Réseau de transport d'électricité

DÉBAT PUBLIC SUR LE PROJET DE RECONSTRUCTION DE LA LIGNE DE GRAND TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ ENTRE AVELIN ET GAVRELLE

ETUDE COMPLÉMENTAIRE

ÉTUDE DE LA TECHNIQUE SOUTERRAINE APPLIQUÉE AU PROJET AVELIN-GAVRELLE






RÉSUMÉ

A la demande de la Commission Particulière de Débat Public et des élus de la Pévèle, RTE a réalisé des études complémentaires sur la technique souterraine dans le cadre du projet de reconstruction de la ligne à 400 000 volts Avelin-Gavrelle. Ces études montrent que :

- **La construction d'une ligne partiellement ou totalement en technique souterraine entre Avelin et Gavrelle est techniquement accessible, ce qui n'était pas le cas il y a encore une dizaine d'années. Les différents problèmes techniques posés par les caractéristiques spécifiques des liaisons partiellement ou totalement souterraines trouvent aujourd'hui des solutions technologiques. Il reste toutefois des interrogations quant à l'exploitation du réseau au sein duquel s'insérerait un ouvrage souterrain aussi important, compte tenu de l'absence d'expérience de ce type d'ouvrage au niveau mondial.**
- **Les impacts environnementaux de la liaison souterraine existent, tant sur les milieux naturels que sur l'activité agricole. Ils sont très marqués pendant la phase de chantier, dont l'emprise est de plus de 10 fois la superficie du chantier d'une ligne aérienne équivalente. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, l'impact hydrologique et agricole de la liaison souterraine est plus important que celui de la ligne aérienne, alors que l'impact paysager d'une liaison souterraine est très minime par rapport à celui d'une ligne aérienne.**
- **Le coût d'une liaison souterraine pour le niveau de puissance requis reste 10 fois plus élevé, que l'équivalent en ligne aérienne. En intégrant l'ensemble des coûts d'entretien et d'exploitation pendant la durée de vie de l'ouvrage, la liaison aérienne reste 6,5 fois moins coûteuse.**
- **Le champ magnétique émis par une liaison souterraine atteint un maximum plus élevé que celui émis par une ligne aérienne, tout en restant dans la limite fixée par la réglementation. Il décroît plus vite lorsqu'on s'éloigne de la liaison souterraine que dans le cas d'une ligne aérienne.**

SOMMAIRE

Résumé

Préambule - Rappel de la demande 3

DESCRIPTION DES CONSTITUANTS D'UNE LIAISON PARTIELLEMENT SOUTERRAINE 8

Quels câbles souterrains sont nécessaires pour transporter 4600 MW ? 8

La composition du Câble à isolation synthétique (CIS) 8

L'installation du câble 9

Chambres de jonction 10

Les forages dirigés 11

Poste aéro-souterrain 12

Matériels à installer dans les postes d'Avelin et de Gavrelle 12

Questions techniques non résolues à ce jour 14

Coût d'investissement des trois cas étudiés 15

IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UNE LIAISON SOUTERRAINE 16

Impacts génériques des liaisons souterraines. 16

Impacts potentiels d'une liaison du type de celle qu'il faudrait implanter 21

COMPARAISON DE LA TECHNIQUE AÉRIENNE ET DE LA TECHNIQUE SOUTERRAINE 24

Comparaison économique 24

Comparaison environnementale des techniques aérienne et souterraine 26

Comparaison des champs magnétiques émis par une ligne aérienne et une ligne souterraine 28

Autres points de comparaison 28

ANNEXE : le Contrat de service public de RTE 30

GLOSSAIRE 31

Préambule – Rappel de la demande

Lors de la réunion publique de Phalempin, le 14 décembre 2011, les élus de La Pévèle ont demandé à RTE une étude complémentaire sur la technique souterraine. La CPDP a appuyé cette demande, et demandé que RTE réalise cette étude et la mette à disposition du public avant la fin du débat public.

Deux points ont été évoqués :

- L'étude d'une solution souterraine partielle sur les communes de la Pévèle (Avelin, Attiches, Tourmignies, Mons-en-Pévèle, Moncheaux).
- L'étude de l'impact environnemental de la liaison souterraine, avec notamment la demande d'illustration des impacts du poste aéro-souterrain et du chantier.

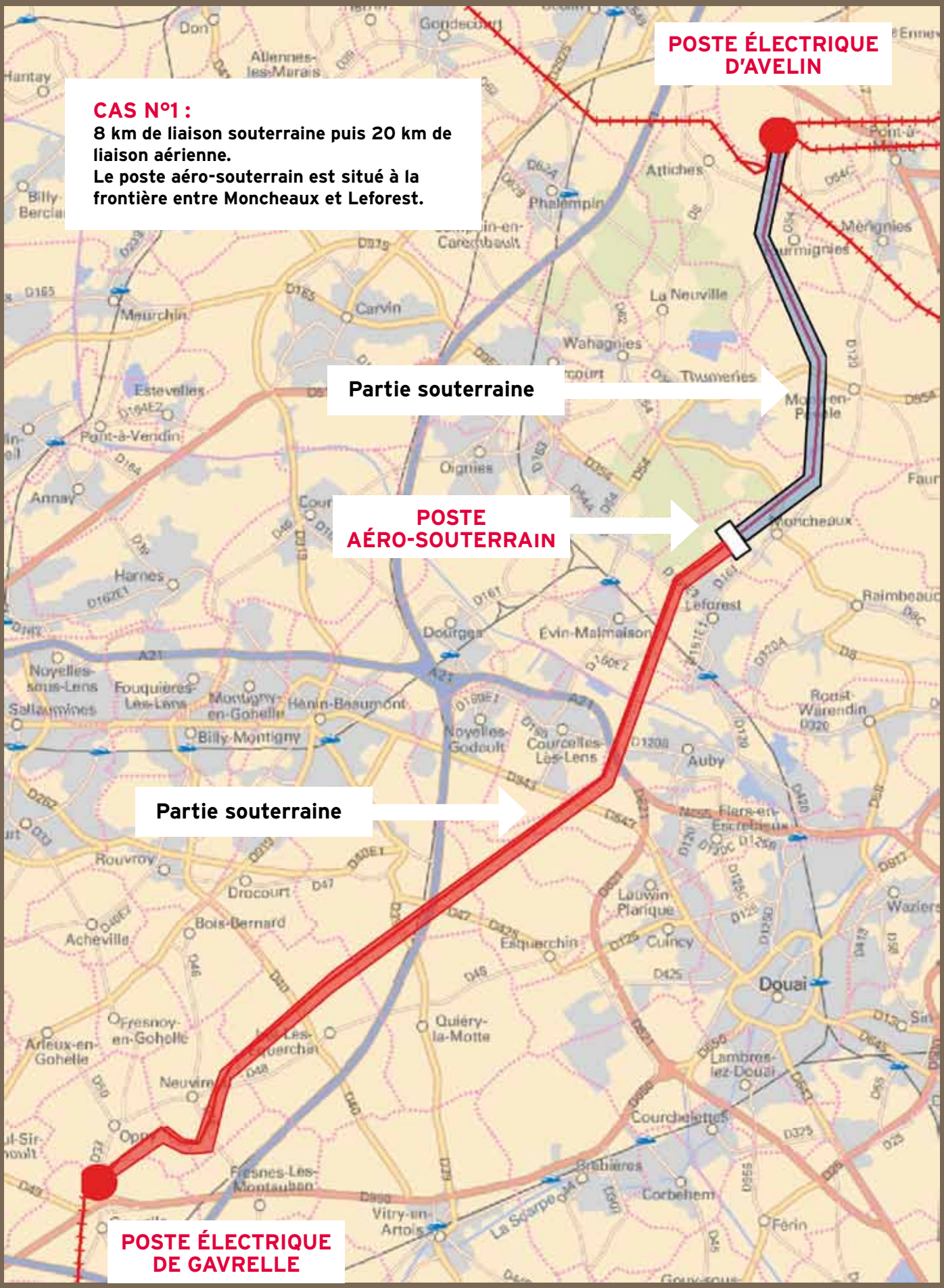
Ces points ont été complétés par d'autres soulevés au cours du débat public, relatifs à la technique des liaisons électriques souterraines :

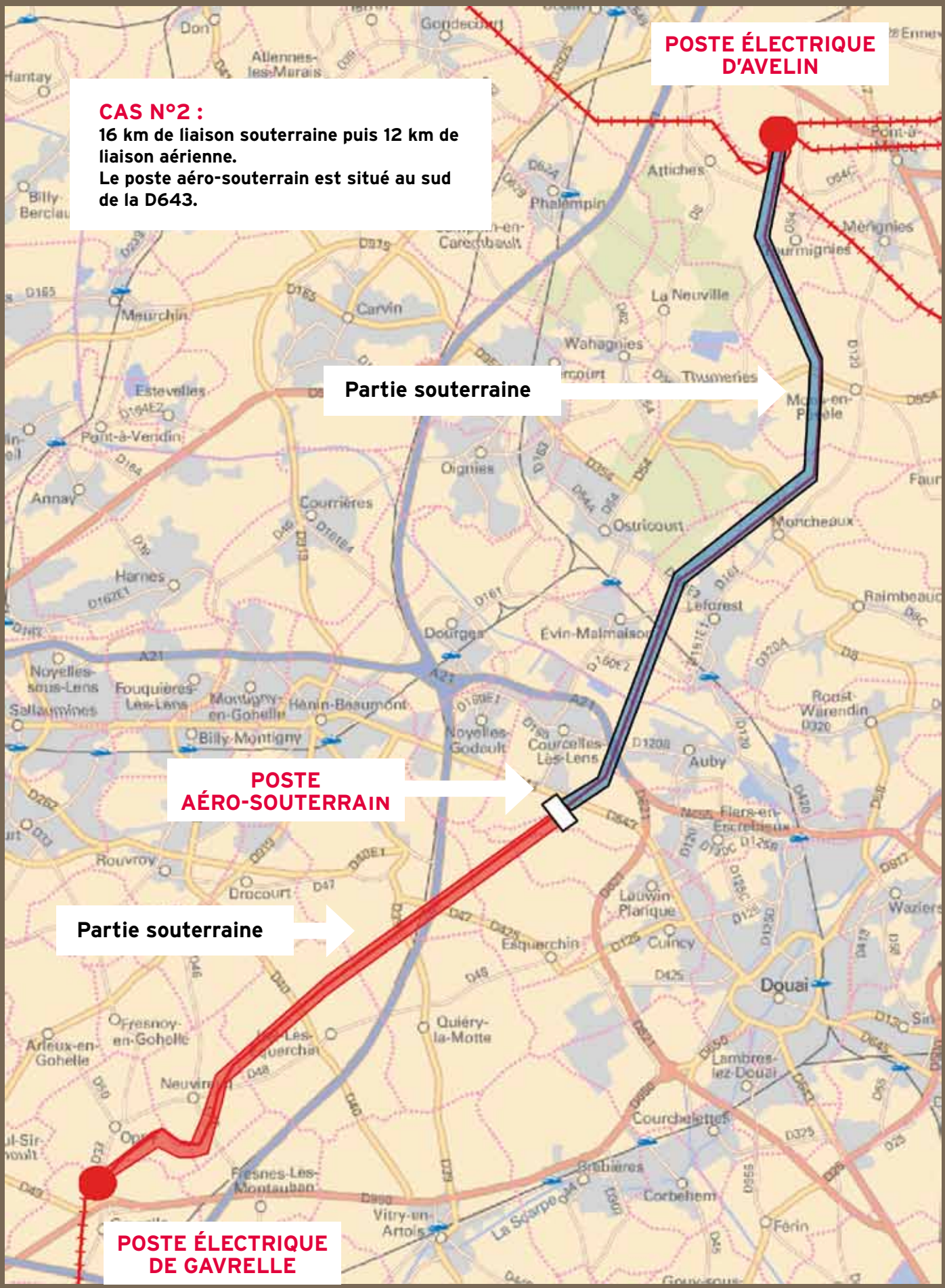
- La comparaison des technologies aériennes et souterraines suivant l'ensemble des critères : économique, technique, environnement, résistance aux aléas météorologiques, sécurité, entretien.
- La prise en compte, dans la comparaison économique des techniques aérienne et souterraine, des paramètres autres que le seul coût d'investissement, comme le coût d'entretien, des pertes Joule, du démantèlement, afin d'approcher la notion de « coût complet de la liaison », c'est-à-dire le cumul de l'ensemble des coûts pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

