

Fiche d'information

Étude de câblage Suisse: limites techniques et opérationnelles des lignes câblées souterraines dans le réseau de transport suisse

Date

9 avril 2025

1 Situation initiale

1.1 Part croissante des lignes câblées souterraines dans le réseau de transport suisse

La construction de nouvelles lignes câblées souterraines dans le réseau de transport suisse n'est plus possible que dans une mesure très limitée. C'est ce que montre l'étude de câblage de Swissgrid. En tant qu'entreprise innovante, Swissgrid est ouverte aux nouvelles technologies et examine aussi bien les variantes aériennes que les variantes câblées dans les projets de réseau. C'est le Conseil fédéral qui décide, dans le cadre de la procédure de plan sectoriel, si un tronçon de ligne doit être réalisé sous forme de ligne câblée souterraine ou de ligne aérienne. Actuellement, 42 kilomètres de lignes câblées souterraines ont été construits sur le réseau de transport suisse. La réalisation d'environ 250 kilomètres supplémentaires a déjà été fixée par les autorités, par exemple la nouvelle ligne câblée dans le deuxième tube du tunnel routier du Gothard.

1.2 L'étude de câblage montre les conséquences en cas d'exploitation et de perturbation

Swissgrid attire depuis longtemps l'attention sur les défis techniques et opérationnels que représente la multiplication de lignes câblées souterraines dans le réseau à très haute tension. Afin d'objectiver le débat sur le choix de la technologie et de renforcer la solidité des bases de décision, Swissgrid a élaboré une étude de câblage détaillée, basée sur des scénarios. L'étude a été validée par l'entreprise RTE international et a fait l'objet d'une réflexion avec l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et la Commission fédérale de l'électricité (El-Com). De plus, les résultats de l'étude commandée par l'OFEN ont été confirmés par l'École polytechnique fédérale (EPF).

La présente étude de câblage montre qu'une part trop importante de lignes câblées souterraines dans le réseau de transport a un impact négatif sur la stabilité du réseau et la sécurité d'approvisionnement de la Suisse. La raison: les propriétés physiques spécifiques des lignes câblées souterraines, qui compliquent considérablement tant l'exploitation du réseau de transport que l'élimination des perturbations. Ces propriétés physiques augmentant de manière disproportionnée avec la tension, les défis techniques et opérationnels d'un câblage croissant dans le réseau à très haute tension (380 et 220 kilovolts) sont particulièrement importants. En revanche, à un niveau de tension inférieur (jusqu'à 145 kilovolts), ils sont nettement plus limités.

2 Aperçu des limites techniques et opérationnelles

2.1 Exploitation stable et fiable du réseau: maintien de la tension

Une tension constante est fondamentale pour le fonctionnement fiable du réseau de transport suisse. Les lignes câblées souterraines augmentent davantage la tension que les lignes aériennes en raison de leurs caractéristiques physiques. En outre, les longues lignes câblées souterraines réduisent soit la puissance effective d'une ligne (puissance active), soit elles nécessitent des installations pour compenser la puissance réactive. Et plus une ligne câblée souterraine est longue, plus ce défi est important.

La tension est principalement régulée par des générateurs dans les centrales électriques qui injectent l'énergie électrique directement dans le réseau de transport. Si le réseau contient plus de puissance réactive que les centrales ne peuvent en absorber, il y a un risque de surtensions. Le risque que des vibrations perturbatrices et des amplifications de vibrations provoquent des instabilités de centrales électriques et de l'exploitation du réseau augmente aussi. Cela peut entraîner des défaillances de réseau et des dommages aux installations ou le déclenchement de dispositifs de protection et donc la mise hors service de composants de réseau. Aujourd'hui déjà, il existe des situations dans lesquelles le potentiel des centrales électriques à absorber la puissance réactive ne suffit pas à maintenir la tension dans les limites autorisées dans toutes les régions. Swissgrid prévoit donc d'ores et déjà d'investir dans des installations supplémentaires de compensation de puissance réactive.

