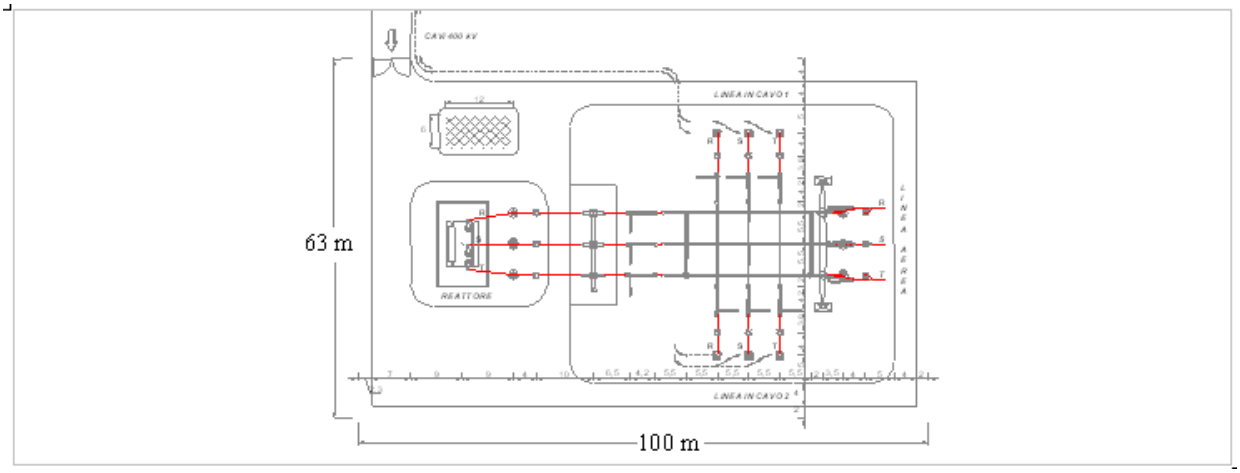


Fig. 0-3 Dimensions d'un poste de compensation du réactif pour un tricâble 400 kV

Parmi les travaux d'installation il faut mentionner la réalisation de chambres pour les jonctions qui, pour le niveau de 400 kV, ont des dimensions importantes (plus de 10 m de longueur et 2 m de largeur et profondeur).

Tout le long de tracé il est nécessaire d'avoir la possibilité d'accès des poids lourds (Fig. 0-4) pour l'approvisionnement des bobines de câble. Il est évident que la végétation présente en surface sera détruite.

Fig. 0-4: Approvisionnement des câbles en chantier (source CESI RICERCA 2007)

Impacts sur la végétation :
L'impact sur la flore et la végétation des liaisons en câbles est très significatif (*Fig. 0-5*). Pendant la phase de chantier il est nécessaire de disposer d'une surface de terrain « propre » (donc déboisement et perte temporaire de cultures agricoles) équivalente à la longueur du tracé par une largeur correspondante à l'aire de chantier, et, pendant la phase de fonctionnement, une limitation des espèces végétales cultivables. L'énergie thermique produite par la ligne en fonctionnement pourra induire un effet de séchage du terrain autour ou, au contraire, une forte érosion en cas d'inondations.

Interférence avec les eaux superficielles et souterraines :
S'agissant d'une technologie souterraine il ne faut pas négliger les interférences avec les eaux superficielles et souterraines, surtout dans des zones à haute exploitation des nappes aquifères à des fins agricoles. La traversée de cours d'eaux d'une certaine importance peut constituer, en outre, un élément d'attention, non seulement d'un point de vue technique, mais aussi vis à vis des diverses utilisations possibles et de la présence d'une faune aquatique.

Fig. 0-5 - Vue d'ensemble de l'emprise de chantier des câbles posés dans le Nord Yorkshire-Grande Bretagne (source CIGRE 2007)

Champs électromagnétiques :
L'effet d'écran exercé par les gaines conductrices des câbles permet d'annuler le champ électrique.
Le profil du champ magnétique à 1 mètre de hauteur sur le sol pour une liaison en double circuit à deux tri-câbles par circuit, en considérant des conditions nominales de fonctionnement, c'est à dire un courant

de 2000A sur chaque circuit, peut atteindre environ 10 µT à l'aplomb d'un circuit mais décroît très rapidement dès qu'on s'en éloigne (divisé par 5 à 5 mètres et par 15 à 10 mètres).

ANNEXE 2 – COMPRARATIF ENTRE LIGNES AERIENNES ET CABLES ENFOUIS

Les tableaux suivants sont extraits du rapport CESI A8021930 « Synthèse actualisée des différentes technologies envisageables pour le projet «Cotentin-Maine» », préparé pour la Préfecture de la Manche - Bureau de l'environnement.