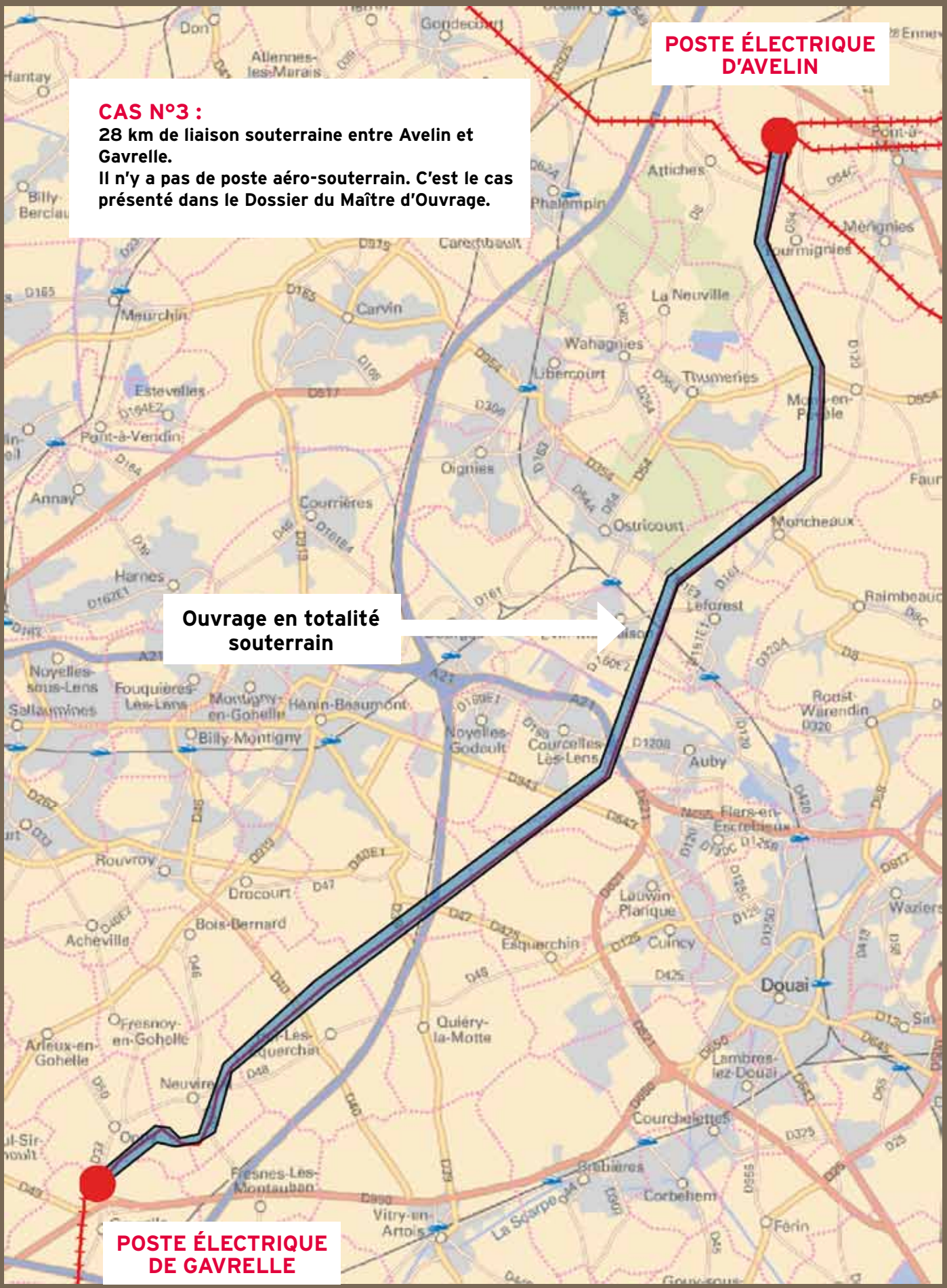
RTE a proposé au débat public un projet de ligne aérienne, qui est la technique utilisée pour le niveau de tension 400 000 volts d'après le Contrat de service public de RTE (cf Annexe). Afin de répondre aux demandes du public et de la CPDP et compléter ainsi l'information disponible sur les enjeux techniques, environnementaux et économiques de la technique souterraine, RTE a réalisé différentes études présentées dans la suite de ce document.

RTE a considéré trois cas, illustrés dans les cartes des pages suivantes :

CAS N°1 :	CAS N°2 :	CAS N°3 :
construction de 8 km de liaison souterraine à partir du poste d'Avelin, c'est-à-dire dans la Pévèle, puis de 20 km de liaison aérienne.	construction de 16 km de liaison souterraine à partir d'Avelin, c'est-à-dire dans la Pévèle et le Bassin Minier, puis de 12 km de liaison aérienne.	construction de 28 km de liaison souterraine. C'était le cas présenté dans le dossier du maître d'ouvrage.


POSTE ÉLECTRIQUE D'AVELIN
CAS N°1 :
8 km de liaison souterraine puis 20 km de liaison aérienne.
Le poste aéro-souterrain est situé à la frontière entre Moncheaux et Leforest.
Partie souterraine
POSTE AÉRO-SOUTERRAIN
Partie souterraine
POSTE ÉLECTRIQUE DE GAVRELLE
Don
Gondecourt
Allennes-les-Marais
Attiches
Phalempin
Carvin
Meurchin
La Neuville
Wahagnies
Thumeries
Estevelles
Pont-à-Vendin
Annay
Oignies
Moncheaux
Harnes
Leforest
Dourges
Évin-Malmaison
Noyelles-sous-Lens
Fouquières-Lès-Lens
Montigny-en-Gohelle
Hénin-Beaumont
Billy-Montigny
Noyelles-Godault
Courcelles-Lès-Lens
Auby
Flers-en-Escrebieux
Rouvroy
Drocourt
Bois-Bernard
Acheville
Esquerchin
Lauwin Planque
Cuincy
Douai
Fresnoy-en-Gohelle
Arleux-en-Gohelle
Quiéry-la-Motte
Neuvireuil
Lambres-lez-Douai
Courchelettes
Brébières
Corbehem
Vitry-en-Artois
Férin
A21


POSTE ÉLECTRIQUE D'AVELIN
CAS N°2 :
16 km de liaison souterraine puis 12 km de liaison aérienne.
Le poste aéro-souterrain est situé au sud de la D643.
Partie souterraine
POSTE AÉRO-SOUTERRAIN
Partie souterraine
POSTE ÉLECTRIQUE DE GAVRELLE


POSTE ÉLECTRIQUE D'AVELIN
CAS N°3 :
28 km de liaison souterraine entre Avelin et Gavrelle.
Il n'y a pas de poste aéro-souterrain. C'est le cas présenté dans le Dossier du Maître d'Ouvrage.
Ouvrage en totalité souterrain
POSTE ÉLECTRIQUE DE GAVRELLE
Don
Gondecourt
Allennes-les-Marais
Attiches
Phalempin
Merignies
Carvin
La Neuville
Wahagnies
Libercourt
Thumeries
Estevelles
Pont-à-Vendin
Annay
Courrières
Oignies
Ostricourt
Moncheaux
Harnes
Leforest
Raimbeaucourt
Noyelles-sous-Lens
Fouquières-Les-Lens
Montigny-en-Gohelle
Hénin-Beaumont
Billy-Montigny
Sallaumines
Noyelles-Godault
Courcelles-Lès-Lens
Auby
Roost-Warendin
Flers-en-Escrebieux
Rouvroy
Drocourt
Bois-Bernard
Acheville
Lauwin Planque
Esquerchin
Cuincy
Douai
Fresnoy-en-Gohelle
Arleux-en-Gohelle
Quiéry-la-Motte
Lambres-lez-Douai
Courchelettes
Fresnes-Les-Montauban
Brebières
Corbehem
Vitry-en-Artois
Férin

Les cas n°1 et 2 ont été particulièrement analysés dans cette étude complémentaire, le cas n°3 étant déjà présenté dans le dossier du maître d'ouvrage.

A ce stade, comme pour la future ligne aérienne, RTE n'a pas recherché de tracé pour la liaison souterraine. Les études ont été réalisées en prenant comme base le tracé de la ligne électrique aérienne simple circuit existant actuellement entre les postes électriques d'Avelin et de Gavrelle.

Le document présente successivement :

- À quoi ressemblerait le câble souterrain transportant 4600 MW dans les trois configurations de liaison mixte aérienne et souterraine ou de liaison totalement souterraine. Pour répondre à cette question, il a été nécessaire de réaliser une étude de réseau dans chaque cas, afin de dimensionner les appareillages à installer dans les postes d'Avelin et Gavrelle pour compenser les problèmes créés par le comportement électrique du câble souterrain.
- Les impacts environnementaux des liaisons souterraines. Nous présentons d'abord les impacts principaux des liaisons souterraines en général, puis les résultats de l'étude des impacts d'une liaison dimensionnée pour la ligne Avelin-Gavrelle, c'est-à-dire composée de 6 x 3 câbles souterrains.
- La comparaison entre les techniques des câbles souterrains et de lignes aériennes, sous tous les aspects (techniques, économiques, environnementaux).

DESCRIPTION DES CONSTITUANTS D'UNE LIAISON PARTIELLEMENT SOUTERRAINE

QUELS CÂBLES SOUTERRAINS SONT NÉCESSAIRES POUR TRANSPORTER 4600 MW ?

La capacité de transport d'un câble souterrain est limitée par la température du câble, qui ne doit en aucun cas dépasser 90°C sous peine de détérioration irrémédiable.

La température dépend du courant qui circule dans le câble, et de la résistance du câble, elle-même liée au matériau et à la section de l'âme du câble. En effet, la circulation de courant produit un dégagement de chaleur. Or, la chaleur produite est comme emprisonnée dans le sol autour du câble, et pourra s'évacuer d'autant mieux que le câble est peu profond. La proximité avec d'autres sources de chaleur (autres câbles de transport d'énergie, conduites de vapeur ou réseaux de chaleur) doit être particulièrement surveillée car cela limiterait le courant qui peut circuler dans le câble avant d'atteindre les 90°C. Dans notre étude, nous avons considéré qu'il n'y aurait pas de câble souterrain ou réseau de chaleur présent dans l'environnement du câble étudié, mis à part le fait que la liaison sera elle-même composée de plusieurs câbles souterrains parallèles.

Le premier paramètre cité ci-dessus est donc la profondeur à laquelle ils sont enterrés. Les câbles souterrains sont habituellement enterrés à au moins 1,60 m de profondeur, avec 1 m de remblai au moins au-dessus des câbles.

Lors du franchissement de voiries routières à fort trafic, voies ferrés ou canaux, la réalisation de tranchées n'est pas possible. La traversée de ces infrastructures est alors habituellement effectuée par forage dirigé, technique qui implique un passage à plus de 1,60 m de profondeur. Le câble est alors enterré plus profondément et sa section doit être augmentée pour limiter son échauffement, car plus la section d'un câble est importante, plus sa résistance est faible.

Voici les principaux obstacles à franchir dans les trois cas étudiés :

Cas n°1 (8 km de souterrain à partir d'Avelin, jusqu'à Moncheaux) : pas de franchissement particulier.

Cas n°2 (16 km de souterrain jusqu'à Flers-en-Escrebieux) :

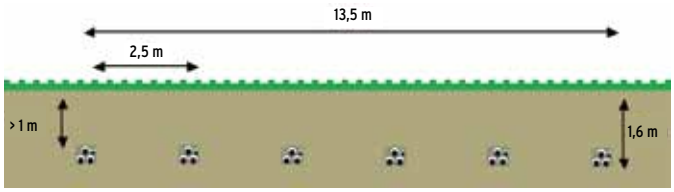
- voies SNCF de la ligne Lille-Douai
- canal de la Deûle
- rocade minière
- route départementale RD643

Cas n°3 : (28 km de souterrain d'Avelin à Gavrelle) :

- voies SNCF de la ligne Lille-Douai
- canal de la Deûle
- rocade minière
- route départementale RD643
- Autoroute A1
- Ligne à grande vitesse LGV Nord

Les calculs thermiques indiquent que pour les tronçons sans franchissement particulier, 3 tricâbles par circuit (soit un total de 6 tricâbles), espacés de 2,5 mètres, avec un câble cuivre de 2000 mm² de section, sont nécessaires. Pour les franchissements particuliers, il faut augmenter la section de cuivre et utiliser un câble cuivre de 2500 mm² de section. Le changement de section se fait alors au niveau des boîtes de jonction, qui permettent de réunir deux câbles de section différente.

Le schéma en coupe de la liaison souterraine en partie courante aurait l'aspect suivant :



Il s'agit d'une pose dite « en trèfle » pour chacun des six tricâbles.

LA COMPOSITION DU CÂBLE À ISOLATION SYNTHÉTIQUE (CIS)

Un câble à isolation synthétique, tel que celui qui serait utilisé, est constitué :

- d'une âme conductrice en cuivre de section 2000 mm², ou 2500 mm² pour les franchissements de voirie routière, canal ou voie ferrée. Ce sont les plus gros câbles de transport d'électricité qui existent actuellement,
- d'une couche d'isolant en polyéthylène réticulé de 27 mm d'épaisseur environ,
- d'un écran métallique,
- d'une gaine extérieure de protection en polyéthylène ou PVC.

Le diamètre d'un câble est donc de l'ordre de 150 mm.



Figure : Coupe du câble 400 000 volts 2500 mm² Cuivre utilisé pour la liaison située à proximité de l'aéroport de Madrid.
Diamètre : environ 15 cm (pour une phase d'un tricâble)

Les tronçons élémentaires sont d'une longueur de 1000 m au maximum, livrés enroulés sur des tourets.

L'INSTALLATION DU CÂBLE

La technique de pose privilégiée est la pose en tranchée.

L'emprise au sol pour les 2 circuits, après travaux, est de 13,5 mètres de large. Lors des travaux de pose, une emprise plus large est nécessaire, pour permettre la circulation des engins de chantier et le stockage temporaire des terres extraites.



