

Le tunnel de base du Mont-Cenis : interface génie civil /équipements, le cas particulier du passage de câbles HT dans le tunnel

The Mont-Cenis base tunnel: civil works / equipment interface, the particular case of passing HV cables through the tunnel

Paolo POTI, *TELT SAS, Turin, Italie*

Stefano LIONE, *TELT SAS, Turin, Italie*

Lorenzo BRINO, *TELT SAS, Turin Italie*

Résumé

Après avoir analysé les points critiques des interfaces entre les travaux de génie civil et les équipements dans les ouvrages souterrains du tunnel de base du Mont-Cenis, l'article présente le choix de contractualiser certaines parties d'ouvrages dans le lot unique « équipements », alors qu'elles sont intégrées habituellement aux lots d'ouvrages de génie civil.

C'est dans cette hypothèse de construction que vient s'insérer le cas particulier de la réalisation d'une canalisation de câbles de 132 kV pour raccorder la Sous-station électrique (SSE)/le Poste d'alimentation (PdA) de Suse au réseau électrique national italien, dont voici les fonctionnalités et les ouvrages connexes.

Le réseau d'alimentation se développera essentiellement au niveau ferroviaire, aussi bien en souterrain qu'à l'air libre, sur une longueur totale de 7,8 km.

Le choix novateur d'utiliser les deux tubes ferroviaires pour raccorder les deux ternes de câbles présente des avantages majeurs pour le territoire. Il permet en effet de réduire les impacts socio-environnementaux de la canalisation de câbles elle-même, qui à l'origine devait être entièrement « en surface » sur les voies d'accès de la ville de Suse.

Abstract

After having analysed the critical points in the interface between the civil engineering works and the systems in the Mont Cenis Base Tunnel underground works, this article presents the choice of contracting certain parts of the work in the single "systems" lot even though they are usually integrated into the civil engineering lots.

In this context we have the case of the laying of the 132 kV cables in the ducts to connect the Electrical Substation/the Susa Grid Supply Point to the Italian national electricity supply network, the technical characteristics of which are outlined below, along with the associated works. The power supply network will essentially be developed along the railway both underground and in the open air for a total length of 7.8 km.

The innovative choice to use the two railway tubes to connect the two three-phase transmission wire bundles has significant advantages for the local area. In fact, this reduces the socio-environmental impact of the cable ducts which were originally intended to be entirely "on the surface" of the access roads of the town of Susa.

Le tunnel de base du Mont-Cenis : interface génie civil /équipements, le cas particulier du passage de câbles HT dans le tunnel

The Mont-Cenis base tunnel: civil works / equipment interface, the particular case of passing HV cables through the tunnel

Paolo POTI, *TELT SAS, Turin, Italie*

Stefano LIONE, *TELT SAS, Turin, Italie*

Lorenzo BRINO, *TELT SAS, Turin Italie*

1 Introduction

La section transfrontalière de la Nouvelle Ligne ferroviaire Lyon-Turin est composée: d'une zone à l'air libre à St-Jean-de-Maurienne en France (3,7 km), qui comprend la nouvelle gare internationale voyageurs de St-Jean-de-Maurienne, l'aire de sécurité et l'interconnexion avec la ligne historique française; du tunnel de base du Montcenis (57,5 km); d'une zone à l'air libre dans la plaine de Suse en Italie (2,7 km), qui comprend la nouvelle gare internationale voyageurs et une aire de sécurité; du tunnel d'interconnexion (2,1 km) vers le faisceau de voies existant de Bussoleno ; d'une zone à l'air libre d'interconnexion avec la ligne historique à Bussoleno (0,9 km). La longueur totale de la section transfrontalière est de 66,9 km et elle comprend les installations suivantes en terme de sécurité pour les usagers: 2 sites de sécurité extérieures (Saint-Jean-de-Maurienne et Suse) et un point de lutte contre l'incendie extérieur (Bussoleno); 3 sites de sécurité souterraines (La Praz, Modane et Clarea, accessibles de l'extérieur par des descenderies) ; 1 descenderie supplémentaire pour l'accès des secours à Saint Martin la Porte. Les tunnels (de base et d'interconnexion) sont composés de deux tubes à voie unique reliés par des connexions réalisées tous les 333m (distance réduite à 50m dans les aires de sécurité souterraines du tunnel de base). Le profil transversal de la section d'un tube est composé d'un trottoir de service et d'évacuation (largeur d'au moins 1,20m du côté du deuxième tube), d'une voie de circulation ferroviaire et d'un trottoir de maintenance sur le côté externe (voir Figure 1).

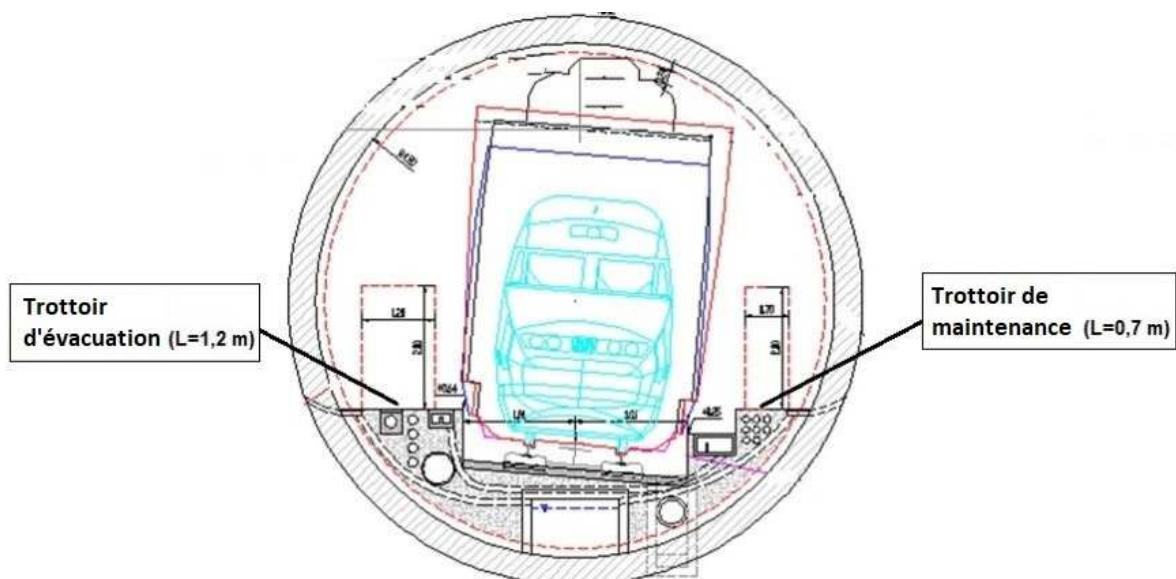


Figure 1: Section transversale du tunnel (typologique)

