Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 112 (2021)
Heft: 12

Artikel: Les lignes câblées dans le réseau de transport
Autor: Dinser, Sandro / Biasiutti, Gianni
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-977642

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les lignes câblées dans le réseau de transport

Étude des types de réalisation | Le câblage gagne en importance dans la construction de lignes. Or, dans ce domaine, la Suisse présente certaines particularités: la construction à l'aide de batteries de tubes n'est pas compatible avec l'urbanisation très dense ou la topographie montagneuse. Cette étude présente les différents types de réalisation de lignes câblées souterraines et décrit leurs caractéristiques.

SANDRO DINSER, GIANNI BIASIUTTI

Lors de la construction de lignes de transport d'électricité, le câblage peut permettre de surmonter des obstacles civilisationnels, écologiques ou topographiques, ou de les regrouper avec d'autres infrastructures dans des tunnels. Dans la première phase d'un projet de construction d'une ligne de transport, ses différents tracés possibles sont évalués dans le «plan sectoriel des lignes de transport d'électricité» (PSE). L'objectif consiste à déterminer son tracé et la technologie à utiliser (ligne aérienne ou câble souterrain). L'Office fédéral de l'énergie dirige cette procédure à laquelle participent les parties prenantes. Swissgrid, en tant que maître d'ouvrage, montre les différentes variantes du tracé de la ligne.

Les batteries de tubes représentaient la solution suisse standard pour les lignes câblées souterraines jusqu'à présent. Les câbles peuvent également être tirés dans des tuyaux plus ou moins gros, dans des galeries souterraines ou dans des tunnels. Différentes technologies innovantes peuvent être envisagées pour la construction de ces installations à l'heure actuelle. Elles augmentent la marge de manœuvre relative au tracé des lignes et peuvent également être intéressantes au regard des coûts. Swissgrid a réalisé une étude afin de recenser tous les types de réalisation de lignes câblées adaptés aux particularités suisses et de les comprendre en termes d'adéquation et de caractéristiques. L'analyse s'est concentrée sur les tracés de 2 km et plus.

Méthodologie de l'étude

L'étude a été confiée à une équipe d'experts en construction, en électro-

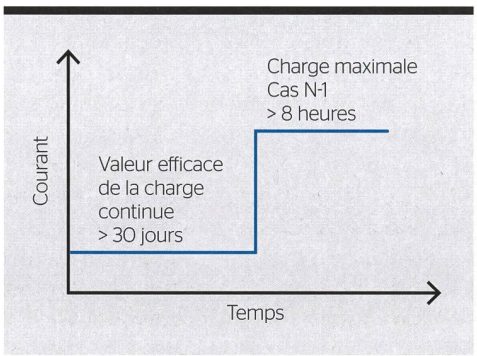


Figure 1 Profil de courant pour spécifier la charge admissible des lignes câblées souterraines. La charge permanente détermine la température d'équilibre de la ligne câblée. Le passage à la charge maximale (dans le cas d'un événement N-1) entraîne une nouvelle augmentation de la température du câble conducteur, celle-ci ne devant pas atteindre la valeur limite de 90 °C avant au moins 8 h.

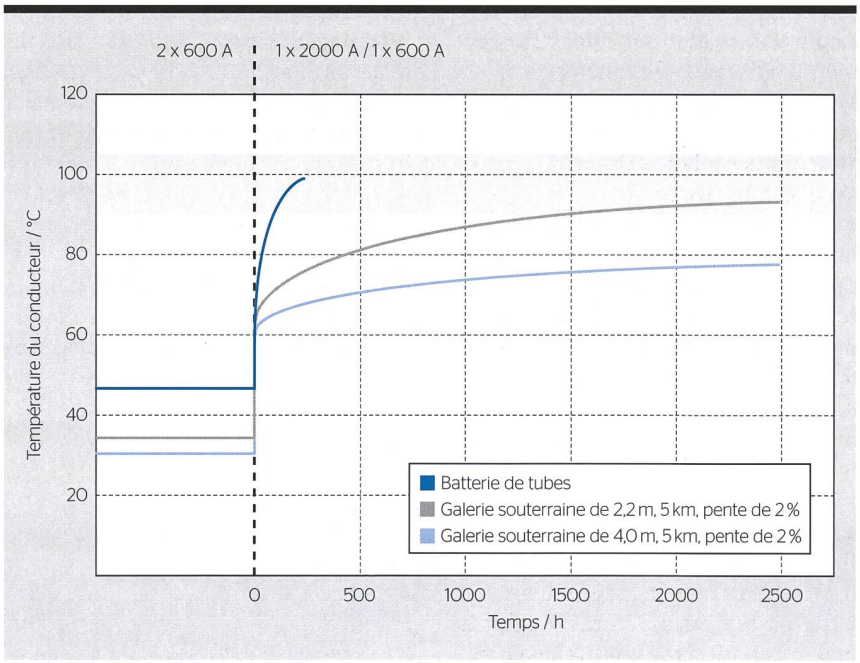


Figure 2 Température du câble conducteur en fonction du temps pour des lignes câblées à 2 faisceaux avec des types de réalisations différents. La température initiale se réfère à une charge préliminaire de longue durée de 600 A. À l'instant zéro, un saut à la charge maximale de 2000 A se produit. Les températures stationnaires sont atteintes au bout de plusieurs semaines dans le cas de la batterie de tubes, et au bout de plusieurs mois seulement dans le cas des galeries souterraines ventilées.