Tourets de câble 400 000 volts en cours de déchargement

La réalisation d'une liaison souterraine nécessite d'abord la réalisation d'une tranchée. Des fourreaux en PEHD (polyéthylène haute densité) disposés en trèfle sont ensuite placés au fond de cette tranchée, qui est rebouchée avec le matériau précédemment extrait du sous-sol s'il se prête au remblai. Les câbles sont ensuite tirés dans ces fourreaux.

Deux tronçons de câble sont raccordés par des jonctions. Pour réaliser une jonction, les âmes conductrices sont raccordées par soudure ; la reconstitution de l'isolement est réalisée par des blocs prémoulés en matière synthétique isolante que l'on glisse à l'endroit de la soudure. Des tresses métalliques raccordent les écrans métalliques, et la gaine protectrice est reconstituée par deux demi-coquilles.



Réalisation d'une jonction : c'est une opération manuelle très délicate, réalisée dans la chambre de jonction maçonnée

Une jonction prémoulée a ainsi une longueur d'environ 1,5 mètre et un diamètre de l'ordre de 400 à 500 mm.



Jonction finalisée en cours de mise en place définitive

En résumé, le mode opératoire de la réalisation de la liaison serait le suivant :

- Décapage des terres végétales sur 18 m de large (13,5 m pour les 6 tricâbles + 4,5 m de zone de circulation d'engins et stockage matériels), stockage de la terre végétale le long de la piste (5 m de large),
- Réalisation éventuelle d'une piste empierrée,
- Réalisation de la fouille de 13,5 m de large sur 1,60 m de hauteur,
- Livraison des barres de PEHD de diamètre 280 mm et de longueur 12,00 m (240 kg chacune),
- Assemblage des barres de 12 m par électro soudures pour constituer chaque fourreau,
- Mise en place des 6 ensembles de trois fourreaux disposés en trèfle dans la fouille,
- Remise en place des terres de sous-sol et compactage,
- Dépose de la piste empierrée si nécessaire,
- Remise en place des terres végétales et remises en état.



Réalisation d'une chambre de jonction (pour un tricâble)

CHAMBRES DE JONCTION

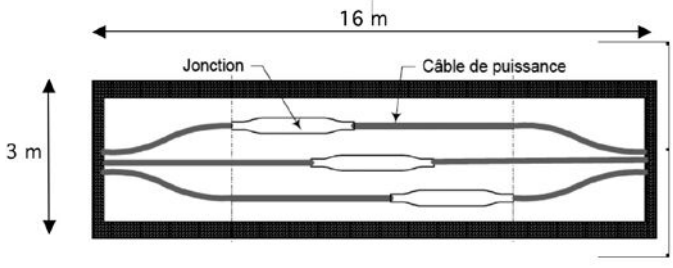
La chambre de jonction est un espace de 3 mètres de large sur 16 mètres de long, maçonné, dans lequel évoluent les spécialistes qui réalisent la jonction.

La chambre de jonction est ensuite rebouchée avec du sable, couverte d'une dalle, puis d'un mètre de terre au moins.

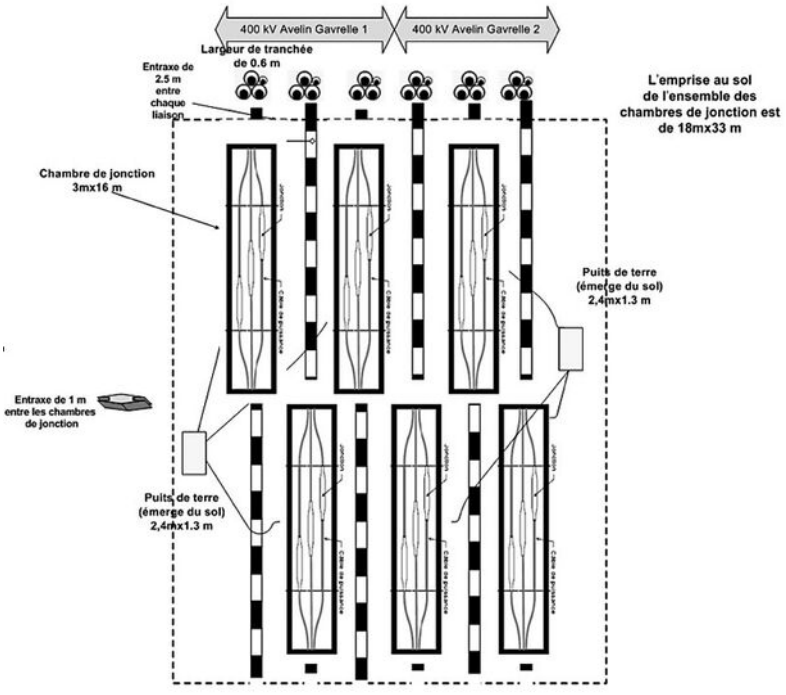
A chaque chambre de jonction, un puits visitable permet au personnel de RTE qui surveille les ouvrages de vérifier périodiquement la mise à la terre des écrans des câbles.

Ce puits doit émerger à la surface du sol. Il est clos par un regard et doit être positionné si possible à proximité d'une voirie.

Il faut réaliser une chambre de jonction pour chaque tricâble.



Chambre de jonction pour un tricâble, en vue du dessus



Vue du dessus des six chambres de jonction, comme celles qu'il faudrait construire pour Avelin-Gavrelle

LES FORAGES DIRIGÉS

Les forages dirigés permettent de franchir une voie de communication ou un obstacle naturel sans ouvrir une tranchée.

Une tige pilote est forée dans le sol. Elle est guidée depuis la surface par un opérateur grâce à un système qui transmet par ondes radio les informations sur la position et l'inclinaison de la tête foreuse.

Une fois le tir pilote effectué, le trou est alésé jusqu'à atteindre le diamètre nécessaire à l'accueil des fourreaux.

Ensuite les fourreaux sont tirés à l'intérieur de cette sorte de micro-galerie. Il s'agit de fourreaux PEHD qui sont soit déroulés depuis un touret, soit constitués de barres de 12 m thermo-soudées pour les diamètres de plus de 160 mm.

Pour terminer, les câbles sont installés à l'intérieur des fourreaux à raison d'un câble par fourreau.



Machine pour forage dirigé

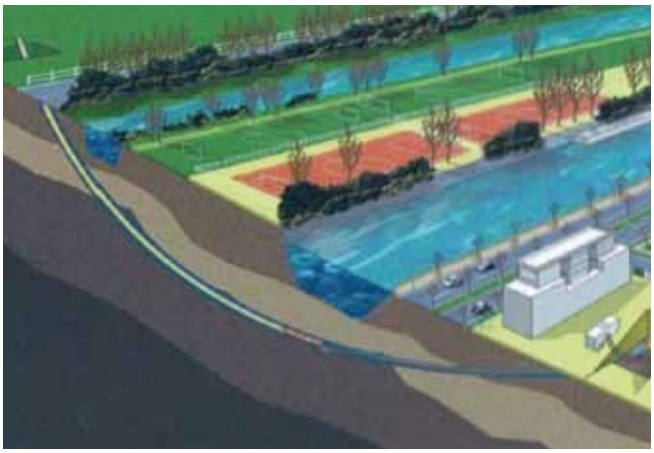


Schéma d'un forage dirigé

POSTE AÉRO-SOUTERRAIN

Pour les cas n°1 et 2, la transition entre la ligne aérienne et la liaison souterraine ne peut être réalisée qu'en créant un poste électrique supplémentaire, dit « poste aéro-souterrain ». Ce poste comprend :

- les extrémités de 2 circuits souterrains,
- les dispositifs de protections et de surveillance dans un bâtiment.

Nous avons optimisé la disposition des appareillages dans le poste pour en limiter l'emprise au maximum. La surface totale à laquelle nous sommes arrivés est de l'ordre de 3700 m².

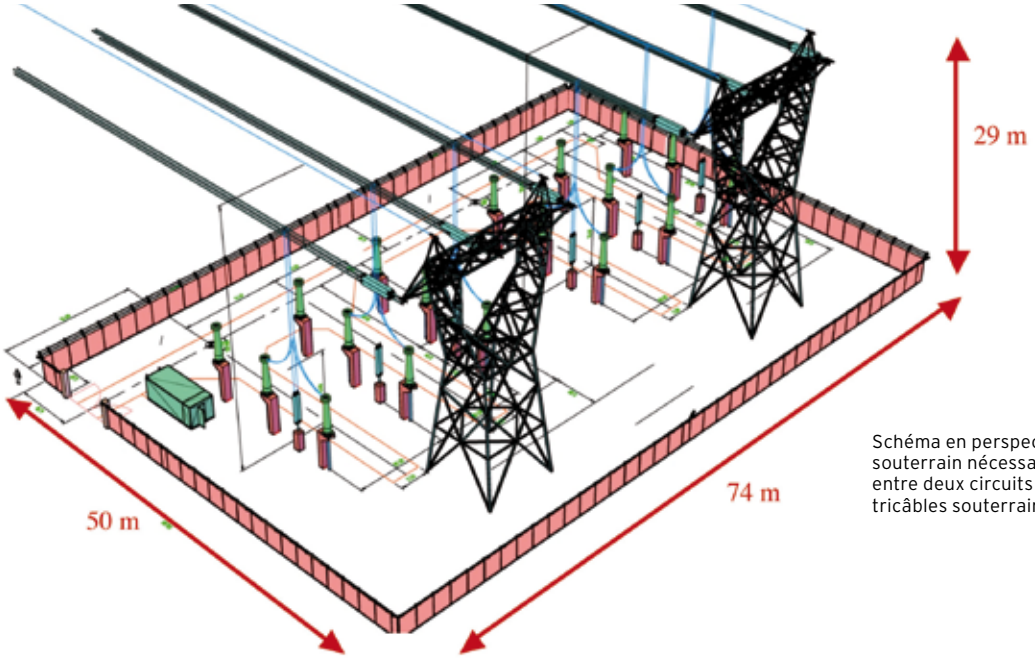


Schéma en perspective du poste aéro-souterrain nécessaire pour la transition entre deux circuits aériens et six tricâbles souterrains.

À titre d'exemple, la photographie suivante montre un poste aéro-souterrain pour une liaison souterraine à deux tricâbles, près de l'aéroport de Madrid. Le choix technique qui a été fait dans ce cas est la construction d'un portique, ce qui augmente la superficie du poste aéro-souterrain.



Poste aéro-souterrain en Espagne (2 tricâbles)

MATÉRIELS À INSTALLER DANS LES POSTES D'AVELIN ET DE GAVRELLE

Les liaisons souterraines sont électriquement très différentes des lignes aériennes qui composent la quasi-totalité du réseau de grand transport d'électricité. Cela a pour conséquence l'installation de matériels spécifiques dans les deux postes situés aux extrémités de la liaison : Avelin et Gavrelle.

Caractéristiques techniques des liaisons souterraines du point de vue du réseau électrique :

Trois notions permettent de décrire les différences entre les lignes aériennes et les liaisons souterraines : **la résistance, l'inductance et la capacité propre :**

- **La résistance,** est environ 3 fois plus faible pour le câble souterrain dimensionné pour la future ligne Avelin-Gavrelle que pour la ligne aérienne équivalente. La résistance est à l'origine de l'échauffement lors du passage d'un courant.

- **L'inductance** du câble souterrain est 5 fois plus faible. C'est-à-dire que dans un réseau électrique, le courant électrique aura 5 fois plus envie d'emprunter le chemin électrique offert par le câble souterrain, que celui de la ligne aérienne équivalente. Ce phénomène déséquilibrerait les flux d'électricité dans le réseau, et conduirait à une surcharge du câble souterrain. Il est donc nécessaire de compenser cette situation, en ajoutant un dispositif en série avec le câble souterrain. Nos études montrent que pour les cas n°1 et 2, un dispositif appelé « inductance série » permet de rééquilibrer les flux dans le réseau. Pour le cas n°3 de la liaison totalement souterraine, le déséquilibre des flux serait si fort qu'un système de régulation plus complexe et encombrant, appelé transformateur-déphaseur, serait nécessaire. Compte tenu du fait que le poste de Gavrelle dispose de la place suffisante, ce qui n'est pas le cas à Avelin, les dispositifs en série (dits « inductance série ») des cas n°1 et 2 seraient installés à Gavrelle.

- **La capacité propre** du câble souterrain est 15 à 20 fois plus élevée que celle de la ligne aérienne équivalente. Cette très forte capacité doit absolument être compensée. Dans le cas contraire, les tensions atteindraient des valeurs trop élevées pour être supportables par les matériels électriques du réseau. La compensation se fait par des appareils appelés « inductances en parallèle ». La moitié de cette capacité propre doit ainsi être compensée ; on ne peut en effet compenser plus que la moitié de cette capacité propre, sous peine de voir apparaître des résonances dans le réseau (c'est-à-dire de très fortes oscillations de la tension entre la capacité du câble et l'inductance de compensation), qui pourraient détruire le matériel électrique des postes. Cela représente un tel volume de compensation qu'il faudrait installer des dispositifs parallèles dans les deux postes, Avelin et Gavrelle. A un stade ultérieur de la définition de ce système de compensation, il faudrait vérifier si la compensation de la moitié de la capacité propre du câble souterrain est suffisante pour que le réseau électrique fonctionne correctement.

