

# tunnel gousselerbiere



- plan de situation
- description de l'ouvrage
- géologie
- classes d'excavation
- phasage des travaux
- équipements techniques

vers ettelbrück

Mersch

Front d'attaque

Gousselerange

Lintgen

tunnel gousselerbiere

TUNNEL GOUSSELERBIERE  
2595 m

Front d'attaque

Lorentzweiler

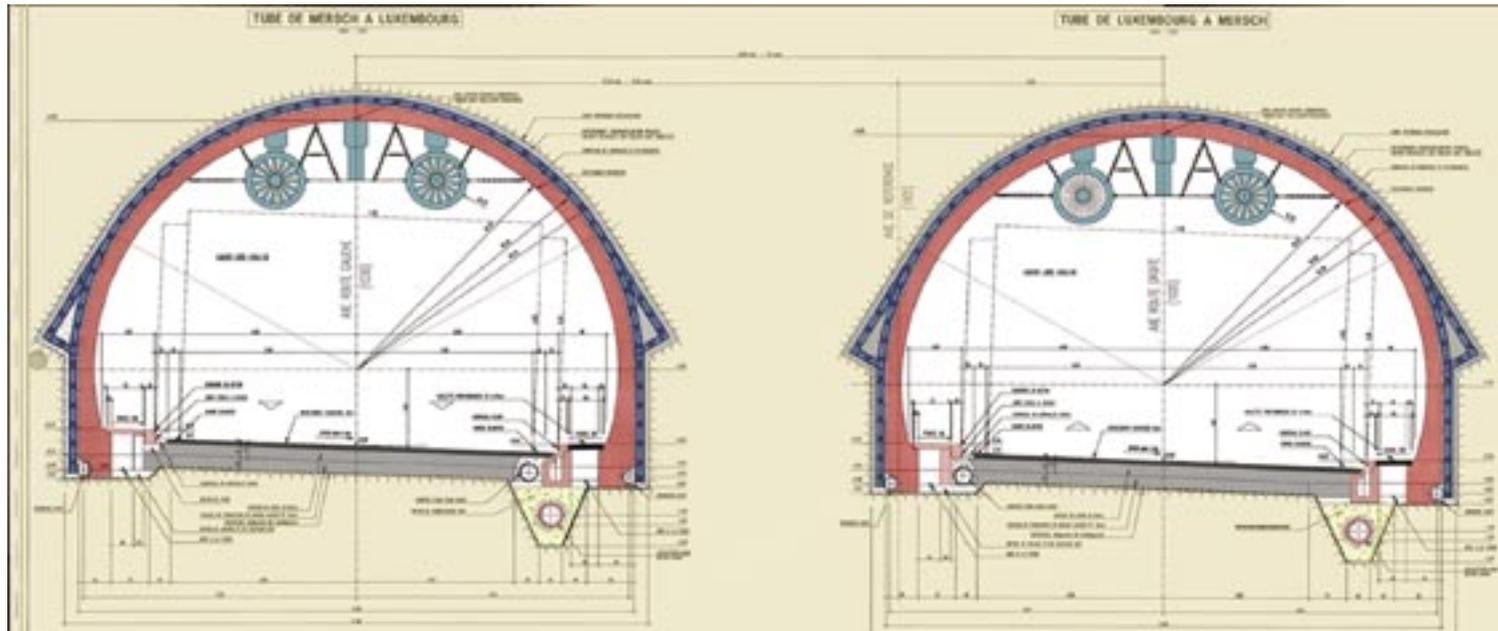
an de

vers luxembourg

tunnel gousselerbiere

# les ouvrages tunnel gousselerbierng

## descriptif



Le "Tunnel Gousselerbierng" est composé de deux tubes pratiquement parallèles dont chacun a une longueur de 2695 m en souterrain (PK 11030 au PK 13725).

Il relie la "Vallée de l'Alzette" au sud à la "Vallée de la Mamer" au nord.

En élévation, le tunnel monte avec une pente maximale de 0,5 resp. 0,75% à partir des deux portails, le point haut se situant au PK 11917. En "Vallée de la Mamer", l'entrée en galerie des deux tubes se fait sur deux niveaux différents.

En plan, le tunnel décrit une double courbe de rayons principaux  $r = 1650$  m, resp.  $r = 1000$  m qui s'aligne au tracé à ciel ouvert vers Luxembourg au sud et vers Mersch au nord.

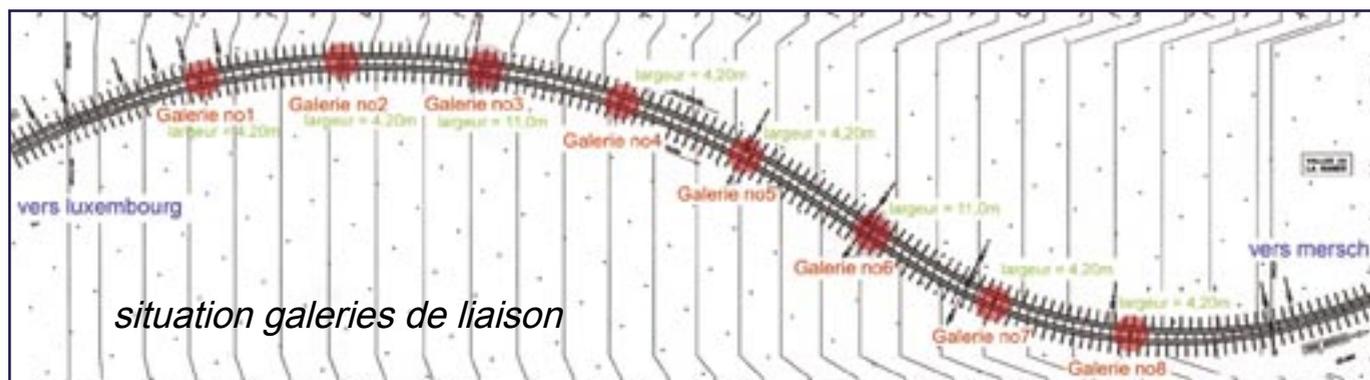
Le dévers max. est de 3,75 % dans les deux tubes.

A l'endroit des portails, l'entredistance axe-axe des deux tubes varie d'un minimum de 16 m pour atteindre 25 m en section courante, l'écartement se faisant en éventail sur environ 300 m.

La couverture en rocher sur le tunnel est variable, entre un minimum de 3 à 4 m dans les zones des fronts d'attaque et un maximum de quelque 115 m.

Pratiquement sur toute sa longueur, le tunnel passe sous des forêts et des champs. Exception faite de la localité de Gosseldange, il n'y a pas d'immeubles ou d'habitations dans sa zone d'influence directe.