Par rapport aux lignes aériennes, les lignes câblées souterraines génèrent plus de puissance réactive. La raison en est leur construction compacte: leurs conducteurs sont beaucoup plus rapprochés que ceux des lignes aériennes et ils sont recouverts d'une épaisse gaine isolante. Leur capacité à absorber et à restituer une charge électrique augmente ainsi leur puissance réactive. Avec l'augmentation du câblage du réseau de transport, le besoin en installations de compensation augmenterait donc encore massivement. Cela amplifierait la complexité de l'exploitation et donc les risques d'erreurs du réseau de transport. En outre, les installations de compensation nécessitent beaucoup de place, ce qui fait souvent défaut dans les sous-stations – qui sont les sites les plus appropriés – et elles génèrent des émissions sonores. L'étude de câblage montre que les installations de compensation supplémentaires nécessaires avec une grande majorité de lignes câblées souterraines entraîneraient des coûts d'environ 1.4 milliard de francs. En règle générale, les lignes câblées souterraines sont entre 2 et 10 fois plus chères que les lignes aériennes de même longueur si l'on considère l'ensemble du cycle de vie. Ces coûts supplémentaires pour les lignes câblées souterraines doivent être payés par l'ensemble des consommatrices et des consommateurs d'électricité.

2.2 Exploitation stable et fiable du réseau: résonances

Chaque infrastructure technique possède ce que l'on appelle une fréquence propre, avec laquelle elle «oscille» d'elle-même une fois qu'elle a été «lancée», un peu comme une balançoire qui, une fois poussée, oscille d'elle-même dans sa fréquence propre. Les réseaux électriques ont également des fréquences propres, appelées fréquences de résonance. Afin d'éviter les perturbations dans le réseau de transport, ses fréquences de résonance doivent être aussi éloignées que possible des fréquences de ces oscillations susceptibles d'interférer avec les lignes. Il s'agit notamment des harmoniques présentes dans le réseau. Celles-ci résultent de l'interaction de nombreux consommateurs électriques non linéaires différents ou de l'électronique de puissance, comme les redresseurs, les convertisseurs de fréquence ou les commandes de moteur.

Comme mentionné ci-dessus, une ligne câblée souterraine dans le réseau à très haute tension présente des caractéristiques physiques fondamentalement différentes de celles d'une ligne aérienne en raison de sa construction compacte et massive. Ainsi, la fréquence de résonance des réseaux avec lignes câblées souterraines est nettement plus basse que celle des réseaux composés exclusivement de lignes aériennes. Cet effet est comparable à un diapason qui «vibre plus grave» plus sa masse est importante. Mais plus la fréquence de résonance des réseaux est basse, plus elle est proche de la fréquence des influences extérieures potentiellement perturbatrices. Les lignes câblées souterraines présentent donc un risque d'amplification dangereuse des vibrations, comparable à l'effet de soldats traversant un pont au pas: si la fréquence de leurs pas s'aligne sur la fréquence propre du pont, l'amplification des vibrations peut provoquer l'effondrement du pont.

Si le nombre de kilomètres de lignes câblées souterraines augmente dans le réseau de transport d'une région donnée, sa fréquence de résonance globale baisse. Le risque de résonances et d'amplifications

vibratoires potentiellement perturbatrices augmente alors, et avec lui le risque de défaillances du réseau ou de dommages aux composants de réseau et aux appareils électriques. Contrairement à la puissance réactive, les phénomènes physiques à l'origine des problèmes de résonance ne peuvent pas être atténués par des installations de compensation. Seuls des filtres en sont capables. Leur introduction dans le réseau est toutefois risquée, car, selon l'état du réseau, ils peuvent soit l'aider, soit le perturber. Par exemple, il peut arriver qu'un filtre n'offre aucune atténuation ou même qu'il amplifie les vibrations lorsque certaines lignes sont hors service.