La Nouvelle Ligne Lyon- Turin sera une ligne qui assurera un trafic mixte passagers et fret, conçue pour une vitesse maximale de 250 km/h. Les catégories suivantes de trains pourront y circuler :

- Trains de passagers à grande vitesse (GV) : vitesse maximum d'exploitation 220 km/h sur le tronçon Saint-Jean-de-Maurienne–Suse ;
- Trains d'Autoroute Ferroviaire au grand gabarit (AFGG) et Trains d'Autoroute Ferroviaires Modalohr (AFM) : vitesse maximum d'exploitation 120 km/h.
- Trains conventionnels de marchandises (M), la longueur maximum pour chaque rame est de 750m. Vitesse maximum d'exploitation : 100 ou 120 km/h selon la catégorie.

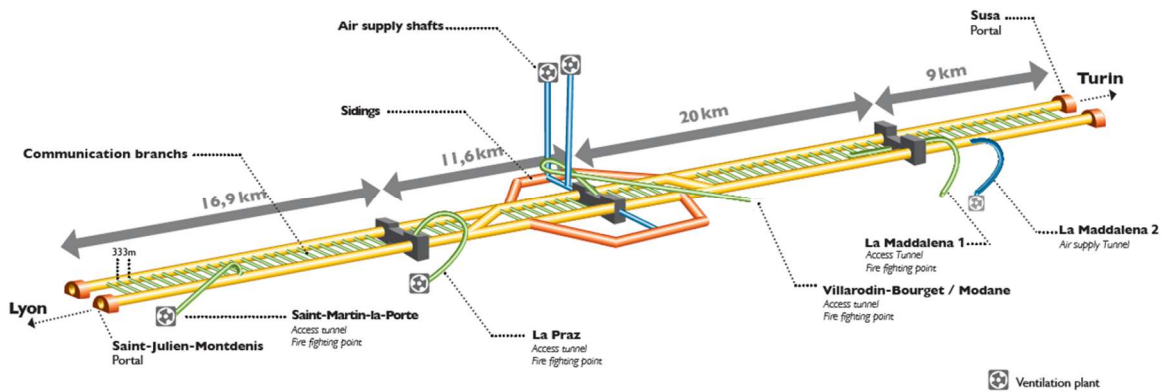


Figure 2 – Schéma du Tunnel de Base de 57,5 km et des principaux ouvrages rattachés

2 Finitions des ouvrages de génie civil du tunnel de base et hypothèses de subdivision de la réalisation entre ouvrages de génie civil et équipements

Avant d'entrer au cœur de l'article en analysant en détail le cas particulier de la ligne électrique, ce paragraphe illustre de manière générale le sujet complexe des interfaces entre les ouvrages de génie civil et les équipements, tel qu'il est développé dans le projet.

Les besoins logistiques et fonctionnels, la nécessité de réduire les aléas dans le calendrier et les séquences de construction, le maintien du plus grand dégagement possible pour l'approvisionnement des équipements (par exemple dans les descenderies), ont rendu opportune la vérification de la faisabilité opérationnelle du transfert de certaines finitions des chantiers opérationnels de génie civil au chantier opérationnel unique des équipements. Cette vérification a entraîné la possibilité concrète de limiter le plus possible les interfaces opérationnelles délicates et les livraisons d'ouvrages partielles entre différents lots, afin de réduire les risques de litiges.

Dans le cadre du projet des ouvrages en souterrain, nous avons qualifié généralement de finitions les parties de la section qui ne présentent pas de caractéristiques structurales, telles que le radier et les trottoirs de la section du tunnel de base (TdB).

Les figures ci-dessous (3 et 4) illustrent, pour les sections fonctionnelles du TdB, la subdivision adoptée en phase de projet entre parties structurales et finitions (en rouge).