Huit galeries transversales relient les deux tubes, celles aux PK 11930 et 12825 étant spécialement conçues pour un passage facile aux véhicules de secours et de service. Ces galeries sont combinées avec des locaux techniques abritant des installations électro-mécaniques.



plan de situation avec  
installations de chantier  
et décharges

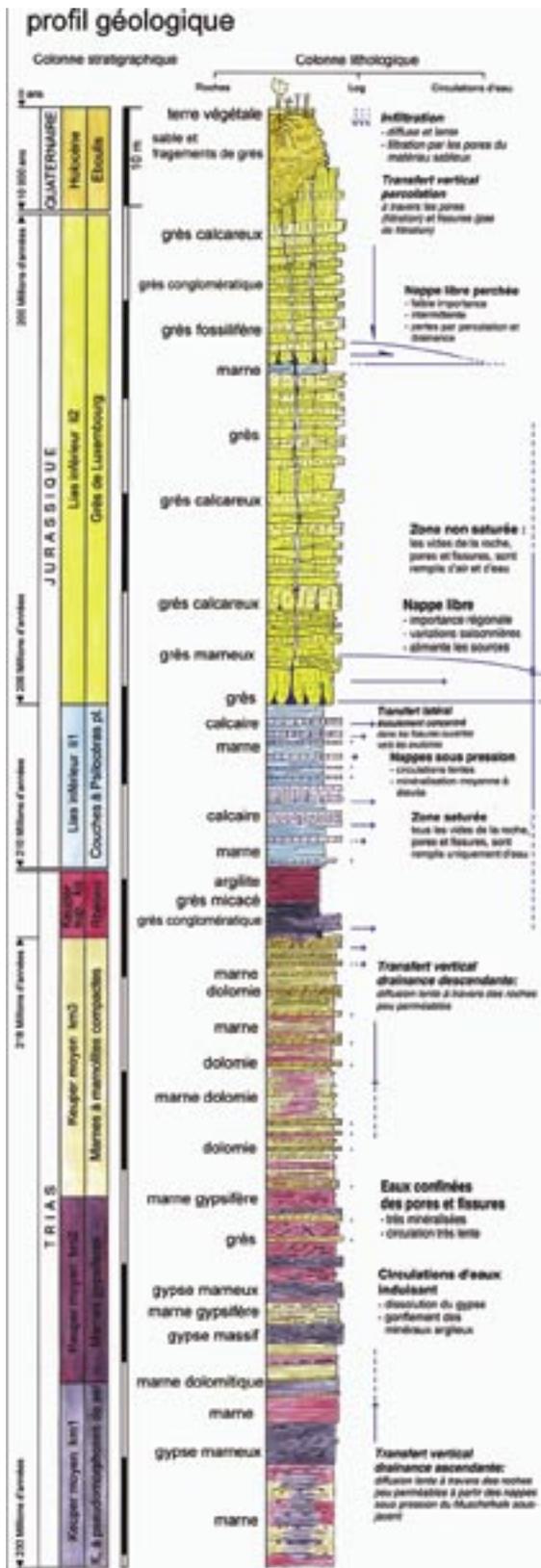
## Caractéristiques et volumes principaux du tunnel :

- Longueur d'excavation:	2 x	2.695 m
- Largeur de la chaussée:		7 m
- Largeur utile des tunnels:		10 m
- Pente longitudinale:		max. 0,75 %
- Profil-type d'excavation:		72,39 à 76,15 m <sup>2</sup> en section courante
- Volume total d'excavation: (non foisonné et sans hors-profils)		420.000 m <sup>3</sup>
- Volume du béton de revêtement: (avec béton des hors-profils estimés)		59.000 m <sup>3</sup>
- Volume du béton projeté de l'anneau extérieur (soutènement): (avec béton d'égalisation estimé)		32.000 m <sup>3</sup>
- Etanchéité des tunnels:	:	122.000 m <sup>2</sup>

La section d'excavation théorique en section courante varie, selon les classes respectives, de 72,39 m<sup>2</sup> à 76,16 m<sup>2</sup>.



installation de chantier  
entrée nord



Le massif du «Gousselerbiérg» est constitué sur le plateau et dans sa partie supérieure par la formation gréseuse du Lias inférieur (Grès de Luxembourg, li2 de la carte géologique). Dans sa partie inférieure il est formé par les roches du Keuper moyen (km3 et km2). Entre le Grès liasique et le Keuper s'observent les unités des couches à Psil. planorbis (li1), épaisses d'une quinzaine de mètres, et les argilites et grès du Rhétien (ko), épais de quelques mètres. Le Grès de Luxembourg présente une épaisseur d'environ 80 mètres, il est perméable à l'eau et renferme une nappe d'eau importante qui alimente de nombreuses sources émergeant à sa base peu perméable, formée par les premiers niveaux marneux du li1. Les eaux peuvent percoler de manière diffuse dans la couverture meuble du versant et s'infiltrer localement dans des diaclases ou zones de failles.

Le tracé du tunnel est d'orientation générale nord-sud et recoupe les formations essentiellement marneuses du Keuper. La disposition des couches est sub-horizontale ou à faible pendage, généralement inférieur à 5 degrés. Quelques failles de faible rejet et d'orientation est-ouest ou sud-ouest nord-est recoupent le massif en lui conférant une structure en "horst et graben". Les plans de failles sont redressés. Il est possible que certaines des cassures construites sur base de la reconnaissance géologique préliminaire correspondent à des zones de flexure, marquées par des pentes localement plus raides, ou à de légères ondulations.

Les couches traversées par le tunnel sont constituées dans leur partie supérieure par des marnes et marnes dolomitiques bariolées rouges et vertes et des intercalations de niveaux dolomitiques d'épaisseur décimétrique à métrique (Keuper à Marnolithes compactes, km3). Dans les marnes du Keuper, la fraction carbonatée est toujours dolomitique, la calcite ne s'observe que sous forme de cristallisations secondaires. L'épaisseur de cette unité marno-dolomitique est d'environ 30 mètres. Sous-jacente à cet ensemble, on observe la série des marnes gypsifères (km2). La limite de formation a été établie sur base lithologique par l'apparition des premiers niveaux ou d'amas gypsifères inclus dans la marna. Le gypse s'y présente soit sous forme finement disséminée, soit en bancs massifs formés de gypse et d'anhydrite, les plus épais ayant été exploités en carrière souterraine à quelques kilomètres au sud du site du tunnel. Localement, la roche marneuse est traversée par des filonets irréguliers de gypse fibreux secondaire. Il est possible que les proportions de gypse secondaire augmentent dans les zones de failles.

Des diaclases orthogonales, verticales et généralement colmatées recoupent le massif. Leur écartement est généralement plurimétrique à décimétrique, il est plus serré dans les versants en bordure du plateau. Un deuxième réseau de diaclases affecte les différents niveaux rocheux individuellement. L'intensité et les écartements de ces diaclases varient avec l'épaisseur des bancs et leur compétence. Les bancs durs dolomitiques sont caractérisés par des fractures pouvant être ouvertes en zone d'altération.

pas colmatées par des minéralisations secondaires, peuvent être largement supérieures à celles rencontrées dans les zones non dérangées. On peut admettre que les zones de failles ont des extensions latérales de plusieurs mètres.

Les formations marneuses traversées sont, tout comme la couverture des argilites du Rhétien (ko) et les marnes du li1, peu perméables à l'eau et ne contiennent pas de nappe d'eau souterraine exploitable. Les bancs dolomitiques (ou les bancs calcareux ou gréseux de la couverture) présentent une perméabilité qui est en fonction de leur degré de fracturation. Ils peuvent contenir de petites nappes d'eau, légèrement sous pression et donc être à l'origine de faibles venues d'eau. La perméabilité horizontale, selon les plans de stratification, est normalement supérieure à la perméabilité verticale, des diaclases importantes ou des zones de failles peuvent cependant être à l'origine de situations particulières. Les marnes sont sensibles à l'eau et leur altération est prononcée au contact direct avec les bancs et niveaux perméables.

