Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 18

Artikel: Liaisons souterraines à très haute tension

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904078

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: 09.12.2025

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

Liaisons souterraines à très haute tension

Rapport élaboré par un groupe de travail de l'UCS

Depuis quelques années une opposition croissante se manifeste lors de la construction de lignes aériennes à très haute tension et l'étude de réalisation souterraine pour de telles liaisons est souvent réclamée. Bien que les plus hautes instances fédérales se soient prononcées dans plusieurs cas litigieux en faveur de lignes aériennes*, des solutions câblées pourraient être exigées pour certains tronçons traversant des régions à protéger. A l'avenir et pour diverses raisons (environnement, zones urbaines) de telles situations vont se multiplier. Les sociétés électriques sont donc de plus en plus souvent confrontées aux problèmes de réalisation souterraine de liaisons à très haute tension.

* *Cf. également l'avis de la Commission fédérale des installations électriques du 28 juillet 1987 [2].*

1. Introduction

1.1 Préambule

Les problèmes liés à la mise en câble ont quelque peu évolué ces dernières années et l'UCS a demandé à un groupe de travail de préparer une mise à jour du rapport «Verkabelung von Höchstspannungsleitungen» [1] datant de 1979. Le catalogue de questions a été revu et les fabricants ont réétudié les différentes solutions actuellement réalisables. Les problèmes suivants ont été abordés pour les niveaux de tension de 220 et 380 kV:

1. questions électrotechniques
2. questions de technique de construction
3. questions d'exploitation
4. questions d'environnement
5. questions juridiques
6. questions de coût

Le groupe de travail est arrivé à la conclusion qu'en très haute tension chaque cas de mise en câble est particulier et à traiter séparément. Les connaissances actuelles permettent de se faire une idée générale, mais les conditions propres à chaque liaison empêchent l'établissement de règles absolues. Les quelques expériences faites en Suisse ont montré que des problèmes inattendus surgissent souvent lors du projet et de la construction de liaisons souterraines. Le catalogue des questions ci-après met en évidence les différents problèmes pouvant survenir lors de la réalisation. La recherche de solutions particulières est l'affaire de chaque entreprise.

1.2 Généralités

Il convient de rappeler les quelques aspects fondamentaux suivants:

● *Catégories de lignes*

Il y a lieu de distinguer deux catégories de lignes bien différentes:

- Les *lignes d'extrémités de réseau* où la technique de câbles souterrains est utilisée pour l'alimentation de centres urbains, îles éloignées ou pour l'évacuation de la production d'usines souterraines. Ici les puissances à transiter ont des valeurs bien limitées et l'implantation de pylônes est impossible.

- Les *grandes lignes d'interconnexion* nationale ou internationale où les puissances en jeu sont beaucoup plus importantes. Dans ce cas, les problèmes posés sont tout autres et, à notre connaissance, aucune liaison câblée à 380 kV n'a encore été insérée à ce jour dans le monde dans un grand réseau d'interconnexion.

● *Difficultés de réalisation*

Avec l'augmentation de l'occupation du terrain, il sera également de plus en plus difficile de définir un tracé pour les câbles à très hautes tensions, puisqu'ils nécessitent des largeurs de fouilles importantes (voir fig. 10, 11 et 12). Pratiquement, une galerie visitable devient souvent indispensable. Les problèmes, particulièrement juridiques et de réalisation de la construction, posés par cette galerie souterraine sont considérables. Une fois la liaison réalisée, l'obstacle est de taille et une modification du tracé serait techniquement très difficile et coûteuse.

● *Impact sur l'environnement*

L'influence sur l'environnement d'une ligne souterraine est réelle et ne peut être négligée.

- Le problème de l'évacuation de chaleur est important et il faut attacher une attention particulière à l'échauffement et au risque d'assèchement des terrains. Les effets perturbateurs sont sensibles spécialement dans les régions cultivées et sauvages. Les réalisations

en fourreau ou en galerie proche de la surface du sol interdisent la végétation à racine profonde.

- Une réalisation en fourreau ou en galerie peut modifier les effets de drainage et les écoulements d'eaux souterraines.

Remarque: par simplification, on désignera plus loin par:

«galerie»: une construction peu profonde réalisée en tranchée ouverte.

«tunnel»: une galerie profonde réalisée par forage (tunnelier) ou par minage.

- Il faut également tenir compte des risques de pollution par fuites d'huile, de liquide réfrigérant, ou de gaz isolant suivant les cas.

- L'intervention dans la structure écologique globale de la zone touchée par une modification mécanique de la couche supérieure du sol provoque de toute évidence une perturbation grave des biotopes [3].

- La condamnation de surfaces cultivables est nettement plus importante que pour les lignes aériennes.

- De plus, bien que la liaison soit enterrée, l'impact visuel du solde des installations sur le terrain reste significatif puisqu'il faut prévoir des postes de transition aéro-souterrains (voir fig. 1) et, éventuellement, des installations d'évacuation de la chaleur. Pour des liaisons d'une certaine longueur, des stations de compensation de la puissance réactive doivent en plus être aménagées en surface. Le tracé doit rester accessible pour de gros engins de chantier afin de permettre les interventions en cas d'avarie durant l'exploitation.

- Durant les travaux de construction, les vastes chantiers ont de multiples impacts sur l'environnement.

● *Problèmes d'exploitation*

- Le nombre d'éléments délicats à installer dans une installation câblée souterraine est considérable. Les dépenses liées à la surveillance et à l'entretien de tous ces éléments ont un poids certain. La fréquence des avaries est plus élevée du fait de la complexité de l'installation.

- Le réseau est affaibli par l'introduction de tronçons câblés. L'exploitation est moins fiable: faible capacité de surcharge, problèmes de courant réactif et de tension, de résonnances, de sélectivité des protections, suppression des réenclenchements automatiques, longues indisponibilités en cas de défauts.

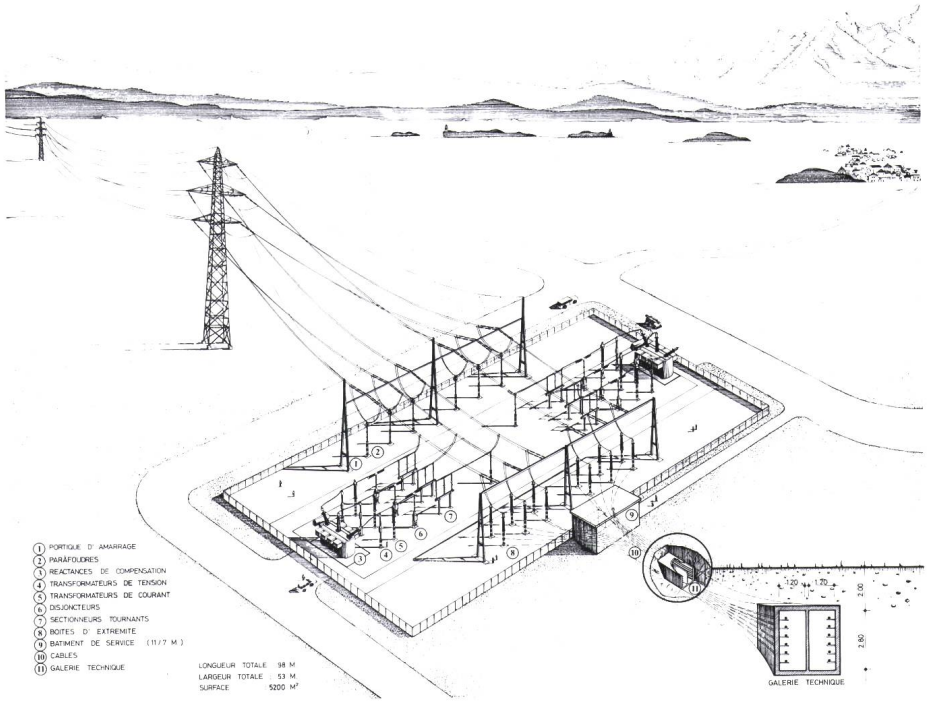


Figure 1 Représentation d'un poste aéro-souterrain à 380 kV

● *Problèmes de coûts*

Les investissements pour des réalisations souterraines restent encore à ce jour très élevés. Si quelques progrès ont été réalisés dans les coûts des techniques des installations électriques, les coûts des ouvrages de génie civil ont par contre fortement augmenté.

Le développement technique ne devrait donc guère influencer le rapport de coût entre liaisons aériennes et souterraines.

● *Techniques futures*

Régulièrement des propositions pour des nouveaux types de câble (par exemple emploi des supraconducteurs) sont avancées, solutions qui plaideraient en faveur de réalisations souterraines. Les nouvelles possibilités signalées dans la littérature présentent encore de très nombreuses inconnues du point de vue de la fabrication et de l'exploitation, inconnues qui sont loin d'être toutes résolues. En cas d'aboutissement, le temps séparant un nouveau développement de son application commerciale peut atteindre quelques dizaines d'années.

- Les nouveautés concernent généralement le câble lui-même. Il ne faut cependant pas oublier le temps nécessaire au développement des accessoires tels que les boîtes d'extrémités et de jonction.

- Dans l'avenir immédiat, les espoirs sont plutôt fondés sur la réalisation de câbles à isolation synthétique. Pour le niveau de tension de 110 kV, les expériences sont très concluantes. Pour les niveaux de 220 et 380 kV, les premières réalisations existent et des progrès certains vont faire progresser le nombre d'installations de ce type.

2. Technique des câbles

Quoique plusieurs types de câbles existent pour les très hautes tensions, nous avons retenu ici seulement les 3 types les plus couramment utilisés, soit:

- les câbles à isolation synthétique
- les câbles à isolation papier et à huile fluide pressurisée
- les tubes à isolation gazeuse SF_6.

2.1 Câbles à isolation synthétique

Il s'agit des câbles à isolation extrudée. Le polyéthylène (PE) ayant l'inconvénient de se déformer à haute température, il n'est guère utilisé en Suisse. On préfère généralement le polyéthylène réticulé (XLPE) ou l'éthylène-propylène-rubber réticulé (EPR), dont les caractéristiques mécaniques à haute température sont nettement meilleures.

Ce type de câbles se compose d'un conducteur formé de brins de cuivre ou d'aluminium sur lequel une couche semi-conductrice, une couche isolante et une nouvelle couche semi-conductrice sont extrudées puis réticulées, en un seul passage. Afin d'éviter toute pénétration d'humidité à l'intérieur de l'isolant, une gaine métallique étanche faisant office d'écran est appliquée sur le conducteur isolé. Cette gaine métallique, en cuivre ou en aluminium, est généralement ondulée (voir fig. 2).

Actuellement, des câbles à isolation extrudée fonctionnent en Suisse au niveau 220 kV alors que des essais sont faits en France au niveau 380 kV.*

Par rapport aux câbles à huile, les pertes diélectriques des câbles à isolation extrudée sont nettement plus faibles, surtout pour le XLPE; ces faibles pertes associées à une résistance thermique plus faible de l'isolation amènent généralement, pour une charge donnée, au choix d'une section de conducteur inférieure à celle qui serait choisie pour un câble à huile.

Figure 2
Câble sec 110 kV, 1×500 mm²
(Photo Cossonay)

	Diamètre approximatif mm
Conducteur cordé, rond, en cuivre, 500 mm²	27
Semi-conducteur réticulé extrudé	30
Isolation en XLPE ou EPR	62
Semi-conducteur réticulé extrudé	67
Gaine métallique ondulée	75
Gaine anticorrosion	85

2.2 Câbles à huile

Les matières premières employées pour la fabrication de tels câbles répondent à des exigences bien particulières. Les papiers sont traités spécialement et l'huile minérale ou synthétique d'isolation est dégazée avant l'imprégnation du câble.

Un canal situé au centre du conducteur du câble monopolaire permet la circulation de l'huile des et vers les réservoirs, en fonction du régime thermique du câble (sans effet de refroidissement). L'emplacement de ces réservoirs est choisi de telle sorte qu'en toutes circonstances et en tous points, la pression interne du câble soit supérieure à la pression atmosphérique, quelle que soit la dénivellation de la ligne.

Devant résister à la pression, la gaine du câble est soit en plomb allié ou en cuivre soudé et ondulé, parfois renforcée par des frettes métalliques, soit en aluminium filé à la presse, permettant ainsi d'avoir de fortes épaisseurs et d'éviter toute soudure.

Après son imprégnation, le câble est maintenu constamment sous pression d'huile. A cette fin, lors des phases subséquentes de fabrication ainsi que du transport et de la pose, chaque tronçon est raccordé à un réservoir placé à l'intérieur de la bobine. Une fois mis en place et montés, les câbles sont reliés aux réservoirs définitifs.

Dans les câbles à huile, à haute ou à basse pression (cas le plus fréquent), l'huile est maintenue par des réservoirs à membrane placés en bout de ligne et chargés de fournir ou d'absorber l'huile, en fonction du régime thermique du câble (voir fig. 3).

D'autres types de câbles à isolation imprégnée ont fait leurs preuves, en particulier ceux à pression externe ou interne de gaz. Ces câbles peu courants en Suisse ne sont utilisés que pour des applications très particulières lorsqu'il est primordial d'éviter de polluer une nappe phréatique ou en cas de forte dénivellation. Ce type de câble a perdu de son importance depuis l'apparition des câbles à isolation extrudée utilisés en très haute tension.

Le tableau I résume les caractéristiques usuelles des câbles.

2.3 Tubes à isolation gazeuse (GIL)

Depuis environ 15 ans, des liaisons à isolation gazeuse (hexafluorure de soufre SF_6) sont installées dans des postes de couplage et dans les grandes centrales de production. Des installations sont exploitées avec succès à des tensions allant jusqu'à 550 kV et pour des puissances élevées. Les longueurs de ces liaisons s'élèvent toutefois à quelques centaines de mètres seulement.

En Suisse, des liaisons SF_6 à 380 kV sont installées, par exemple, dans la centrale de Mapragg (Kraftwerke Sarganserland) depuis 1976 et dans le poste de couplage de Laufenbourg (EGL) depuis 1981.