Figures: Swissgrid

technique et en génie thermique. La première étape a consisté à passer en revue la littérature concernant les lignes câblées pour les niveaux supérieurs du réseau. L'équipe s'est ensuite procuré la vue d'ensemble des procédés de construction, de la réalisation des tranchées aux galeries souterraines ou aux tunnels creusés, en passant par les tubes souterrains et les petites galeries. Elle a discuté de l'état de la technique ainsi que des coûts des différents types de machines, parfois nouvelles, avec un fabricant de machines de pose de tubes et de percement de petits tunnels (Herrenknecht, 60 % de parts de marché dans le monde). Sur cette base, l'équipe a conçu différents types de réalisation de lignes câblées, les a examinés sous tous leurs aspects essentiels et en a calculé les coûts.

Les types de réalisation, leur comportement thermique et leurs coûts sont décrits ci-dessous.

Exigences relatives aux lignes câblées souterraines

Les exigences ont été choisies de manière homogène afin de pouvoir comparer les différents types de réalisation. L'extension suivante a été définie: 2 faisceaux et une section de 2500 mm² pour le câble conducteur en cuivre.

L'exigence relative à la charge admissible est formulée de sorte à tenir compte de l'inertie thermique de la ligne câblée. Cette inertie est importante, car les charges maximales du réseau de transport sont des événements sporadiques et limités dans le temps. Les lignes câblées procurent une réserve de charge admissible importante face à de tels épisodes de forte charge.

Dans cette optique, un profil de charge schématique a été défini selon la **figure 1**. Ce profil comporte une charge initiale constante de longue durée, qui conduit à une température d'équilibre, et une variation brusque à une charge maximale temporaire. L'étude a fixé la charge initiale à 600 A, la charge permanente à 1200 A et la charge maximale temporaire à 2000 A. La température du câble conducteur est le facteur limitant de la capacité de transport du courant. La température maximale admissible est de 90 °C en continu (105 °C pendant une courte durée).

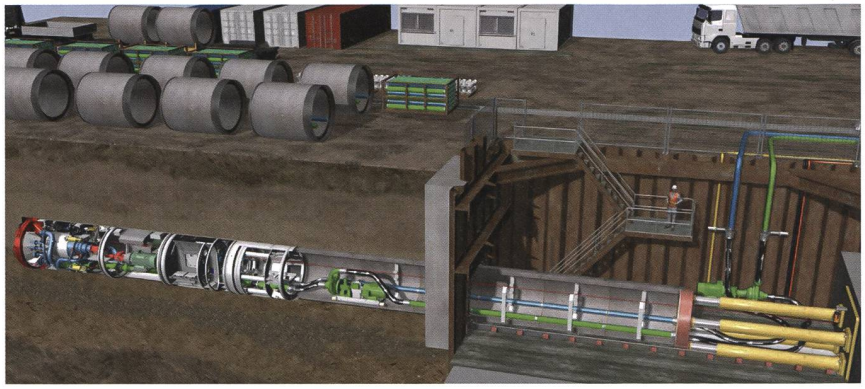


Figure 3 Illustration du microtunnelage ou fonçage de tubes.

La **figure 2** montre l'inertie thermique des lignes câblées lors de la variation brusque de charge mentionnée. Trois types de réalisation ont été comparés: la batterie de tubes ainsi que des galeries ventilées de 2,2 et 4 m de diamètre. La ventilation est créée par tirage thermique grâce à la pente de 2 % de la galerie. Dans le cas de la batterie de tubes, la température du câble conducteur se stabilise à 43 °C avec la charge permanente. Après la variation brusque de charge, la température atteint 90 °C dans les 60 h. Dans les galeries souterraines, la température reste basse avec la charge permanente. Après la variation brusque à la charge maximale, elle augmente tout d'abord rapidement en raison de la faible capacité thermique de l'air ambiant. L'air des galeries souterraines se met ensuite en mouvement et le réchauffement se poursuit lentement en raison de la dissipation de chaleur dans la montagne par l'intermédiaire de la grande surface des galeries. Dans la galerie souterraine de 2,2 m, le câble conducteur atteint la limite de 90 °C au bout de 1500 h, soit 2 mois. Dans la galerie de 4 m, l'élévation de température se stabilise à 77 °C au bout d'environ 2000 h. La **figure 2** montre que l'équilibre thermique n'est atteint qu'au bout de plusieurs semaines ou mois, selon la conception de la ligne de câbles, en raison de la capacité de stockage des masses environnantes.

Transposé à la pratique de l'exploitation du réseau, le profil de charge schématique peut être interprété de la manière suivante: la charge permanente est la valeur efficace du courant pendant une période d'un mois avec une charge élevée. La charge maximale est la valeur la plus élevée dans le cas d'un événement N-1. Cette dernière doit pouvoir être supportée pendant au moins 8 h, jusqu'à la fin d'une intervention.