Le tracé du tunnel est subdivisé en 3 secteurs dont les propriétés techniques sont schématisées ci-dessous :

Secteur 1 : Zones d'entrée et de sortie du tunnel dans la vallée de la Mamer et de l'Alzette, formées de roches marneuses du Keuper, caractérisées par un degré d'altération variable, intense à proximité de la surface et diminuant progressivement vers l'intérieur du massif. L'extension de l'altération est influencée par les grandes diaclases verticales et par les circulations d'eau latérales (faibles) sur les bancs dolomitiques et gypsifères.

Secteur 2 : Zone du Keuper marno-dolomitique, constituée stratigraphiquement par l'unité du Keuper à Marnolithes compactes (km3) et formée de marnes et marnes dolomitiques avec des intercalations de niveaux dolomitiques.

Secteur 3 : Zone des marnes gypsifères (km2) caractérisée par la présence de gypere et d'anhydrite en bancs, amas ou filonets.

Un phénomène particulier auquel on doit s'attendre, du moins lors de la traversée des niveaux supérieurs des marnes gypsifères (Km2), est celui du gonflement, phénomène qui peut être des plus spectaculaires. Ainsi p.ex. le Kappelisbergtunnel à Baden-Württemberg, ouvrage creusé dans des formations géologiques similaires aux nôtres, a pris depuis sa mise en service en 1887 quelque 4,70 m de dénivelé. Au 'Tunnel Markusbiérg', sur l'autoroute de Sarre, on avait affaire, à l'interface Km2-Km3, à des soulèvements fort heureusement locaux - la zone concernée ne s'étendait en fait que sur une trentaine de mètres - atteignant les 100 cm. Les pressions de gonflement y dépassaient les 50 to/m2, ce qui représente une force à maîtriser correspondant à une colonne d'eau de 50 m de haut! Il est sûr que le phénomène est dû à la présence d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) dans le massif. Il est sûr aussi qu'il est intimement lié à la circulation d'eau dans le massif (Ton- / Anhydritquellen).

Beaucoup d'aspects de ce type de gonflement, qu'il ne faut surtout pas confondre avec un gonflement de la seule phase argileuse d'un rocher (Tonquellen) ou qui est dû à la présence de pyrite (phénomène thermo-chimique), ne sont cependant pas connus et il existe toute une panoplie de théories divergentes, voire complètement contradictoires sur le sujet (cf. Prof. Kovari: 'Travaux souterrains dans des roches gonflantes', mars 2001, ETH Zürich-Office Fédéral des Routes). Ce qui revient à dire qu'il faut à chaque fois résoudre un problème spécifique se déroulant dans un environnement naturel particulier, nécessitant à chaque fois une démarche rigoureusement adaptée à la situation.

Contrairement à ce d'aucuns peuvent d'ailleurs penser, les dégâts liés à des gonflements sont de loin plus importants que ceux liés à des tassements, du moins sur une échelle mondiale. Il est cependant fort probable que le Grand-Duché n'échappe pas à cette statistique.

## classes d'excavation

### classes d'excavation

L'importance et le lieu de mise en place du soutènement sont seuls déterminants pour l'attribution des classes d'excavation.

On distingue les classes d'excavation (CE) suivantes:

- CE I:

Les travaux de soutènement ne provoquent qu'une perturbation insignifiante du rythme de l'excavation.

- CE II:

Les travaux de soutènement provoquent une légère perturbation du rythme de l'excavation.

- CE III:

Les travaux de soutènement provoquent une perturbation notable du rythme de l'excavation.

- CE IV :

Les travaux de soutènement provoquent une interruption du rythme de l'excavation (soutènement immédiat après chaque étape d'excavation).

- CE V :

Les travaux de soutènement interviennent en parallèle avec l'avancement. L'étaillage du front ou le soutènement à l'avancement est nécessaire.

Pour les élargissements locaux ou les niches, on adoptera les mêmes classes d'excavation que pour l'avancement principal. Cette règle s'applique pour des excavations supplémentaires réalisées à l'avancement ou ultérieurement.

# tunnel gousseleberbiereg

phasage des travaux



# travaux préparatoires



phasage des **travaux**

## travaux préparatoires

Le "tunnel Gousselerbiere" sera obligatoirement creusé à partir des deux portails de la "Vallée de l'Alzette" et de la "Vallée de la Mamer", en opérant sur quatre fronts ce qui nécessite deux différentes installations de chantiers à chaque extrémité du tunnel. Avant les travaux de creusement propres, des travaux préparatoires devront être réalisés, tels que les chemins d'accès, des plateformes pour les bureaux et ateliers. Même si ces deux petits villages ne sont que provisoires, ils doivent toutefois garantir le bon déroulement des travaux, pendant 4 à 5 ans.

### Les installations de chantier

Etant donné que les activités de creusement et de soutènement provisoires du tunnel ne peuvent être interrompues à aucun moment pour des raisons de sécurité, le chantier travaille jour et nuit, sur trois postes, exceptés les week-end et les jours fériés.

De ce fait, les installations doivent impérativement assurer l'approvisionnement en continu des différents matériaux nécessaires, tels béton projeté, cintres etc...

Outre des bureaux, ces installations consistent principalement en des zones de stockages des matériaux de construction et des déblais. Elles comprennent également un magasin, des locaux pour les mineurs, un atelier de maintenance des engins, une centrale à béton et une centrale de traitement des eaux polluées.



installation de chantier  
entrée sud  
vallée de l'alzette



installation de chantier  
entrée nord  
vallée de la mamer

# travaux préparatoires

## tunnel gousselerbierg



installation de chantier  
entrée nord  
vallée de la mamer



installations de chantier

chaque installation de chantier comprend:

- routes d'accès
- plateforme
- place d'atterrissage pour hélicoptère
- bureaux de la Direction des travaux
- bureaux de l'entreprise
- vestiaires et sanitaires
- locaux de séjour des ouvriers
- infirmerie
- pavillon d'information (vallée Alzette)
- centrale à béton
- parc des engins
- dépôts, hangars et ateliers
- bassins de rétention et de décantations
- équipement de nettoyage des roues
- décharge intermédiaire de dépôts
- poste de transformation de 20 kvolts / 380 volts / 800 kVa
- poste de transformation de 20 kvolts / 380volts / 630 kVa /400 kVa
- 2 compresseurs électriques fixes pour air comprimé, insonorisés, ainsi que 2 cuves à air comprimé de min. 5000 litres/unité

Principe de ventilation et de dépoussiérage du tunnel.

Le but est d'assurer le meilleur confort aux mineurs: un ventilateur aspirateur à front afin d'évacuer l'ensemble des pollutions produites.

Le ventilateur est placé à front sur une charpente métallique, qui permet de l'avancer sans difficulté.

pelle hydraulique	- 180 à 200 cv - godet rocher 1 à 3 dents - brise roche BRV32
robot hydraulique	- pompe à béton électrique 15 à 20 m <sup>3</sup> /h - réservoir et pompe à adjuvant - bras articulé de projection - porteur à moteur thermique
érecteur de cintres	- pince de préhension - nacelle - chariot élévateur
matériel de forage	- bras universel rotation 360° - marteau rotopercutant à précision contrôlée
chargeuse	- puissance: 155 cv - capacité du godet: 2400 litres
camions type chantier	- capacité: ~16 m <sup>3</sup> puissance 260 cv
foreuse pour trous de 18 m sur porteur autonome	
nacelle élévatrice pour avancement et servitudes	
compresseur	15 m <sup>3</sup> /h



L'ensemble du matériel à moteur thermique entrant dans le souterrain sera équipé d'un système d'épuration des gaz d'échappement.