2.3 Remise en service de lignes après des perturbations ou des coupures planifiées

Des perturbations régionales de l'approvisionnement en électricité peuvent par exemple être provoquées par des phénomènes naturels (p. ex. foudre, verglas, chutes d'arbres). Dans le réseau de transport, les coupures de lignes planifiées par Swissgrid pour effectuer des travaux de maintenance ou pour pouvoir réaliser des projets d'extension du réseau sont de loin les plus fréquentes. Dans tous ces cas, il est important que les lignes soient (ré)enclenchées rapidement et si possible sans problème. Il en résulte des vibrations électriques.

Les réseaux avec lignes câblées souterraines dans le réseau à très haute tension présentant, comme décrit ci-dessus, une fréquence de résonance plus basse, le potentiel d'amplification et de dommages de ces oscillations est nettement plus important. Pour cette raison, chaque remise en service de lignes câblées souterraines après des perturbations ou après des coupures planifiées risque d'entraîner des dommages. De plus, en cas d'endommagement, les lignes câblées souterraines restent souvent hors service pendant des semaines, voire des mois, car leur réparation est nettement plus compliquée et plus coûteuse que celle des lignes aériennes.

2.4 Reconstruction du réseau après un black-out

Par black-out, on entend une perturbation à grande échelle de l'approvisionnement en électricité, déclenchée par la défaillance simultanée de plusieurs éléments du réseau de transport. Contrairement aux perturbations limitées à certaines régions ou aux coupures planifiées, les black-out sont très rares. Leurs conséquences peuvent toutefois être dramatiques. Pour cette raison, une reconstruction rapide et aussi fluide que possible du réseau après un black-out de grande ampleur est existentiel pour la sécurité d'approvisionnement de la Suisse. Pour ce scénario, Swissgrid a divisé le réseau de transport suisse en quatre cellules de reconstruction du réseau. Chacune de ces cellules comprend une zone de centrales dites «aptes au démarrage autonome». Après le black-out, ces dernières peuvent, à l'aide de leur propre production d'électricité, rétablir la fréquence, la tension et la puissance nécessaires et ainsi reconstruire successivement les réseaux environnants et les alimenter en énergie électrique.

L'étude de câblage Suisse montre que les effets de résonance peuvent, en fonction de la longueur des lignes câblées souterraines et de la proximité avec des centrales électriques aptes au démarrage autonome, brider totalement l'aptitude d'une cellule à reconstruire le réseau après un black-out à grande échelle.

3 Regard vers l'avenir

Le système électrique est en train de vivre la plus grande transformation de son histoire. Dans ce contexte, Swissgrid s'intéresse également aux développements généraux dans le domaine de la technologie de transport à très haute tension. En tant qu'entreprise innovante, Swissgrid est ouverte aux nouvelles technologies. Pour la planification des projets en cours, Swissgrid mise sur des technologies testées et éprouvées tout en observant le marché des technologies et en participant à des processus d'innovation et à des projets pilotes. Pour ce faire, Swissgrid est en contact étroit avec les gestionnaires de réseau européens et entretient un dialogue technique avec les autorités, la recherche et l'industrie. En ce qui concerne les défis posés par les lignes câblées souterraines dans le réseau de transport suisse, il convient toutefois de préciser clairement les choses: dans l'optique d'un développement durable et sûr du réseau, la problématique mise en évidence dans l'étude de câblage exige impérativement, et rapidement, des conditions générales appropriées pour les câblages.

L'étude de câblage montre que la part des lignes câblées souterraines dans le réseau de transport doit être maintenue à un niveau bas d'un point de vue technique et opérationnel. Un câblage incontrôlé selon le

principe du «premier arrivé, premier servi» a des conséquences négatives sur la stabilité du réseau et la sécurité d’approvisionnement de la Suisse. Dans le cadre des futurs projets de réseau, il convient donc d’évaluer soigneusement, dans une perspective globale, les endroits du réseau de transport où une ligne câblée souterraine constitue une variante de mise en œuvre nécessaire et acceptable.