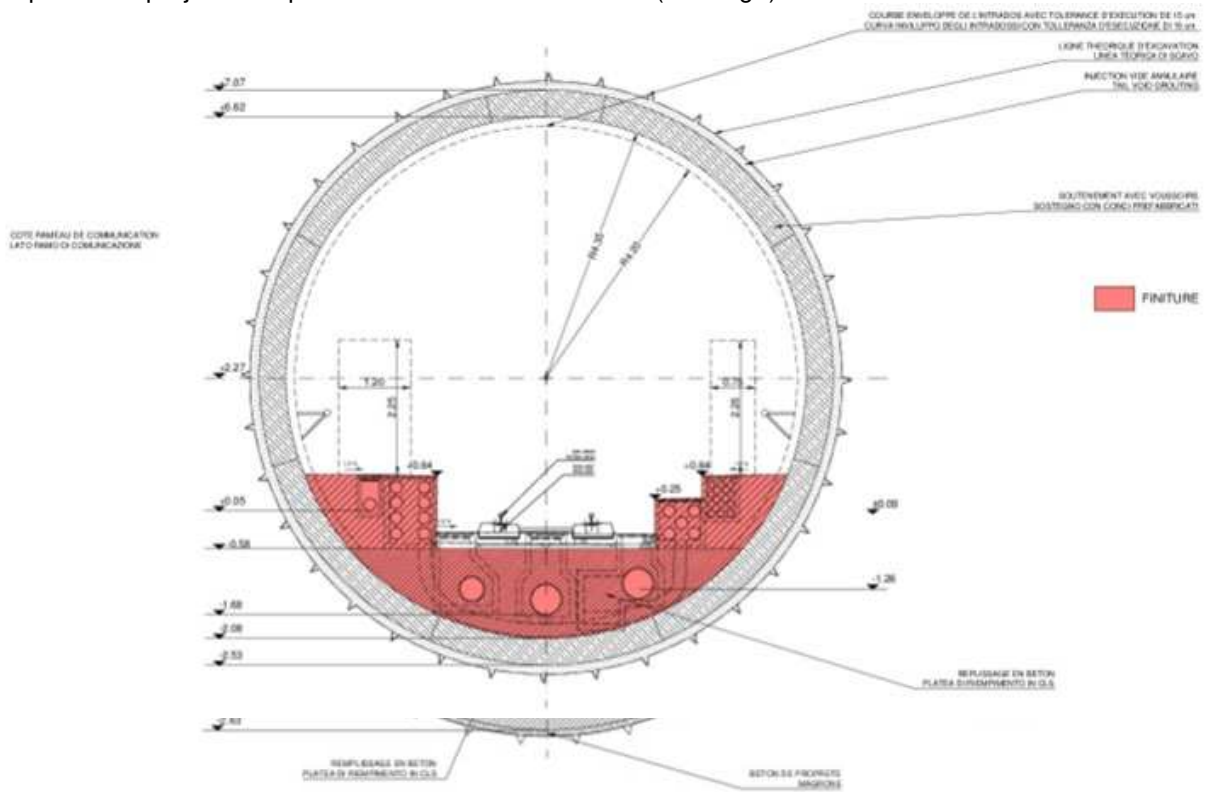


Figure 3 – Tunnel de Base : section type descriptive de l’excavation par tunnelier à bouclier, sans drainage

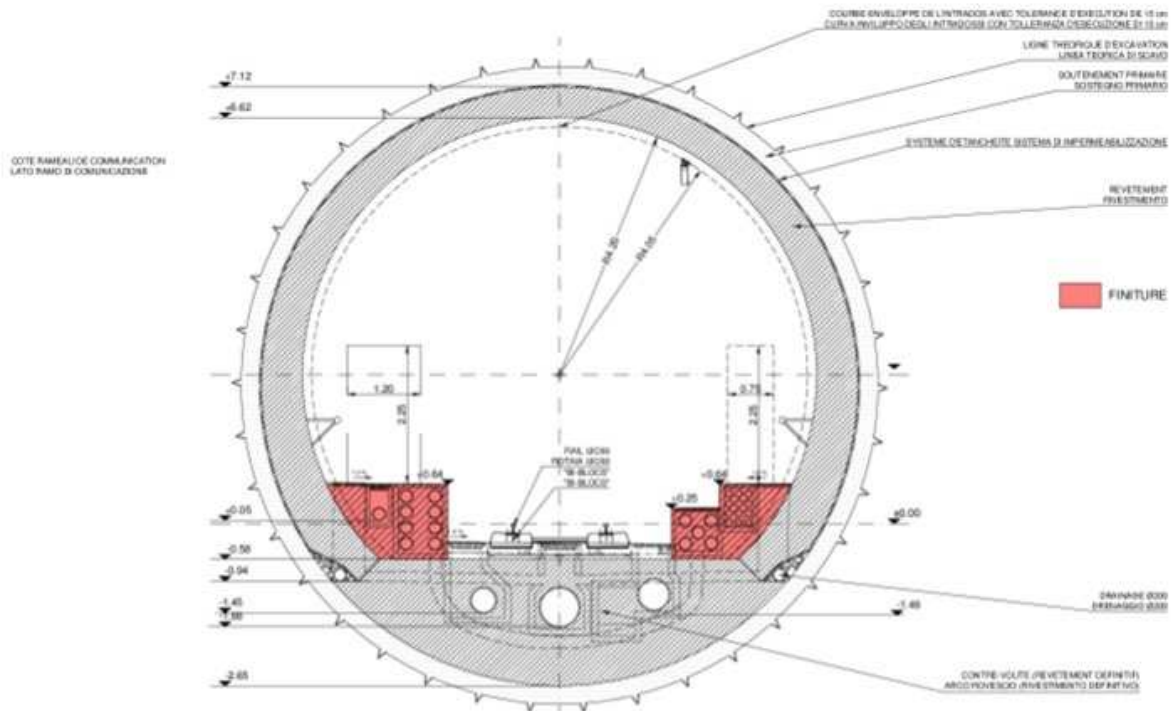


Figure 4 – Tunnel de Base : section type descriptive de l’excavation par tunnelier ouvert

Comme on peut l'observer sur la Figure 4, dans le cas d'une section d'excavation par tunnelier ouvert, il n'y a pas de coulage séparé entre l'arc inversé et le radier ; le coulage du radier est concomitant à celui de l'arc, et dans ce cas les finitions sont exclusivement constituées par les trottoirs.

Sur la base de ces définitions, une analyse détaillée des parties d'ouvrage et/ou d'aménagements présentes dans le radier et dans les trottoirs a été effectuée, ainsi que leurs conséquences sur la faisabilité opérationnelle du transfert entre lot de génie civil et lot d'équipements.

Pour les descenderies, nous avons examiné la possibilité de réaliser les revêtements définitifs dans le cadre du chantier opérationnel équipements.

Enfin, l'étude a approfondi l'opportunité, pour chaque section des sites de sécurité en souterrain, d'étendre ce transfert entre chantiers opérationnels aux structures internes, telles que les dalles intermédiaires et les cloisons de séparation.

En résumant à l'extrême, la réalisation des trottoirs avec tous les aménagements nécessaires aux équipements normalement attribués au lot génie civil, et de certains revêtements définitifs, sera donc effectuée au cours du chantier opérationnel équipements, et donc reportée au-delà de l'achèvement des ouvrages de génie civil principaux.

Tous les aménagements liés aux canalisations de câbles et regards de trottoirs et relatifs au réseau anti-incendie, à la moyenne tension, à la signalisation et aux télécommunications, seront également fournis et posés dans le cadre du chantier opérationnel équipements.

3 Cas particulier de la liaison par câble 132 kV - le tracé

L'hypothèse de construction décrite au paragraphe 2 intègre le cas particulier de la réalisation d'une canalisation de câbles à double teneur 132 kV (câbles en aluminium de section 1 600 mm² à isolation extrudée) pour raccorder la sous-station électrique (SSE) de Suse (liée à l'exploitation ferroviaire) au réseau électrique national italien dans la station électrique (SE) de Venaus.