# excavation



phasage des travaux

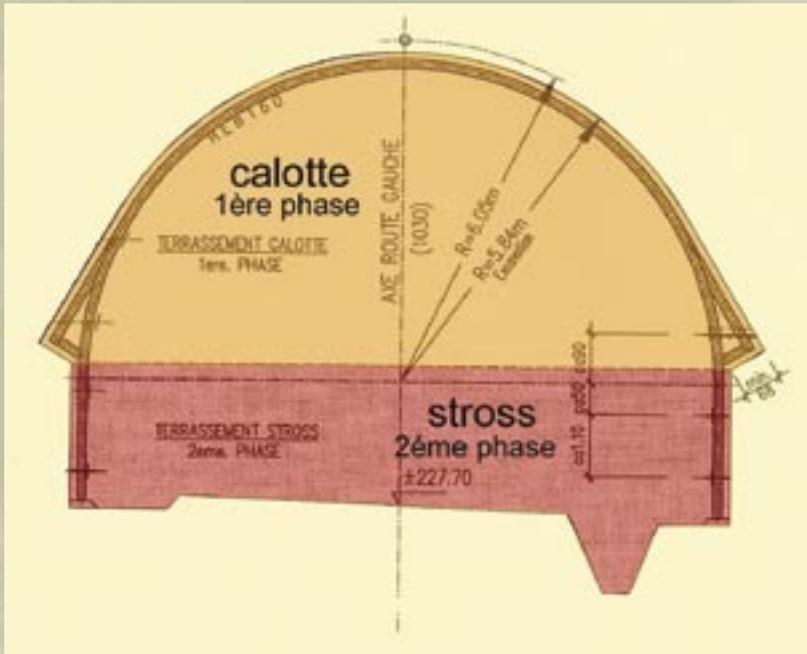
tunnel gousseleberberq

# phase 2

## le creusement

# les ouvrages

## tunnel gousselerbiERG



Le creusement d'un tunnel consiste en trois phases principales: l'abattage, le marinage et le confortement provisoire de la galerie et du front.

L'abattage du rocher au 'Tunnel GousselerbiERG' peut se faire en principe par des moyens mécaniques ou par minage.

Ce sont plutôt des critères économiques que techniques qui dictent la façon de procéder. En effet, normalement une excavation mécanique par pelles lourdes associées à des brise-roches hydrauliques est plus économique qu'une excavation au minage, pour autant que le cycle d'abattage ne devienne excessivement long, soit qu'il n'excède pas les 5 à 6 heures. Dès que ce seuil est atteint, un abattage par minage devient plus rentable et s'impose. Ceci s'explique plus particulièrement, en sachant que le chantier du 'Tunnel GousselerbiERG' emploie constamment plus de cent personnes, soit qu'une heure de travail 'non-productif' coûte cher, voire très

cher. En outre, des cycles d'abattage excessivement longs et pénibles entraînent automatiquement des frais accrus d'usure, d'entretien et de réparation des machines.

### excavation par moyens mécaniques

Selon la cohésion et la résistance du terrain, le déroctage s'effectue soit avec une pelle mécanique munie d'une brise-roche hydraulique, soit par une excavatrice spéciale avec bras court renforcé et orientable, munie d'un godet spécial à trois dents.

Le volume maximal possible à excaver en une passe dépend de la nature de la roche. Il faut garantir une surface d'excavation stable par elle-même durant le temps nécessaire à la mise en oeuvre du soutènement provisoire.

Le produit de marinage est chargé par une chargeuse sur pneumatiques sur des camions.



# excavation par minage

## excavation par minage

Il n'y a guère de procédé dans le domaine du génie civil, ayant fait de tels progrès techniques au cours des dernières années, que le minage. En effet, le travail le plus onéreux, c'est-à-dire le forage des trous de mines - une volée en pleine section requiert le forage d'environ 116 trous d'un diamètre de 45 à 152 mm atteignant une profondeur jusqu'à concurrence de 4,00 m maximum - se fait de nos jours, et sur le chantier du 'Tunnel Gousselerbiere' en particulier, au moyen de vrais robots mécanisés appelés 'jumbos de forage', qui réalisent plusieurs trous simultanément suivant un schéma préprogrammé. La vitesse de forage atteint les 3 mètres par minute. Ce qui constitue manifestement un progrès non-négligeable, en considérant que du temps de la construction du grand tunnel du 'St. Gotthard', soit au début du siècle, les perforations se faisaient encore à la main.



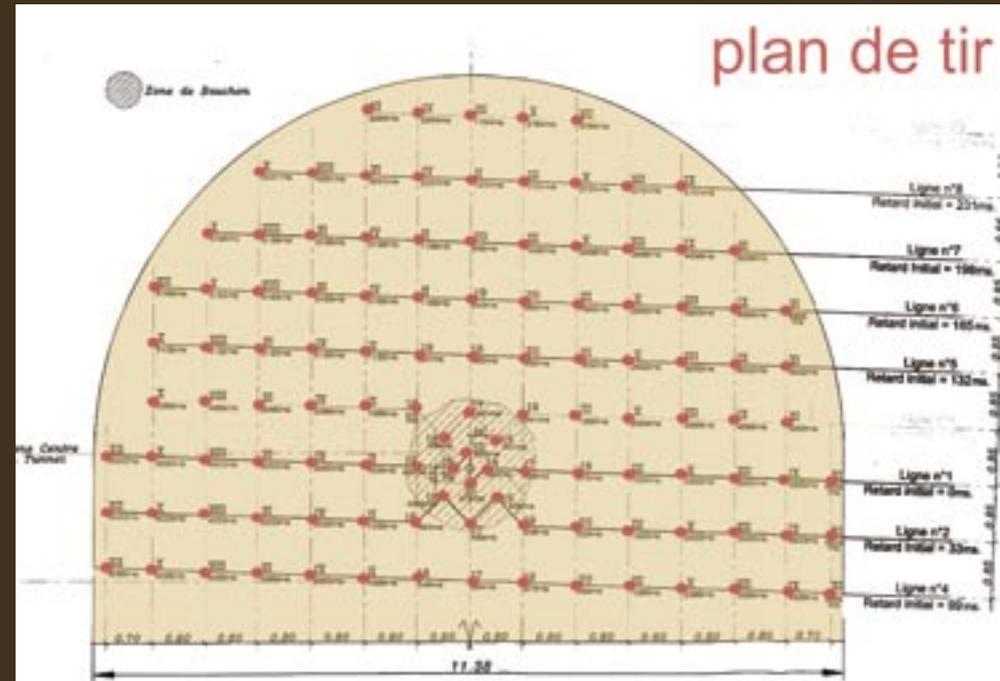
Pour abattre une volée d'environ 4 m, il faut allumer quelque 300 kg d'explosif. Celui-ci se présente sous forme d'émulsion, encartouchée dans des étuis, contenant chacun 0,625 kg d'explosif et disposés à raison de 4 à 5 pièces dans chaque trou de mine. L'ensemble des cartouches équipées de détonateurs de haute intensité électrique est relié par un circuit. Le mode de mise en feu est du type séquentiel.

Sans ce système de mise en feu et avec la quantité d'explosif d'un seul abattage, soit environ 300 kg, on pourrait mettre en ruine les immeubles limitrophes au chantier.