Procédé de construction

Les techniques classiques de construction de lignes câblées sont le creusement de tranchées pour construire des batteries de tubes et des conduites, ainsi que le dynamitage ou le fraisage pour creuser des galeries ou des tunnels accessibles. Différentes techniques de creusement mécanique, dont certaines sont novatrices, permettent de construire des tubes ou des petites galeries souterraines:

Horizontal Directional Drilling, HDD: ce procédé se base sur la technique du forage dirigé, appliquée pour les forages en profondeur. Un forage vers la fouille d'arrivée est réalisé à partir d'une fouille de départ. Dans la fouille cible, un manchon-aléseur est relié à la tige de forage pour élargir le forage pilote, puis retiré. Le tube de protection est enfin placé à l'intérieur. Cette technique est adaptée pour passer sous les rivières, les routes ou les conduites. Elle ne peut toutefois être utilisée que dans des sols stables ou des roches tendres. Les tronçons peuvent atteindre 2 km.

E-Powerpipe (Herrenknecht): un tunnelier miniaturisé télécommandé constitue le cœur de ce procédé novateur. Il est installé devant des tubes en acier. Ces tuyaux ont une longueur unitaire de 9 m, peuvent être raccordés et contiennent les systèmes d'alimentation et d'évacuation de la machine. Le processus de creusement commence dans un puits de départ. À partir de celui-ci, les tubes de fonçage

Figures: Herrenknecht | Swissgrid

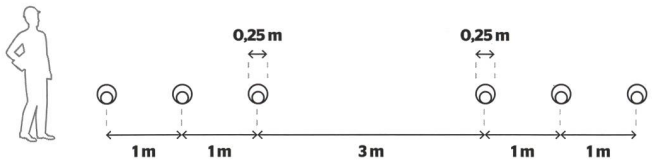
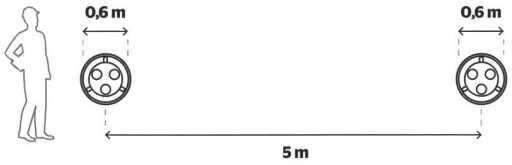
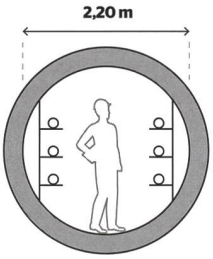
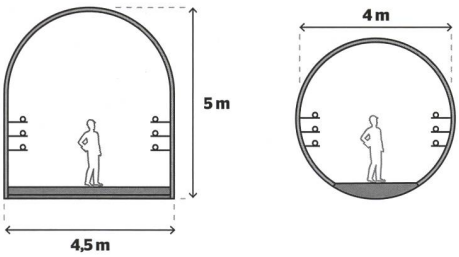
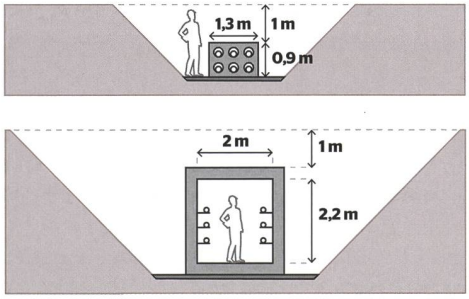
Réalisation / symbole	Méthode de construction	Dimensions
Tubes pour phase 	E-Power Pipe	6 tubes 250 mm Tronçons 1500m
Tube pour faisceau 	HDD	2 tubes 600 mm Tronçons 2000 m
	E-Power Pipe	2 tubes 600 mm Tronçons 1500 m
	Microtunnelage	2 tubes 1200 mm Tronçons 1000 m
Microgalerie accessible 	Microtunnelage	Tube 2200 mm Tronçons 1500 m
Tunnel 	Dynamitage	Largeur 4,5 m, hauteur 5,5 m Tronçons 5000 m
	Tunnelier	Diamètre 4,0 m Tronçons 10 000 m
Creusement de tranchées 	Batterie de tubes	6 tubes de 250 mm Tronçons de longueur illimitée
	Canal pour conduites	Largeur 2 m, hauteur 2,2 m Tronçons de longueur illimitée

Tableau 1 Aperçu des différents types de réalisation des lignes câblées souterraines.

sont poussés vers le puits cible à l'aide d'un dispositif d'avancement, tandis que la machine de forage se charge de l'excavation. Au cours de ce processus, les tubes de fonçage sont ajoutés les uns après les autres. Le tunnelier est retiré après le percement du puits cible. Le tube définitif est fixé à sa place lorsque la machine de forage est retirée. Ce procédé convient à tous les types de roches meubles, même dans la nappe phréatique. Le diamètre maximal du tube est de 700 mm, la profondeur d'environ 2 m et la longueur des tronçons peut atteindre 1,5 km.

Microtunnelage (figure 3): le fonçage de tubes est une méthode qui a fait ses preuves en conjonction avec un tunnelier télécommandé placé à l'avant des éléments de tubes en béton armé. Une presse pousse les tubes du puits de départ au puits d'arrivée. De nouveaux tubes de fonçage sont placés et poussés en permanence dans le puits de départ. Le percement et la pose du revêtement final de la galerie souterraine sont ainsi réalisés en une seule étape. Ce procédé peut être utilisé dans tous les terrains et convient aussi bien à la construction de petites conduites non accessibles qu'aux grandes galeries souterraines d'un diamètre maximum d'environ 4 m. La longueur des tronçons est de 0,5 km pour les petites conduites et de 1,5 km pour les plus grandes. La profondeur est d'environ 10 m.