Tab. 0-1- Caractéristiques de la ligne aérienne et du siphon en câble enfoui: impact permanent sur l'environnement

Impact permanent sur l'environnement		
	Ligne aérienne	***Siphon en câble enfoui***
Impact visuel	➢Très important : la hauteur des pylônes pour les lignes double terne à 400 kV est de l'ordre de 45 à 65 mètres ; ➢Possible mitigation de l'impact visuel en utilisant des colorations mimétiques, en mutualisant la construction de la ligne avec d'autres structures de type linéaire (chemin de fer, autoroutes, autres lignes déjà existantes), en recherchant des tracés au fond des vallées et à mi-côte en montagne qui permettent une visibilité réduite de la ligne	➢Pratiquement nul le long du parcours (à part les limitations de culture) ; ➢Impact des postes d'extrémité de transition « aérien-souterrain », semblables à des petits postes de transformation à très haute tension; ➢Impact visuel des postes de compensation de puissance réactive dans le cas où le siphon dépasse la longueur de 20-30 km
Emprise permanente des postes d'extrémité, de transition ou de compensation	➢Postes d'extrémité : environ une dizaine d'hectare pour le projet Cotentin-Maine	➢Postes d'extrémité : comme dans les lignes aériennes ➢Au début et à la fin du siphon: poste de transition : 1200 m^2 pour double tricâble ; ➢Chaque 25 km poste de compensation : 3000 à 6000 m^2 (l'aire du poste dépend de la valeur de puissance réactive à compenser)
Utilisation du terrain	➢100 m^2/pylône ➢1 pylône tous les 400 à 500 m ➢ possibilité d'employer le terrain pour usages agricoles (cultures, élevage de bétail) au-dessous de la ligne ; ➢limitation de la hauteur des arboricultures	➢Emprise limitée si le tracé longe une route/voie ferrée ➢1 jonction/700 à 1000m. Chaque chambre de jonction doit être inspectable ➢sur 5-6 m de largeur, importantes limitations aux cultures
Impact sur milieu naturel	➢ponctuel à chaque pylône ➢possibles dangers pour l'avifaune si pas de dispositif adapté	➢Impact lié à tracé continu ➢écoulement des eaux perturbé le long de l'ouvrage

Tab. 0-2- Caractéristiques de la ligne aérienne et du siphon en câble enfoui : impact transitoire sur l'environnement en phase de chantier

Impact transitoire sur l'environnement en phase de chantier		
	Ligne aérienne	***Siphon en câble enfoui***
Emprise du chantier	➢Chantier discontinu le long du tracé : pointillé à chaque pylône, tous les 400 à 500 m. Sauf lors de la pose des conducteurs ; ➢Chantier à chaque pylône occupe environ 800m^2 ➢Nécessité de pistes d'accès	➢Chantier d'environ 1,5 km de longueur ayant un front variable 3-5 mètres de chaque côté d'une route à 15 m y comprise la route de service (pour chaque couple de tricâbles); ➢Aucune piste d'accès si le chantier se développe le long d'une route ➢Chantier civil et technologique important pour la construction et la mise en service des postes d'extrémité et des postes de compensation de puissance réactive ➢Impact très important en cas de pose des câbles en campagne : nécessité d'accès des poids lourdes
Impact du chantier	➢Engins de mouvement et de transport de terre ➢Poussière et pollution dues au transit de camions ➢Bruit de terrassement et d'injection de ciment	➢Mouvement et de transport de terre plus important par rapport à la ligne aérienne ➢Poussière et pollution dues au transit de camions ➢Bruit de terrassement

Tab. 0-3- Caractéristiques de la ligne aérienne et du siphon en câble enfoui: champs électromagnétiques

Champs électromagnétiques		
	Ligne aérienne	***Siphon en câble enfoui***
Champ magnétique	➢Dans des conditions normales et moyennes du transit, les valeurs du champ magnétique sont environ 6 µT à l'aplomb de la ligne, 1,6 µT à une distance de 30 m de l'axe, 0,2 µT à une distance de 100 m de l'axe. ➢Même dans les conditions d'IMAP (Intensité du courant Maximale Admissible en Permanence) le champ magnétique à 1 mètre du sol sous la ligne est très inférieur au niveau maximum recommandé par la Communauté Européenne ➢Le champ diminue en s'approchant du sol	➢Le champ magnétique à 1 mètre de hauteur sur le sol ne dépasse les 10 µT à l'aplomb du câble avec un courant de 2000 A, mais il décroît très rapidement dès qu'on s'en éloigne (divisé par 5 à 5 mètres et par 15 à 10 mètres). ➢Le champ augmente vers le sol
Champ électrique	➢Le profil de champ électrique répond au critère E ≤ 5 kV/m sous la ligne.	➢L'effet d'écran exercé par les gaines conductrices des câbles permet d'annuler le champ électrique.