Le projet définitif de 2013 prévoyait un tracé des câbles 132 kV exclusivement en surface sur les voies locales pour une longueur d'environ 8,4 km, avec un impact notable sur le territoire et notamment sur l'agglomération urbaine de Suse. Suite aux prescriptions du CIPE de 2015 sur le projet définitif, il a été décidé en 2016 de modifier le tracé en développant la ligne électrique principalement au niveau ferroviaire (en tunnel et à l'air libre), pour limiter ainsi l'impact sur le territoire et exclure totalement le centre d'habitation de Suse du nouveau parcours des câbles, réduit à une longueur totale de 7,8 km (Figure 5).

Cette solution permet notamment d'éliminer plus de 6 km de travaux à ciel ouvert à fort impact dans un environnement fortement anthropique correspondant à la ville de Suse, avec pour conséquence la suppression de plus de 40 interférences de services et sous-services actuellement recensées au projet.

En outre, grâce à l'énorme réduction du coût de déviation des réseaux et en partie à la réduction de la longueur du tracé de la canalisation de câbles, en termes économiques, le coût de réalisation paramétré estimé à 1,34 M€/km en 2013, est passé à un coût total de 1,182 M€/km en 2016, soit une économie totale d'environ 2 M€ (ou 18 %).

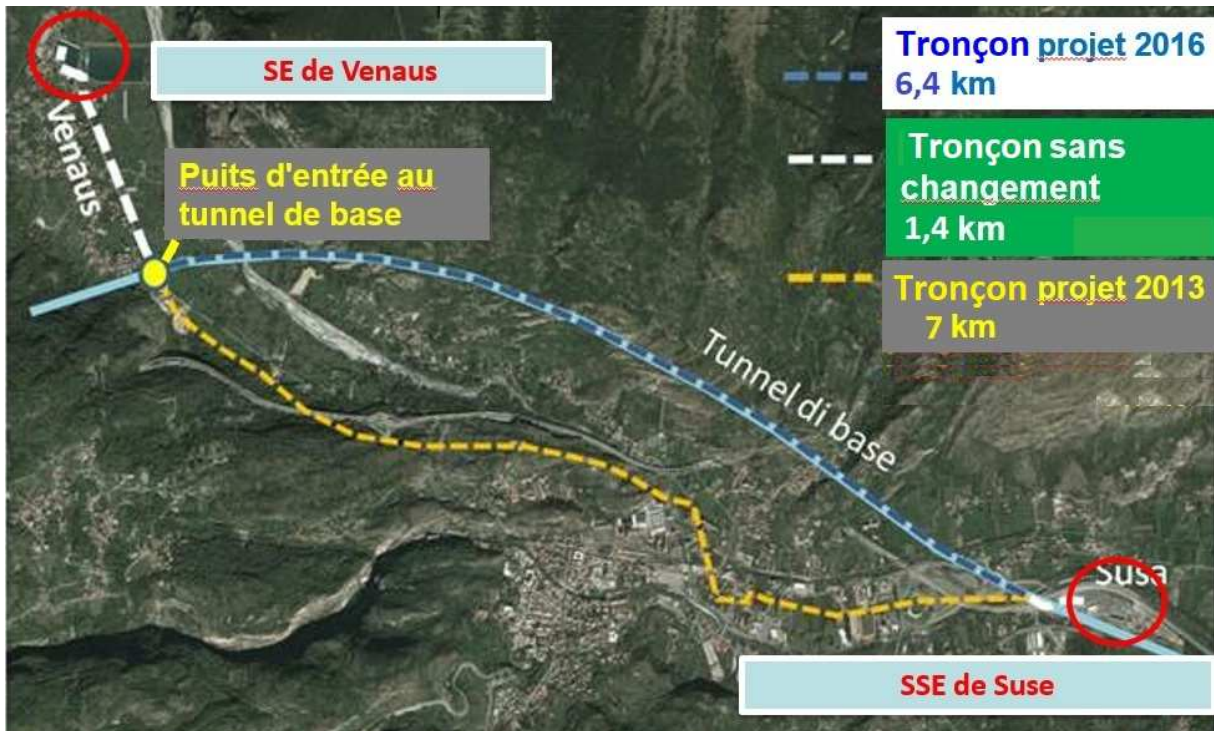


Figure 5 – Variations du tracé des câbles dans les phases du projet de 2013 et 2016

En omettant le premier tronçon en surface d'environ 1,4 km à la sortie de la SE de Venaus (trait blanc de la Figure 6), dont la pose du double terne sur la route provinciale est prévue de manière « classique » en trèfle dans une tranchée simple, au niveau de l'intersection avec le tunnel de base, deux raccords verticaux seront réalisés pour permettre aux câbles d'atteindre le tracé ferroviaire. Ces raccords seront d'un diamètre interne de 2 m et d'une profondeur de 50 m environ. Dans les puits qui seront creusés dans le cadre du contrat des ouvrages de génie civil, les câbles haute tension seront installés au moyen de fixations montées sur les parois du puits (voir Figure 6).