En effet, les vibrations produites par les tirs de mine se propagent dans le sol et peuvent, lorsqu'elles sont trop intenses, excéder localement la résistance des structures et conduire à l'apparition de fissures.



# les ouvrages tunnel gousselerbiereg excavation par minage



Pour éviter ce phénomène, on met à profit le fait que la vitesse particulière maximale d'une vibration - critère prépondérant de son effet nocif sur les constructions - ne dépend que de la quantité d'explosif mis à feu simultanément, c'est-à-dire lors d'une même série à micro-retard, et non pas de la totalité de la charge de la volée.

Dans le cas du 'Tunnel Gousselerbiereg', l'abattage total s'étend ainsi sur plus de 5.000 millisecondes, avec une charge unitaire maximum de seulement 3,125 kg. Donc en clair: Les 400 kg d'explosif d'une volée sont mis à feu de telle sorte que leur effet équivaut à celui d'une charge de 3,125 kg seulement. Pour ce réaliser, il faut bien sûr mettre en place un dispositif de mise à feu et des détonateurs de très haute précision et d'une grande fiabilité qui s'allument jusqu'à la 25/1000 seconde près.

Pour illustrer l'effet d'une détonation: Prenons à titre d'exemple une maison située à 100 mètres de cette détonation. Si on allumait les 400 kg d'une volée en même temps, il y aurait lieu de s'attendre à une vitesse particulière de quelque 80 mm/s, soit, la maison tomberait purement et simplement en miettes. Avec le système sophistiqué mis en place, cette vitesse particulière n'atteint pas les 3 mm/s, effet d'une vibration qui ne nuirait même pas à des constructions outre mesure sensibles, telles que p.ex. un monument protégé.



## excavation par minage

Notons à ce propos qu'un tunnel d'approvisionnement du fameux château 'Neuschwanstein' du roi Louis II en Bavière a été récemment abattu par minage, sans mécompte et sans que la moindre fissure ne soit apparue dans la construction.

Les préjugés d'aucuns vis-à-vis du minage, le qualifiant comme une méthode brutale, sont dévoilés comme faux et même contre-productifs: Des terrassements à l'explosif - par exemple dans le grès de Luxembourg - pour autant qu'ils soient bien planifiés et judicieusement exécutés, provoqueraient à coup sûr moins de nuisances aux bâtiments et aux humains qu'un terrassement au brise-roches hydraulique. Pensons seulement aux bruits fatigants que peut causer un tel terrassement pendant des mois et des mois.

## marinage

### le marinage

Par marinage, on entend le chargement du marin - rocher abattu en souterrain - et son transport hors du tunnel. Rien qu'en souterrain il y a lieu, au 'Tunnel Gousselerbiérg', de déplacer quelque 450.000 m<sup>3</sup> de roches et de les évacuer en due forme sur les déponies 'Schwunnendall' et 'Mierscherbiérg', préalablement aménagées, déponies de matériaux complètement inertes, renaturées après les





phasage des travaux



soutènement  
provisoire

## soutènement provisoire le soutènement provisoire

Si l'on enlève un appui à un objet, cet objet se renverse. Il en est de même de la construction d'un tunnel, puisque les matériaux enlevés lors d'un abattage constituaient en quelque sorte l'appui de la montagne. Cet appui manquant, il faut donc le remplacer par quelque chose d'équivalent, si on ne veut pas que la galerie se referme aussi vite qu'on l'a ouverte. On peut aussi parler, à ce moment là, d'un écoulement. Vilain mot

Or, la statique classique nous apprend qu'il y a lieu de faire le compte des charges supportées qu'il faut judicieusement dévier et fonder sagement sur le soubassement. Dans le cas d'un tunnel, les charges supportées équivalent au poids des terres sur le toit de la galerie. Pour le 'Tunnel Gousselerbiere' et les 100 m de sa couverture maximale, il faut localement maîtriser pas moins de 12.000 tonnes si on procède à un abattage de 4 mètres dans un tube seulement.

Cette charge n'est certes pas négligeable - à titre de comparaison, un pont est dimensionné pour une charge maximale de 120 tonnes, donc 1 % seulement des charges dont est question ci-avant - et suivant les principes de la statique classique, il faudrait, pour retenir ces forces, couler à chaque fois, derrière chaque excavation, une voûte en béton armé hautement résistant, d'une épaisseur d'un mètre au moins. Ce qui prolongerait le délai de construction actuellement prévu du 'Tunnel Gousselerbiere' de quelque 5 années, sans parler des coûts qu'il faudrait alors multiplier par deux.

Or, on ne met en place qu'un béton non-armé, mais fibré, d'une épaisseur de 15 cm au plus (cf. annexe). D'après les principes de la statique classique, le tunnel devrait donc s'écrouler purement et simplement. Ce qui n'est, fort heureusement, pas le cas. Quelle est l'explication ?

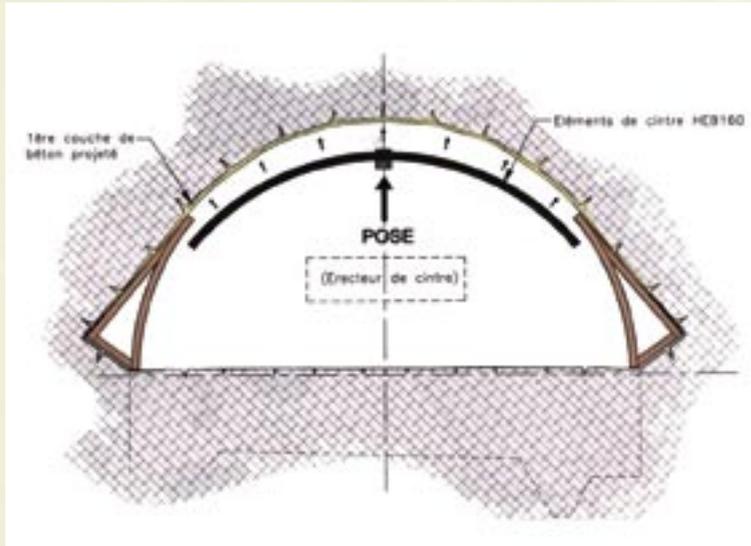
Elle réside dans l'application au 'Tunnel Gousselerbiere' d'une méthode de construction issue de réflexions rigoureusement appliquées - plutôt que d'une théorie nouvelle - mise au point dans les années 1960 par des gens comme Pacher, Müller-Salzburg et Rabcewicz, connue depuis lors sous le nom de NOT (Neue Österreichische Tunnelbauweise)



# Le soutènement provisoire

tunnel gousselerbiere

## soutènement provisoire



Cette façon de procéder prend son essor dans les années 1970 avec la construction des grands tunnels 'Tauern' et 'Arlberg'.

La NÖT consiste à considérer le substratum encaissant, non seulement comme charge à porter (facteur négatif), mais comme élément, comme matériau de construction essentiel (facteur positif). De surcroît, tout le monde peut s'en apercevoir, une force appliquée entraîne toujours une déformation

Or, d'après les principes de la NÖT, il n'y a pas lieu d'interdire toutes ces déformations induites par les poussées du massif, mais de les limiter; les limites étant imposées par la résistance, le potentiel de travail des matériaux, donc du substratum rocheux. Ici encore, tout un chacun peut concevoir qu'on peut déformer chaque

chose jusqu'au moment où elle se casse. Donc en clair : le soutènement provisoire doit être mis en place en quantité suffisante au bon moment : ni trop tôt (alors on retient inutilement des forces que la montagne pourrait encaisser et, partant, on gaspille les deniers publics) ni trop tard (alors on induit à la montagne des forces qu'elle ne peut pas supporter et, partant, le tunnel s'écroule).