Swissgrid s’efforce de créer une systématique qui définit les conditions générales techniques et opérationnelles pour les câblages. Pour les futurs projets de construction de réseau, il faut disposer, au plus tard dans le cadre des avant-projets ainsi que dans la procédure de plan sectoriel, de bases de décision solides pour le calcul de la longueur de câble acceptable, par rapport à l’ensemble du réseau ainsi qu’aux autres projets de réseau prévus. Ces bases doivent être associées à d’autres conditions générales, comme les aspects d’aménagement du territoire ou les interdépendances d’infrastructures existantes, afin de former un catalogue de critères complet, axé sur les exigences du système global.

Les lignes câblées souterraines pouvant avoir un impact sur le réseau local, mais aussi sur des régions de réseau très éloignées, il n’est pas possible de quantifier les longueurs maximales de câble possibles par région. La systématique doit montrer quelles sont les lignes pour lesquelles un câblage doit être exclu pour des raisons techniques et opérationnelles. Swissgrid coordonnera cette systématique avec les autorités et la présentera aux différents groupes d’intérêts et au grand public.

4 Conclusion

Dans le réseau de transport suisse, la construction de nouvelles lignes câblées souterraines n’est possible que dans une mesure très limitée. La présente étude de câblage Suisse confirme les grands défis techniques et opérationnels d’un câblage croissant dans le réseau à très haute tension, défis sur lesquels Swissgrid insiste depuis longtemps. Ces défis sont dus aux propriétés physiques spécifiques des lignes câblées souterraines. Les conclusions de l’étude sont les suivantes:

1. Plus d’installations, davantage de complexité et des coûts plus élevés: les lignes câblées souterraines génèrent nettement plus de puissance réactive que les lignes aériennes. Afin d’éviter des surtensions et des défaillances de réseau dommageables, cette puissance réactive doit être absorbée par des installations de compensation supplémentaires. Les installations de compensation augmentent la complexité de l’exploitation du réseau, entraînent des coûts élevés, nécessitent beaucoup de place et génèrent du bruit.
2. Reconstruction du réseau plus difficile après un black-out: les lignes câblées souterraines abaissent les fréquences de résonance dans le réseau de transport. Cela augmente le risque qu’après un black-out, la reconstruction du réseau de régions entières soit impossible en raison des effets de résonance. De plus, les effets de résonance augmentent le risque de dommages aux composants de réseau et aux appareils électriques.
3. Plus la part de câbles est faible, plus l’exploitation du réseau est stable: en raison des phénomènes mis en évidence par l’étude de câblage, la part des lignes câblées souterraines dans le réseau de transport doit être maintenue à un niveau bas.
4. Planifier à long terme: un câblage incontrôlé selon le principe du «premier arrivé, premier servi» a des conséquences négatives sur la sécurité d’approvisionnement de la Suisse. En accord avec les autorités, Swissgrid s’efforce de mettre en place une systématique afin de pouvoir évaluer, dans une perspective globale, les endroits du réseau de transport où une ligne câblée souterraine constitue une variante de mise en œuvre nécessaire et acceptable.
5. Délais de réparation plus longs en cas de dommages: alors que les lignes aériennes sont de nouveau disponibles en quelques minutes ou heures en cas de perturbation, cela peut prendre des semaines, voire des mois, pour les lignes câblées souterraines. En effet, la perturbation d’une ligne câblée souterraine est généralement liée à un endommagement.

Les résultats de l’étude appuient le principe introduit dans la discussion dans le cadre du projet de consultation de la loi sur les installations électriques pour la transformation et l’extension des réseaux électriques («Réseau express»), selon lequel un principe de lignes aériennes doit être appliqué à l’avenir dans le réseau de transport et les lignes câblées souterraines ne doivent être examinées que si les critères correspondants sont remplis.