La figure 4 montre la construction d'une liaison SF_6. A 220 kV et 380 kV, seuls des tubes monophasés sont installés. Le conducteur en aluminium est placé dans un tube en aluminium mis à la terre. Le conducteur est tenu au centre par des supports isolants en résine epoxy. Le tube est rempli d'hexafluorure de soufre qui a une double fonction:

- d'isolation du conducteur sous tension;
- de transport de la chaleur due aux pertes énergétiques du conducteur au tube extérieur.

Le SF_6 convient bien, c'est un gaz ininflammable, non toxique, inodore et

* en particulier 250 m de liaison 600 MVA au poste de Plessis-Gassot et 780 m de liaison 64 MVA à la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine.

incolore. A noter que c'est un gaz lourd dont la récupération en cas de fuite est difficile. Il se décompose sous l'effet d'un arc électrique et la poudre blanche résultante est toxique et son élimination toujours plus problématique.

Les éléments de tube extérieur ont généralement une longueur de 7,5 m et sont vissés ou soudés ensemble. Le passage du courant dans les conducteurs entre les éléments est assuré par des contacts argentés à doigt. Pour les longueurs supérieures à 400–500 m, il y a lieu d'installer des lyres de dilatation qui requièrent des chambres spéciales (voir fig. 5).

Le tableau I résume également les principales caractéristiques techniques des liaisons SF_6 à 220 et 380 kV.

Du point de vue des caractéristiques électrotechniques, les liaisons isolées au gaz SF_6 se situent entre les lignes aériennes et les câbles à isolation solide.

Les figures 6 et 7 montrent une réalisation de liaison SF_6 à 380 kV à un terne dans une galerie à ciel ouvert. La figure 8 montre une réalisation posée à même le sol. Il s'agit là de liaisons inférieures à 400 m dans un poste électrique.

La figure 12 permet de comparer les sections de tunnel pour une installation SF_6 et en câbles à huile, à 220 kV et 380 kV, à deux ternes. Les deux tunnels sont visitables; en comparant les dimensions, il ne faut pas oublier que la liaison SF_6 permet de transporter une puissance plus élevée que celle des câbles conventionnels à huile.

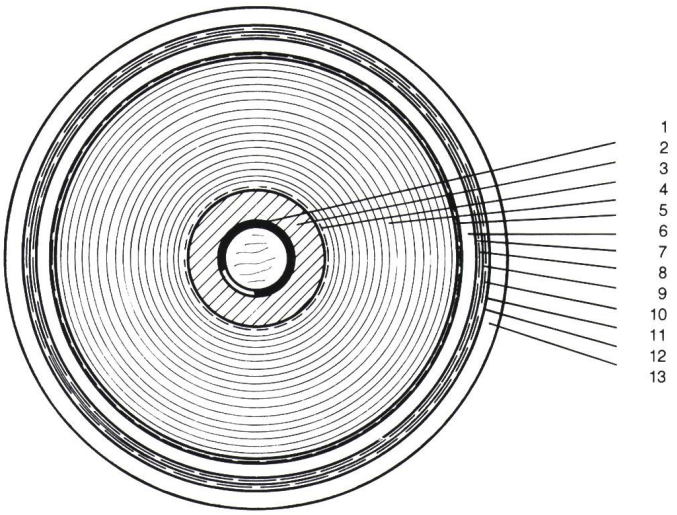
L'expérience positive de plusieurs années faite dans les postes de couplage SF_6 concernant la surveillance du gaz SF_6, l'isolation des cloisons, les transitions aéro-souterraines, la compensation des dilatations et la protection contre les coups de foudre devrait permettre de construire des liaisons SF_6 fiables de longueurs importantes (quelques dizaines de kilomètres). Toutefois, il n'existe à ce jour aucune réalisation de ce type, et l'expérience fait défaut.

Les avantages du SF_6 sont de bonnes caractéristiques électriques, un courant capacitif plus faible que pour les câbles à huile, une grande puissance transmissible, une bonne sécurité d'exploitation, l'indépendance vis-à-vis de l'extérieur, un temps de réparation acceptable et l'absence d'huile.

Les désavantages de cette solution sont, lors du montage, un travail considérable, délicat et nécessitant une propreté absolue. Pour cette raison, la

Caractéristiques techniques principales

Tension nominale	380 kV
Tension de service maximale	420 kV
Courant nominal	500 A
Courant de court-circuit	44 kA, 1 s



Coupe du câble

1	Spirale en acier	10,8/12,8 mm	8	Rubans de cuivre longitudinaux	89,6 mm
2	Conducteur en cuivre	29,0 mm	9	Rubans de cuivre radiaux	91,2 mm
3	Papiers semi-conducteurs (3)	29,6 mm	10	Rubans de cuivre longitudinaux	92,0 mm
4	Isolation	81,0 mm	11	Rubans de cuivre radiaux	93,6 mm
5	Ecran Höchstaedter	81,5 mm	12	Ruban synthétique	93,7 mm
6	Gaine de plomb allié	88,2 mm	13	Gaine en polyéthylène	100,0 mm
7	Papiers bitumés (3)	88,8 mm	Poids		26,5 kg/m

Figure 3 Câble à huile 220 kV et 380 kV (Photos Cortaillod/Brugg)

Solution et mode de pose			A	B	C	D	S_2	E	F	G	S_3
Genre d'isolation			synthéti. extrudée	papier-huile	papier-huile	papier-huile	SF_6 GIL	papier-huile	papier-huile	papier-huile	SF_6 GIL
Tension nominale U_n composée/simple		kV	110/63	220/127	220/127	220/127	220/127	380/220	380/220	380/220	380/220
Tension maximale U_m admissible en permanence		kV	123/71	245/141	245/141	245/141	245/141	420/242	420/242	420/242	420/242
Nombre et section de conducteur par phase		mm^2	1×800	2×1000	1×1000	1×1600	1×2375	2×2000	2×1600	2×1600	1×2375
Nombre de circuits (ternes) en parallèle			2	2	2	2	2	2	2	2	2
Données électriques pour 1 terne											
Tension de tenue au choc		kV	500	1050	1050	1050	1050	1425	1425	1425	1425
Essai de tension en usine (15 min) à 50 Hz		kV	160	225	225	225	460 a)	395	395	395	680 a)
Essai de tension après pose (15 min) à U continue		kV	192	520	520	520	368 b)	805	805	850	544 b)
Capacité de service par phase		10^{-6} F/km	0,240	0,596	0,298	0,348	0,065	0,604	0,574	0,574	0,055
Courant de charge par phase à U nominale	env.	A/km	5,0	23,9	11,9	13,9	2,6	41,6	39,6	39,6	3,8
Puissance réactive triphasée fournie à vide	env.	MVAr/km	0,92	9,1	4,5	5,3	1,0	27,4	26,1	26,1	2,5
Courant permanent maximal admissible (hiver/été)		A	800/750	1250/1205	1250	1250	3150	2500	2500	2500	3150
Puissance transmissible maximale (hiver/été)		MVA/ terne	152/143	476/459	476	476	476 c)	1645	1645	1645	1645 c)
Température maximale du conducteur		°C	90	80	80	80	105	80	80	80	100
Pertes diélectriques par phase à U nominale		kW/km	0,4	7,5	3,8	4,4	$0{,}17 \cdot 10^{-3}$	13,7	13,0	13,0	$0{,}33 \cdot 10^{-3}$
Pertes ohmiques conducteur/phase à Pmax. hiver	env.	kW/km	19,0	18,5	37,9	27,1	20,2	39,0	44,1	47,0	87,5
Pertes totales triphasées à Pmax. hiver	env.	kW/km	3×20	3×26,5	3×43,8	3×34,5	3×163	3×56,4	3×60,5	3×63,5	3×153
Courant de court-circuit thermique maximal par conducteur pendant 1 sec./3 sec.		kA	88/51	110/65	100/65	160/104	.../100	202/116	162/93	162/93	.../100
Données constructives											
Métal et diamètre extérieur du conducteur		mm	Cu 37,0	Cu 43,4	Cu 43,4	Cu 53,5	Al 132	Cu 57,4	Cu 53,5	Cu 53,5	Al 132
Diamètre extérieur du câble/tube	env.	mm	85,0	102,8	102,8	113,4	326,0	142,0	138,0	138,0	380,0
Poids du câble/tube	env.	kg/m	12,5	19,4	19,4	26,2	24,0	37,0	32,0	32,0	28,0
Rayon de courbure minimum		m	1,68	2,06	2,06	2,27	100 d)	2,84	2,76	2,76	100 d)
Pression maximale de service		bar	—	15	15	15	5,4	10	10	10	5,4
Longueur usuelle de fabrication du câble/tube		m	600/1000	500/700	500/700	500/700	7,5	500/600	500/600	500/600	7,5

Tableau I Caractéristiques principales des câbles unipolaires et des tubes SF_6

Remarques: par hypothèses - la température ambiante maximale: 10 °C en hiver; 20 °C en été;
- la résistivité thermique moyenne du milieu ambiant: 85 °C cm/W.

a) Essai de tension 1 min. (U_p) à 50 Hz
b) Essai de tension 80% U_p
c) Les tubes SF_6 permettent une puissance transmissible maximale plus élevée
d) Ou possibilité de changement brusque de direction par des coquilles articulées.

pose en galerie ou en tunnel est à recommander. En exploitation, il faut citer la nécessité absolue d'une étanchéité parfaite afin de maintenir la pression et la qualité du gaz. Les dangers de corrosion sont également assez importants ainsi que les effets toxiques de la décomposition du gaz signalés ci-dessus.

2.4 Autres solutions

2.4.1 Liaisons à courant continu

Pour des raisons techniques et économiques, le transport à courant continu est réservé aux cas suivants:

- transport aérien à très grande distance (plus de 500 km) dans des espaces vierges;
- transport câblé sous-marin supérieur à environ 50 km;
- interconnexion de deux réseaux non synchrones.

Dans le contexte suisse, des liaisons à courant continu n'auraient pas d'avantages déterminants sur celles à courant alternatif; par contre, elles seraient notablement plus chères.

2.4.2 Liaisons à supraconducteur

Bien que les découvertes réalisées ces derniers mois dans le domaine des supraconducteurs soient d'une importance capitale, les perspectives d'application se concentrent sur les réalisations suivantes:

- création de champs magnétiques puissants;
- circuits intégrés ultra-rapides pour ordinateurs;
- domaine médical.

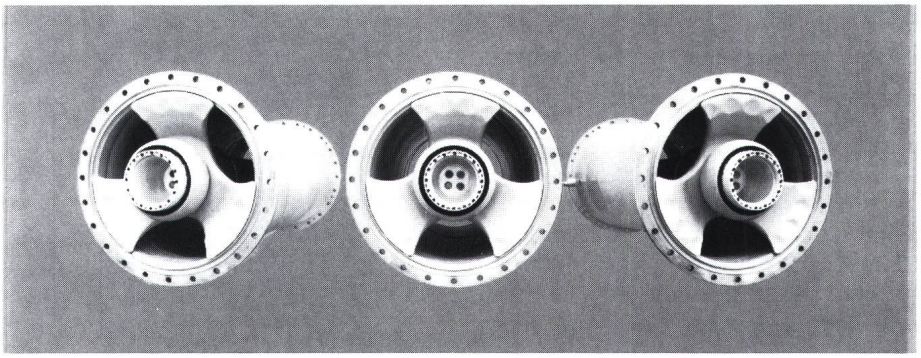


Figure 4 Tube SF_6 220/380 kV GIL avec brides vissées (Photo ABB)

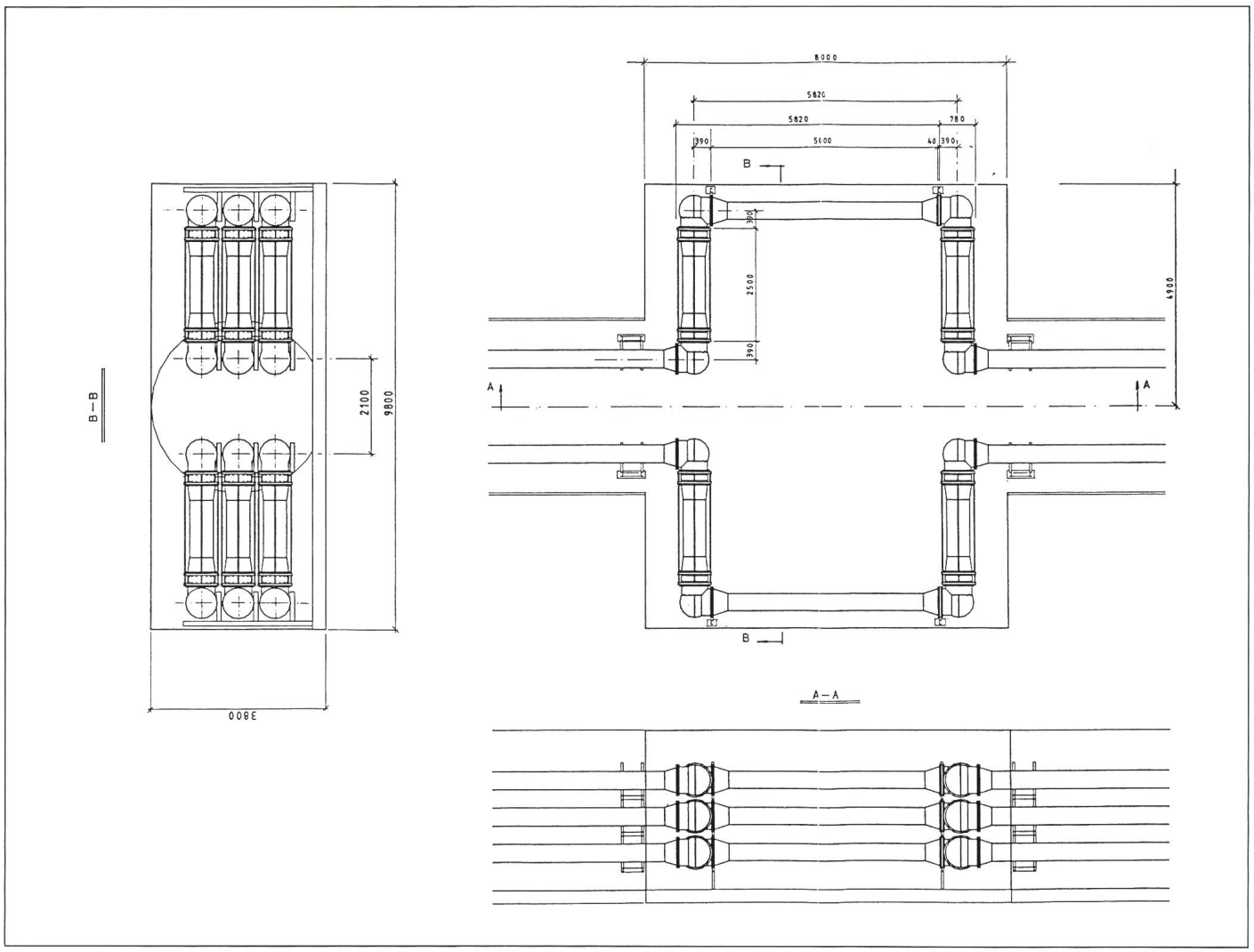
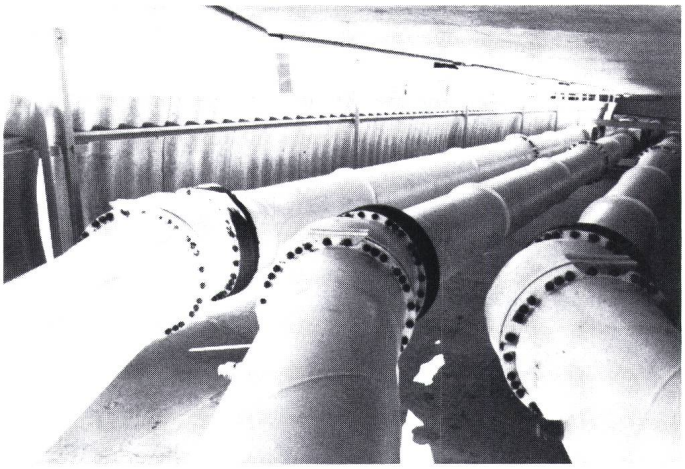