Tab. 0-4- Comparaison des coûts entre ligne aérienne et siphons en câble enfoui

Comparaison des coûts	
Ligne aérienne	***Câble enfoui***
➢Fourchette de coûts d'investissement en zone rurale : 0.6 à 1 M€/km ➢Coûts des tronçons en montagne : 1.5 à 2 M€/km ➢Coûts de gestion et de maintenance (O&M) : 2.5-3% du coût d'investissement ➢Pertes: 2÷3% de la puissance nominale pour 100 km. Coût des pertes lié au prix du kWh. ➢Coûts de démantèlement en fin de vie : 1.5÷2.5% du coût d'investissement	➢Fourchette de coûts d'investissement en zone rurale sans obstacles majeurs: 4 à 8 M€/km pour un double tricâble ; ➢Il est quasiment impossible d'évaluer « a priori » les coûts de réalisation en présence d'obstacles majeurs : une étude détaillée dans le contexte spécifique doit être conduite. Dans ces situations les coûts investissement peuvent largement dépasser les 10 M€/km ➢Coûts de compensation du réactif (nécessaire si la longueur de la connexion dépasse 20-30 km): 150 k€/km ➢Coûts d'une paire de postes de transition aéro-souterraine : 900 k€ ➢Coûts de gestion et de maintenance (O&M) : négligeables par rapport au coût d'investissement ➢Pertes : 0.8÷1.4% de la puissance nominale pour 100 km. Pertes plus réduites par rapport à la ligne aérienne à cause de la section du conducteur plus élevée. Coût des pertes lié au prix du kWh. ➢Coûts de démantèlement en fin de vie : 0.4÷0.8% du coût d'investissement

Tab. 0-5- Caractéristiques de la ligne aérienne et du siphon en câble enfoui: autres aspects

Autres aspects		
	Ligne aérienne	***Siphon en câble enfoui***
Expérience précédente	➢Technologie bien maîtrisée	➢Technologie bien maîtrisée sur de brèves distances
Fiabilité attendue	➢Bien maîtrisée : nombre de déclenchements élevés mais de courte durée et avec possibilité de ré-enclenchement automatique	➢Plutôt bien maîtrisée : nombre de déclenchements pour causes internes très limité mais durée de réparation très élevée ; ➢Le ré-enclenchement automatique n'est pas possible
Dépassement d'obstacles	➢Traversée de routes: bien maîtrisée et aisée ➢Traversée de rivières: bien maîtrisée et aisée ➢Traversée de montagnes: bien maîtrisée souvent difficile	➢Traversée de routes: bien maîtrisée et aisée ➢Traversée de rivières: souvent difficile ➢Traversée de montagnes: pose en tunnel complexe
Intégration dans les ouvrages existants	➢Possibilité de réduire l'impact environnemental en mutualisant les lignes aériennes avec d'autres ouvrages à développement linéaire: routes, autoroutes, voies ferrées ➢Pas de synergie avec ponts et tunnels	➢Routes, autoroutes et voies ferrées: utilisation de l'emprise du tracé ➢Ponts: possibilité d'intégration aisée dans la structure ➢Tunnels: difficile si tunnel non initialement prévu à cet effet
Autres aspects	----------	➢Numéro très limité de siphons possibles dans les lignes mixtes à cause de la difficulté à protéger la ligne de façon sélective et efficace lorsqu'il y a plus que deux ou trois siphons

ANNEXE 3 – NOUVELLE LIGNE 400 KV TRINO (PIEMONT)-LACCHIARELLA (LOMBARDIE)

« Single pole » à double circuit

« Single pole » double circuit : nécessité limitée de déboisement

Mutualisation entre la nouvelle ligne à double circuit (à droite) et une vielle ligne 400 kV de Milan vers Gênes à simple circuit (à gauche). Cette ligne a été partiellement reconstruite en « single pole » pour mitiger l'impact visuel

Pylône « germe »

Mutualisation des pylônes « germe » avec l'autoroute Milan-Gênes

Détail de la base très réduite du pylône « germe »

Pylône treillis nécessaire pour franchir le fleuve Tessin