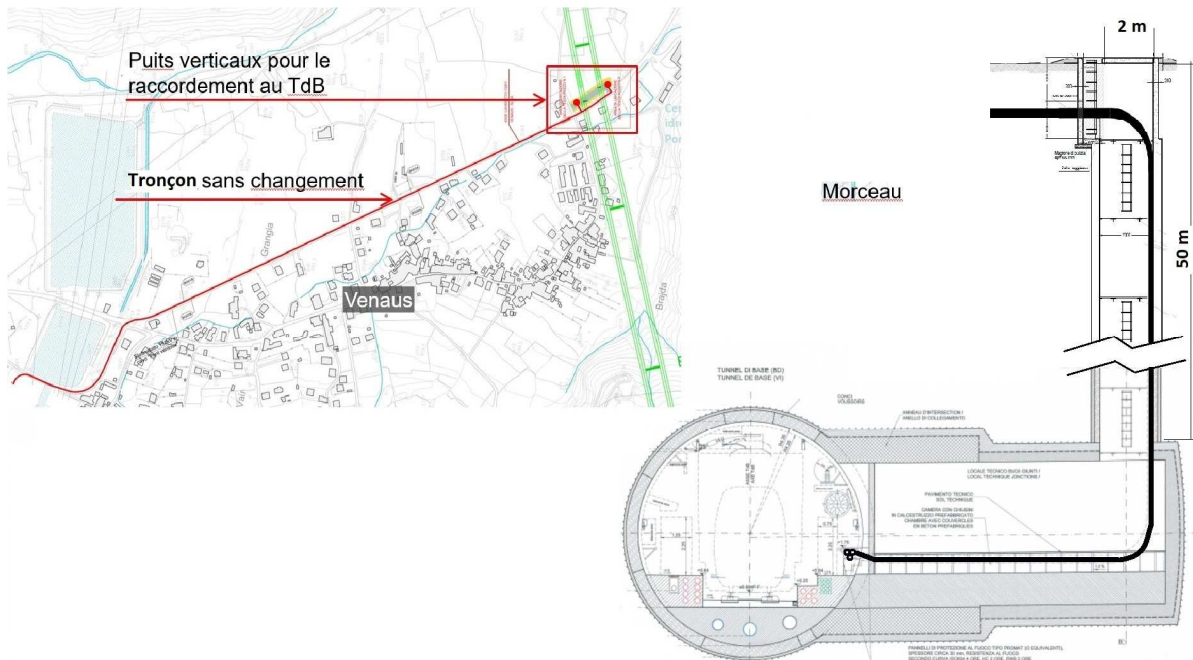


Figure 6- Secteur initial du tracé et section d'un puits de descente vers le tunnel de base

À partir de ce point et jusqu'à la sous-station électrique de Suse, le câble sera de fait entièrement posé au niveau ferroviaire. Dans la section de galerie courante (selon un développement linéaire d'environ 5 200 m), la pose est prévue à l'intérieur d'une galerie surélevée à côté du trottoir de service/maintenance (voir Figure 7).

À la sortie du tunnel de base et au niveau de la gare internationale de Suse, le câble sera placé à l'intérieur de caniveaux préfabriqués en béton armé.

Après la traversée de la rivière Dora dans un vide technique englobé dans la structure du nouveau pont ferroviaire et le passage souterrain de l'A32, la canalisation de câbles entrera dans la place de la sous-station électrique de Suse, où il achèvera son parcours après environ 7 kilomètres et 800 mètres.

4 Les câbles à l'intérieur du tunnel de base

Comme expliqué ci-dessus, il est intéressant d'approfondir le choix novateur d'utiliser les deux tubes ferroviaires pour raccorder les deux ternes de câbles, en éliminant de fait tout impact environnemental sur le territoire.

Un terne sera posé à l'intérieur du tube pair et un autre à l'intérieur du tube impair. Cette solution garantit de hauts niveaux de fiabilité et de disponibilité. Les deux ternes (l'un normalement destiné à l'alimentation de la traction ferroviaire et l'autre à l'alimentation des équipements auxiliaires), sont en effet dimensionnés pour pouvoir assurer réciproquement l'alimentation de secours. En cas de panne dans l'un des tubes (ou toute autre indisponibilité) avec demande d'interruption de l'alimentation d'un terne 132 kV, le terne de l'autre tube pourra garantir la continuité de l'alimentation. Il n'existe actuellement pas sur le marché de câbles HT à zéro émission de fumées et de gaz toxiques ; les canalisations du tunnel seront donc revêtues de panneaux en matériau ignifuge, dont la conception incombera aux spécialistes des ouvrages de génie civil.

Sur la base des analyses complémentaires réalisées dans le cadre des études de compatibilité électromagnétique (voir également le § 5), les câbles seront posés dans des coffrages en béton armé placés contre le trottoir de maintenance (sans affecter l'espace de passage de 0,7 m, voir Figure 7), contenant si nécessaire un compartiment de dimensions adaptées pour accueillir la conduite de blindage en acier (voir Figure 7).