Figure 5 Chambre de compensation pour lyres de dilatation SF_6



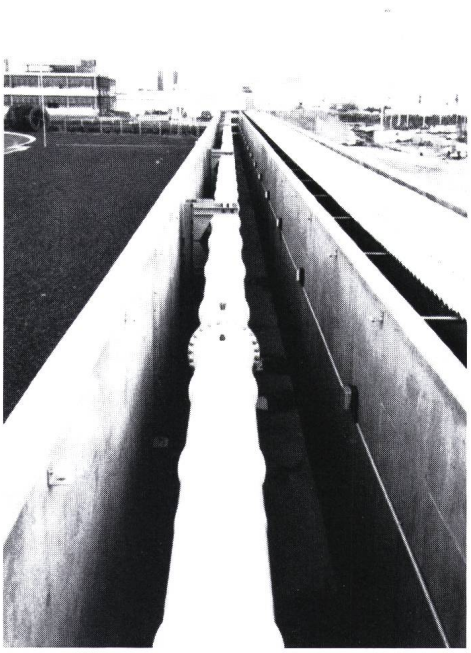


Figure 6 et 7 Exemple liaisons SF_6, 420 kV, 3150 A à Koeberg, Afrique du Sud, en service depuis 1978 (Photo ABB)

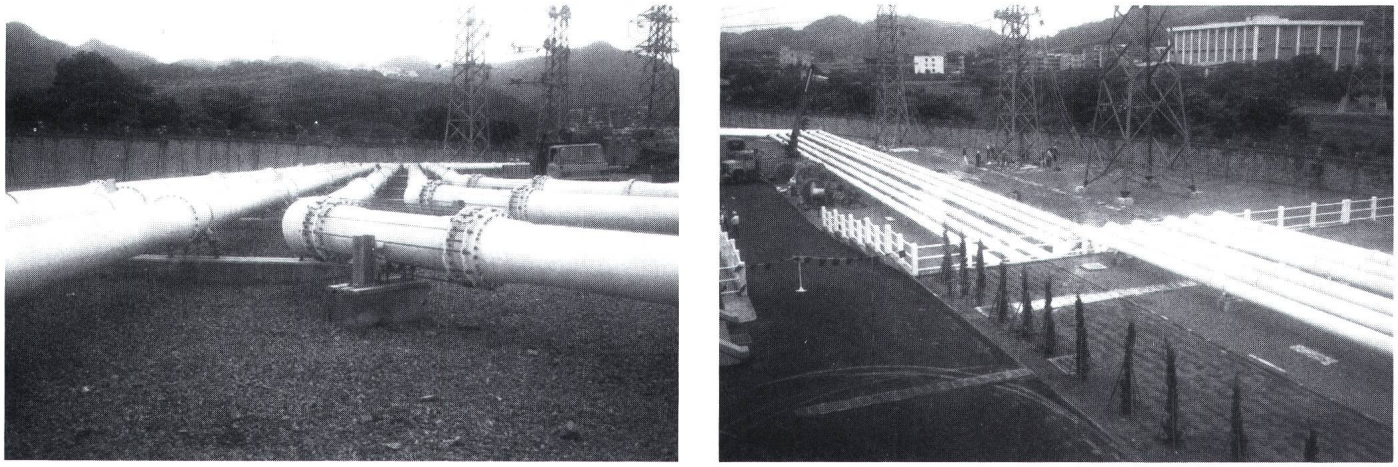


Figure 8 Exemple liaisons SF_6, 362 kV, 4000 A, TPC, Taiwan, en service depuis 1987 (Photo ABB)

La réalisation de liaisons de transport à grande distance à câble supraconducteur reste un espoir pour le futur.

3. Problèmes posés par les liaisons souterraines

Un catalogue des problèmes et contraintes occasionnés par une mise en souterrain de lignes à très haute tension a été établi et figure en annexe.

3.1 Electrotechnique

3.1.1 Surtensions

Les câbles et leurs accessoires sont sensibles aux surtensions, soit d'origine atmosphérique sur des ouvrages extérieurs (ondes à front raide, réflexion), soit de phénomènes transitoires de service (ouverture de circuit). Tous les endroits critiques doivent être équipés de parafoudres de grandes dimensions afin de protéger les câbles et leurs accessoires. Il est important de déterminer exactement les différents niveaux de surtension possibles. Ce problème est complexe.

3.1.2 Courants capacitifs

- Réduction de la puissance transportable:

Les courants capacitifs sont nettement plus importants pour les câbles que pour les tubes SF_6 et les lignes aériennes. Ces courants sont proportionnels à la longueur de la liaison et réduisent fortement la capacité de transport du câble (voir fig. 9).

- Génération de puissance réactive dans le réseau:

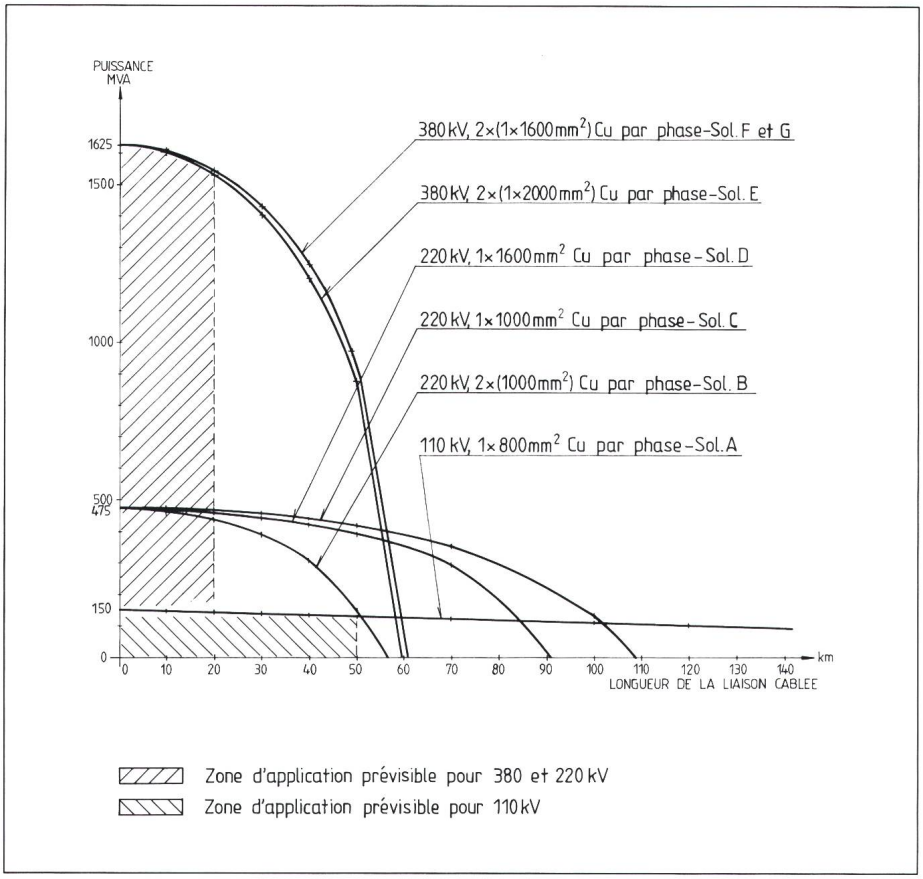


Figure 9 Câbles à huile: Diminution de la puissance de transport en fonction de la longueur de la liaison

Pour les câbles à huile, suivant l'épaisseur de l'isolation et le nombre de conducteurs en parallèle par phase, le courant capacitif peut atteindre des valeurs importantes, par exemple plus de 40 A par phase et par km au niveau 380 kV. La puissance réactive fournie à vide atteint 26 MVAr/km par terne 380 kV, ce qui limite les tronçons câblés, sans compensation, à 20 km environ.

- Problèmes techniques d'exploitation:

Lorsque le réseau est faiblement chargé et génère une grande puissance

réactive, sa tension peut s'élever à des valeurs dangereuses. Des tronçons câblés pourraient au besoin alors être déclenchés (ou un des deux ternes d'une liaison). De telles mesures réduisent considérablement la sécurité d'exploitation.

De plus, il faut souligner d'autres problèmes inhérents: la mise sous tension des câbles, le contrôle de synchronisme à ligne ouverte, le plus grand pouvoir de coupure des disjoncteurs, la stabilité des alternateurs, etc.

3.1.3 Compensation

Comme on l'a vu au paragraphe précédent, par suite de l'effet condensateur très important des câbles à huile, l'augmentation de la longueur de la liaison oblige de prévoir une répartition régulière de bobines d'inductance en dérivation de manière à consommer la puissance réactive. Ces installations de compensation sont volumineuses, apparentes et coûteuses (voir fig. 1).

3.1.4 Pertes

Les pertes énergétiques des câbles sont égales à la somme des pertes diélectriques (dépendantes de la tangente delta et de la tension U mais pas de la charge) et des pertes ohmiques ($3RI^2$) dans les conducteurs et dans les gaines (dépendantes de la charge). Ces dernières sont atténuées par la permutation des liaisons entre gaines (crossbonding, voir ci-dessous).

A capacité de transport égale, les pertes d'une ligne souterraine sont, à faible charge, supérieures à celles d'une ligne aérienne, alors qu'à pleine charge, elles sont inférieures. Dans les solutions avec refroidissement forcé, il y a lieu de tenir compte également de la consommation d'énergie des circuits de réfrigération.

3.1.5 Permutation (crossbonding)

Pour les longues lignes, les courants de gaine sont limités par permutation des liaisons entre gaines. Dans les chambres de jonction, des dispositifs de protection contre les surtensions sont nécessaires; il existe plusieurs possibilités telles que des résistances dépendant de la tension ou l'introduction de parafoudres en étoile ou en triangle. La mise à terre du système et les dangers qui en découlent pour les personnes posent des problèmes souvent difficiles à résoudre. La bonne tenue de ce petit matériel requiert beaucoup d'attention.

3.1.6 Refroidissement

Pour chaque système câblé, la puissance transmissible est fonction de l'équilibre entre le dégagement de chaleur et les possibilités de transmission de chaleur du sol. La conduction de chaleur dans l'isolation des câbles est connue, par contre, les caractéristiques du sol sont très variables. Les puissances transmissibles dépendent du système de refroidissement adopté, dont les principaux types sont:

- le refroidissement naturel;
- le refroidissement latéral: fluide refroidisseur circulant dans des tubes parallèles aux câbles;
- le refroidissement intégral: immersion des câbles dans un fluide refroidisseur;
- le refroidissement direct: circulation forcée d'un fluide refroidisseur dans l'âme creuse du câble (longueur limitée); ce système a l'avantage d'éliminer les risques d'apparition d'éventuels points chauds le long du conducteur.

Les réalisations en tube SF_6 dégagent moins de chaleur et ont de ce fait une capacité de charge et de surcharge supérieure.

3.2 Technique de construction

Les problèmes de construction sont dépendants du mode de pose, qui lui-même est dépendant de la capacité de transport exigée. Faire passer les lignes souterraines sur le même tracé que des routes ou des canalisations (gaz, eau, téléphone, etc.) s'avère souvent impraticable pour les capacités en jeu et peut poser des problèmes de sécurité; il faut donc étudier un tracé propre, adapté aux obstacles existants et à l'état des lieux.

Mode de pose: il faut distinguer trois types de pose différents:

- en fourreau
- en galerie
- en tunnel (voir remarque chapitre 1.2).

3.2.1 Pose en fourreau

Les câbles sont placés dans des tubes noyés dans un bloc de béton (fig. 10).

La mise en fourreau consiste à tirer les câbles dans des tubes en PVC noyés dans une masse de béton. La capacité de conduction de chaleur du béton est connue. L'ensemble de la chaleur produite doit être transmis au sol. Il existe la possibilité de forcer le refroidissement en créant une circulation d'eau dans le béton. Ce mode de pose nécessite une grande section pour une capacité de transport donnée.