De nouveaux procédés mécaniques, comme le Direct Pipe et la trancheuse (tous deux de Herrenknecht), permettent de construire de longues lignes câblées. Par ailleurs, il existe différentes techniques pour de courts passages souterrains (voies, routes, rivières). Ils ne seront pas abordés ici.

Types de réalisation des lignes câblées

Les types de réalisation de lignes câblées optimisées en termes de coûts ont été développés à partir des procédés de construction. Les principales caractéristiques de la réalisation sont le diamètre ainsi que le tirage et la disposition des câbles. Les propriétés en matière de dissipation de la chaleur, de charge admissible et d'intensité du champ magnétique ont notamment été étudiées. Le **tableau 1** fournit une vue d'ensemble des types de réalisation.

Conduction de la chaleur / W/m·K	Roche dure: Béton: Roche meuble humide: Roche meuble sèche:	2,0 1,5 1,0 0,5
Capacité thermique / J/kg·K	Roche dure: Roche meuble humide: Roche meuble sèche:	1000 1800 850
Température du sous-sol / °C	10 à 20	
Température extérieure / °C	-5 à 25	
Pente des tubes ou des galeries souterraines / %	1 à 3	

Tableau 2 Valeurs des paramètres pour les calculs thermiques.

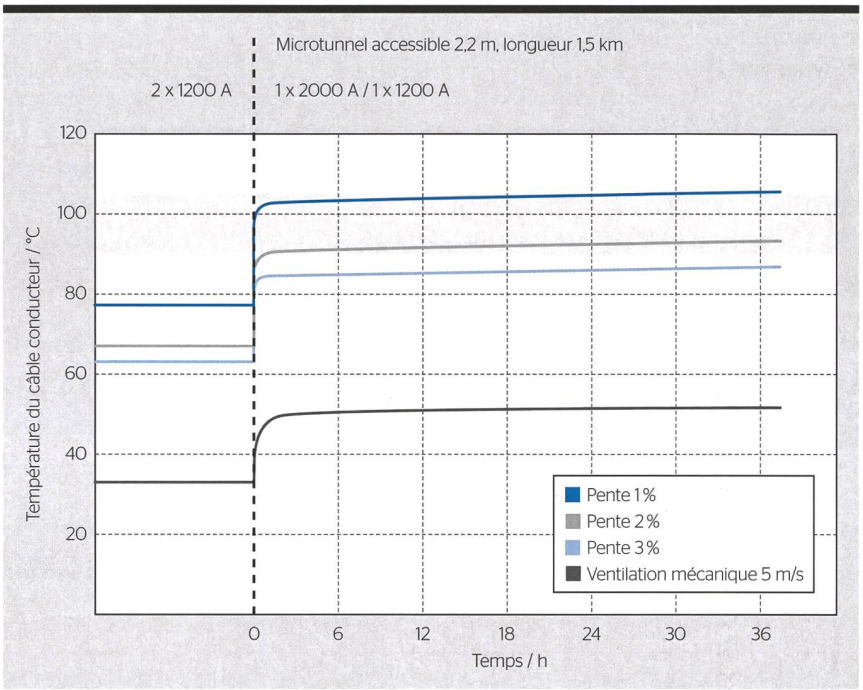


Figure 4 Température du conducteur d'une ligne câblée à 2 faisceaux dans un microtunnel avec différentes puissances de ventilation. Variation brusque de la charge permanente de 1200 A à 2000 A. La figure montre l'influence importante de l'intensité du flux d'air sur la dissipation de chaleur, c'est-à-dire sur la charge admissible de la ligne câblée.

La ligne câblée est constituée d'une série de tronçons dans le cas de techniques comprenant une distance limitée entre le puits de départ et le puits d'arrivée.

La géologie représente un aspect essentiel lors du choix de la réalisation. Certains procédés de tunnelage peuvent être utilisés de manière universelle (le microtunnelage, par exemple), tandis que d'autres ne sont adaptés qu'à certaines situations géologiques **(tableau 3)**. Les conditions topographiques et les obstacles en surface sont également importants.

Des précautions lors de la construction ne sont nécessaires que pour placer les manchons des câbles dans le cas des batteries de tubes. Pour les variantes avec galeries accessibles, les manchons sont montés directement à la paroi latérale, et pour celles avec des tubes plus petits, les puits de départ et d'arrivée indispensables à la construction sont utilisés pour placer les manchons. Les distances entre les puits correspondent aux longueurs disponibles pour les câbles; elles sont comprises entre 1,5 et 2 km.

Dans la mesure du possible, les câbles sont à l'air libre, c'est-à-dire sans tubes de protection, afin de garantir une bonne dissipation de la chaleur. Dans les galeries, les tunnels ou les canalisations accessibles, les câbles sont disposés à plat, avec un espacement de 40 cm entre leurs axes longitudinaux. Dans le cas des tubes pour faisceaux, ils sont placés en triangle sur des brides avec un espacement d'environ 25 cm entre leurs axes longitudinaux. Les brides sont équipées de rouleaux pour pouvoir y tirer les câbles.