Inductance série en réseau





Dispositif de compensation de la capacité propre du câble

Les systèmes de compensation à installer sont les suivants :

Cas n°1, 8 km de liaison souterraine + 20 km de liaison aérienne :

L'inductance série nécessaire pour corriger le déséquilibre des flux est de 10 Ohms, pour chacun des deux circuits. Ces deux inductances séries seraient installées à Gavrelle. Il n'est pas nécessaire d'augmenter la superficie du poste pour cela.

La moitié de la capacité propre à compenser représente 352 Mvar.

À Avelin : une inductance parallèle de 64 Mvar est installée au tertiaire de chacun des autotransformateurs 400 kV/225 kV. Deux inductances parallèles de 80 Mvar sont installées sur le jeu de barres 225 000 volts. Il n'est pas nécessaire d'étendre le poste.

À Gavrelle : pas de compensation pour la capacité propre.

Cas n°2, 16 km de liaison souterraine + 12 km de liaison aérienne :

Nous faisons l'hypothèse qu'une inductance série de 10 Ohms permet de corriger le déséquilibre des flux, pour chacun des deux circuits. Des calculs plus précis montreraient peut-être qu'une puissance supérieure est nécessaire ; cela influerait très peu sur le coût total du projet. Ces deux inductances série seraient installées à Gavrelle. Il n'est pas nécessaire d'étendre le poste.

La moitié de la capacité propre à compenser représente 630 Mvar.

À Avelin : une inductance parallèle de 64 Mvar est installée au tertiaire de chacun des autotransformateurs 400 kV / 225 kV. Deux inductances de 80 Mvar sont installées sur le jeu de barres 225 000 volts (pour Avelin, c'est comme dans le cas n°1).

À Gavrelle : installation de deux inductances parallèles de compensation de 100 Mvar sur le jeu de barres 400 000 volts, sans nécessité d'étendre le poste.

Cas n°3, 28 km de liaison souterraine :

Il est alors nécessaire d'installer un transformateur-déphaseur par circuit, pour corriger le déséquilibre des flux dans le réseau.

Il faut compenser plus de 1000 Mvar, ce qui est considérable. Pour l'ensemble de ces dispositifs, il faudra étendre les postes d'Avelin et de Gavrelle.



Transformateur-déphaseur installé en France à La Praz en 400 000 volts (pour un circuit)

QUESTIONS TECHNIQUES NON RÉSOLUES À CE JOUR

Les câbles souterrains utilisés dans les réseaux maillés sont extrêmement rares. La plupart des utilisations du câble souterrain sont l'alimentation d'un centre-ville ou le raccordement au réseau d'une centrale de production d'électricité, c'est-à-dire des topologies simples où le câble relie une consommation ou une production au réseau. Dans notre cas, le câble serait inséré à l'intérieur de boucles telles que : Lille – Dunkerque – Arras – Lille et Lille – Valenciennes – Charleville-Mézières – Reims – Troyes – Paris – Arras – Lille. Rappelons qu'à ce jour aucun pays au monde n'a envisagé la construction d'une liaison souterraine d'une telle puissance, et d'une telle importance pour la sûreté de fonctionnement du réseau électrique.

Si la disponibilité des matériels permet d'assurer la possibilité de construire une liaison souterraine partielle ou totale avec six tricâbles, il reste que certains problèmes techniques nécessiteraient des études très délicates au stade de la conception détaillée :

- La mise sous tension du câble équivaudrait à enclencher environ 700 Mvar dans le cas n°1, et 1260 Mvar dans le cas n°2. Environ la moitié de cette puissance serait compensée par des inductances parallèles placées dans le poste de Gavrelle. Cela représente, pour la partie non compensée, une puissance réactive largement supérieure à celle des condensateurs les plus importants installés sur le réseau (qui sont de 150 Mvar). L'à-coup de tension à l'enclenchement ne serait pas supportable par les matériels de réseau, et perturberait les équipements des utilisateurs du réseau. Il faudrait donc définir une méthode d'enclenchement du câble, avec probablement un enclenchement progressif ou par tronçon.
- Le phénomène transitoire qui affecterait la tension à l'enclenchement provoquerait des résonances entre le câble et sa compensation, entre le câble et le réseau. Ce phénomène devra être calculé et amorti par des dispositifs à définir, non décrits dans le présent document.

COÛT D'INVESTISSEMENT DES TROIS CAS ÉTUDIÉS

Le tableau suivant répertorie les différents coûts dans les trois cas étudiés

Note : M€ = million d'euro

	Rappel : projet proposé par RTE : 28 km de liaison aérienne	CAS N°1 8 km de liaison souterraine, 20 km de liaison aérienne	CAS N°2 16 km de liaison souterraine, 12 km de liaison aérienne	CAS N°3 28 km de liaison souterraine
Fourniture du câble souterrain et des accessoires	-	68 M€	140 M€	266 M€
Génie civil et déroulage des câbles	-	18 M€	35 M€	69 M€
montage des accessoires et essais	-	7 M€	14 M€	29 M€
Franchissements particuliers	-	Néant	3 M€	4 M€
Poste aéro-souterrain	-	1,5 M€	1,5 M€	-
Systèmes de compensation dans les postes d'Avelin et de Gavrelle	-	13 M€	18 M€	62 M€
Total pour la partie liaison souterraine	**-**	**107 M€**	**211 M€**	**430 M€**
Partie ligne aérienne	**40 M€**	**24 M€**	**14 M€**	**-**
Adaptation des postes d'Avelin et Gavrelle pour les nouveaux flux	25 M€	25 M€	25 M€	25 M€
Démontage de la ligne aérienne actuelle	4 M€	4 M€	4 M€	4 M€
Coût total du projet	**69 M€**	**160 M€**	**254 M€**	**459 M€**

On peut noter que dans le cas n°1, les 8 premiers kilomètres coûteraient environ 12 M€ en technique aérienne. Le coût de la réalisation de ces 8 kilomètres en technique souterraine est de 107M€, soit un facteur 9 entre les deux techniques, ce qui est typique des liaisons de forte puissance.

Dans le cas n°2, les 16 premiers kilomètres coûteraient environ 22 M€ en technique aérienne. Le coût de la réalisation de ces 16 km en technique souterraine est de 211 M€, soit un facteur 10 sur le coût.

En synthèse :

La construction d'une liaison partiellement ou totalement souterraine de 30 km est techniquement possible. Les matériels sont industriellement disponibles. Toutefois les inconvénients en matière d'exploitation du réseau électrique ne sont pas bien connus pour un type de liaison électrique qui n'a pas d'exemple dans le monde aujourd'hui.

Le coût d'investissement de la technique souterraine, pour le niveau de tension et le niveau de puissance requis pour le projet Avelin-Gavrelle, est d'environ 10 fois le coût d'investissement de la liaison aérienne correspondante.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UNE LIAISON SOUTERRAINE

Une ligne électrique est une infrastructure industrielle. Aérienne ou souterraine, elle a un impact sur l'environnement. La technique du câble souterrain est utilisée depuis 90 ans dans les réseaux de transport d'électricité, et depuis 80 ans en très haute tension à 225 000 volts. Pendant plusieurs décennies, cette technique a été utilisée exclusivement en milieu urbain dense, pour lesquels RTE dispose d'une expérience reconnue en matière de mise en œuvre et de maîtrise des effets de ces ouvrages. Les techniques ayant évolué, RTE installe depuis environ 10 ans des liaisons souterraines en plein champ. Ces opérations font l'objet d'études et de suivis, avec la profession agricole notamment puisque la majeure partie de ces ouvrages est installée dans des terrains agricoles. En 400 000 volts en France, il n'y a aucune réalisation en terrain agricole à ce jour, et seuls deux projets sont en cours d'instruction administrative. Il s'agit d'ouvrages de bien moindre ampleur que le projet Avelin-Gavrelle. Des suivis vont être engagés afin d'affiner la connaissance des effets de ces nouvelles opérations sur les cultures.

Nous examinons pour commencer les impacts des liaisons souterraines en général, tel que le retour d'expérience de RTE permet de les décrire.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous décrivons les impacts particuliers d'une liaison souterraine formée de 6 tricâbles, ce qui n'a jamais été construit à ce jour dans le monde.

IMPACTS GÉNÉRIQUES DES LIAISONS SOUTERRAINES.

RTE exploite plus de 3000 km de liaisons souterraines, à des niveaux de tension 63 000 volts, 90 000 volts, 225 000 volts et 400 000 volts. Certaines de ces liaisons ont été construites en zone rurale, donc fournissent un retour d'expérience, pour des liaisons composées d'un tricâble, et plus rarement de deux tricâbles. C'est ce retour d'expérience qui est présenté dans ce paragraphe.

Les impacts temporaires liés aux travaux

Le chantier

RTE peut pratiquer plusieurs modes de pose en fonction de la nature du câble utilisé, du milieu traversé et des obstacles rencontrés.

- En dehors d'obstacles particuliers, la mise en place des câbles se fait grâce à l'ouverture d'une tranchée. Les fourreaux sont déposés en fond de tranchée.
  La tranchée est ensuite remblayée avec ses propres matériaux.

Enfin les câbles sont tirés dans les fourreaux, et les jonctions sont réalisées.

- Dans le cas où l'ouvrage est amené à traverser une voirie importante, une voie SNCF, un canal ou une rivière, des techniques spécifiques peuvent être adoptées.
  Ces techniques consistent à faire passer en profondeur sous l'obstacle des fourreaux, dirigés par un dispositif de guidage, sans ouvrir de tranchée. Les câbles souterrains y sont ensuite introduits.

La réalisation de ces travaux nécessite l'installation de part et d'autre de la traversée d'une plate forme, sur laquelle est installé le matériel nécessaire aux opérations de forage. Ces plates formes occupent quelques dizaines de mètres carrés.

Emprise de l'ouvrage et du chantier

La largeur totale de la tranchée à créer est proportionnelle au nombre de tricâbles. Pour six tricâbles, elle mesure 13,5 mètres de large. Sa profondeur est de l'ordre de 2 mètres.

L'emprise du chantier, barrières de protection incluses, s'étend à une dizaine de mètres de part et d'autre de la tranchée : il faut créer des pistes pour la circulation des engins et des aires de stockage du matériel et des terres excavées. L'emprise est plus importante aux endroits où manœuvrent les engins (pelle mécanique pour l'ouverture de la tranchée, camions de livraison du béton...). Le chantier occuperait donc une largeur de 35 m environ :

- 13,5 m de largeur totale de tranchée,
- 4,5 m pour la circulation des engins et le stockage des matériels,
- 5,0 m pour le stockage de la terre végétale,
- 12,0 m pour le stockage des déblais extraits du sous-sol.

Les conditions de fabrication et de transport du câble limitent les longueurs de câbles (1000 mètres maximum en 400 000 volts). Les liaisons souterraines comportent donc des tronçons de câbles, réunis par des jonctions, dans les chambres de jonction. Les chambres de jonction sont totalement enterrées. Elles nécessitent une surface proportionnelle au nombre de tricâbles à raccorder. Pour six tricâbles, elle s'élève à 600 m^2.

Enfin, des puits de visite accessibles en permanence doivent être mis en place à proximité des chambres de jonction. Ces puits émergent à la surface du sol, pour permettre aux opérateurs RTE d'y pénétrer facilement pour des vérifications techniques.

Durée des travaux

La durée des travaux peut varier sensiblement selon la nature des terrains rencontrés, l'encombrement du sous-

sol et la technique utilisée. La durée d'ouverture des fouilles est inférieure dans le cas d'une pose en fourreaux. En moyenne, deux semaines seraient nécessaires pour réaliser 100 mètres de liaison souterraine 400 000 volts composée de 6 tricâbles

Afin d'organiser le traitement des terres excavées, un délai supplémentaire sera nécessaire si une zone polluée aux métaux lourds est traversée.

Les chambres de jonction restent ouvertes le temps nécessaire au raccordement de deux tronçons de câbles.

Impacts temporaires sur le milieu physique

La circulation, le stationnement, l'utilisation et l'entretien des engins de chantier, ainsi que le stockage dans les dépôts de chantier entraînent des risques de pollution des eaux et du sol (par déversement accidentel d'huiles et de lubrifiants, par exemple).

La technique utilisée pour les forages dirigés (injection de bentonite) comporte des risques de pollution des nappes. Les travaux peuvent entraîner des émissions de matières en suspension dans les cours d'eau.

Impacts temporaires sur le milieu naturel

La flore

Les travaux peuvent avoir des effets sur la flore et les milieux naturels : la création des pistes de cheminement, des aires de stockage et de la tranchée nécessitent en effet la suppression totale de la végétation et la destruction des milieux situés dans leur emprise.

La faune

Les travaux peuvent constituer un facteur de dérangement et de perturbation pour la faune, s'ils se déroulent durant des périodes sensibles pour les animaux (accouplement, nidification, ...). La faune vivant dans les milieux détruits (Insectes, Oiseaux, ...) ou hibernant dans le sol peut être affectée (Amphibiens, Reptiles, ...).

Impacts temporaires sur le milieu agricole

Les interventions en milieu agricole, sur des terres cultivées ou cultivables, nécessitent que des précautions soient prises pour ne pas perturber les activités.