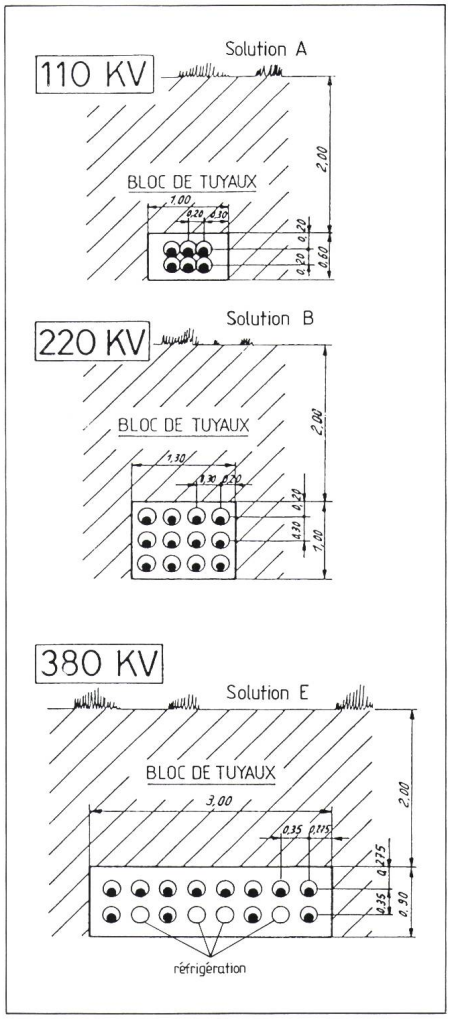


Figure 10 Profil type pour pose en fourreau 110, 220 et 380 kV

Avantages:

- le bloc peut être construit par étapes;
- possibilité d'introduction des câbles ultérieurement.

Inconvénients:

- évacuation de chaleur nécessitant de grosses sections ou un refroidissement forcé;
- localisation de défauts ne pouvant se faire qu'aux boîtes de jonction;
- en cas de défaut, nécessité de remplacer tout un tronçon;
- nécessité de déboisement en cas de traversée de forêt;
- ouvrages spéciaux visitables nécessaires pour les boîtes de jonction;
- mode de pose ne convenant pas pour les tubes SF_6.

3.2.2 Pose en galerie

La galerie technique, proche de la surface du sol, est réalisée en béton armé dans des tranchées ouvertes, puis complètement recouvertes (fig. 11).

En galerie, les câbles sont posés ou suspendus le long des parois. Ce canal, suffisamment grand pour permettre le passage d'un homme (entretien et contrôle), peut être ventilé artificiellement pour forcer le refroidissement des câbles et ainsi augmenter leur capacité de transport. Ce mode de pose est également adapté à la technique SF_6.

Avantages:

- surveillance des câbles possible en tout temps;
- changement de câbles plus facile.

Inconvénients:

- solution chère;
- nécessité de déboisement en cas de traversée de forêt;
- les boîtes de jonction et les réservoirs d'huile nécessitent des élargissements de la galerie (voir fig. 16);
- dans certains cas, fenêtres de ventilation réparties le long du parcours (bruit);
- SF_6: nécessite des chambres de compensation pour les lyres de dilatation tous les 400 à 500 m (fig. 5).

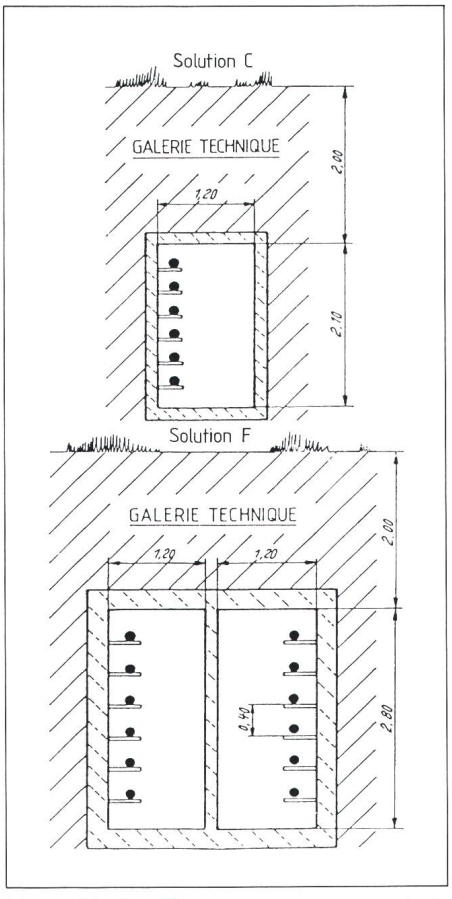


Figure 11 Profil type pour pose en galerie 220 et 380 kV

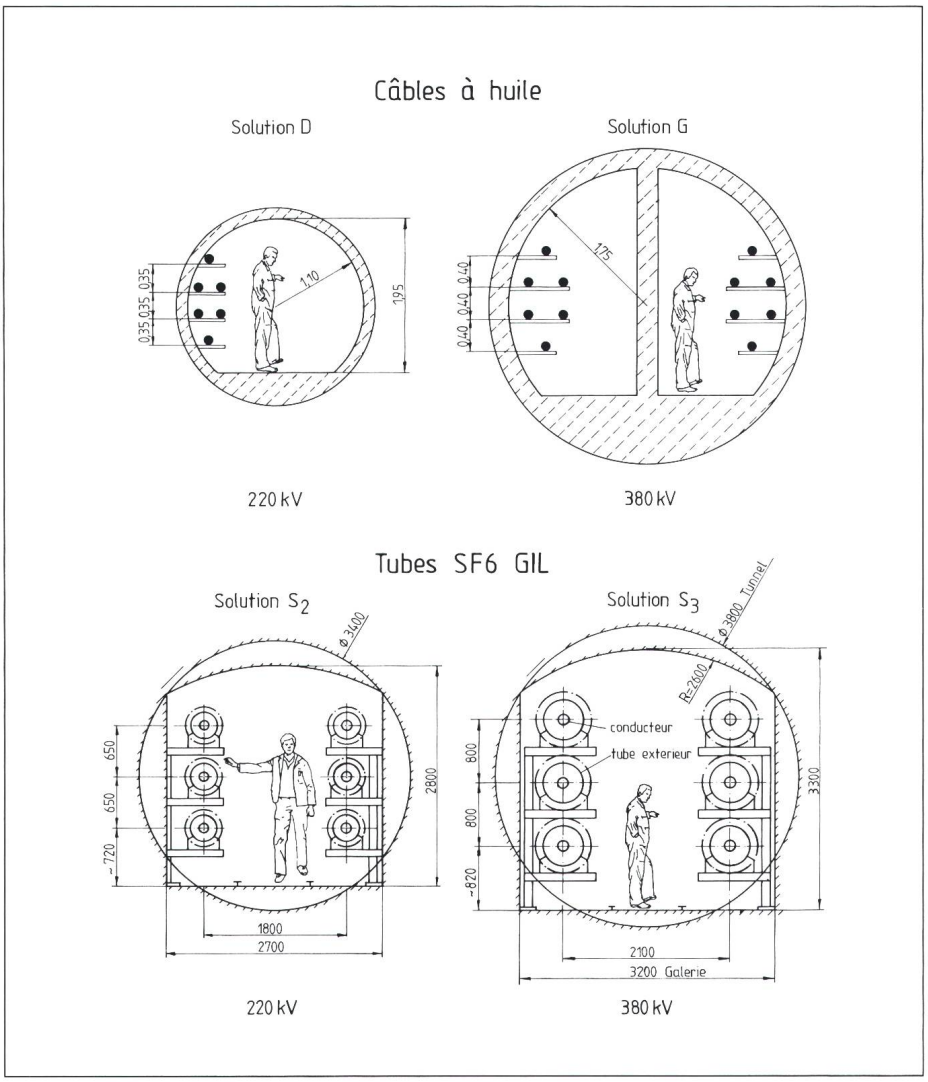


Figure 12 Profil type pour pose en tunnel 220 et 380 kV

3.2.3 Pose en tunnel

La disposition est similaire à celle de la galerie mais réalisée en profondeur par un tunnelier ou par minage (fig. 12).

La pose en tunnel profond a des caractéristiques proches de la solution précédente. Du fait de l'isolation du sol, le refroidissement forcé est indispensable. Cette méthode convient aux solutions câblées ou en SF_6.

Avantages:

- tracé ne dépendant pas des obstacles de surface ou enterrés peu profondément;
- possibilité de tracé rectiligne.

Inconvénients:

- coût très élevé;
- incertitude liée à la géologie;
- pas d'évacuation de chaleur par le sol;
- implantation de points d'accès;
- aménagement de fenêtres de ventilation (bruit pour le voisinage);
- chambres de jonction ou de dilatation très coûteuses (voir fig. 16).

3.3 Exploitation

3.3.1 Répartition de charge

Les différences d'impédance introduites par l'alternance de tronçons câblés et aériens provoquent un déséquilibre de la charge dans les différentes parties du réseau. Le type de câbles a peu d'influence sur ce phénomène (situation moins critique avec des tubes SF_6).

3.3.2 Surtensions

L'inductivité des câbles est plus petite que celle des lignes aériennes, d'où un amortissement moins bon des surtensions. Une onde de choc d'origine atmosphérique ou une surtension de manœuvre sera en partie réfléchie à la jonction entre la ligne aérienne et le

câble, ce qui peut provoquer des valeurs de tension inacceptables. La tension transitoire de rétablissement, lors de l'ouverture des disjoncteurs, rend le renforcement des chambres de coupure obligatoire.

3.3.3 Protection

Le réglage des relais de distance est contrarié par la différence d'impédance entre lignes aériennes et câbles. Pour de longs trajets câblés, la sélectivité n'est plus assurée. En plus de la protection normale, on doit installer une protection thermique. Il est alors nécessaire de connaître précisément l'image thermique du câble pour signaler les surcharges de façon sûre. Le réglage des relais est également entravé par le fort courant d'enclenchement du câble à vide.

La technique du réenclenchement automatique des lignes après perturbation, très répandue à ce jour dans les réseaux, n'est plus envisageable avec des lignes souterraines.

3.3.4 Perturbations

● *Perturbations avec câble endommagé:*

La découverte de la cause et de l'endroit du défaut est relativement rapide si le câble est en galerie ou en tunnel, par contre elle peut être beaucoup plus difficile pour une pose en fourreau. Le remplacement d'un tronçon de câble nécessite plusieurs semaines et donc une longue interruption de l'exploitation.

● *Perturbations sans mise hors service immédiate:*

Il s'agit généralement d'inétanchéité, de pénétration d'eau, de perte d'huile suite à une fuite dans le manteau. La recherche du défaut est longue (peut durer des semaines) et difficile. Pour des raisons de sécurité, la ligne doit être mise hors service pendant les travaux.

Les nombreux accessoires sont aussi sujets aux défauts signalés ci-dessus. De plus, les défaillances aux multiples installations de surveillance peuvent provoquer des mises hors service erronées de la liaison.

3.3.5 Surcharge

Contrairement aux lignes aériennes et aux tubes blindés SF_6, les câbles sont très sensibles aux surcharges, car il se produit une accumulation de chaleur très rapide qui conduit à une réduction de la durée de vie de l'isolant. Cet inconvénient n'a guère de conséquences dans les liaisons en antenne où les surcharges sont limitées, mais il est très gênant dans un réseau bouclé.

La charge initiale des câbles détermine la surcharge et la durée admissibles. Celles-ci sont d'autant plus réduites que le courant est élevé. Il y a lieu de contrôler également la bonne tenue mécanique et électrique des câbles aux courants de court-circuit.

3.3.6 Influence de câbles en parallèle

Avec de longs tronçons en parallèle, la tension longitudinale induite peut atteindre des valeurs dangereuses, spécialement pour les câbles de télécommunication. Les liaisons de mesures et de commande doivent donc être mises en canal protégé ou spécialement blindé.

3.3.7 Surveillance

Au contraire des lignes aériennes, les câbles à huile ou les tubes FS_6 nécessitent une surveillance accrue. Des appareils surveillant en permanence le comportement de la pression en fonction du courant et de la température environnante et enregistrant les valeurs instantanées sont indispensables. L'installation de transformateurs de mesure adéquats permet de plus de surveiller les courants de gaine et de détecter certains défauts.

3.3.8 Disponibilité

Il est difficile de donner des valeurs statistiques significatives pour les li-

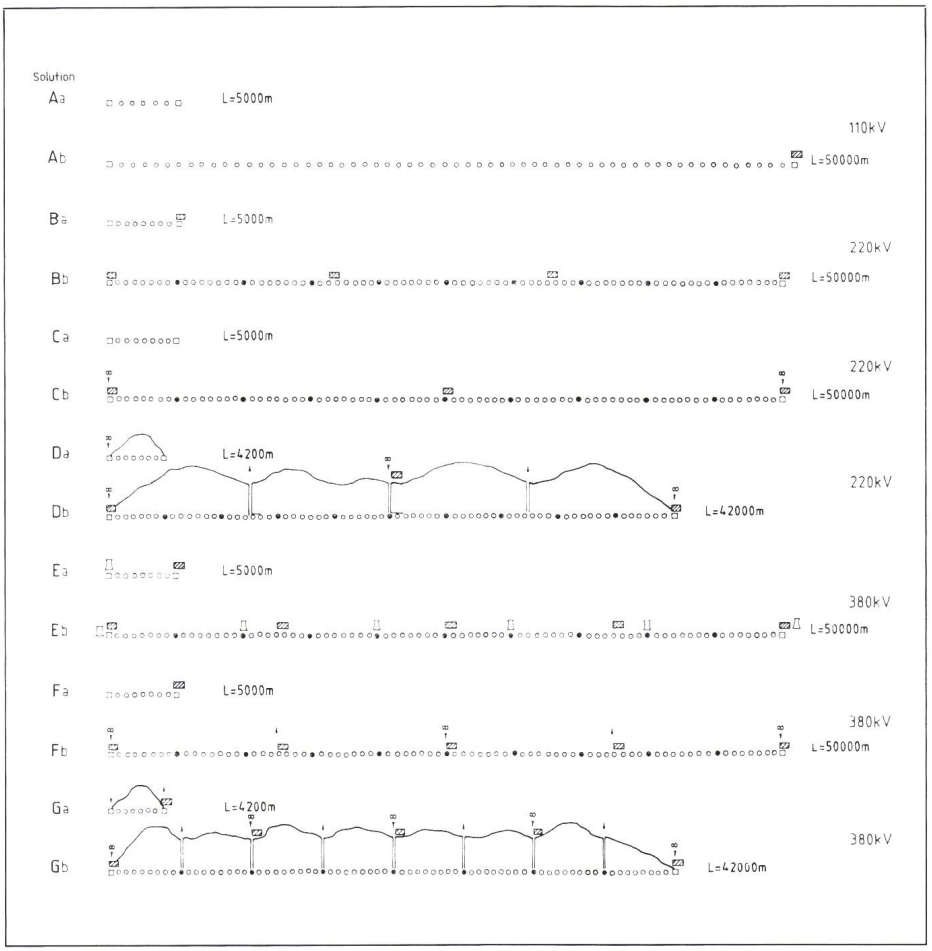


Figure 13 Schéma d'installation des diverses solutions en câbles (définitions voir chap. 4)

Légende:
- o poste d'entrée/sortie
- o jonction simple
- • jonction d'arrêt
- réactance
- ventilateur
- pompe et tour de réfrigération

gnes souterraines à haute tension puisqu'il y a très peu de liaisons et de kilomètres posés. Des données en provenance de l'étranger (CIGRE, EDF) permettent toutefois de donner les taux approximatifs de défaillance et d'indisponibilité suivants pour:

les câbles à huile 220 et 380 kV:

taux de défaillance:	1,25 défauts/ 100 km et an
durée moyenne d'indisponibilité:	250 heures
taux d'indisponibilité:	3,5%/100 km

les lignes aériennes:

taux de défaillance:	0,3 défauts/ 100 km et an
durée moyenne d'indisponibilité:	60 heures
taux d'indisponibilité:	0,2%/100 km

Il n'y a pas de valeurs connues pour les tubes blindés SF_6 puisqu'il n'existe aucune grande installation de ce type.