Figures: Herrenknecht | Swissgrid

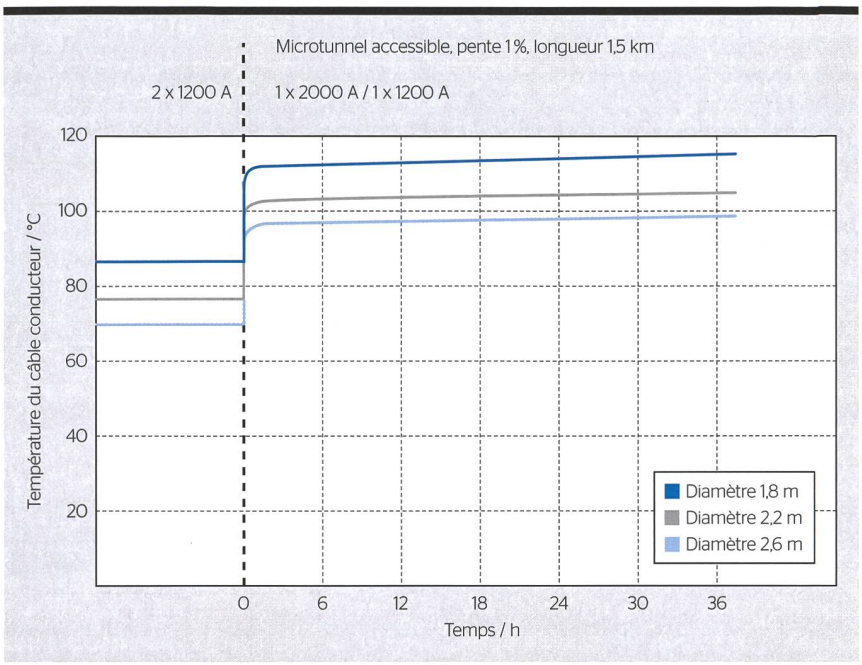


Figure 5 Température du conducteur d'une ligne câblée à 2 faisceaux dans un microtunnel de différents diamètres avec une pente de 1 %. Variation brusque de la charge permanente de 1200 A à 2000 A. La figure montre que la dissipation de la chaleur est meilleure pour les galeries souterraines de grande surface. Voir la figure 4 pour l'influence de la pente.

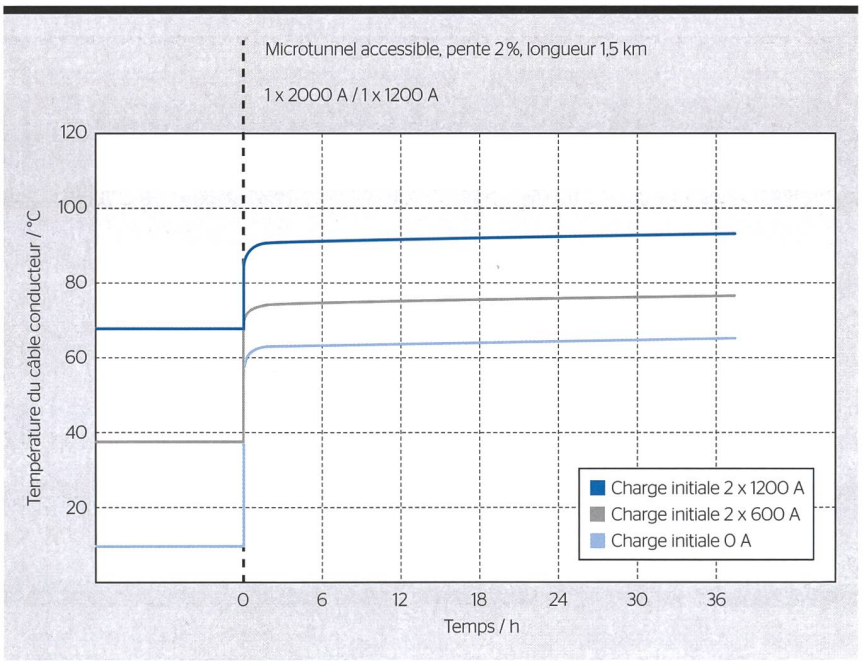


Figure 6 Température du câble conducteur lors du passage à la charge maximale en fonction de différentes charges initiales : aucune, 600 A, 1200 A. Une charge initiale élevée remplit les réserves de stockage de chaleur des masses environnantes, de sorte que la chaleur supplémentaire due à la variation brusque de charge doit être davantage dissipée axialement.

Afin d'éviter les pertes supplémentaires dues aux courants induits dans les blindages, ces derniers sont connectés selon le principe de la liaison croisée. Une mise à terre d'un côté et des conducteurs de terre parallèles sont également possibles pour les lignes plus courtes.

L'espacement entre les câbles permet de réduire les pertes dues aux courants de Foucault induits par les fils voisins dans les blindages. Si les blindages se touchent, ces pertes peuvent représenter jusqu'à 50 % des pertes de transport dans le câble conducteur.

La dissipation de chaleur, et donc la charge admissible, représente la principale caractéristique technique de chaque type de réalisation. Elle est très différente en fonction de ce dernier. Le paragraphe suivant aborde cet aspect.