Il ressort de ce qui précède que le facteur temps devient outre mesure important dans l'application du soutènement. Il y a lieu de ne pas manquer le moment opportun. Pour satisfaire cette exigence, il faut avoir à disposition les matériaux et le matériel adéquat : Ainsi par exemple il n'est guère concevable, qu'après un abattage, on commence à ériger un coffrage, à mettre en place des armatures et à couler tranquillement du béton. Au tunnel 'Gousselerbiere' le béton est appliqué par projection, donc sans coffrage, au moyen de guniteuses robotisées. De surcroît, le béton n'est pas armé, mais on y adjoint des fibres métalliques de quelques centimètres de long seulement. Ces fibres augmentent considérablement le potentiel de travail, donc la déformabilité du béton, alors qu'un béton normal se casserait sans signe précurseur. Ainsi on a maîtrisé, sans apparition de fissures intempestives, des déformations jusqu'à concurrence de 15cm.



2000 11 13

# les ouvrages tunnel gousselerbiereg soutènement provisoire

Le soutènement présente les caractéristiques suivantes:

- protéger le terrain découvert de l'altération contre l'action de l'air et de l'eau,
- être mis en oeuvre immédiatement et faire corps avec le terrain.
- être composé d'éléments composites et maniables (boulons, cintres, béton projeté) pour pouvoir être modifié facilement selon les conditions rencontrées et selon les mesures de comportement réel du terrain.

La mise en place du soutènement s'effectue en deux étapes:

1. une première phase de soutènement consiste à soutenir et mettre en sécurité la zone critique d'avancement du front
2. la seconde phase complémentaire est définie hors zone critique et selon le comportement de la première étape.

Composition du soutènement afin d'obtenir une coque continue régulière:

1. première couche de béton projeté fibré (épaisseur de 5 à 10 cm).

Le béton projeté est appliqué directement après l'excavation, ceci pour empêcher des chutes éventuelles de pierres et une stabilisation primaire de l'excavation.

L'équipe-type de soutènement est composée de 6 hommes, en particulier du conducteur de boulonneurs et du robot de projection. Elle travaille en 3 postes de 8 heures.

Après mise en place du soutènement, l'excavation reprend. D'habitude un cycle de creusement / soutènement est réalisé par poste.



# Le soutènement provisoire

## soutènement provisoire

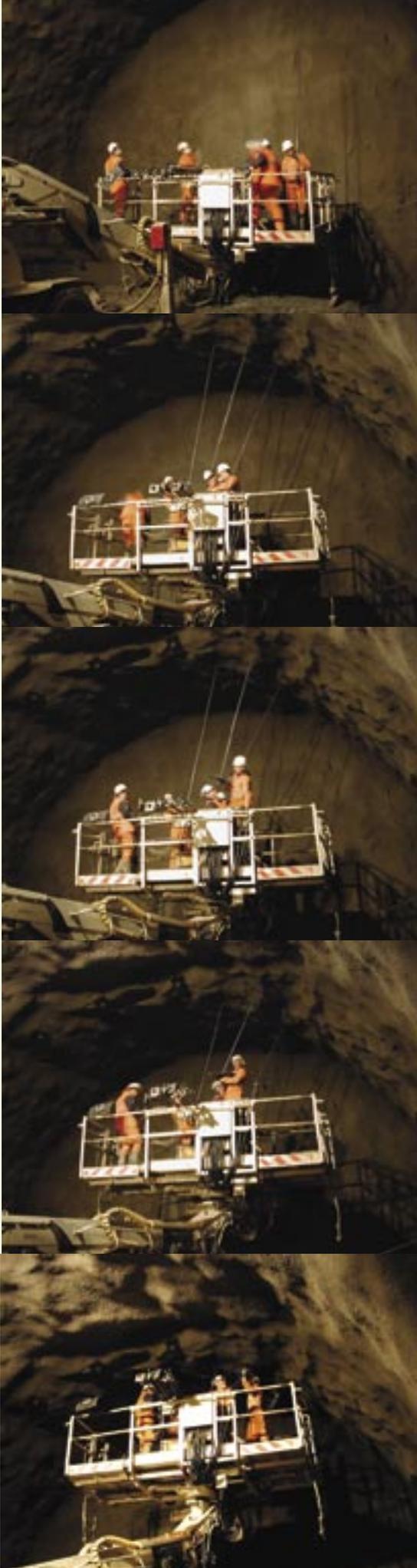
tunnel gosselerbiereg

### boulons

Un autre élément important du soutènement sont les boulons : Il s'agit avant tout de boulons frottants qui agissent de suite (facteur temps). Ces boulons, mis en place par des boulonneuses semi-automatiques, ont plusieurs fonctions :

- ils assemblent des blocs rocheux qui, sous l'influence de la pesanteur, auraient tendance à tomber (Steinschlag)
- ils reportent les efforts dans le massif, palliant ainsi aux concentrations dangereuses, qui pourraient se former aux abords des excavations, menant ainsi à des instabilités locales brutales, qui souvent se produisent sans signe précurseur aucun (ce qui rend ce phénomène "Bergschlag" particulièrement dangereux)
- ils confèrent au matériau de construction 'rocher' toute la cohésion nécessaire, pour assumer son rôle en établissant, du moins partiellement, l'état de contrainte tridimensionnel auquel il était soumis avant l'excavation.
- il s'agit enfin d'éléments de construction flexibles, permettant une intervention constante en arrière du front par l'emploi de boulons plus longs ou d'un autre type, si des transformations plus importantes qu'escomptées devaient se manifester.

Lorsque les terrains traversés sont trop disloqués ou s'ils montrent une tendance à la plastification, voire à l'altération précoce, il faut immédiatement confiner l'excavation. Un tel support est réalisé au moyen de cintres préfabriqués lourds ou légers suivant le cas.