La durée moyenne d'indisponibilité pour les câbles est élevée puisqu'elle comprend le temps de recherche du défaut plus le temps de la réparation. L'expérience montre qu'environ un tiers des défauts dans les systèmes câblés est d'origine externe (intervention de tiers, mouvements de terrain, coups de foudre aux jonctions aéro-souterraines, etc.). Cette moindre fiabilité peut être améliorée par un plus grand maillage du réseau (augmentation du nombre de liaisons).

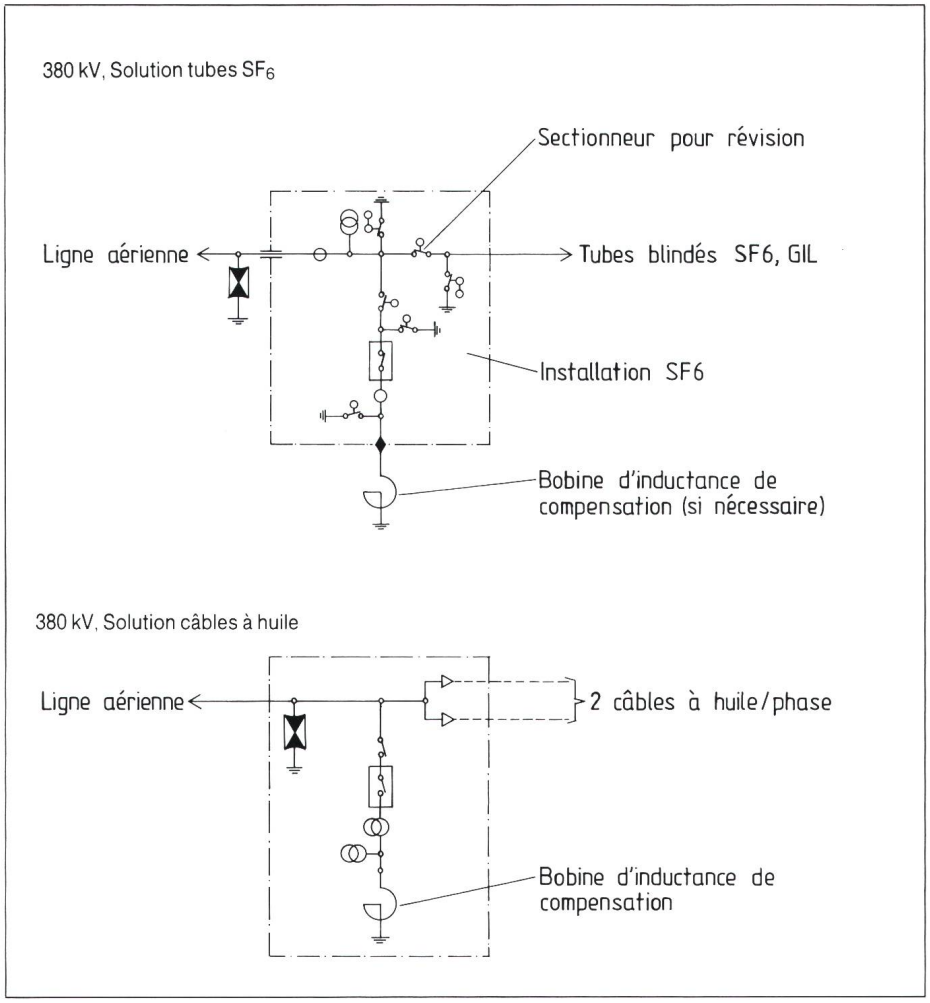


Figure 14 Schéma d'un poste de transition aéro-souterrain

3.4 Environnement

Ces dernières années, la protection de la nature est devenue un critère très important pour toute décision et autorisation de construire un ouvrage.

L'écologie étant l'étude des relations entre les organismes et leur milieu vivant (facteurs biologiques, parasites, influences humaines) et inanimé (climat, sol), il est nécessaire de considérer le problème dans son ensemble et de ne pas voir que l'aspect esthétique d'une construction.

Si, indiscutablement, une liaison souterraine est en grande partie cachée et de ce fait ne porte pas atteinte à l'esthétique du paysage, elle provoque une modification des structures du sol et un échauffement local. Il faut garder à l'esprit la faiblesse des câbles vis-à-vis d'évènements géologiques (secousse sismique, glissement de terrain, etc.) et les risques de pollution du sol par pertes d'huile ou de liquide réfrigérant.

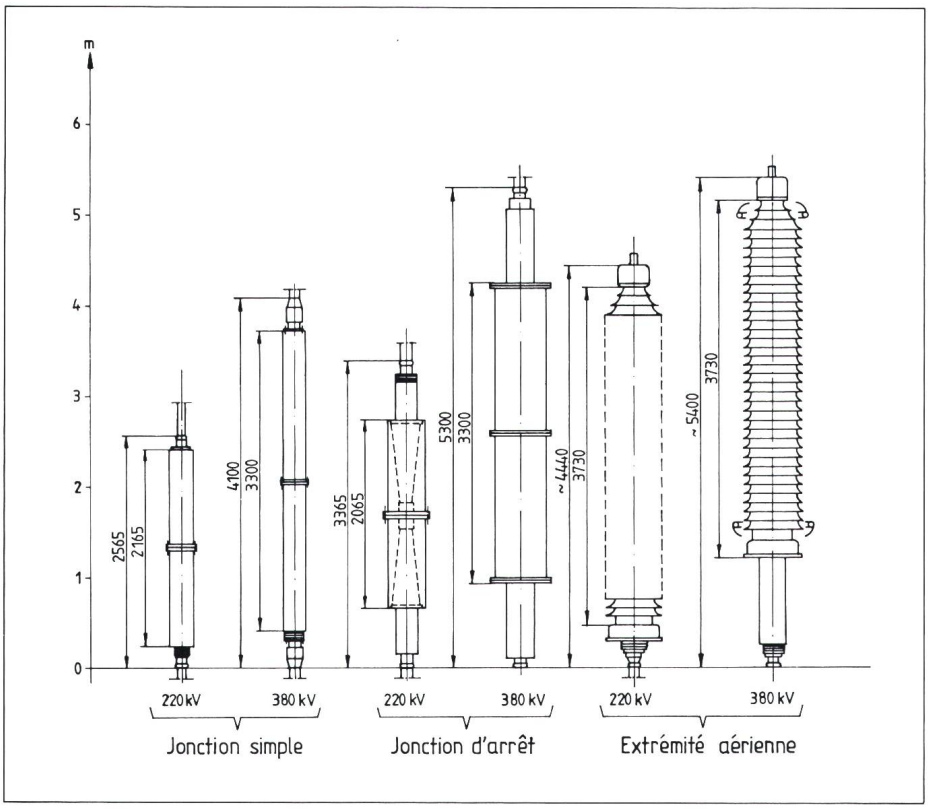


Figure 15 Dimension des accessoires des câbles 220 et 380 kV

3.5 Problèmes juridiques

Les problèmes juridiques augmentent avec la croissance des infrastructures. Le sous-sol abrite de multiples liaisons, que se soit à courant fort, de télécommunication, de télévision, gaz naturel, eau, chauffage à distance. Ce phénomène n'amène pas que des problèmes techniques, mais multiplie également les questions juridiques, et cela d'autant plus que ces liaisons souterraines doivent être inscrites sur les plans de cadastre. De plus, sur le domaine public, les servitudes de passage ne représentent pas, en général, de droits réels.

4. Aspects économiques

Afin d'apprécier avec une certaine précision les aspects économiques de liaisons souterraines, huit solutions d'installation de deux ternes ont été étudiées, soit:

Solution A: 110 kV câbles à isolation synthétique disposés en fourreau (bloc de tuyaux)

Solution B: 220 kV câbles à huile disposés en fourreau (bloc de tuyaux)

Solution C: 220 kV câbles à huile disposés en galerie

Solution D: 220 kV câbles à huile disposés en tunnel profond

Solution S2: 220 kV tubes SF_6 disposés en galerie

Solution E: 380 kV câbles à huile disposés en fourreau (bloc de tuyaux)

Solution F: 380 kV câbles à huile disposés en galerie

Solution G: 380 kV câbles à huile disposés en tunnel profond

Solution S3: 380 kV tubes SF_6 disposés en galerie.

Les figures 10, 11 et 12 représentent les profils correspondant à ces différentes variantes et la figure 13 les schémas d'installation des différentes solutions. Notons que pour les solutions C et F, les dimensions des galeries sont minimales, ce qui nuit à l'exploitation et à la sécurité du personnel.

Les coûts ont été devisés par des constructeurs suisses pour des liaisons-types de 5 et 50 km, puis ensuite comparés à ceux d'une ligne aérienne. Le tableau I résume les caractéristiques de ces liaisons et les tableaux II et III en donnent les coûts, ainsi que leur rapport avec une ligne aérienne de même capacité. Il en résulte que, pour 110 kV, le coût de la mise en souterrain est de 11 à 12 fois, pour 220 kV de 14 à 26 et pour 380 kV de 21 à 28 fois plus élevé que celui d'une ligne aérienne comparable.

4.1 Conditions géographiques et géologiques

Il est entendu que les coûts du génie civil dépendent en grande partie des difficultés locales, et les coûts indiqués correspondent à des conditions normales. Ceux-ci pourraient atteindre des valeurs beaucoup plus élevées en cas de difficultés éventuelles.

4.2 Installations de refroidissement

Pour les solutions A, B, C, S2 et F, le refroidissement naturel convient. Par contre pour la solution E, on prévoit un refroidissement par circulation d'eau glycolée parallèle aux câbles et pour les solutions D, G et S3 une ventilation. Il est entendu que d'autres systèmes de refroidissement peuvent être envisagés.

4.3 Installations de compensation

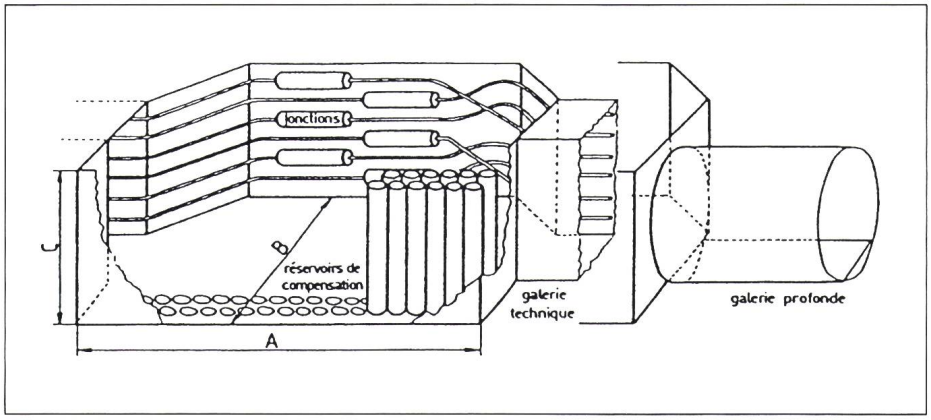
En-dessous d'une production de puissance réactive, à vide, de 90 MVAr, on a admis que la puissance réactive n'est pas compensée. Par contre au-dessus, il a été prévu une compensation totale par bobines d'inductance réparties régulièrement sur le tracé et déclenchables au besoin.

4.4 Installations de transition aéro-souterraines

Les postes des deux extrémités ont été inclus dans le calcul des coûts (voir schéma fig. 14).