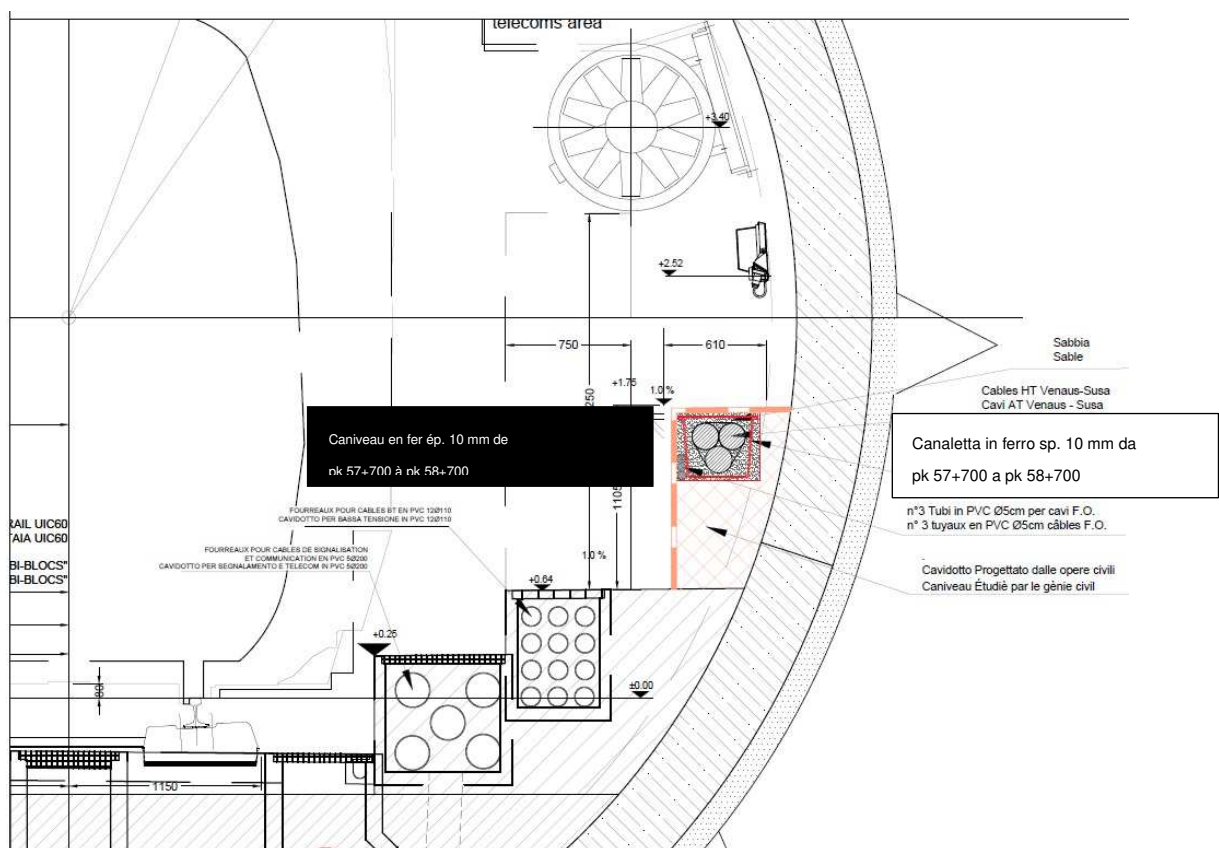


Figure 7 – Section en tunnel avec les câbles 132 kV

Dans la galerie, les jonctions seront réalisées à l'intérieur de niches prévues à cet effet. Afin d'optimiser les coûts, les longueurs maximales possibles seront utilisées, de manière compatible avec les dimensions maximales des bobines. En particulier, le câble mesurera environ 700 m de longueur.

Compte tenu de la dimension des jonctions et du rayon minimal de courbure du câble, les dimensions en plan des chambres de jonction seront approximativement de 10x6 m. Ces chambres de jonction seront elles aussi réalisées dans le cadre du contrat des ouvrages de génie civil.

Aucune hauteur particulière n'est prescrite. Néanmoins, la nécessité de prévoir dans les chambres de jonction l'espace nécessaire aux sectionneurs de la ligne de contact impose une hauteur d'environ 4 mètres là où la niche coïncide avec la niche des sectionneurs. Dans les autres cas, la niche aura une hauteur apte à permettre la bonne exécution des travaux (environ 2,5 mètres).

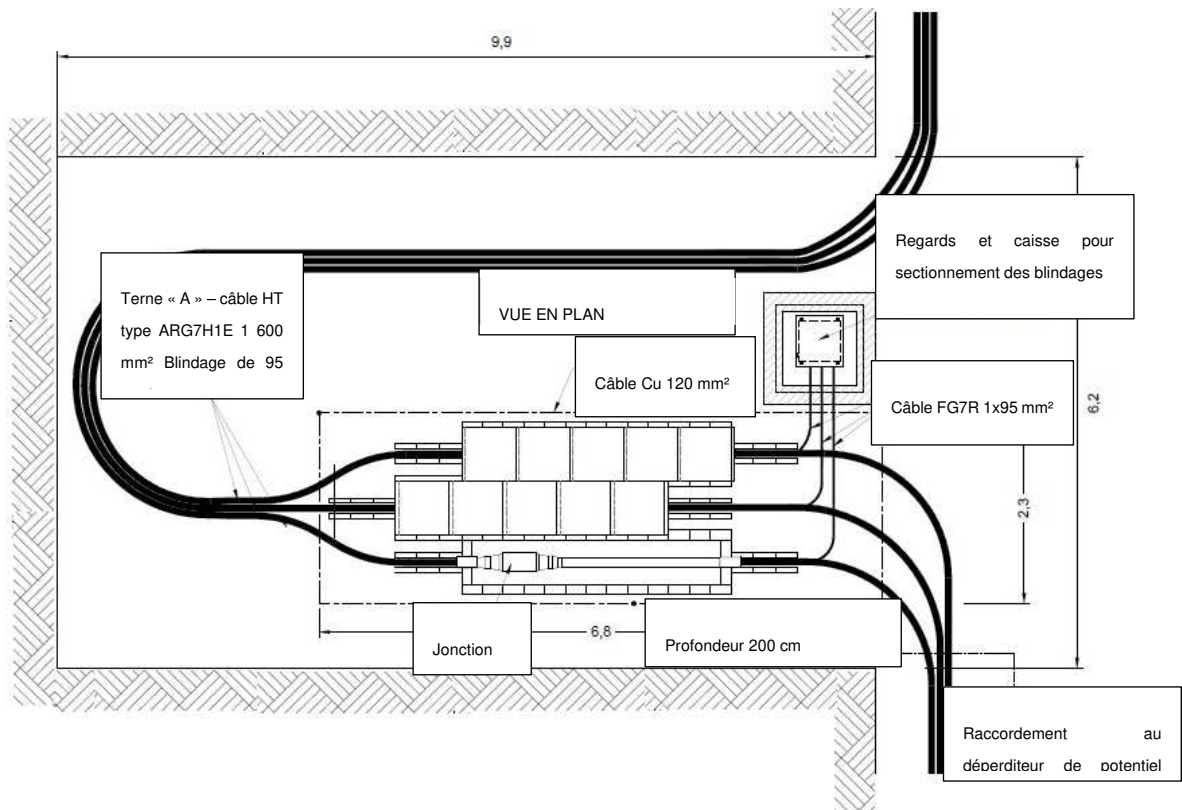


Figure 8 – Chambre de jonction en tunnel (vue en plan)

Un total de 12 regards par terne est prévu le long du tracé, dont 7 en souterrain et 5 à l'air libre.

5 Dimensionnement du câble et vérifications

Comme indiqué précédemment, la ligne électrique à double terne aura pour but d'approvisionner en énergie la sous-station électrique de Suse, pour alimenter les équipements de traction électrique de la ligne à grande vitesse Lyon-Turin (charge monophasée) et les équipements auxiliaires à travers des conduites à 20 kV (charges triphasées).