Dissipation de la chaleur

Les calculs thermiques pour lignes câblées sont effectués avec les formules de la CEI en général. Leur application aux câbles se trouvant dans des conduites ou des galeries souterraines ventilées ne couvre toutefois que les charges stationnaires. L'étude s'est par contre concentrée sur l'observation pratique du comportement dynamique d'une installation câblée. Un modèle de calcul spécifique basé sur Matlab/Thermo a été créé à cette fin. Dans la mesure du possible, cet outil a été comparé aux approches de la CEI.

Les valeurs des paramètres importants pour le calcul sont résumées dans le **tableau 2.** La plage de valeurs indiquée couvre les conditions ambiantes typiques de la Suisse.

Dans le cas des variantes avec de petits tubes sans ventilation, à savoir de la batterie de tubes et des tubes de phase, la dissipation de la chaleur est uniquement radiale : la chaleur est dissipée dans le ballast par l'intermédiaire de l'air se trouvant dans le tube, puis dans le sous-sol et enfin dans la surface.

Pour les variantes avec ventilation, la chaleur est dissipée dans deux directions : une partie est dissipée longitudinalement sur la surface au moyen du flux d'air, et l'autre de manière radiale dans la paroi de la galerie souterraine par convection. Le transport radial de la chaleur est renforcé par le flux d'air axial, car celui-ci intensifie les turbulences de l'air. La

Figures : Swissgrid

dissipation radiale de la chaleur est d'autant plus prédominante que le diamètre et la longueur de la galerie souterraine sont grands.

Le flux d'air axial peut être provoqué naturellement par le tirage thermique ou mécaniquement par des ventilateurs. Les explications suivantes montrent que le flux d'air a une grande influence sur la dissipation de la chaleur, et donc sur la charge admissible d'une ligne câblée.

La **figure 4** montre l'évolution de la température du câble conducteur (en cuivre, section de 2500 mm²) pour différents flux d'air lors du passage de la charge permanente à la charge maximale sur l'exemple de la galerie accessible de 2,2 m de diamètre. Elle est longue de 1,5 km, soit la longueur maximale d'un tronçon. La température indiquée pour le câble conducteur se réfère à l'extrémité de la section de ventilation où la température est la plus élevée. Le flux d'air est provoqué par les différences de pente ou par une ventilation mécanique (5 m/s). Avec une pente de 2 %, le courant d'air naturel se déplace à une vitesse d'environ 1 m/s. Cette pente garantit un courant d'air fiable en pratique.

Avec une pente de 2 %, il est presque possible de supporter la charge élevée dans la galerie souterraine de la **figure 4**. Si la pente de la galerie est limitée par la topographie, il est possible d'augmenter la différence de hauteur à l'aide d'un conduit de cheminée placé à la sortie d'air. La ventilation mécanique permet d'augmenter considérablement la charge admissible. Cette ventilation peut être mise en marche en fonction des besoins ou en continu (selon la **figure 4**).

Le diamètre de la galerie souterraine exerce une influence importante sur la dissipation de la chaleur. C'est ce que montre la **figure 5** à partir d'une variation relativement faible du diamètre, de 1,8 à 2,6 m. Il s'agit de la galerie de la **figure 4**, mais avec une pente de 1 % seulement. La meilleure dissipation de la chaleur pour les grands diamètres s'explique par le fait que la surface plus importante de la galerie souterraine procure une masse de stockage environnante supérieure.

La charge permanente moyenne détermine les températures initiales en régime permanent du câble et de

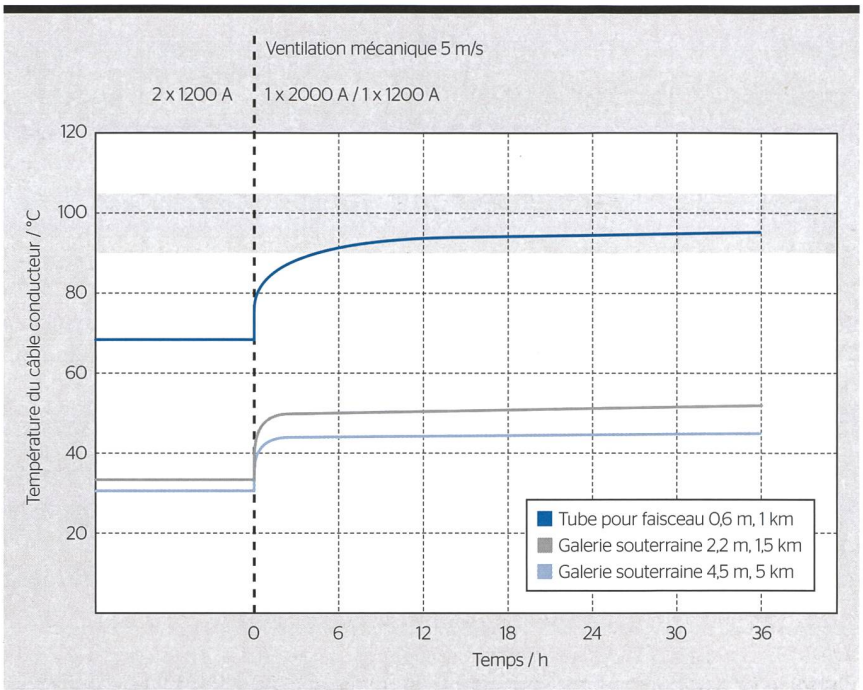


Figure 7 Température du conducteur d'une ligne câblée pour différents types de réalisation lors du passage à la charge maximale avec une ventilation mécanique de 5 m/s. Cette figure illustre la meilleure efficacité de la ventilation pour les tubes ou les galeries de grand diamètre. Dans les grandes galeries, la chaleur se dissipe principalement de manière radiale grâce à la grande surface.