Les mesures de précaution consistent notamment :

- à effectuer les travaux en dehors des périodes de semence ou de récolte, si les conditions techniques le permettent ;
- à préserver les réseaux de drainage et d'irrigation (RTE prend en charge les modifications de réseaux qui s'avèreraient nécessaires ainsi que la reconstitution des réseaux éventuellement endommagés par les travaux) ;
- à préserver les accès aux parcelles ou les rétablir avec des moyens temporaires pour permettre la poursuite des travaux agricoles pendant la durée du chantier ;
- à maintenir les champs clos pendant les opérations ;
- à arrêter momentanément les travaux en cas d'intempéries exceptionnelles qui seraient de nature à accroître sensiblement l'importance des dégâts ;
- à dérouler un film protecteur en géotextile sous la piste de circulation des engins afin d'éviter les mélanges entre le terrain naturel et les matériaux rapportés ;
- à éviter la désorganisation des couches de terre : si des précautions ne sont pas prises, les travaux peuvent entraîner le mélange des différentes couches de terrain (matériaux du sous-sol et terre arable fertile). Une telle désorganisation du sol peut provoquer une diminution du rendement des cultures futures. Pour éviter ces problèmes, le tri des terres est effectué lors du creusement de la tranchée. La couche de terre végétale est séparée des terres du sous-sol. Elle est remise en surface lors du comblement.

Impacts temporaires sur le confort, la santé et la sécurité des personnes

Le bruit et la poussière

Comme tout chantier de génie civil, la construction d'un ouvrage électrique est susceptible d'être source d'émissions sonores et de poussières. Ces nuisances sont liées essentiellement à l'activité des engins de travaux.

La circulation des piétons et des véhicules

Les principaux risques et nuisances proviennent :

- de la circulation et du fonctionnement des engins de chantier sur et autour du site des travaux ;
- du risque de blessure des passants et des riverains ;
- de la perturbation de la desserte du site et de ses abords liée à la localisation du chantier. Les travaux peuvent en effet induire une gêne pour les riverains, les usagers et les activités locales (habitat, commerce, agriculture, circulation des piétons et des véhicules ...).

Impacts temporaires sur le bâti

Tout chantier situé à proximité immédiate de l'habitat peut avoir des incidences sur le bâti, en particulier quand celui-ci est ancien ou fragile (détérioration accidentelle ou incidence des vibrations).

Impacts temporaires sur le patrimoine

Il faut s'assurer que l'affouillement du sol ne porte pas atteinte à d'éventuels vestiges archéologiques.

Des prescriptions sont émises en amont des travaux par le Service Régional de l'Archéologie. Elles peuvent comprendre la réalisation de diagnostics d'évaluation et de fouilles, mais une découverte fortuite reste possible.

Impacts temporaires sur le sol et le sous-sol

Les chaussées et les trottoirs

L'implantation d'une liaison souterraine sous les routes, rues ou chemins ou à leur croisement peut entraîner lors des travaux la dégradation des chaussées, des trottoirs, des revêtements de surface ... Cette dégradation provient de la circulation des engins de chantier et de la création de la tranchée.

Les aménagements paysagers et les plantations ornementales

Quand un tronçon de liaison souterraine est implanté sous des espaces verts (parc urbain, square, terre-plein végétalisé, bordure d'allée, alignement d'arbres, jardins privatifs, aménagements paysagers divers ...), la suppression ou le déplacement des végétaux s'avère nécessaire pour la durée du chantier. Après les travaux, il faut procéder à la remise en état du site.

Cette remise en état doit prendre en compte le fait qu'aucun arbre de haut jet ne peut se situer à moins de 3 m de la liaison souterraine, afin que les racines profondes ne perturbent pas l'ouvrage.

Le croisement avec d'autres réseaux souterrains

Malgré la préparation du chantier et malgré les précautions prises lors des travaux, des dommages (accrochage, détérioration, fissuration ...) peuvent être causés de façon accidentelle à des réseaux non (ou mal) répertoriés. Les réseaux qui pourraient être endommagés au cours de la réalisation des travaux sont remis en état.

Les impacts permanents

Les impacts permanents sur l'environnement d'un ouvrage électrique souterrain sont essentiellement fonciers (conséquences sur l'occupation des terrains, publics ou privés). Leur importance diffère selon le milieu traversé.

Impacts sur l'eau

Les eaux superficielles

La présence d'une liaison souterraine peut modifier l'écoulement des eaux superficielles (exemple : effet drainant de la tranchée). Une canalisation peut modifier les conditions d'écoulement des cours d'eau, fossés ou vallées sèches traversés (pose d'une liaison dans le lit d'une rivière, sous un pont ...).

Pour maîtriser ces phénomènes, des études spécifiques doivent être réalisées préalablement aux travaux.

Les zones inondables

La présence en sous-sol d'une canalisation électrique souterraine est sans effet sur l'écoulement des crues.

Les captages et leurs périmètres de protection

Les tracés dans les périmètres de protection immédiate sont évités dans la mesure du possible. Sinon, le projet fait l'objet d'une étude hydrogéologique spécifique.

De même, les tracés évitent en général les périmètres de protection rapprochée et éloignée, bien qu'ils n'y posent pas de problèmes. En effet, les seuls risques consécutifs à la présence de l'ouvrage dans ces zones pourraient être liés aux risques de pollution. Or, ces risques sont pratiquement inexistants car les matériaux utilisés ne sont pas susceptibles d'être altérés par les circulations d'eaux superficielles provenant du ruissellement et des eaux de pluie.

Les nappes phréatiques

On peut distinguer deux types de nappes :

- les nappes libres, dont la hauteur peut varier car la pression du toit est à la pression atmosphérique,
- les nappes captives, dont le toit est à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Lorsqu'une liaison souterraine est implantée :

- dans le recouvrement d'une nappe captive, il convient de veiller à ce que la profondeur de la tranchée ne déstabilise pas le recouvrement pour éviter les remontées d'eau ;
- à proximité d'une nappe libre à recouvrement, il faut prêter attention à ce que la tranchée ne perce pas le recouvrement, ce qui engendrerait une infiltration des eaux de surface qui, si elles étaient polluées, dégraderaient la qualité des eaux ;
- près d'une nappe libre sans recouvrement, la tranchée modifie la perméabilité verticale et provoque un effet drainant des eaux de surface. Il peut donc y avoir un risque de migration de pollution.

Les zones humides

Dans la mesure du possible, les tracés dans ces milieux naturels sensibles sont évités. L'éventuelle traversée d'une de ces zones impose de prendre des précautions particulières : les matériaux utilisés pour les voies de roulement et pour le remblaiement des tranchées doivent être compatibles avec ces milieux.

Impacts sur les sols

En l'absence de précautions particulières, la présence de l'ouvrage lui-même peut avoir un impact non négligeable sur les sols, particulièrement en zone agricole : désorganisation des horizons des sols, tassement, foisonnement, engorgement, diminution de la réserve utile en eau, accélération de l'érosion ou du ravinement. Cet impact éventuel s'estompe habituellement rapidement pour des liaisons souterraines de faible largeur. Il n'en serait certainement pas de même dans le cas d'une liaison souterraine ayant une emprise de 13,5 m.

Selon les cas, les tranchées peuvent drainer les sols (risque localisé d'assèchement) ou constituer un barrage hydraulique ; l'effet est d'autant plus sensible que les circulations d'eau sont peu profondes.

La modification de la porosité

La nature et la perméabilité du sol ou du sous-sol (au-delà du fond de la tranchée) jouent un rôle déterminant.

Lors du remblaiement des tranchées, un tassement trop important peut entraîner par la suite une diminution de la porosité du sol. Elle induit une limitation préjudiciable du passage de l'air, de l'eau et des racines.

Il peut se produire également une augmentation de la porosité du sol (compactage insuffisant par exemple, ou utilisation de remblais inadaptés). Lors des précipitations, le sol peut alors emmagasiner plus d'eau que le terrain avoisinant.

Si le sous-sol est perméable en profondeur, le surplus d'eau est drainé naturellement. Les effets sont alors limités. Si le sol et le sous-sol sont imperméables ou ne permettent qu'un drainage imparfait, les tranchées peuvent s'engorger. L'eau se met à circuler dans le sens de la pente comme un drain, créant des « mouillères » en point bas. Il est alors nécessaire de poser des drains enterrés renvoyant l'excès d'eau vers le réseau hydrologique.

L'accélération de l'érosion

Lorsque le tracé de l'ouvrage s'inscrit dans une zone de pente, les eaux de ruissellement peuvent suivre le tracé de la tranchée. Elles entraînent une érosion qui peut être favorisée par la disparition de la couverture végétale.

L'impact thermique

Les câbles vont s'échauffer et de provoquer un assèchement du sol à leur voisinage. Cet échauffement est imperceptible au niveau du sol, mais en cas de fortes pluies ou d'inondation, il peut se produire une forte érosion en raison des différences de comportement des terrains.

Impacts sur le milieu naturel

Les effets d'une liaison électrique souterraine sur le milieu naturel peuvent être importants, certains effets étant positifs, d'autres négatifs.



En effet, la tranchée va supprimer une bande d'arbres et d'arbustes sur toute la longueur du tracé. L'ouverture du milieu peut apporter l'effet positif d'une source de biodiversité et favoriser l'apparition d'espèces pionnières. L'impact peut en revanche s'avérer très fort lorsque des milieux sensibles (espaces protégés, zones humides ...) doivent être traversés. Un inventaire botanique préalable est indispensable : il permet de recenser les secteurs les plus fragiles.

Dans la mesure du possible, les zones sensibles du point de vue de la faune et de la flore sont évitées. Les impacts sur ces milieux se font ressentir :

- au niveau des espèces végétales ou animales rares ou protégées,
- au niveau des habitats des espèces et des milieux. En effet, l'habitat est en équilibre avec les espèces et les communautés qu'il abrite. Ces dernières pourraient disparaître si cet équilibre était modifié. À cet égard, certains milieux deviennent très vulnérables, en particulier lorsqu'il y a modification des facteurs physico-chimiques ou augmentation des risques de pollution ou d'érosion (par exemple, zones humides, pelouses calcaires ...).

Impacts sur l'agriculture

Les retours d'expérience de RTE sur des liaisons haute tension montrent qu'elles peuvent avoir un effet microdrainant lié au bouleversement de la structure des sols. L'impact dépend de la période de développement des cultures : les cultures semées en automne et qui bénéficient des pluies printanières sont bien plus tolérantes que celles semées au printemps. L'effet s'estomperait au bout de trois années.

Une étude a d'autre part été menée sur l'impact éventuel de l'élévation de température due à la présence des

câbles sur la croissance des végétaux. Elle a porté sur des liaisons haute tension (63 000 volts et 90 000 volts). Elle a montré que les effets étaient faibles ou inexistants. L'étude remarque cependant que les résultats pourraient être différents dans le cas de liaisons de plus forte puissance. La question de cet effet pour une liaison constituée de 6 tricâbles se pose. En effet, nous ne disposons pas de retour d'expérience sur un tel ouvrage, qui n'a jamais été réalisé au niveau mondial.

D'une manière générale, le plus grand soin doit être apporté à la remise en état des terrains agricoles, tant en ce qui concerne les sols, que les chemins d'exploitation ou les réseaux. Le principal risque est de provoquer une déstructuration et la désorganisation des horizons du sol, avec des effets à long terme. Des tassements peuvent entraîner des engorgements localisés (ces tassements peuvent se produire notamment au voisinage des chambres de jonction, où les circulations d'engins ont été plus conséquentes). Tous les sols n'ont pas la même sensibilité : les sols agronomiques humides, ou superficiels, par exemple, sont difficiles à remettre en état, alors que les sols limoneux, profonds, bien drainés, retrouveront plus aisément leur qualité initiale si les précautions nécessaires ont été prises. Des remontées de pierres ont été constatées dans certains cas.

La culture reste possible sur la bande de terrain située au-dessus de la liaison, exception faite de l'arboriculture et des plantations de végétaux à racines profondes. Les différents matériels agricoles peuvent être utilisés car les risques d'accrochage de la liaison sont minimes, celle-ci étant enfouie en fond de fouille à 1,60 mètres de profondeur au minimum, avec a minima 1 mètre de couverture sur le câble, et signalée par un grillage avertisseur posé à 20 cm au-dessus de l'ouvrage.

L'arrosage peut également être pratiqué.

En revanche, certains aménagements ou travaux agricoles, tels que l'installation de réseaux de drainage et d'irrigation, le sous-solage, l'implantation de silos, les aménagements d'accès qui imposent de creuser le sol plus profondément que les travaux agricoles courants, nécessitent de s'assurer auprès de RTE de leur compatibilité avec la profondeur de la liaison souterraine.

Impacts en matière de bruit

La liaison souterraine ne génère aucun bruit.

Impacts sur le foncier et l'affectation des sols

La présence d'une liaison électrique souterraine n'entraîne pas de dépossession du sol. Les propriétaires conservent la propriété et la jouissance de leurs terrains. Ils demeurent libres d'utiliser ces derniers dans la mesure où les distances de sécurité sont respectées, de manière à ce que les travaux envisagés ne constituent un danger ni pour les personnes ni pour l'ouvrage électrique.