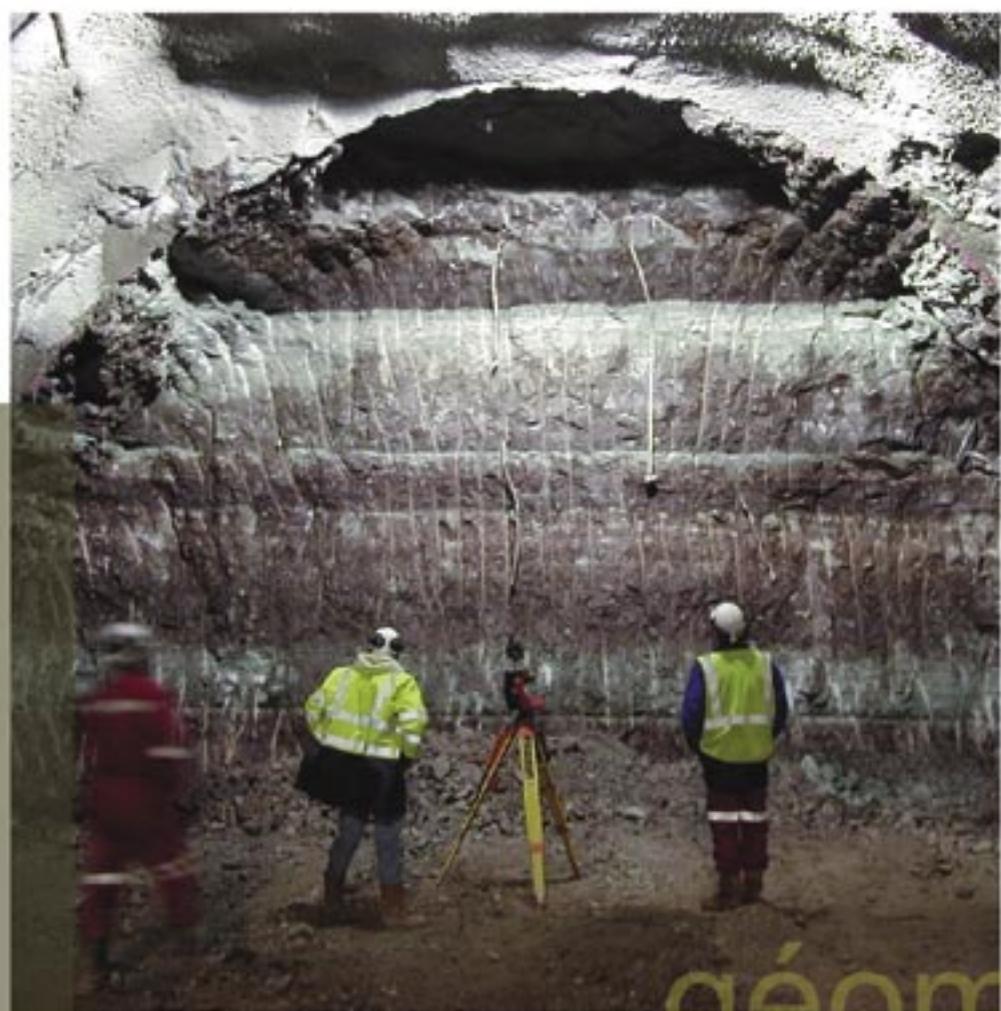
forage

# tunnel gousselerbierng cintres



pose cintres légers

auscultation



géomètres

phasage des travaux

## auscultation - contrôle

Afin d'assurer l'efficacité constante du soutènement, le comportement réel du massif traversé est surveillé régulièrement. Si nécessaire, le soutènement est, ou renforcé ou allégé. Cette opération de surveillance nécessite la mise en place et le suivi au millimètre de profils témoins, installés tous les 12-15 m dans chaque tube. Chaque profil est donc contrôlé suivant un programme établi. Des courbes caractéristiques du comportement du massif et des soutènements par rapport à la distance au front d'excavation sont établies. Ceci permet de diagnostiquer des anomalies et de prendre très rapidement les décisions indispensables à la sécurité de l'ouvrage.

Description des travaux topographiques d'un chantier de tunnel.

- Mise en place de la polygonale d'appui avec correction et calage précis des 2 attaques
- Calculs du guidage de l'excavation
- Mise en place, au fur et à mesure de la polygonale dans chaque tube avec contrôle fréquent de l'état des points déjà installés (forts risques de "bougé")
- Mise en place, au fur et à mesure des repères de nivellement avec contrôle hebdomadaire de la "santé" de ces repères (risques de "bougé", dû au tassement de la galerie)
- Mise en place de profils d'auscultation
- Mesures de convergences des profils d'auscultation avec des théodolites très précis (Leica TCA1800L, T2000)
- Traitement des données d'auscultation et mise en diagrammes des déformations du massif permettant une décision en matière de soutènement
- Contrôle de l'excavation et de la mise en place du soutènement au moyen, entre-autre, d'un profilomètre
- Calculs des cubatures d'excavation, des hors-profils et des hors-profils géologiques
- Contrôle de l'excavation et du soutènement du stross
- Contrôle de la géométrie des coffrages de l'anneau définitif



# phase 4

## auscultation - contrôle

### profils d'auscultation courbes de tassement - convergence

Les profils d'auscultation des mouvements du massif suite à l'excavation sont espacés de 6 à 20 mètres selon les conditions géologiques et les types de soutènements: profils rapprochés dans les zones de terrains de mauvaise qualité, dans les zones de changement de terrains ou de soutènement.

La fréquence des levés est quotidienne jusqu'à l'obtention d'une tendance à l'équilibre (en situation normale, cette tendance est obtenue pour une distance front-profil inférieure à 30 mètres) puis, cette fréquence devient hebdomadaire voire mensuelle.

Chaque profil d'auscultation est constitué de 5 points de mesures:

- une clé de voûte;
- deux points aux naissances de voûte;
- deux points en base des pénétrés

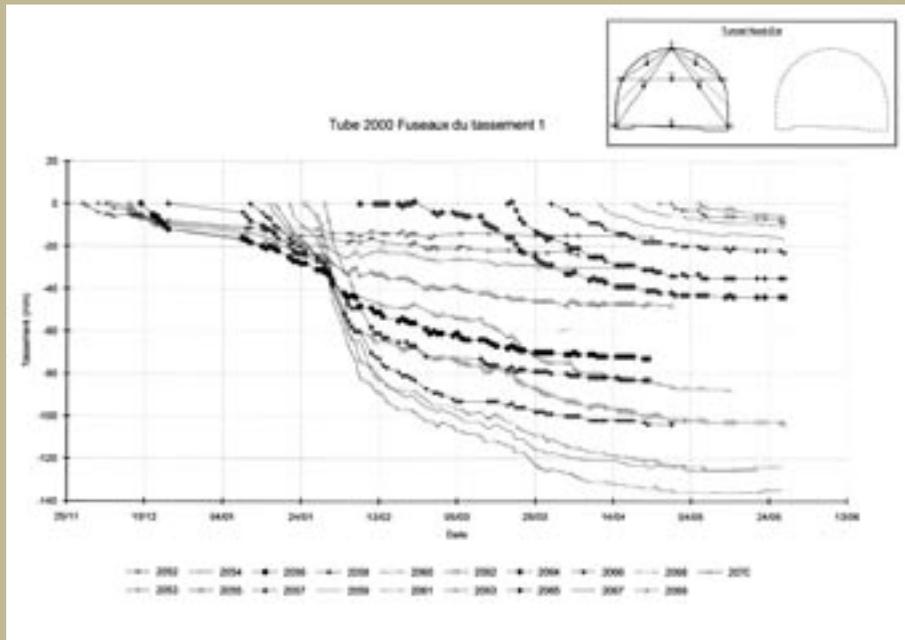
Des mesures sont réalisées :

- en altimétrie pour les 5 points-repère;
- en convergence pour 6 cordes définies sur les 5 points repères.