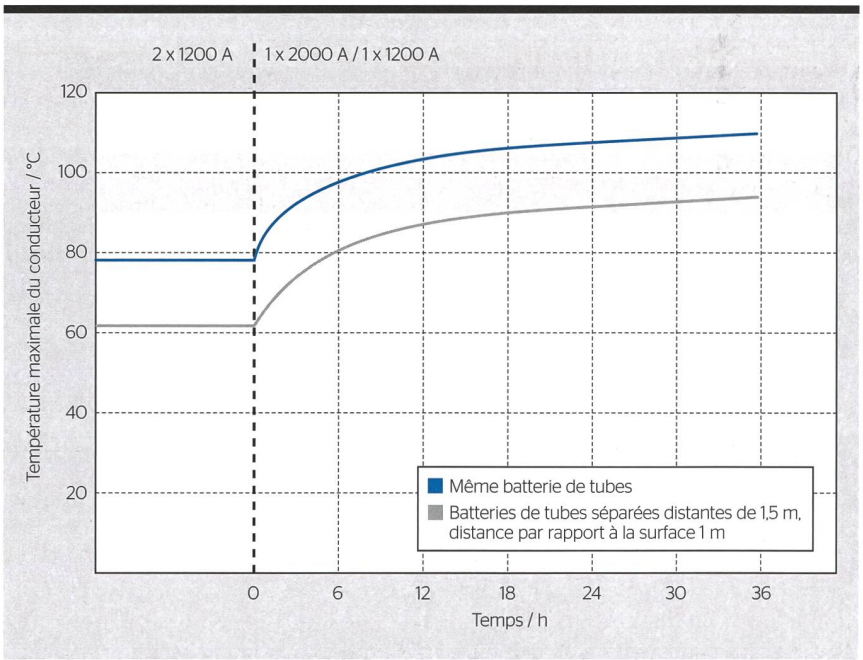


Figure 8 Température du câble conducteur lors de la variation brusque de charge d'une ligne à 2 faisceaux se trouvant dans une même batterie de tubes ou dans des batteries de tubes séparées. La séparation des deux faisceaux améliore la dissipation de la chaleur.

Figures: Swissgrid

Variante de réalisation	Géologie					
	Roche meuble Couche supérieure	Roche meuble Gravier Éboulis	Roche meuble Moraine	Roche tendre Molasse Grès	Roche dure Granit, Basalte Calcaire	**Note relative à la charge admissible 1 à 5**
Ligne câblée, construction souterraine						
6 tubes pour phase, E-Powerpipe, 250 mm	6,6	6,8	7,0			**3**
2 tubes pour faisceaux, E-Powerpipe, 600 mm	5,9	5,9	6,0			**1**
2 tubes pour faisceaux, HDD, 600 mm			5,7	6,7		**1**
2 tubes pour faisceaux, microtunnel, 1200 mm	10,5	10,6	11,1	13,4	14,7	**2**
2 tubes pour faisceaux, Direct Pipe, 1000 mm	7,4	7,7	8,4	10,7		**2**
Microtunnel accessible, 2200 mm	10,6	10,7	11,1	12,7	13,6	**4**
Galerie dynamitée					10,5	**5**
Galerie fraisée, tunnelier à grippeurs					11,2	**5**
Galerie fraisée, tunnelier à bouclier simple				15,5		**5**
Galerie fraisée, tunnelier à blindage de front		26,1	26,1			**5**
Creusement de tranchées pour lignes câblées						
Trancheuse, Pipe Express, 900 mm	6,4	6,4	6,4			**2**
Batteries de tubes	5,4	5,4	5,4	6,2		**2**
Canal pour conduites	10,2	10,2	10,2	13,2		**4**

Tableau 3 Aperçu des coûts, de l'adéquation aux différentes situations géologiques et de la charge admissible des différents types de réalisation, dans le cas de 2 faisceaux, en cuivre, avec une section de 2500 mm². Coûts indiqués en mio. CHF/km. La note relative à la charge admissible est une valeur sans unité attribuée à des fins de comparaison.

l'environnement avant la variation brusque de charge. La charge admissible maximale est d'autant plus élevée que la charge permanente précédente est faible. La **figure 6** montre ce rapport sur l'exemple du microtunnel accessible pour trois charges initiales.

La ventilation mécanique permet d'augmenter considérablement la dissipation de la chaleur, et ce d'autant plus que la section de la galerie souterraine est grande. La **figure 7** montre l'évolution de la température pendant la variation brusque de charge dans des tubes ou des galeries souterraines de différents diamètres avec un courant d'air de 5 m/s. Pour le plus grand diamètre, de 4,5 m, la ventilation a pour effet que la charge admissible des câbles est pratiquement la même qu'à l'air libre (pour un câble en cuivre d'une section de 2500 mm²: env. 2800 A en permanence). L'efficacité de la dissipation de la chaleur est principalement due à la surface de la galerie, c'est-à-dire à la masse de stockage disponible. La température du câble conducteur n'augmente que légèrement lorsque la section de ventilation est allongée, car la dissipation de la chaleur dans la galerie souterraine de grand diamètre est principalement radiale.