La présence en sous-sol d'une canalisation électrique se traduit par l'établissement de servitudes. Son impact sur les terrains privés traversés résulte de la nécessité de préserver un accès permanent aux câbles : sur la totalité du parcours, une bande est neutralisée et inconstructible au droit de la liaison électrique. Même si les interventions ultérieures demeurent exceptionnelles, cette bande doit rester en permanence accessible et dégagée.

Sur ces terrains privés, la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie autorise RTE à instaurer des servitudes pour construire et exploiter des lignes électriques aériennes et souterraines.

Impacts sur les autres réseaux

La présence des câbles peut perturber les réseaux situés dans le voisinage immédiat, par exemple d'autres liaisons électriques souterraines, des câbles de télécommunication, des canalisations de transport de fluide…

Des études techniques détaillées sont réalisées pour assurer la compatibilité de ces installations.

Impacts sur les paysages et le patrimoine architectural

L'utilisation des ouvrages souterrains répond généralement à une volonté de supprimer l'impact visuel que peut causer une ligne électrique aérienne. En effet, une liaison souterraine crée un impact visuel permanent mineur, excepté dans deux cas :

- en zone boisée, lorsqu'une tranchée doit être réalisée,
- lorsque des installations aéro-souterraines doivent être mises en place ; c'est le cas pour les hypothèses n°1 et n°2, qui nécessitent qu'un poste aéro-souterrain soit implanté à l'interface entre la ligne aérienne et la ligne souterraine.

Impacts liés aux éventuels travaux de réparation

La présence de la liaison en sous-sol est une source potentielle de travaux. En terrain public ou privé, les câbles souterrains sont soumis à des risques d'accrochage, que ce soit lors de travaux de terrassement ou d'ouverture de tranchée ou suite à un mouvement de terrain.

Bien qu'ils soient systématiquement signalés par un grillage avertisseur situé à 20 centimètres au-dessus de l'ouvrage, ils demeurent vulnérables par les engins de terrassement.

Quand des câbles sont détériorés, leur réparation implique la réalisation de jonctions. Ces travaux nécessitent la réouverture de la tranchée à l'endroit de la réparation.

Le chantier occasionne alors ponctuellement et temporairement des perturbations semblables à celles décrites plus haut pour la phase d'installation.

IMPACTS POTENTIELS D'UNE LIAISON DU TYPE DE CELLE QU'IL FAUDRAIT IMPLANTER

Pour créer une liaison souterraine à 400 000 volts de la puissance souhaitée entre Avelin et Gavrelle, il faudrait 6 tricâbles.



Un tricâble : pour l'ouvrage à implanter, il en faudrait six.

Il s'agit donc d'un cas tout à fait particulier en ce qui concerne les emprises.

En effet, pour des raisons techniques, afin d'éviter qu'ils ne se chauffent mutuellement, les tricâbles doivent être posés à une distance de 2,50 mètres les uns des autres.

La largeur totale de la tranchée à créer est de l'ordre de 13,50 mètres (sa profondeur est de 2 mètres). Il est envisageable de recourir à deux trajets différents, ce qui réduirait l'emprise de chacune des tranchées à environ 6 mètres.

L'emprise du chantier de construction, barrières de protection incluses, serait d'environ 35 mètres de large dans le premier cas, de deux fois 15 mètres dans le second cas.

La mise en place de chambres de jonction tous les 1000 mètres au maximum doit être prévue. Les chambres de jonction nécessitent une surface d'environ 600 m² pour six tricâbles et de 300 m² pour trois tricâbles.

Des puits de visite doivent être implantés au niveau de chacune des chambres de jonction.

Enfin, des travaux doivent être effectués dans les postes d'Avelin et de Gavrelle. Les matériels à mettre en place émettent du bruit, mais RTE dispose des solutions techniques pour éviter l'élévation des niveaux sonores à l'extérieur des postes.

Deux options sont envisageables : une mise en souterrain partielle dans la Pévèle (cas n°1, 8 kilomètres de long), une mise en souterrain partielle dans la Pévèle et le Bassin Minier (cas n°2, 16 kilomètres de long).

Il s'agirait de faire cheminer dans ces territoires un ouvrage d'une emprise de plus de 13 mètres de large ou de deux fois 6 mètres (à titre d'exemple, le standard international pour une largeur de voie routière est de 3,50 mètres ; on se situe donc au niveau de l'emprise d'une route à 2 voies ou d'une 2 x 2 voies).



Exemples de chantiers :

Chantier de construction d'une liaison souterraine 400 000 volts composée de deux tricâbles, en Allemagne.



Exemple de l'impact sur les milieux d'un chantier de construction (ligne souterraine à 400 000 volts composée de quatre tricâbles, en Grande-Bretagne).

Quatre remarques s'imposent :

- Aucune voirie de la région ne semble pouvoir accueillir un tel ouvrage ; il faudrait, soit totalement occuper (donc couper durant les travaux) une route à grande circulation, soit doubler, voire tripler une route départementale ou communale. Il n'est pas concevable non plus de lui faire traverser des secteurs urbanisés ou destinés à l'être.
- La variante Ouest semble difficilement réalisable, car il n'est pas possible de faire alternativement passer ce type d'ouvrage(s) d'un côté de l'autoroute à l'autre.
- Le tracé peut en revanche suivre le couloir de la ligne aérienne existant entre Avelin et Gavrelle plus ou moins partiellement. C'est probablement une solution dans le Bassin Minier. On peut y envisager un trajet simple, avec les six tricâbles groupés, ou un trajet double, de deux fois trois tricâbles, de chaque côté de l'axe de la ligne actuelle. Il faut cependant respecter une distance de 5 mètres minimum avec le pied des pylônes en place. Dans les deux cas, le couloir serait modifié. Il faut souligner que cette solution nécessite des dispositions particulières (petits engins, en particulier).
- Dans le cas d'une implantation du poste aéro-souterrain au sud de la RD 643, il conviendrait de prendre en compte la proximité des champs captants de l'Escrebieux.

Par ailleurs, le tracé le plus court possible serait à rechercher, pour quatre raisons essentielles :

- Les difficultés techniques, du point de vue de la gestion du réseau électrique, augmentent avec la quantité de compensation qu'il est nécessaire d'installer. Cette compensation dépend directement de la longueur totale de câble installée,
- réduire le plus possible la présence de l'ouvrage et son impact sur l'occupation du sol des territoires à traverser,
- limiter d'autant les difficultés de réalisation,
- limiter le coût.

À ce stade de la réflexion, il convient de souligner que l'analyse des impacts va porter sur des principes de passage, et non sur les impacts réellement prévisibles d'un tracé.

On peut cependant convenir que compte tenu de la densité de l'habitat dans le Bassin Minier, il serait intéressant d'y emprunter le couloir de la ligne existante. On remarquera que le passage dans les espaces les plus denses, même si l'on peut s'appuyer sur le couloir de cette ligne aérienne, reste délicat (cf. le passage entre Leforest et Évin-Malmaison) ; un impact sur la végétation des abords du canal de la Deûle et des espaces naturels sensibles du bois de l'Offlarde semble inévitable.

Les caractéristiques environnementales des territoires concernés amènent à considérer les impacts potentiels suivants :

Au moment du chantier :

- il faut compter 2 semaines de travaux pour mettre en place 100 mètres de liaison ; compte tenu de la densité de l'habitat, des impacts forts sont prévisibles sur la vie quotidienne des riverains et des usagers des voies de circulation (bruit, poussières, coupures de voies, perturbations des circulations, ...) ; cet impact toucherait plus particulièrement le Bassin Minier ;
- des opérations délicates sont à prévoir pour limiter les impacts sur l'agriculture : il faut trier et remettre en place les sols excavés pour la tranchée en tenant compte des horizons rencontrés, en particulier celui de la terre végétale ; ceci dans une bande de terrain d'une largeur importante, qui rend l'intervention complexe, quelle que soit la solution (un ou deux trajets) ; pour 100 m de liaison, ce sont 2 700 à 2 800 m^3 qui devront être ainsi traités ; il faudra reconstituer les fossés et les réseaux drainants existants, fréquents dans la Pévèle, qui seraient endommagés au cours des travaux ; en outre, la nature des sols de la Pévèle (lourds et humides) se prête mal à leur remise en état dans de bonnes conditions ;
- le chantier linéaire d'une trentaine de mètres de large va entraîner la destruction de la flore et des milieux au niveau du sol : il faut s'attendre à une atteinte dans des sites naturels sensibles du Bassin Minier, ainsi qu'un risque de perturbation des zones humides de la vallée de la Marque dans la Pévèle ;
- le chantier risque de devoir emprunter des secteurs de sols pollués ou leurs abords ; ces secteurs nécessitent des mesures de précautions spécifiques (exportation et traitement des terres excavées, apport de matériaux sains) ; des volumes importants pourraient là aussi être affectés ;
- un passage au moins en sous-œuvre complexe est à prévoir : le franchissement du Canal de la Deûle. Le forage dirigé devra descendre à au moins 15 mètres en-dessous de la surface du sol ;
- il faut ajouter enfin les impacts du chantier de construction des chambres de jonction, des puits de visite et du poste aéro-souterrain.

Après le chantier :

- après la mise en place de la liaison, la construction et la plantation d'arbres sont impossibles dans une bande de 20 mètres ou de deux fois 10 mètres ;
- il y a un risque de conséquences à long terme pour les sols agricoles, compte tenu de la complexité de leur remise en état, notamment dans la Pévèle ; des effets dus à une élévation de température dans le sol sont possibles ;

- la présence des jonctions, tous les 1000 mètres, avec 6 structures de 3 m x 16 m enterrées sous 1 mètre de terre, peut perturber la pousse des plantes sur une superficie de 600 m² ;
- la présence des puits de visite, avec la contrainte d'un regard permettant l'accès qui émerge du sol, est à prendre en compte pour les exploitants agricoles ;
- dans le cas de liaisons partiellement souterraines, le poste aéro-souterrain qui doit être mis en place au contact entre la partie aérienne et la partie souterraine ; ce poste aura un impact visuel notable, compte tenu de la consistance et de la hauteur de ses installations ; le site d'implantation de ce poste apparaît difficile à trouver : il faut éviter les secteurs au paysage ouvert et privilégier des espaces dotés d'écrans végétaux. Il y a donc un risque d'accroître l'emprise du projet sur les espaces naturels ;
- une perturbation à long terme de milieux naturels sensibles est également à examiner vers le bois de l'Offlarde et pour les zones humides de la vallée de la Marque ;
- des risques de dysfonctionnements dans les écoulements en Pévèle sont à prendre en compte ;
- il est à rappeler également les impacts liés à d'éventuels travaux de réparation après la mise en service de la nouvelle liaison souterraine (impacts sur le milieu similaires au chantier cité précédemment dans la mesure où ils nécessiteraient une réouverture de la tranchée).

Plusieurs points restent sujets à interrogations. RTE a des retours d'expérience sur les premières liaisons souterraines construites, en haute tension, et mène actuellement des actions pilotes sur des projets dans la Somme (63 000 et 225 000 volts). RTE ne dispose pas de retour sur les liaisons souterraines 400 000 volts. En effet, les premières qui seront construites en France sont en cours d'instruction administrative. Elles seront construites dans le Nord et en Moselle, elles ne comportent que deux tricâbles et cheminent dans des espaces cultivés.

En synthèse :

Sur le territoire du projet, l'impact d'une liaison souterraine de forte puissance réside d'abord dans le chantier de construction, équivalent en termes d'impact environnemental à la construction d'une route à 2 x 2 voies.

Une fois la liaison en service, l'impact est d'abord la contrainte sur l'utilisation du sol : interdiction de certaines plantations, de construction ; nécessité de maintenir l'accessibilité de l'ouvrage pour des réparations éventuelles ; présence tous les 1000 mètres d'un puits de visite qui émerge à la surface du sol.

L'impact environnemental est essentiellement hydrologique, en particulier dans la Pévèle qui est un territoire au sol très humide, et agricole, notamment au niveau des chambres des jonctions qui représenteraient, tous les 1000 m, 600 m² de superficie totale.

COMPARAISON DE LA TECHNIQUE AÉRIENNE ET DE LA TECHNIQUE SOUTERRAINE

COMPARAISON ÉCONOMIQUE

Nous détaillons dans ce paragraphe l'ensemble des coûts d'un ouvrage pendant sa durée de vie : le coût initial (investissement), les coûts pendant la durée de vie de l'ouvrage (pertes Joule, entretien, etc...) et le coût de démantèlement. Pour l'addition de l'investissement de départ et des coûts de chaque année de vie de l'ouvrage, nous utilisons un taux d'actualisation de 5,5%, et une durée de 45 ans qui est la durée comptable d'amortissement des investissements de RTE (ce paramètre ayant très peu d'influence sur le résultat du fait de l'actualisation).

Coût d'investissement

Le coût d'investissement des différents cas étudiés est détaillé à la fin du 2ème chapitre.

	Projet proposé par RTE : 28 km de liaison aérienne	CAS N°1 8 km de liaison souterraine, 20 km de liaison aérienne	CAS N°2 16 km de liaison souterraine, 12 km de liaison aérienne	CAS N°3 28 km de liaison souterraine
Coût total du projet	69 M€	160 M€	254 M€	459 M€

Coût des pertes Joule

Le principal paramètre qui joue sur le coût d'exploitation d'un ouvrage est le coût des pertes Joule qu'il génère, par l'échauffement que provoque le passage du courant qui le traverse.