En cas de panne de l'un des deux ternes (événement rarissime dont la fréquence est estimée tous les 120 ans en conditions de maintenance et renouvellement normales), un système de couplage sur barre omnibus permettra d'alimenter les deux sections (traction électrique et équipements auxiliaires) à l'aide du seul terne resté en service.

Selon les estimations, la puissance totale maximale instantanée absorbée par la sous-station électrique a été définie à 102 MVA, à laquelle correspond un courant de phase (à 132 kV CA monophasé) d'environ 772 A. Cette charge pourra être absorbée par un seul transformateur 132/25 kV monophasé, et le courant ne sera donc pas équilibré sur les trois phases.

Concernant la section d'alimentation au service des équipements LFM, la puissance totale absorbée par l'équipement a été estimée à 20 MVA, à laquelle correspond un courant de phase d'environ 90 A, équilibré cette fois-ci sur les trois phases.

Comme indiqué, en cas de panne temporaire d'un des deux ternes, il sera possible d'alimenter l'ensemble de l'équipement avec le terne resté en service à travers la fermeture des sectionneurs parallèles des barres. Dans ces conditions le courant peut atteindre une valeur de courant de phase égale à la somme des valeurs de chaque équipement, c'est-à-dire 862 A, auxquelles il faut ajouter un courant en quadrature de phase d'environ 45 A dû à la capacité à la terre du câble (capacité linéaire de $0,22\mu\text{F}/\text{km}$).

Ainsi, et compte tenu également de la délicatesse et de l'importance stratégique des équipements à alimenter, il est nécessaire de choisir des câbles de $1\,600\text{ mm}^2$, section à laquelle correspond une portée maximale de 1020 A.

L'isolation de protection est une gaine en polyéthylène (PRC) ; pour éviter la propagation de la flamme, le revêtement le plus extérieur est une gaine en PVC.

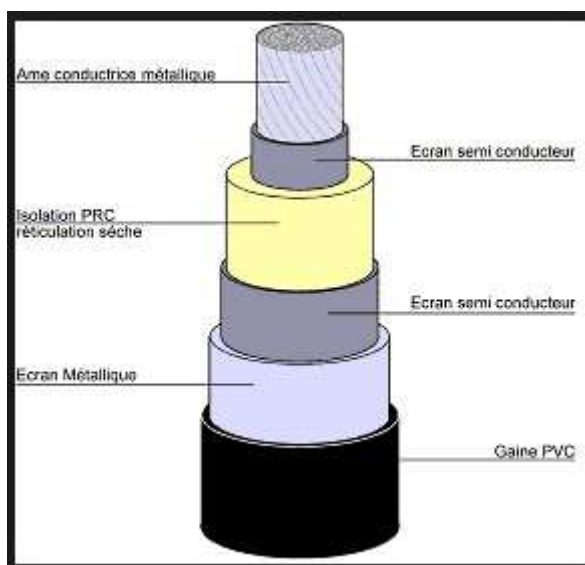


Figure 9 – Schéma de principe du câble

Sur la base des valeurs calculées sur la charge maximale théorique en exercice avec les deux ternes 132 kV en fonction, l'**émission thermique maximale** a été vérifiée.

Cette valeur serait atteinte si la sous-station électrique de Suse devait suppléer la perte totale de la sous-station adjacente (fonctionnement dégradé, estimé dans ce cas à une fois tous les 100 ans pour une durée d'environ 30 minutes) ; les câbles destinés à la traction devraient ainsi conduire sur 10 minutes une puissance totale moyenne de 77,7 MVA. Dans de telles conditions, chaque câble serait donc vecteur d'un flux de courant égal à 589 A, soit une température superficielle du conducteur égale à 65 °C^1 (inférieure à la limite maximale de 90 °C).

Les effets inductifs et capacitifs ont également été vérifiés dans les mêmes conditions, avec des résultats acceptables pour les caractéristiques du câble (section utile de $1\,600\text{ mm}^2$) et la longueur totale de la canalisation (7,8 km).

Pour les raisons suivantes, la **vérification du champ électromagnétique (CEM)** a été plus poussée :

- les retombées environnementales et sociales sur le territoire ;
- les effets négatifs possibles du circuit des câbles 132 kV (circuit tueur) sur les circuits de tension inférieure, les câbles de signaux et les tubes en acier (circuits victimes).

La vérification a notamment porté sur les éléments récepteurs en surface par rapport à la norme CEO 211.6 sur la limite de la plage à $3\text{ }\mu\text{T}$, et par rapport au DPCM du 8/07/2003 sur les récepteurs avec présence de personnes pendant plus de 4 heures consécutives (présence nécessaire d'une conduite de blindage).

¹ En fonctionnement normal, le courant ne dépasse pas les 200 A et la température reste toujours inférieure à 35 °C .

Pour plus de sécurité, ces vérifications ont été effectuées à la portée thermique maximale du câble soit 1020 A, bien que la norme CEI 11-4 prévoit une vérification à la portée moyenne en fonctionnement normal (environ 200 A).

La Figure 10 illustre les plages d'encombrement à la limite de 3 μT identifiées dans différentes conditions.