4.5 Dimensionnement des installations

Toutes les installations annexes ont également été évaluées et chiffrées. Sur les figures 15 et 16 sont représentées les dimensions principales des accessoires



Jonctions simples

Genre de ligne		Type de tracé	A m	B m	C m	Cheminée d'accès	Remarques
110 kV	6×1× 800 mm²	bloc de tuyaux	7	2	2	2	
220 kV	12×1×1600 mm²	bloc de tuyaux	13	4	2,7	2	
	6×1×1000 mm²	galerie technique	25	2,2	2,7	2	
	6×1×1600 mm²	tunnel profond	∅ du tunnel				
380 kV	12×1×2000 mm²	bloc de tuyaux	30	4	2,8	4	mur de séparation
	12×1×2000 mm²	galerie technique	20	4	2,8	4	au milieu
	12×1×2000 mm²	tunnel profond	20	4	2,8	—	de la chambre

Jonctions d'arrêts

Genre de ligne		Type de tracé	A m	B m	C m	Cheminée d'accès	Remarques
220 kV	12×1×1600 mm²	bloc de tuyaux	24	6	2,7	2	
	6×1×1000 mm²	galerie technique	28	3,2	2,7	2	
	6×1×1600 mm²	tunnel profond	28	3,2	3	—	
380 kV	12×1×2000 mm²	bloc de tuyaux	30	6	4,8	4	mur de séparation
	12×1×2000 mm²	galerie technique	30	6	4,8	4	au milieu
	12×1×2000 mm²	tunnel profond	30	6	4,8	—	de la chambre

Figure 16 Chambre de jonction pour câbles 110, 220 et 380 kV

Tension nominale	kV	110	220				380			
Ligne souterraine Solution et mode de pose		A	B	C	D	S_2	E	F	G	S_3
Type de câbles		sec	à huile	à huile	à huile	tubes SF_6	à huile	à huile	à huile	tubes SF_6
Mode de pose en		fourreau	fourreau	galerie	tunnel	galerie	fourreau	galerie	tunnel	galerie
Refroidissement forcé avec circulation à		—	—	—	air	—	eau	—	air	air
Longueur de la liaison	km	5	5	5	4,2	5	5	5	4,2	5
Nombre et section de câbles monopolaires par phase	mm^2	1×800 Cu	2×1000 Cu	1×1000 Cu	1×1600 Cu	1×2375 Al	2×2000 Cu	2×1600 Cu	2×1600 Cu	1×2375 Al
Puissance réactive fournie à vide par les 2 ternes (* compensée)	MVAr	2×4,58	2×45,35*	2×22,68	2×22,25	2×4,95	2×136,9*	2×130,3*	2×109,45*	2×12,5
Courant max. par phase, en hiver	A	800		1250		3150		2500		3150
Capacité max. de transport des 2 ternes, en hiver	MVA	2×150		2×475		a)		2×1645		a)
Coût Câbles rendus posés	mio Fr.	7,8	21,5	11,0	12,5	39,0	58,8	45,2	40,0	47,0
Accessoires rendus posés	mio Fr.	0,4	5,0	3,6	3,5		8,3	11,0	10,0	
Total des câbles installés	mio Fr.	8,2	26,5	14,6	16,0	39,0	67,1	56,2	50,0	47,0
Génie civil	mio Fr.	7,1	10,1	29,3	26,6	30,0	13,7	42,1	42,7	43,5
Installation de refroidissement	mio Fr.	—	—	—	1,3	—	2,2	—	2,3	0,5
Aménagement aux 2 extrémités	mio Fr.	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Installation des bobines d'inductance	mio Fr.	—	4,0	—	—	—	8,0	8,0	8,0	—
Imprévus 15%	mio Fr.	2,5	6,4	6,9	6,9	10,6	14,1	16,4	15,9	14,1
Etudes, direction des trav. 9%	mio Fr.	1,7	4,4	4,8	4,8	7,3	9,7	11,3	11,0	9,8
Coût total pour les 2 ternes	mio Fr.	20	53	58	58	89	118	137	133	118
Ligne aérienne de même capacité de transport										
Coût total pour les 2 ternes sur 4,2 km	mio Fr.	1,7		3,4				5,00		
Rapport de prix: souterrain/aérien		12	16	17	17	26	24	27	27	24

Tableau II Comparaison des coûts approximatifs (prix 1987) pour des conditions favorables (terrain plat, accès facile) pour une liaison à 2 ternes de 5 km en ligne sinueuse ou de 4,2 km en ligne directe

a) Les tubes SF_6 permettent une capacité maximale plus élevée.

Tension nominale	kV	110	220				380			
Ligne souterraine Solution et mode de pose		A	B	C	D	S_2	E	F	G	S_3
Type de câbles		sec	à huile	à huile	à huile	tubes SF_6	à huile	à huile	à huile	tubes SF_6
Mode de pose en		fourreau	fourreau	galerie	tunnel	galerie	fourreau	galerie	tunnel	galerie
Refroidissement forcé avec circulation à		—	—	—	air	—	eau	—	air	air
Longueur de la liaison	km	50	50	50	42	50	50	50	42	50
Nombre et section de câbles monopolaires par phase	mm^2	1×800 Cu	2×1000 Cu	1×1000 Cu	1×1600 Cu	1×2375 Al	2×2000 Cu	2×1600 Cu	2×1600 Cu	1×2375 Al
Puissance réactive fournie à vide par les 2 ternes (* compensée)	MVAr	2×45,8	2×453,5	2×226,8	2×2225	2×49,5	2×1369	2×1303	2×1094	2×125
Courant max. par phase, en hiver	A	800		1250		3150		2500		3150
Capacité max. de transport des 2 ternes, en hiver	MVA	2×150		2×475		a)		2×1645		a)
Coût Câbles rendus posés	mio Fr.	77,7	214,8	109,8	124,0	340,0	588,0	451,8	379,5	420,0
Accessoires rendus posés	mio Fr.	3,6	49,7	36,6	31,8		88,0	115,0	96,6	
Total des câbles installés	mio Fr.	81,3	264,5	146,4	155,8	340,0	676,0	566,8	476,1	420,0
Génie civil	mio Fr.	64,2	93,1	282,6	268,2	290,0	125,4	406,3	435,8	419,5
Installation de refroidissement	mio Fr.	—	—	—	24,0	—	25,0	12,6	11,4	5,0
Aménagement aux 2 extrémités	mio Fr.	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Installation des bobines d'inductance	mio Fr.	4,0	32,0	24,0	24,5	4,0	60,0	60,0	61,5	8,0
Imprévus 15%	mio Fr.	22,6	58,7	68,2	71,2	95,4	133,4	157,3	148,2	128,3
Etudes, direction des trav. 9%	mio Fr.	15,6	40,5	47,0	49,1	65,8	92,1	108,5	102,2	88,5
Coût total pour les 2 ternes	mio Fr.	189	491	570	595	797	1115	1423	1238	1072
Ligne aérienne de même capacité de transport										
Coût total pour les 2 ternes sur 42 km	mio Fr.	17		34				50		
Rapport de prix: souterrain/aérien		11	14	17	17	23	22	28	25	21

Tableau III Comparaison des coûts approximatifs (prix 1987) pour des conditions favorables (terrain plat, accès facile) pour une liaison à 2 ternes de 50 km en ligne sinueuse ou de 42 km en ligne directe

a) Les tubes SF_6 permettent une capacité maximale plus élevée.

pour les câbles à huile, les chambres des boîtes de jonction avec les nombreux réservoirs à huile qui doivent y prendre place. De plus, les figures 17 et 18 représentent les emprises sur le terrain pendant la réalisation des travaux. La figure 1 donne une représentation d'un poste de transition aéro-souterrain à 2 ternes 380 kV.

5. Résumé et conclusions

5.1 Résumé

Le réseau de transport à très haute tension suisse (tension 220 et 380 kV) représenté à la figure 19 est presque exclusivement constitué de lignes aériennes (voir tabl. IV).

Bien qu'il soit aujourd'hui possible de construire en Suisse des câbles conventionnels ou des tubes blindés SF_6 pour la tension de 380 kV, seules quelques liaisons souterraines de très courte distance sont réalisées, et ce seulement en extrémité de réseau. Les lignes aériennes restent la seule solution valable pour des grandes liaisons d'interconnexion.

Cette conclusion s'impose si l'on tient compte des éléments importants suivants:

- les caractéristiques techniques, qui mettent en évidence les avantages de la ligne aérienne;
- l'exploitation, où on constate pour les câbles une fiabilité plus faible, une longue indisponibilité en cas de défaut, la difficulté de surveiller le système et la complexité de la technologie;
- l'environnement, qui serait affecté par le passage de câbles pour des raisons d'échauffement ou de risques de fuite, ainsi que par l'ampleur et la durée du chantier;
- l'aspect économique, d'où il ressort que dans tous les cas la solution

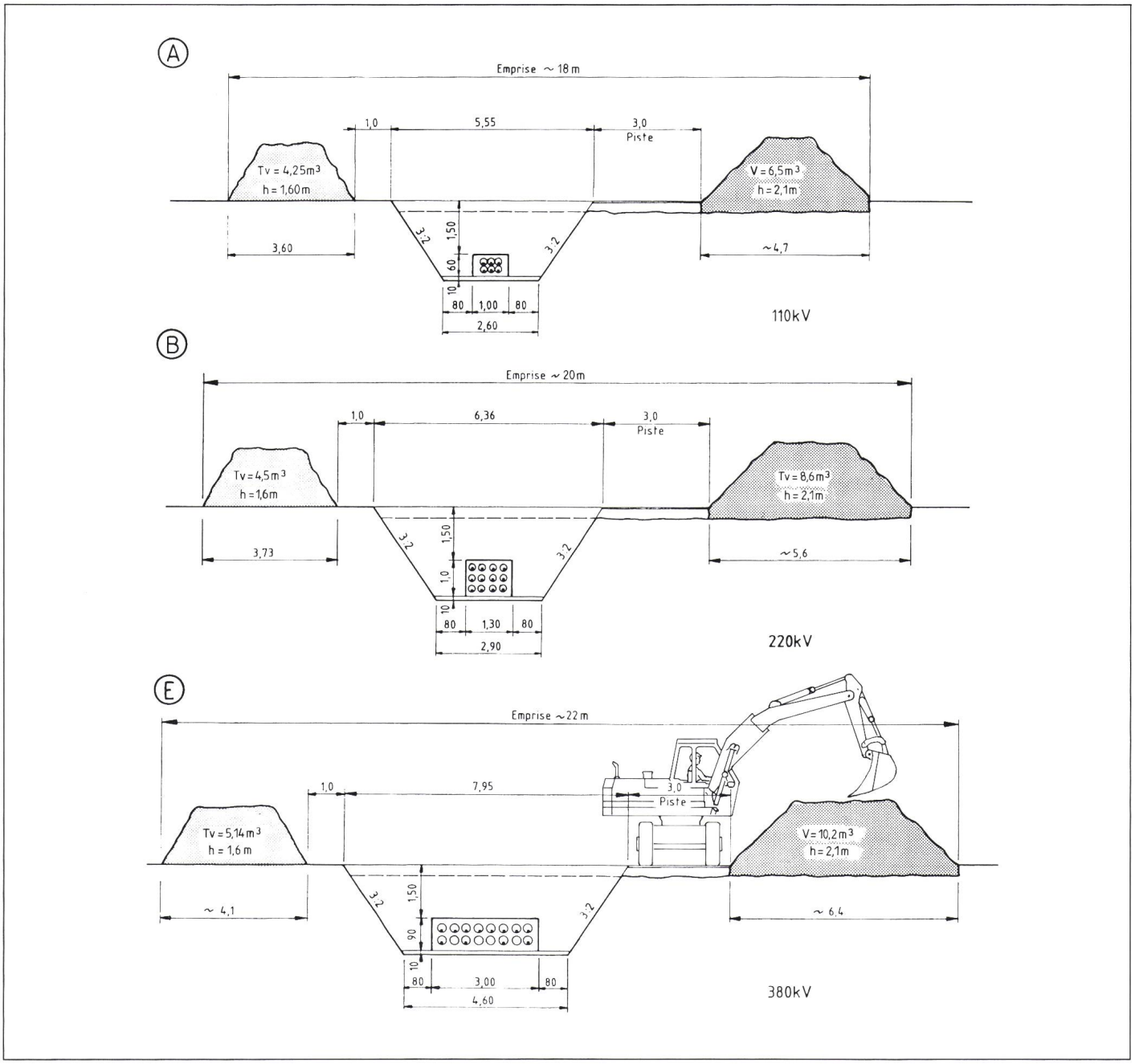


Figure 17 Emprise pendant les travaux des solutions en fourreau

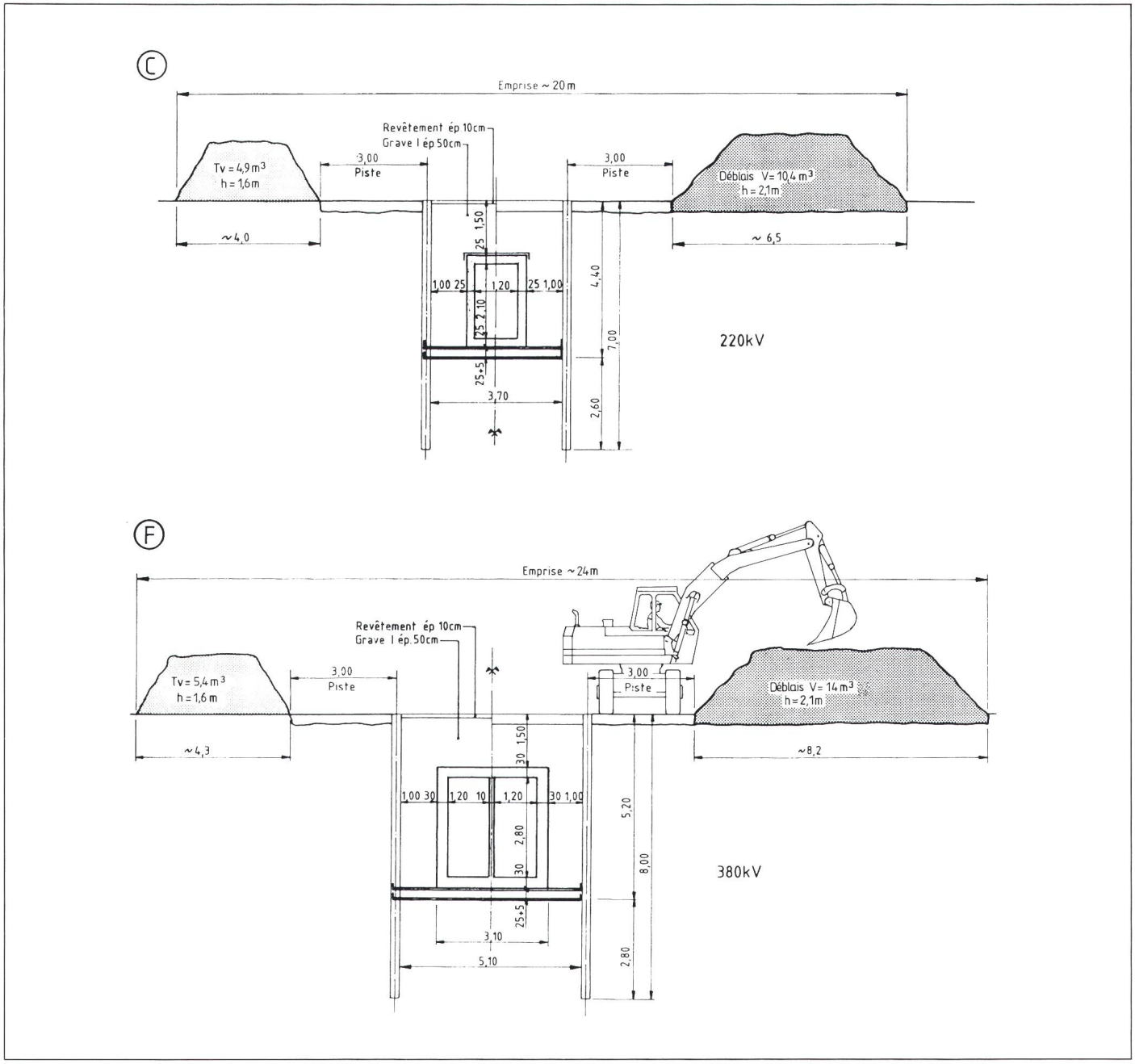


Figure 18 Emprise pendant les travaux des solutions en galerie

souterraine est nettement plus chère que la ligne aérienne, ce qui a une incidence directe sur le coût de l'énergie distribuée.