Un câble souterrain étant environ trois fois moins résistif que la ligne aérienne équivalente, les pertes Joule qu'il génère à transit équivalent sont trois fois plus faibles.

Pour le calcul qui suit, nous avons utilisé le transit de la ligne Avelin-Gavrelle actuelle durant l'année 2010, que nous multiplions par 3 pour prendre en compte le triplement de puissance de la ligne après sa reconstruction. Cette hypothèse a pour effet de maximiser les pertes Joule, car ce niveau de transit ne sera probablement pas atteint avant que plusieurs années soient passées après la mise en service de la nouvelle ligne. Cela pénalise le bilan économique de la ligne aérienne car le paramètre des pertes Joule est favorable aux câbles souterrains.

Le coût des pertes Joule est estimé à 100 €/MWh pour le long terme considéré.

Le calcul appliqué aux ouvrages dimensionnés pour Avelin-Gavrelle donne un coût des pertes Joule pendant la durée de vie de la ligne aérienne de 926 k€/km, et 265 k€/km pour la liaison souterraine. Dans le cas de la liaison souterraine, il faut ajouter 644 k€ pour les pertes dans les inductances séries de compensation. Ces valeurs sont cohérentes avec celles généralement citées dans les publications internationales, avec toutefois moins de pertes Joule dans la ligne aérienne à quadruple faisceau du fait de sa moindre résistivité.

Coût de l'entretien

Une ligne aérienne nécessite un entretien :

- Mise en peinture régulière des pylônes pour éviter la corrosion. La 1ère mise en peinture n'intervient généralement pas avant la 20ème année de la ligne, les mises en peinture ont lieu ensuite tous les 7 ans environ.
- Élagage des arbres à proximité de la ligne pour éviter les amorçages. Ce poste de dépenses pèse moins sur la ligne Avelin-Gavrelle que pour le reste du réseau, car la zone est peu boisée.
- Visites de contrôle deux fois par an par hélicoptère pour ausculter le matériel de ligne.

En comparaison, la liaison souterraine n'a pratiquement pas d'entretien, à part des visites régulières du tracé et l'entretien des matériels de compensation et d'extrémité placés dans les postes.

Le coût au km de ligne aérienne de l'entretien, cumulé sur la durée de vie de la ligne, est de l'ordre de 15 000 €/km, soit inférieur à 2% du coût des pertes Joule. Pour un câble souterrain, il est de l'ordre de 2 000 €/km.

Coût de démontage

Le coût de démontage d'une liaison aérienne du type de celle envisagée dans le cadre du projet présenté par RTE est de l'ordre de 10% du coût de construction. Comme ce coût intervient après plusieurs décennies de vie utile de la ligne, son coût actualisé à la date de construction est très faible : de l'ordre de 10 000 €/km.

Pour une liaison souterraine, le coût de la démontage est de l'ordre de 5 fois celui de la ligne aérienne équivalente.

Fiscalité

Les lignes aériennes conduisent au versement de la « taxe pylône », versée tous les ans aux Communes accueillant les pylônes des lignes 400 000 volts. Cette taxe est de 4002 € par pylône pour l'année 2012.

Approche du « coût complet » de la ligne aérienne et du câble souterrain équivalent

Le tableau suivant récapitule les coûts détaillés ci-dessus, pour la liaison à construire (on ne prend pas en compte les coûts des travaux à effectuer dans les postes d'Avelin et de Gavrelle, ainsi que le démontage de la ligne existante, qui sont identiques dans les 4 cas) :

	Rappel : projet proposé par RTE : 28 km de liaison aérienne	CAS N°1 8 km de liaison souterraine, 20 km de liaison aérienne	CAS N°2 16 km de liaison souterraine, 12 km de liaison aérienne	CAS N°3 28 km de liaison souterraine
Ligne aérienne :				
Investissement	40 M€	24 M€	14 M€	0
Pertes Joule	25,9 M€	18,5 M€	11,1 M€	0
Entretien	0,42 M€	0,3 M€	0,18 M€	0
Démontage en fin de vie	0,28 M€	0,2 M€	0,12 M€	0
Taxe pylône	3,82 M€	3,0 M€	1,64 M€	0
Câble souterrain :				
Investissement câble	0	94 M€	193 M€	368 M€
Investissement compensation	0	13 M€	18 M€	62 M€
Pertes Joule câble	0	2,1 M€	4,2 M€	7,4
Pertes Joule compensation	0	0,6 M€	0,6 M€	0,6 M€ + pertes dans le transformateur-déphaseur*
Entretien	0	0,02 M€	0,03 M€	0,06 M€
Démontage en fin de vie	0	0,4 M€	0,8 M€	1,4 M€
Coût complet de la liaison pendant sa durée de vie	70 M€	156 M€	242 M€	439 M€

* Non calculées dans le cadre de cette étude

On constate que pendant sa durée de vie, le gain sur les pertes Joule est très loin de compenser le différentiel de coût d'investissement. Le bilan économique reste très largement en faveur de la technique aérienne, qui est de 5,2 à 6,5 fois moins chère que le câble souterrain suivant le cas considéré dans cette étude. Ce résultat, classique pour ce niveau de puissance, est partagé par l'ensemble de l'industrie : gestionnaires de réseau de transport comme industriels de la construction de câbles souterrains.

ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU RÉSULTAT À LA VALEUR DU TAUX D'ACTUALISATION

Le tableau précédent a été calculé avec un taux d'actualisation de 5,5% qui est le taux en vigueur actuellement en application du cadre de régulation appliqué à RTE.

À la demande de la Commission Particulière de Débat Public, le coût complet en aérien et souterrain, et le rapport de ces coûts complets, a été calculé avec d'autres valeurs du taux d'actualisation, afin d'illustrer son influence sur les résultats du calcul économique.

Les calculs ont été réalisés avec le cas n°2 (16 km en souterrain comparés aux 16 km en aérien).

Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau suivant :

Durée d'amortissement pour le calcul	TAUX D'ACTUALISATION	COÛT DES PERTES	16 KM AÉRIENS DANS LE CAS N°2	16 KM SOUTERRAINS DANS LE CAS N°2	RATIO SOUTERRAIN / AÉRIEN
50 ans	8%	100 €/MWh	38 M€	221 M€	5,8
50 ans	5,5%	100 €/MWh	43 M€	222 M€	5,2
50 ans	4%	100 €/MWh	48 M€	225 M€	4,6
50 ans	2%	100 €/MWh	60 M€	230 M€	3,8

Le ratio souterrain / aérien évolue entre 3,8 et 5,8 suivant les valeurs retenues pour le taux d'actualisation.

Ces résultats sont théoriques. En effet, une baisse du taux d'actualisation par rapport à la valeur actuellement en vigueur de 5,5% aurait deux conséquences :

- une conséquence sur le volume global des besoins en investissements de RTE, qui augmenterait de manière très importante, ce qui rendraient des arbitrages nécessaires car il serait peu probable que le tarif du transport d'électricité soit augmenté d'autant.
- Une conséquence sur les choix de technique constructive des lignes aériennes. La démarche de réduction des pertes Joule, qui voit dans le projet Avelin-Gavrelle sa 1ère concrétisation avec l'ajout du 4e fil dans le faisceau quadruple, serait poursuivie. Le type de fil électrique serait adapté (augmentation du diamètre de chaque fil, ajout de fils supplémentaires, modification de la composition métallurgique de l'alliage utilisé) pour diminuer les pertes Joule générées par la ligne aérienne. L'écart en coût complet entre aérien et souterrain serait modifié.

On ne peut donc projeter les dispositions constructives actuelles dans un monde hypothétique où le taux d'actualisation serait significativement différent de la valeur actuelle.

COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE DES TECHNIQUES AÉRIENNE ET SOUTERRAINE

Toutes deux présentent des avantages et des inconvénients. Construire l'ouvrage en technique souterraine permet d'en supprimer dans la plupart des cas l'impact visuel. Cependant, cette technique n'est pas sans effet sur l'environnement : risque de désorganisation des sols agronomiques, de modification des écoulements d'eau dans le sol, chaleur produite par les câbles, neutralisation d'une bande de terrain en surface...

Dans le cas présent, ces effets sont amplifiés par la consistance de l'ouvrage qu'il faudrait créer.

Rappelons que les impacts peuvent varier fortement suivant les tracés réellement retenus et les mesures de réduction susceptibles d'être mises en œuvre.

Impacts temporaires au moment des travaux

	LIAISON SOUTERRAINE	LIGNE AÉRIENNE
Chantier	> Linéaire 35 m ou 2x15 m de large sur 8 ou 16 km de long, soit 35 000 m²/km de liaison créée. > Un forage dirigé complexe sous le canal de la Deûle	Localisé aux pylônes (une plate-forme de 400 m² pour le chantier) + pistes d'accès (en moyenne 200m de piste de 5 m de large) soit 3000 m²/km de ligne créée.
Riverains	Perturbations sur tout le linéaire	Perturbations localisées aux abords des pylônes + pistes d'accès
Activités agricoles	> Perturbations sur tout le linéaire > Travaux complexes (tri et stockage de gros volumes de terres)	Perturbations localisées aux abords des pylônes + pistes d'accès
Milieu physique	> Tassements du sol au niveau des circulations > Passage en sols pollués > Franchissement de fossés et cours d'eau (risque de pollution et de perturbation des réseaux hydrographiques) > Secteurs humides (risques de pollutions de nappe)	Impacts ponctuels (emplacement des pylônes)
Milieu naturel	> Milieux naturels sensibles du Bassin Minier et de la vallée de la Marque > Dérangement de la faune > Impacts sur la faune vivant dans le sol	> Impacts possibles sur des espaces naturels sensibles (élargissement ou modification du couloir) > Dérangement de la faune
Patrimoine	Présence potentielle de vestiges archéologiques	Présence potentielle de vestiges archéologiques au niveau des pylônes

Après construction

	LIAISON SOUTERRAINE	NOUVELLE LIGNE AÉRIENNE (en bleu les impacts qui seront réduits avec la future ligne par rapport à la ligne actuelle)
Habitat	> Proximité d'habitations > Bande inconstructible de 20 m au minimum	> Proximité d'habitations
Bruit	Pas de bruit	Impact sonore*
Santé	Pas d'impact avéré sur la santé pour les champs magnétiques inférieurs à 100µT d'après l'OMS, la Commission Européenne, et la réglementation française	Pas d'impact avéré sur la santé pour les champs magnétiques inférieurs à 100µT d'après l'OMS, la Commission Européenne, et la réglementation française
Activités agricoles	> Impacts à long terme possibles sur les sols agricoles > Impacts à long terme possibles sur les sols agricoles > Pas d'arboriculture au-dessus de la liaison	Impacts localisés à l'emplacement des pylônes et leurs abords
Milieu physique	> Impacts à long terme possibles sur les sols > Assèchement autour des câbles > Perturbation des écoulements superficiels et souterrains	Impacts localisés
Milieu naturel	> Impacts à long terme possibles sur la flore et la faune du sol > Impacts positifs possibles (augmentation de la biodiversité par ouverture du milieu)	> Impacts à long terme possibles sur la flore > Impacts positifs possibles (augmentation de la biodiversité par ouverture du milieu) > Risques de percussion pour les oiseaux* (proximité des Cinq Tailles) (réductible par la mise en place de dispositifs d'avertissement)
Patrimoine		Covisibilité possible avec des éléments protégés**
Paysage	> Impact visuel du poste aéro-souterrain > Déboisements localisés	> Impacts visuels sur l'ensemble du linéaire > Mesures compensatoires envisageables sur les autres réseaux (lignes RTE et réseaux de distribution d'électricité)

* L'augmentation du nombre de fils électriques diminuera le bruit dû à l'effet couronne, et rendra la ligne plus visible pour les oiseaux, ce qui diminuera le risque de percussion.

** Si la variante Est est retenue, le tracé devra s'écarter de l'église St Pierre à Antioche de Tourmignies, qui est classée monument historique.

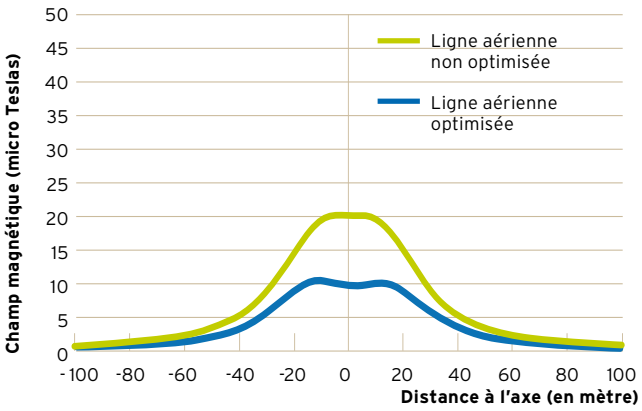
COMPARAISON DES CHAMPS MAGNÉTIQUES ÉMIS PAR UNE LIGNE AÉRIENNE ET UNE LIGNE SOUTERRAINE

Les lignes souterraines émettent des champs magnétiques, comme tous les objets conducteurs traversés par un courant électrique. Le sol n'arrête pas le champ magnétique, à la différence du champ électrique. On mesure donc des champs magnétiques au-dessus des lignes électriques souterraines.