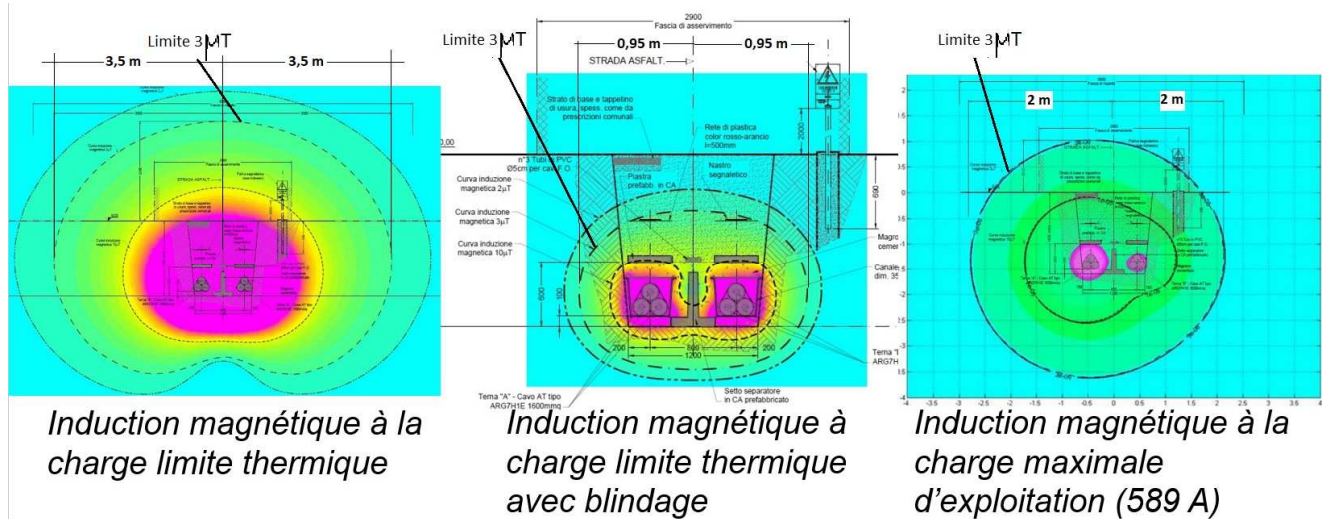


Figure 10 – Sections CEM avec la limite 3 μT (CEI 11-4)

Quoi qu'il en soit, les résultats obtenus ont été rassurants même pour ces simulations poussées à la limite maximale de la charge thermique du câble, obligeant le concepteur à prévoir l'installation de la conduite de blindage en acier vers certains récepteurs sensibles (tant au niveau des habitations que des circuits victimes) à l'extérieur sur seulement 1 000 m, correspondant à la gare internationale de Suse, et dans la galerie sur 1 000 m supplémentaires de PK 57+700 à PK 58+700.

6 Conclusions

Le thème de l'interface entre les ouvrages de génie civil et les équipements est très délicat pour les ouvrages souterrains qui prévoient d'importantes installations technologiques.

Les longs tunnels ferroviaires de dernière génération doivent nécessairement prévoir une excellente planification du transfert entre les exécuteurs des ouvrages de génie civil et ceux des équipements, tant au niveau des délais que des limites de réalisation.

Le benchmark réalisé a mis en évidence que le choix d'un allotissement classique risque d'entraîner des problèmes d'installation des câbles par le lot équipement. C'est le cas de l'expérience sur les lignes à grande vitesse italiennes (en particulier sur le tronçon Florence-Bologne) dans lesquelles le génie civil avait également construit les caniveaux d'accès aux locaux techniques, générant après des problèmes d'installation en matière de conicité, de courbure et de non-respect des tolérances.

Au contraire, au tunnel du Brenner, étant l'ouvrage assez similaire au tunnel de Montcenis, ils ont décidé de allotir comme illustré dans l'article les travaux de génie civil liés aux équipements.

Pour les raisons susmentionnées, l'analyse détaillée effectuée dans le projet sur les possibilités de transfert entre chantiers opérationnels de génie civil et équipements ainsi que les dispositions de projet prises au niveau de toutes les parties d'ouvrage constituant le tunnel de base, offrent d'importants avantages. Citons notamment le transfert anticipé des chantiers avec possibilité de report d'installation des embranchements, la réduction de la limite de dégagement en phase de réalisation pour le transport souterrain des équipements technologiques, une plus grande flexibilité en phase de conception exécutive par rapport au calendrier de réalisation, et l'optimisation de la sécurité des chantiers, tant en souterrain qu'à l'extérieur, en l'absence de chevauchement des deux lots.

On estime également que cette configuration, au-delà d'améliorer la qualité et la productivité des travaux et de réduire le risque de litiges, a également une répercussion économique importante en phase de négociation, permettant aux entités qui répondront à l'appel d'offres de proposer des prix contenus.

Dans ce contexte, le passage dans le tunnel ferroviaire des câbles HT d'alimentation d'une SSE liée à l'exploitation ferroviaire elle-même, constitue résolument une application novatrice qui a notamment le grand mérite d'éliminer totalement les impacts socio-environnementaux sur le territoire en surface.

Dans ce cas, le réalisateur des ouvrages de génie civil devra prévoir la présence des ternes 132 kV sur 5 km supplémentaires dans la portion finale du tunnel de base côté Italie et, par conséquent, le creusement des puits de descente et des niches des chambres de jonction.

Enfin, dans le cas particulier examiné, les câbles d'alimentation relevant de la compétence du gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire, tous les aspects relatifs à la maintenance et aux interventions extraordinaires peuvent s'inscrire dans le cadre de la planification normale de la gestion de l'exploitation ferroviaire.

7 Références

- Poti P., Brino L., 2009. Nuova linea Torino-Lione - Impianti Elettrici, *Ingegneria Ferroviaria*, 5, 439-453, Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani (CIFI)
- Brino L., Luchetti E., A. Chabert A., M. Rettighieri M., Der Basistunnel Lyon-Turin: Technische Aspekte eines großen grenzübergreifenden Projekts, *Beton- und Stahlbetonbau Spezial – Europas Lange Tunnel*, juillet 2013, p. 43-49, Ernst und Sohn
- Brino L., La Nuova Linea Torino Lione: gli aspetti tecnici di un grande progetto transfrontaliero, *Gallerie e Grandi Opere Sotterranee*, juin 2012, n. 102, p. 11-15, Pàtron Editore
- Brino L., Poti P., 2017, L'approccio alla sicurezza in fase di esercizio, Congrès SIG « Le grandi infrastrutture ferroviarie alpine in costruzione: le scelte progettuali e costruttive per la realizzazione di tunnel lunghi e profondi », Vérone, 23-24 février 2017
- Directorate General for Mobility and Transport - European Commission, 2014, « Mediterranean Core Network Corridor Study - Final Report 2014 »
- Virano M., 2016, Le scelte di buon uso del suolo e del sottosuolo negli attraversamenti alpini del nord ovest d'Italia lungo il Corridoio Mediterraneo. *Gallerie e grandi opere sotterranee*, n. 117
- Virano M., 2017, Il tunnel di base del Moncenisio: le scelte di TELT all'interno di una strategia europea, *Strade & Autostrade*, n. April 2017