5.2 Domaine d'utilisation des câbles

Dans les grandes villes suisses, l'utilisation de câbles jusqu'à une tension de 150 kV est une technique connue et souvent utilisée. Par contre, il est impensable d'envisager la mise en souterrain du réseau d'interconnexion (en

Longueur des ternes exploités en 220 kV		5116,9 km
dont ternes en aérien	5093,9 km	
ternes construits pour 380 kV	843,5 km	
ternes en câbles souterrains	23,0 km	
Longueur des ternes exploités en 380 kV		1171,1 km
dont ternes en câbles souterrains	0 km	
Total longueur des ternes 220 + 380 kV		6288 km

Tableau IV Longueur du réseau suisse 220 et 380 kV (Etat 1987)

Remarques:

- Valeurs obtenues par sommation des lignes en exploitation au 1.8.1987
- D'autres longueurs de câbles souterrains 220 kV ne faisant pas partie du réseau, sont installées à la sortie d'usines de production.

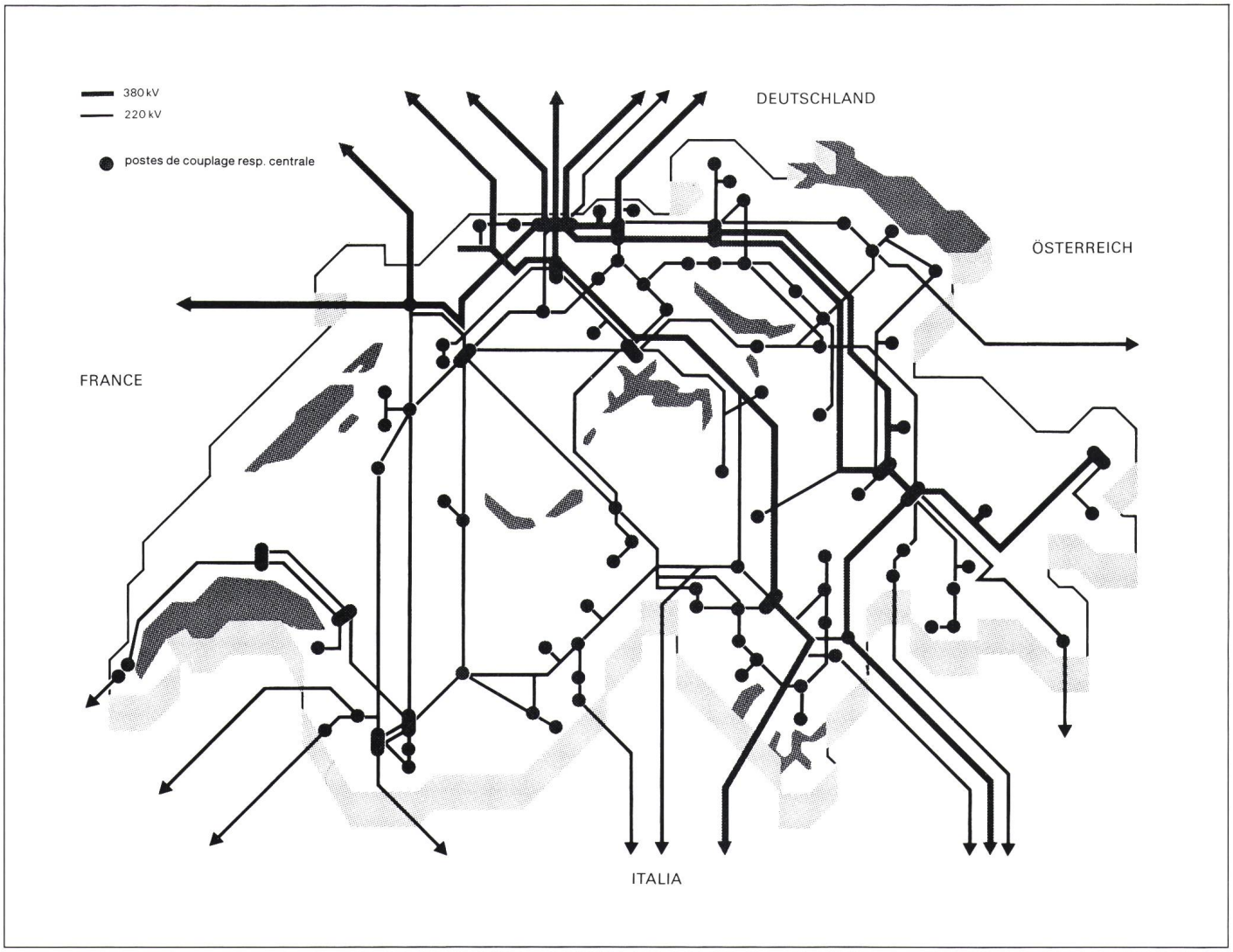


Figure 19 Réseau suisse 220 et 380 kV
(Etat au 1er janvier 1988)

Suisse, tension de 220 et 380 kV). Pour de multiples raisons évoquées ci-dessus, cette solution apparaît aujourd'hui comme utopique.

La réalisation souterraine de lignes à très haute tension peut seulement être envisagée sérieusement en bout de ligne pour alimenter des postes situés au cœur des localités (zones de forte densité de population) ou pour évacuer l'énergie produite dans des centrales souterraines.

5.3 Conclusions

Dans toute décision pour ou contre la mise en souterrain de lignes aériennes, nouvelles ou existantes, il est nécessaire d'apprécier la sécurité, la qualité et le coût économique de l'alimentation en électricité par rapport aux exigences de la protection du paysage. Il faut rappeler la mission des entreprises électriques qui est entre autres de fournir l'énergie nécessaire au pays aux meilleures conditions possibles, tout surcoût étant supporté par la collectivité. Les autorités compétentes doivent, lors de la procédure d'autorisation, comparer des critères techniques quantifiables avec des critères subjectifs d'environnement. Comme le soulignent également toutes les dernières décisions officielles à ce sujet, la sécurité d'alimentation en énergie électrique joue un rôle décisif pour le bon fonctionnement de l'économie nationale.

Bibliographie

[1] Verkabelung von Höchstspannungsleitungen, Bulletin SEV/VSE, Nr. 4, 1979.

[2] Verkabelung von Hochspannungsleitungen, Eidg. Kommission für elektrische Anlagen, Bern 1987.

[3] *H. Schweizer:* Gutachten über die Überprüfung der Frage von Verkabelungen der Höchstspannungsleitungen der Reihe 220 kV/380 kV in bezug auf ihre ökologische und optische Auswirkung auf die Landschaft, insbesondere im Alpenraum, Wien 1986.

[4] Beeinflussung der Umwelt durch elektromagnetische Felder. Eidg. Kommission für elektrische Anlagen, Bern 1986.

[5] Freileitung oder Kabel?, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H., Frankfurt a.M. 1987.

[6] Elektrizitätsübertragung und Landschaftsschutz/Transport de l'énergie électrique et protection du paysage, Eidg. Departement des Innern, Bern 1980.

[7] Elektrische Hochleistungsübertragung und -verteilung in Verdichtungsräumen, Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V., Mannheim.

[8] Effets sur l'environnement des champs électriques à proximité des lignes à très haute tension, Conseil Economique et Social de l'ONU, EP/GE/R.72, 1987.

[9] Extremely Low Frequency Fields - Environmental Criteria 35, World Health Organization, Genève 1984.

[10] *G. Mainka:* Berechnung der Belastbarkeit integralgekühlter Einleiter-Energiekabel. Bull. SEV/VSE 71(1980) S. 686.

[11] *B.W. Weber:* Kabelfehler in elektrischen Netzen. Bull. SEV/VSE 72(1981) S. 219.

[12] *E. Schaffer:* Die Wegleitung über Elektrizitätsübertragung und Landschaftsschutz. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 149.

[13] Die Höchstspannungsanlagen im Wiener Netz; ÖZE, 7/8, 1982.

[14] *H. Nyffenegger:* Berechnung der Erdwärme und zulässigen Belastung von Hochspannungs-Polymerkabeln mittels Taschenrechnern. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 425.

[15] *W. Hofmann:* Das längsgeschweisste Kupferwellrohr als Ummantelung von Ölkabeln. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 793.

[16] *H. Brakelmann und H.-G. Dabringhaus:* Bestimmung der Wechselstromverluste und Impedanzbeläge von Hochspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 796.

[17] *M. Fischer:* Energieübertragung und Kabeltechnik. Bull SEV/VSE 73(1982) S. 1267.

[18] *B. Capol:* Kabeltypen und ihre Eigenschaften. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 1273.

[19] *B. Schmidt:* Kabelherstellung, Zubehör und Installationstechnik. Bull. SEV/VSE 73/(1982) S. 1279.

[20] *A. Meier:* Kabel und Freileitung im System. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 1283.

[21] *H. Glavitsch:* Schutz von Kabelanlagen. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 1288.

[22] *P.-A. Chamorel, P. Blech, M. Ianovici, B. Schädeli:* Berechnung der gegenseitigen elektromagnetischen Beeinflussung von Kabeln. Bull. SEV/VSE 76(1985) S. 218.

[23] *E. Sarbach:* Die äussere Leitschicht bei Kunststoffkabeln. Bull. SEV/VSE 76(1985) S. 236.

[24] *U. Adolph:* Anlaufverhalten des Kühlwassers in Kabeln mit Eigenkühlung. Bull. SEV/VSE 76(1985) S. 754.

[25] *U. Beyer:* Transiente Kabelerwärmung bei zyklischer Belastung. Bull. SEV/VSE 77(1986) S. 251.

[26] Freileitungen und ihre Bewertung als Umweltfaktor, Bulletin SEV/VSE 73(1986).

[27] *E. Sarbach, D.W. Lee:* Messung der Vernetzungsdichte an isolierten Leitungen, speziell mit Infrarot-Spektroskopie. Bull. SEV/VSE 77(1986) S. 762.

[28] *H. Brakelmann:* Kabelbelastbarkeit als Funktion der Tageslastgang-Kennlinie. Bull. SEV/VSE 77(1986) S. 767.

[29] Câbles secs 400 kV: les premières réalisations mondiales, Revue générale d'électricité n° 7(1986).

[30] *E. Sarbach:* XLPE und EPR/EPDM für Kabelisolationen. Bull. SEV/VSE 74(1983)13, S. 706...710.

[31] *W.J. Borer:* Vernetzte 110-kV-Polymerkabel. Bull. SEV/VSE 74(1983)21, S. 1225...1228.

[32] *W. Zaengl:* Grundlagen der Kabel-Isolierstoffe. Bull. SEV/VSE 74(1983)24, S. 1394...1403.

[33] *A. Brechbühler:* Computergestütztes Erfassen und Auswerten der thermischen Belastung eines städtischen Verteilnetzes. Bull. SEV/VSE 74(1983)24, S. 1422...1425.

[34] *G. Hülsken, W. Rasquin:* Eigenkühlung - eine neue Kühlart von Kabeln. Bull. SEV/VSE 75(1984)5, S. 260...265.

[35] *J. Artbauer:* Hochspannungskabel mit SF_6-Isolierung. Elektrizitätswirtschaft (1982), S. 21.

[36] *L. Deschamps e.a.:* Liaison par câbles à isolant gazeux comprimé en service dans le monde, Electra N° 94, mai 1984.

[37] *M.P.Gazzana-Prieroggia:* Calcul de la résistance thermique externe effective des câbles posés dans des milieux ayant diverses résistivités thermiques, Electra N° 98, janvier 1985.

[38] *S. Minemura e.a.:* Développement technique et exploitation des câbles souterrains pour le transport de grandes puissances au Japon. CIGRE 1980, 21-03.

[39] *W. Boone* et *G.M.L.M. Van de Wiel:* Essais in situ de câbles à 400 kV à refroidissement latéral. CIGRE 1982, 21-03.

[40] *C.A. Arkell, D.J.Skipper* et *W. Holdup:* Amélioration des liaisons par câbles à pression interne d'huile fluide. CIGRE 1982, 21-06.

[41] *R.G. Foxall, K. Bjørløw-Larsen* et *G. Brazzi:* Etudes, fabrication et pose d'une liaison par câbles sous-marins à 525 kV alternatif entre le continent canadien et l'île de Vancouver. CIGRE 1984, 21-04.

[42] *J.H. Künisch:* Câble de transport d'énergie à grande puissance, refroidi par le conducteur. Résultat d'un essai de longue durée à Berlin-Ouest. CIGRE 1984, 21-08.

[43] *L. Rebuffat e.a.:* Installation de câbles d'énergie sous-marins dans des conditions d'environnement difficiles. Expérience de la liaison 400 kV de Messine. CIGRE 1984, 21-10.