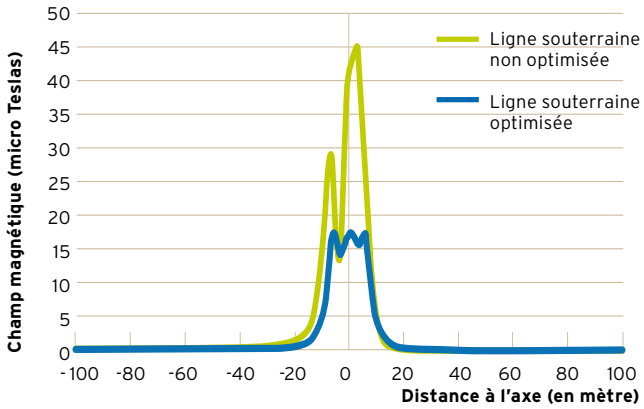
Ces champs magnétiques décroissent très vite lorsqu'on s'éloigne de la liaison souterraine, plus rapidement que pour les liaisons aériennes car les trois phases de chaque circuit sont plus proches dans les liaisons souterraines que dans les liaisons aériennes. Les champs magnétiques des liaisons souterraines sont donc mieux compensés.

Les courbes suivantes comparent les niveaux de champ magnétique atteints, dans un axe transversal à l'axe de l'ouvrage, suivant que la disposition des phases a été optimisée ou non. Nous regardons d'abord le cas d'une liaison aérienne, puis celui d'une liaison souterraine.

COMPARAISON DES CHAMPS MAGNÉTIQUES EN RÉGIME DE SERVICE PERMANENT -LIGNE AÉRIENNE



COMPARAISON DES CHAMPS MAGNÉTIQUES EN RÉGIME DE SERVICE PERMANENT - LIAISON SOUTERRAINE



L'optimisation du point de vue du champ magnétique consiste en un choix d'arrangement des phases des différents circuits (les deux circuits pour la ligne aérienne, les six tricâbles pour la liaison souterraine) de manière à profiter au maximum de l'effet de compensation des champs magnétiques.

On constate que la valeur maximale pour une liaison souterraine est plus forte que pour une liaison aérienne. Cela est dû au fait que la liaison souterraine est plus proche du sol que la liaison aérienne. On vérifie également que le champ magnétique produit par la ligne aérienne s'atténue moins vite lorsqu'on s'en éloigne que dans le cas de la liaison souterraine.

On constate également que les deux types d'ouvrages respectent la réglementation, puisque le champ magnétique maximal est toujours largement inférieur à 100 μT.

AUTRES POINTS DE COMPARAISON

La comparaison entre la réalisation d'un ouvrage du réseau en technique aérienne ou en technique souterraine ne peut se résumer aux aspects économiques et environnementaux étudiés ci-dessus. D'autres paramètres sont souvent évoqués. Nous complétons donc cette comparaison dans les paragraphes suivants.

Résistance aux événements externes

Les liaisons aériennes peuvent être sensibles aux aléas météorologiques tels que les vents violents (cyclones, tornades), les épisodes de givre ou de neige collante.

Ces événements affectent toutefois rarement les lignes à 400 000 volts. En effet, pendant les tempêtes ce sont surtout les chutes d'arbres qui provoquent des dégâts sur les réseaux, et les distances entre les lignes aériennes 400 000 volts et les arbres les prémunissent contre de telles chutes.

De plus, la vitesse de vent à laquelle les nouvelles lignes électriques doivent résister ont été relevées après les tempêtes de 1999. La ligne Avelin-Gavrelle ne devrait donc pas subir de dégâts en cas de tempête équivalente à celle de 1999.

On peut signaler que si les liaisons souterraines ne sont pas sensibles aux aléas météorologiques, il arrive qu'elles soient endommagées lors de séismes, de glissements de terrain, ou d'effondrement de cavités du sous-sol.

Durée d'indisponibilité en cas d'avarie

Les liaisons souterraines présentent des taux d'avarie moindres que les lignes aériennes, car elles ne sont pas

soumises aux aléas météorologiques. Cependant, en cas de panne, les temps d'intervention sont beaucoup plus élevés pour les liaisons souterraines que pour les liaisons aériennes, car il faut plus de temps pour détecter les défaillances et intervenir sur les ouvrages souterrains.

Une liaison aérienne est remise en service en moins d'une journée en général pour une avarie mineure et moins de 5 jours dans le cas d'une avarie importante (chute de pylône). Dans le cas d'un câble souterrain 400 000 volts, la durée d'indisponibilité est plutôt de l'ordre de 3 semaines au minimum. En termes de durée d'indisponibilité annuelle, les câbles souterrains sont donc considérés comme moins performants que les lignes aériennes.

Cela conduit lors de chaque avarie d'un câble souterrain à une exploitation dégradée du système électrique pendant une longue période, donc à des risques d'incident majeur pour l'alimentation électrique de la zone.

Sécurité des tiers à proximité des ouvrages

Pour la technique de la ligne aérienne, les risques sont :

- La chute de pylône. Ce phénomène est très rare. Il peut intervenir lors de tempête, donc à des moments où personne n'est à l'extérieur. RTE n'a pas connaissance de blessure infligée à un tiers par la chute d'un pylône.
- La rupture de câble avec chute de câble : cela arrive très rarement. Les tronçons de lignes aériennes qui surplombent des habitations ou des voies de communication sont sécurisés, avec notamment le doublement des chaînes d'isolateurs. La surveillance héliportée réalisée deux fois par an permet de contrôler les manchons, qui sont les points faibles des lignes aériennes (les manchons sont les tubes comprimés sur le fil électrique à l'endroit du changement de touret). Enfin, les entretoises qui maintiennent les quatre câbles de chaque faisceau de fils électriques évitent en partie ce risque.
- Risques liés aux activités humaines manipulant des objets à proximité des lignes électriques aériennes. Ces risques peuvent être la collision d'un aéronef avec un pylône ou avec les câbles, l'électrocution d'un pêcheur, d'un adepte du cerf-volant, l'accrochage d'un câble conducteur par un engin agricole ou une grue de chantier. Ces événements sont très rares, parfois dramatiques. RTE et ERDF mènent des campagnes d'information des professions ou associations concernées. Pour les lignes aériennes à 400 000 volts, ces événements sont particulièrement rares du fait de la hauteur des conducteurs, et du balisage aéronautique installé à proximité des aéroports et aérodromes. Le retour d'expérience de 2010 et 2011 ne révèle aucun accident de ce type avec une ligne 400 000 volts (et 13 accidents tous niveaux de gravité confondus pour les 80 000 km de réseaux RTE de niveaux de tension inférieurs).

Pour le souterrain :

- Il n'y a pas de risque qu'un court-circuit par défaillance intrinsèque du câble ait une conséquence externe. En effet, le fourreau est dimensionné pour confiner le court-circuit.
- Le principal risque est une agression externe. Lors d'un chantier, le câble peut être accroché par un engin de terrassement ou de carottage. Ce type d'événement est plus probable en zone urbaine. Dans le cas de la ligne Avelin-Gavrelle, l'installation se ferait plutôt en zone rurale donc ce risque serait faible. De plus la procédure de DR-DICT (demande de renseignement, déclaration d'intention de commencement de travaux) est là pour éviter ce risque.

En conclusion :

La comparaison économique entre la technique aérienne et la technique souterraine pour le projet Avelin-Gavrelle montre que même en prenant en compte l'ensemble des coûts sur la durée de vie de l'ouvrage, la ligne aérienne reste de 5,2 à 6,5 fois moins chère que le câble souterrain, si l'on considère que le taux d'actualisation est 5,5%.

La comparaison des impacts environnementaux des chantiers sur le territoire du projet Avelin-Gavrelle montre que l'impact de la construction de la liaison souterraine est beaucoup plus fort, en particulier il va concerner plus de 10 fois la superficie du chantier de construction de la ligne aérienne.

Sur les secteurs concernés, l'impact environnemental de la ligne aérienne est essentiellement visuel. L'impact de la liaison souterraine est essentiellement hydrologique et agricole.

Le champ magnétique d'une liaison souterraine à 400 000 volts reste largement inférieur à la limite réglementaire de 100 µT. Il est plus fort que celui d'une ligne aérienne lorsqu'on est au-dessus du câble. Il décroît plus vite que celui d'une ligne aérienne lorsqu'on s'éloigne de la liaison.

ANNEXE

le Contrat de service public de RTE

Le Contrat de Service Public de RTE, signé le 24 octobre 2005 par six ministres du gouvernement et le président du directoire de RTE, en application de l'article L.121-46 du code de l'énergie contient notamment des engagements réciproques pour une meilleure insertion des réseaux électriques dans l'environnement. Il fixe en particulier des objectifs en matière de réalisation en technique souterraine des nouvelles lignes électriques. En voici l'extrait correspondant :

« Afin de réduire l'impact environnemental du réseau public de transport, RTE s'engage à protéger les paysages, les milieux naturels et urbanisés :

- en réalisant en technique souterraine au moins 30 % des circuits HT à créer ou à renouveler.
- en recourant préférentiellement aux liaisons souterraines :
- pour les ouvrages en 400 000 volts : dans des situations exceptionnelles, du fait du coût de la mise en souterrain.
- pour les ouvrages en 225 000 volts : dans les unités urbaines de plus de 50.000 habitants au sens de l'INSEE pour les projets à réaliser en dehors des tracés existants et des couloirs de lignes, et pour ceux, situés à l'intérieur de ces derniers, qui conduiraient à un accroissement significatif des impacts.
- pour les ouvrages en 90 000 volts et 63 000 volts : outre les cas cités pour les ouvrages en 225 000 volts, dans les zones d'habitat regroupé, dans les zones considérées comme prioritaires (zones d'importance pour la conservation des oiseaux, zones naturelles d'intérêts écologiques floristiques et faunistiques, zones de protection du patrimoine architectural urbain et paysager, sites inscrits au titre de la loi du 2 mai 1930 ainsi que les parcs naturels régionaux et les zones périphériques des parcs nationaux), et aux abords immédiats des postes sources. »

.

GLOSSAIRE

Actualisation

Lorsqu'on additionne des dépenses faites à des échéances différentes, on prend en général en compte le fait qu'il est plus coûteux de dépenser aujourd'hui que demain. Le taux d'actualisation permet de prendre en compte ce phénomène dans les calculs où on additionne un investissement et des dépenses annuelles. Plus de taux d'actualisation est faible, plus les dépenses qui ont lieu dans un lointain avenir seront chères. Plus le taux d'actualisation est fort, moins elles pèseront lourd dans le coût complet.

Bentonite

Mélange constituée d'eau et d'argile, d'aspect boueux, utilisé pour :

- lubrifier l'outil de forage d'un forage dirigé et le refroidir,
- consolider le tunnel
- favoriser l'évacuation des déblais.

Champs captants

Un champ captant est un territoire regroupant un ou plusieurs ouvrage(s) de captages d'eau potable souterraine, dans une même nappe phréatique.

Inductance

C'est une valeur physique proportionnelle au quotient du flux magnétique généré par une bobine sur l'intensité électrique parcourue dans celle-ci. Une bobine installée sur un réseau électrique est aussi appelée inductance.

Mvar

1 Mvar = 1 Méga Volt Ampère réactif. C'est une unité de puissance qui caractérise les inductances ou l'effet capacitif des câbles souterrains.

Ohm

Unité de résistance au passage du courant dans les éléments conducteurs de l'électricité. Plus la résistance est forte, plus l'élément s'échauffe au passage du courant.

Pertes Joule

Les pertes Joule sont les pertes d'énergie par production de chaleur dans les éléments traversés par un courant électrique. Les pertes Joule dépendent de la résistance de l'élément et du carré du courant qui le traverse.

Résistif

Caractéristique d'un élément du réseau qui s'échauffe lors du passage du courant.

Résonance

La résonance est un phénomène selon lequel le réseau électrique est sensible à certaines fréquences. Si le réseau est soumis à une excitation proche d'une de ses fréquences de résonance, comme lors de l'enclenchement d'un élément de réseau, il va être le siège d'oscillations de plus en plus importantes, jusqu'à atteindre un régime d'équilibre qui dépend des éléments dissipatifs du système, ou bien jusqu'à une rupture d'un composant du système.

Résistance

Propriété d'un matériau à s'opposer au passage du courant électrique en s'échauffant. Cette propriété est parfois voulue (fours de cuisson électriques, chauffage électrique), parfois subie lorsqu'il s'agit de l'échauffement des éléments du réseau électrique (on parle alors de pertes Joule, car l'énergie utilisée par la résistance des fils électriques et transformateurs électriques.

Sous-solage

Le sous-solage est une technique permettant de redonner de la perméabilité au sol en améliorant le drainage naturel.

Touret

Grosse bobine sur laquelle est enroulé le câble, en usine, après sa production. Le touret sert au transport et au déroulage du câble.

RTE Système Electrique Nord Est
913 Avenue de Dunkerque
BP 427
59464 LOMME CEDEX
www.rte-france.com

PARIMAGE Impression ICB
Imprimé sur papier recyclé 100% avec des encres végétales