La chaleur du câble doit se dissiper radialement dans les batteries de tubes où la circulation d'air n'est pas possible. Elle pénètre d'abord dans le réservoir que représente le matériau environnant. Elle est ensuite conduite dans l'air ambiant par l'intermédiaire du sol. La **figure 8** montre l'évolution de la température du câble conducteur lors de la variation brusque de charge lorsque les six câbles se trouvent dans la même batterie de tubes ou dans deux batteries éloignées de 1,5 m. L'espacement des deux systèmes augmente la charge admissible: dans une même batterie, la température de 90 °C est atteinte au bout de 3 h, alors qu'elle ne l'est qu'au bout de 20 h dans des batteries séparées.

Le matériau recouvrant la batterie de tubes ou la profondeur ont peu d'influence sur la charge admissible avec une charge transitoire: les calculs effectués en fonction de la profondeur montrent qu'un rayon d'un mètre seulement de l'environnement se réchauffe pendant la première semaine. La profondeur d'installation influence par conséquent la charge admissible uniquement en termes de charge permanente une fois que tous les réservoirs des masses environnantes ont été remplis. Dans le cas des galeries souterraines, les masses de stockage sont si importantes que les événements thermiques n'influencent pas la surface.

Calcul des coûts

Le calcul des coûts de construction des différentes variantes de réalisation a été effectué selon une approche ascendante en fonction des coûts des machines, du personnel nécessaire, des installations, des prestations de percement, ainsi que des prix unitaires des fouilles préliminaires et des agrandissements pour les puits.

Les aspects géologiques exercent une influence considérable sur les coûts de construction (vitesse de percement, agrandissements). Certains procédés de construction ne sont possibles que dans des conditions précises. Cinq types géologiques ont été définis **(tableau 3)** pour tenir compte de ces influences.

Ces informations concernent les variantes de réalisation avec deux faisceaux et des câbles conducteurs en cuivre d'une section de 2500 mm². Les prix des câbles se basent sur des projets réalisés et sur des devis indicatifs. Le **tableau 3** résume ces coûts.

Un outil de planification des projets de lignes a finalement été développé à partir des résultats de l'étude. Cet outil, le « kit de construction de lignes », comporte un catalogue de différents types de réalisation, dans lequel leur adéquation et leurs caractéristiques sont décrites, ainsi qu'un outil Excel pour le calcul des coûts. Il couvre tous les aspects de la construction de lignes et tient compte des lignes aériennes, des stations aéro-souterraines, des passages souterrains courts lors de la réalisation des tranchées et de la compensation de la puissance réactive. Il devrait faire l'objet d'un prochain article.

Conclusion

Différents procédés de construction des lignes câblées souterraines sont disponibles à l'heure actuelle. Les innovations concernent les procédés souterrains, comme la pose de tubes et le percement de petites galeries souterraines sur de longs tronçons à l'aide de

tunneliers ou de fraises télécommandés. Différents procédés peuvent être envisagés en fonction du sol et de la topographie.

La vue d'ensemble des coûts du **tableau 3** montre que la batterie de tubes représente un type de réalisation économique, comme prévu. D'autres variantes peuvent toutefois être préférées en fonction de la difficulté que présente la réalisation du tracé et les exigences en matière de charge admissible: lorsque le creusement des tranchées est difficile et engendre des portées supplémentaires ou des impacts environnementaux, les avantages de la construction souterraine entrent en jeu. En revanche, si une charge admissible élevée est requise, les galeries souterraines de grand diamètre et avec une bonne dissipation de la chaleur sont préférables, car elles permettent d'éviter les doubles câbles et procurent une grande marge de manœuvre pour augmenter la charge admissible grâce à la possibilité de la ventilation mécanique. En Suisse, en raison de la topographie accidentée et de la proximité de la surface rocheuse, les galeries ouvertes par dynamitage représentent souvent une option intéressante avec une charge admissible élevée.

Les lignes câblées souterraines possèdent une inertie thermique grâce aux masses environnantes. Celle-ci leur permet de bien tolérer les charges maximales temporaires. Des températures stables ne s'établissent qu'au bout de plusieurs semaines ou mois en fonction de la réalisation et de la ventilation. Contrairement au cas d'une ligne aérienne, pour une ligne câblée, il faut donc tenir compte de la charge au cours du temps afin d'éviter tout surdimensionnement.

Auteurs
Dr **Sandro Dinser** est responsable Requirement & Quality Lines chez Swissgrid.
→ Swissgrid SA, 5000 Aarau
→ sandro.dinser@swissgrid.ch

Dr **Gianni Biasiutti** est consultant indépendant.
→ Biasiutti Consulting GmbH, 6005 Lucerne
→ bia@cmc-solution.ch

Die deutsche Version dieses Beitrags ist im Bulletin 9/2021 erschienen.