[44] Supertension cables for transmission of large power
Part A: Present state-of-the-art
Part B: Considerations on the near future.
CIGRE Symposium 1985, 230-04, 230-05.

[45] *B.R. Schmidt:* Rapport spécial du groupe «Câbles à haute tension». CIGRE 1986, 21-00.

[46] *R. Arrighi:* Caractéristiques fonctionnelles des câbles isolés à haute tension, de grande longueur. CIGRE 1986, 21-13.

[47] *E.M. Allam, J.H. Cooper, J.F. Simshock:* Développement et essais de longue durée d'un câble oléostatique 765 kV à faibles pertes. CIGRE 1986, 21-06.

[48] *R.J. Van Alst, A.M.F.J. Van de Laar, P.P. Leufkens:* Contraintes thermomécaniques dans les câbles à haute tension extrudés. Rapport CIGRE 21-07, 1986.

[49] *H. Dam-Andersen, J. Jorgensen, D.K. Nielsen, S.H. Poulsen:* Conception, fabrication et pose de câbles au PRC Danemark. Rapport CIGRE 21-08, 1986.

[50] *R. Jocteur, E. Favrie, H. Auclair, B. Dhuicq:* Développement des liaisons 400 kV isolées au polyéthylène basse densité. CIGRE 21-09, 1986

[51] *M. Aguet, J. Besson, D. Bezançon, e.a.:* Comportement et maintenance préventive de câbles à haute tension. Rapport CIGRE 21-10, 1986.

[52] *G.M. Lanfranconi, B. Vecellio:* Câbles à huile ininflammable. Rapport CIGRE 21-11, 1986.

[53] *R. Arrighi:* Rapport présenté au nom du Comité d'Etudes 21 (Câbles isolés à haute tension). Caractéristiques fonctionnelles des câbles isolés à haute tension de grande longueur. CIGRE 21-13, 1986.

[54] *K. Harasawa, A. Tsuchida, T. Motomura, H. Fukagawa:* Etudes sur l'application des câbles 275 kV au PRC aux lignes de transport souterrain d'énergie à grande distance au Japon. CIGRE 21-03, 1986.

[55] *S.H. Lee, K.M. Han, W.K. Park:* Développement et installation de câbles d'énergie à haute tension isolés au PRC en Corée. CIGRE 21-04, 1986.

[57] *R.J. Arnold, A. Homer, B. Riot:* Réparation des câbles IFA sur le fond. CIGRE 21-05, 1986.

[58] Comparison of AC and DC Underground and Submarine cable transmission systems. CIGRE Symposium 1987.

[59] Pose de câbles souterrains et sous-marins. Ecole supérieure d'électricité, Gif-sur-Yvette, Journées d'étude des 4 et 5 février 1987.

Annexe: Catalogue des questions et leurs conséquences

1. Questions électrotechniques

Il importe tout d'abord de différencier les liaisons suivant leur importance dans le réseau (interconnexion, antenne, etc.).

Problèmes de mise en parallèle de lignes aériennes et souterraines, répartition des puissances, élaboration d'un concept général de réseau:

Câble: le système câblé doit être dimensionné dès le début pour la plus grande charge possible. Toutefois, un système de refroidissement peut être mis en service lorsque les conditions l'exigent.

SF_6: la puissance transmissible dans les tubes SF_6 est très élevée (courant nominal: 4000 à 6000 A) et peut être augmentée relativement facilement (ventilation du canal, arrosage de la gaine).

Importante production de puissance réactive par les liaisons souterraines:

Ceci diminue la capacité de transport de puissance active. Le problème est moins sensible pour les tubes SF_6 (production de réactif pour des liaisons à 380 kV: câble env. 26 MVar/km, SF_6 env. 2,5 MVar/km, lignes aériennes env. 0,55 MVar/km). Il peut être nécessaire de compenser l'excédent de puissance réactive avec des bobines d'inductances (self) en dérivation ou des machines tournantes! Ces installations sont coûteuses et volumineuses.

Transmission à fréquence porteuse possible avec certaines restrictions sur des liaisons souterraines:

Eléments d'adaptation nécessaires dans ce cas ou transfert d'informations par d'autres moyens (fibres optiques).

Difficulté de surveillance de la qualité de l'isolement caractérisée par une valeur de tangente delta:

Câble: la sécurité peut être garantie en renouvelant prématurément les câbles dont la qualité d'isolation se dégrade ou en augmentant la réserve.

SF_6: la densité du gaz est déterminante pour la qualité de l'isolement et doit être mesurée en permanence sur toute la longueur de la liaison.

Problèmes liés à la capacité de charge:

Câble: l'isolation est sensible à l'échauffement car elle conduit mal la chaleur. Il faut utiliser des sections de conducteur suffisamment grandes.
Suivant le mode de pose, l'influence des caractéristiques du sol conditionne le dimensionnement et la capacité de transport des câbles. Ceux-ci sont dimensionnés pour les conditions les plus défavorables; l'assèchement du sol doit être surveillé en raison du risque d'apparition de points chauds le long d'un conducteur.

SF_6: Le gaz est insensible à l'échauffement et conduit bien la chaleur au tube extérieur.

Courant de court-circuit élevé:

Ceci est dû à la faible inductivité des câbles; ces courants ne doivent toutefois pas dépasser une valeur fixée pour les raisons suivantes:

- densité de courant dans le conducteur et la gaine,
- échauffement de l'isolation,
- efforts dynamiques.

On peut limiter artificiellement le courant de court-circuit ou dimensionner l'installation en conséquence; le courant de court-circuit peut être limité par l'introduction de bobines d'inductances en série (problème de tension, coûteux) ou en débouclant le réseau (problème de sécurité).

Pertes dans les gaines de câble:

Ces pertes sont de trois types: courants induits, courants de Foucault et pertes par hytérésis.

Par permutation cyclique des liaisons de gaines (méthode «Cross-bonding»), on interrompt la continuité électrique de celles-ci. L'installation doit être isolée et munie de parasurtensions spéciaux.

Problème de surtension aux transitions lignes-câbles par effet de réflexion d'onde due aux impédances différentes:

Installation de parafoudres nécessaire.

Problèmes de répartition de la charge:

La grande capacité de transport nécessite en général plusieurs câbles en parallèle:

- le courant de court-circuit doit pouvoir être supporté par chaque câble
- le courant réactif augmente d'autant
- l'induction mutuelle influence la répartition de la charge. Il y a lieu de permuter les phases.

Dans le cas des installations SF_6, la capacité de transport des tubes SF_6 rend superflue la pose de plusieurs conducteurs en parallèle par phase.

Problème de protection:

Ce problème se pose en particulier lorsqu'il y a alternance de tronçons aériens et souterrains dans une même ligne:
Cette inhomogénéité oblige à chercher des solutions particulières, complexes.

Problèmes liés au choix du type de câble, au mode de pose, aux accessoires nécessaires (jonctions, extrémités de câbles):

Il faut considérer différents critères tels que l'importance de la liaison, les contraintes d'environnement, la place à disposition, etc.

Problèmes posés par l'existence de câbles BT ou de télécommunications parallèles à la ligne:

Risques d'influences indésirables lors de perturbations et de manœuvres.

2. Questions de technique de construction (Génie civil)

Importants travaux de projet:
Nécessité de faire des sondages et des fouilles pour déterminer les caractéristiques du sol (composition, transmission de chaleur, eau, stabilité) et le choix du tracé:
Besoin de personnel qualifié et coût d'étude élevé.

Problèmes de choix du tracé:
Routes, cours d'eau, forêts, etc.; géologie; accès; dénivellation; croisement d'obstacles de surface ou souterrains (canalisations, constructions). Tracé plus long, coût plus élevé, impacts plus grands.

Modification du réseau d'eau souterrain pendant le chantier:
Abaissement du niveau de la nappe phréatique éventuellement nécessaire pendant les travaux. Possibilité d'impact durable sur le système hydraulique souterrain.

Place prise par les éléments de construction importants:
Ces installations doivent être accessibles (chambre de jonctions, système de refroidissement, postes aérosouterrains, installations de compensation).

Impact d'importants travaux de terrassement sur des chantiers d'accès difficile aux machines.

Direction de chantier plus complexe:
Coordination des différentes phases avec d'autres chantiers (délais à respecter) et avancement des travaux dépendant des conditions extérieures (éviter trop de dégâts aux cultures, difficulté de travailler en hiver, surprises éventuelles en cours de travaux).

Impact des différents modes de pose:
Les différents modes de pose (en fourreau, en canal de surface ou profond) ainsi que les obstacles rencontrés influencent fortement l'impact sur le terrain et les coûts. La pose en tunnel interdit toute modification ultérieure de tracé.

Constructions dépendantes du type de câble:
Les câbles à huile nécessitent des canaux et des bacs de rétention pour des raisons de protection de l'environnement.

3. Questions d'exploitation

Installation complexe avec beaucoup d'accessoires:
Nécessite une surveillance et une maintenance accrue, risque de panne plus élevé.

Difficulté de réglage des relais de protection, sélectivité réduite, réenclenchement interdit.

Surveillance périodique du tracé:
Personnel de surveillance pour l'entretien des galeries de visite (conditions de travail difficiles).

Localisation de défaut ou de fuite dans l'isolant (huile ou gaz):
Câble: difficile, particulièrement lorsque l'anomalie n'est pas franche; demande du temps pendant lequel la liaison est indisponible; risque, suite à un nouvel incident, de ne plus assurer la livraison de l'énergie.
SF_6: le système de surveillance des tubes permet de mieux déterminer l'endroit du défaut.

Courant d'enclenchement lors de la mise sous tension à vide:
Câble: prévoir des protections particulières.
SF_6: nettement plus faible que pour les câbles à huile; ne nécessite pas de mesures particulières.

Mise hors service de câbles peu chargés:
Elle est nécessaire pour réduire la charge réactive (pratiquement pas nécessaire pour les réalisations au SF_6:
Diminue la sécurité d'exploitation.

Corrosion et destruction accidentelle de la surface extérieure des câbles et des tubes de refroidissement:
Câble: mesures de protection contre la corrosion, par exemple protection cathodique.
SF_6: tube extérieur résistant, éventuellement peinture protectrice.

Dégâts suite aux vibrations et à la dilatation.

Exploitation délicate des parafoudres basses tensions (destruction par claquage difficile à expliquer).

Nécessité d'augmenter la section à cause de surcharges éventuelles:
Investissement important et entretien.

Difficulté de définir précisément la charge nominale:
Elle dépend de la qualité du sol et du mode de pose. Pour une pose en fourreau, l'installation doit être surdimensionnée, dans les autres cas, la charge dépend de la température de l'air dans la galerie; obligation de réfrigérer l'air en été. Pertes d'énergie.

Indisponibilité due à l'activité de tiers:
Soit par des dégâts à l'installation lors de travaux à proximité (risques d'accidents graves), soit parce que l'installation doit être mise hors service par précaution:
Prévoir suffisamment de réserve dans le réseau.

Réparations longues et difficiles, travail délicat de spécialistes, sécurité du travail (mise à terre du chantier):
Développement de concepts de réparation et stock suffisant de matériel de réserve, réserve de câble aussi longue que le plus long tronçon installé.

Niveau du plan de tension du réseau difficile à respecter; contrôle de synchronisme entravé.

Inductances de compensation dispendieuses et délicates à exploiter:
Instabilité des alternateurs s'il n'y a pas assez de compensation (régime sous-excité des groupes) ou phénomènes de résonance possibles entre les selfs et la ligne aérienne.

Moins bonne disponibilité:
Bien qu'une installation souterraine soit moins sensible aux intempéries ou aux coups de foudre, la longue période hors service pour localiser un défaut et pour le réparer fait qu'un système câblé est moins disponible qu'une ligne aérienne.

4. Questions d'environnement

Pertes énergétiques du câble transmises à l'environnement sous forme de chaleur (problème spécialement important pour une pose en fourreau):

Dessèchement du sol et perturbations du système biologique local (faune et flore) qui exige des conditions de température et d'humidité données.

Modification de la structure du sol par la pose de câbles (destruction et mélange des couches):

Modification du réseau d'eau souterrain, perturbation de l'espace vital de tous les biotopes dans la région du tracé.

Problèmes graves en cas de phénomènes géologiques tels que tremblements de terre, glissements de terrain, affaissements:

Il faut éviter les régions géologiquement instables, ce qui rallonge le tracé.

Risque de pollution par perte d'huile et de liquide réfrigérant:

Risque évident pour les câbles à huile. Les câbles à isolation synthétique ou les tubes blindés SF_6 suppriment le risque de pertes d'huile.

Champs électromagnétiques:

Si les champs électriques sont négligeables, les champs magnétiques restent importants. Mais selon les connaissances actuelles, il n'y a guère d'influence néfaste des champs électromagnétiques dus aux câbles sur l'environnement.

Importante surface de terrain occupée:

Bien que la ligne soit souterraine, elle nécessite d'importantes installations de surface telles que:

- postes aéro-souterrains,
- postes de compensation,
- installation de systèmes de refroidissement.

Longues périodes de chantier:

Les gros travaux et leur durée perturbent l'environnement pendant une longue durée:

- bruit
- transports lourds
- déplacements de terre
- atteinte aux cultures.

5. Questions juridiques

De nombreuses procédures juridiques doivent être entreprises avant de pouvoir commencer les travaux. Ces procédures sont longues, difficiles et généralement fort coûteuses (honoraires, achat de droits et terrains, expropriations):

- Limitation du droit de construire sur le tracé.
- Obtention de droits de passage et servitudes.
- Inscription au registre foncier (obligatoire pour tous les tronçons puisque l'installation n'est pas visible).
- Les tracés sur terrain public ne sont généralement pas protégés par des droits réels.
- Croisement avec d'autres installations souterraines et constructions particulières à entreprendre (succession des servitudes).
- Responsabilité civile vis-à-vis de tiers (par exemple en cas de pollution par fuite d'huile).
- Droit d'utiliser des chemins privés pour la construction et l'entretien de la ligne, problèmes lors de remaniement parcellaire (éventuellement obligation d'achat de terrain).
- Problèmes de droit international supplémentaires posés par les liaisons internationales souterraines.