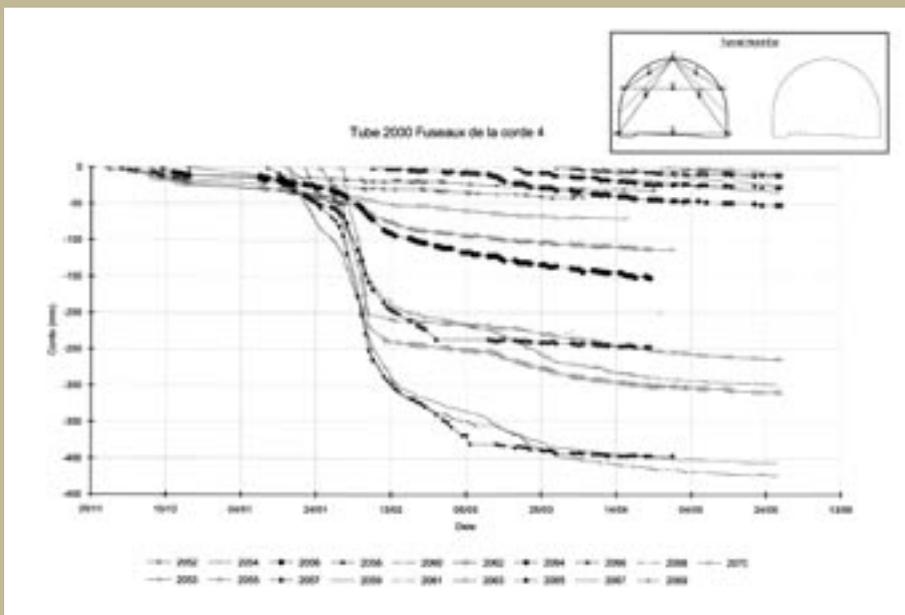
Ces mesures sont interprétées en terme de variation au cours du temps ou selon l'éloignement du front sous forme de courbes de tassements et convergences.

Ces courbes sont analysées:

- en terme de tendance à l'équilibre pour vérifier l'adéquation du soutènement mis en place; et, dans les cas instables, pour vérifier la mise en place de soutènement supplémentaire (ancrages, ...) en arrière de la zone d'excavation voire de la substitution par un soutènement plus lourd (reprofilage, pose d'un nouveau soutènement, ...);
- en terme d'allègement ou de renforcement du soutènement mis en place dans la zone d'excavation selon la comparaison des valeurs mesurées aux seuils de référence donnés par le bureau d'étude pour chaque profil-type de soutènement.



### tassement



### corde



reprofilage

ment reprofilage  
étanchéme



phasage des travaux

## étanchement

Afin de protéger l'ouvrage définitif des eaux d'infiltration, une membrane d'étanchéité en PVC (épaisseur 2 mm) est appliquée sur le périmètre de l'anneau du tunnel avant le bétonnage du revêtement. Cette étanchéité est connectée à un système de drainage et de traitement des eaux d'infiltration et de ruissellement.

Au total, 70.000 m<sup>2</sup> de membranes ont été utilisés dans le tunnel du GousselerbiERG.

### Membrane d'étanchéité



A l'endroit de chaque arrêt de bétonnage (Blockfuge) du revêtement, l'étanchéité est renforcée par l'application d'une bande supplémentaire (matériau identique) d'au moins 50 cm de largeur, à souder sur tout le pourtour de la cavité.

### Etanchement

Le "Tunnel GousselerbiERG" est muni d'une étanchéité partielle (Teilabdichtung), qui s'applique à la surface d'extrados des piedroits et de la voûte. Les eaux souterraines sont déviées par l'intermédiaire d'une couche drainante et de captages ponctuels vers un collecteur de drainage.

Les lés d'étanchéité sont en PVC-mou calandré, épaisseur 2 mm, hormis la couche de marquage obligatoire.

Les matériaux du complexe d'étanchéité sont fixés au support de manière ponctuelle, soit par au moins 2 fixations au m<sup>2</sup> à l'endroit des piedroits et au moins 3 fixations au m<sup>2</sup> à l'endroit de la voûte.

### Avancement (mode d'exécution)

- l'avancement par minage ou l'avancement mécanique en attaque montante comme méthode (mode) d'excavation (p.ex. machines à attaque ponctuelle, brise-roche hydraulique, etc...). Aussi une combinaison de moyens mécaniques et de minage a été envisagée. En outre, vu la situation hydrogéologique et l'évolution des dépôts, l'avancement en attaque descendante d'un certain tronçon du tunnel et ce pour les fronts en provenance de la "Vallée de l'Alzette"
- le creusement par demi-section (type d'excavation B) comme type d'excavation
- les profils-types avec leurs soutènements respectifs, en fonction notamment des mode et type d'excavation, de la fracturation et des caractéristiques mécaniques du massif
- les autres dispositions ayant une incidence sur l'avancement, tels que les travaux de confortation, de drainage, de reconnaissance et des mesures de contrôle.

Comme l'avancement est réalisé dans un massif présentant une tendance à l'altération, voire au gonflement, en présence d'eau, les captages sont effectués en limitant autant que possible le contact entre l'eau et le rocher. En plus, le captage des eaux est fait le plus près possible du front de taille.

Le trafic de chantier est susceptible de dégrader excessivement le fond de l'excavation, des pistes de chantier souterraines adéquates sont de rigueur, aussi bien lors de l'avancement des calottes que des stross.

Le contrôle géométrique de l'excavation ainsi que l'exécution des éventuels reprofilages sont entrepris, si possible avant la mise en place du soutènement, mais au plus tard avant la réalisation du revêtement.

## Membranes d'étanchéité

Les membranes d'étanchéité sont fixées de telle sorte que leur adaptation au support sans tensions excessives soit garantie lors du bétonnage du revêtement. Dans le cas d'une fixation ponctuelle, il est donc nécessaire de prévoir un certain jeu dans la surface de la membrane.

## Essais de contrôle des étanchéités

### *Contrôle visuel de l'étanchéité*

Les feuilles d'étanchéité posées sont contrôlées visuellement pour détecter d'éventuels dégâts d'origine mécanique.



### *Contrôle des soudures des lés d'étanchéité*

Les contrôles peuvent être manuels (soudures simples et doubles).

La soudure est vérifiée par l'exercice d'une pression au moyen d'une pointe ou d'un tournevis, permettant de localiser les défauts éventuels de la soudure.

### *Contrôle des soudures doubles à l'air comprimé*

Une pression d'air comprimé de 0,20 MPa est exercée dans le conduit formé par les deux soudures. Le résultat est concluant lorsque la perte de pression n'excède pas 0,02 MPa en 15 minutes.

La surpression provoque également une sollicitation mécanique de la soudure, ce qui permet un contrôle de la résistance de celle-ci.

### *Contrôle sous vide des soudures par apport (soudures par extrusion).*

Tout d'abord la soudure est enduite d'un liquide de contrôle (solution savonneuse), puis une cloche à vide est mise en place pour ensuite

appliquer une dépression de 0,05 MPa pendant 2 minutes. L'essai est concluant lorsqu'aucune bulle ne se forme dans le liquide de contrôle.

### **Sondages et mesures de contrôle**

Pour obtenir des données complémentaires sur les conditions géologiques, la direction des travaux peut faire exécuter des sondages ou des relevés occasionnels dans la zone de l'avancement, tels que :

- galeries de reconnaissance
- forages
- prélèvements d'échantillons
- mesures in situ
- autres investigations.

### Injections

On distingue les injections de remplissage (de bourrage), de consolidation et d'étanchement.

Les injections de remplissage (de bourrage) ont pour but de remplir les vides existants entre le soutènement et le massif, ainsi qu'entre le revêtement et l'étanchéité.



*étanchement*

*étanchement*

*étanchement*

# anneau intérieur en béton



phasage des travaux

## l'anneau intérieur en béton (revêtement)



Le tunnel excavé et 'provisoirement' soutenu, le complexe d'étanchéité installé, rien ne s'oppose au bétonnage de l'anneau intérieur.

Les fonctions, qui lui sont historiquement attribuées, sont les suivantes :

- remplacer le soutènement 'provisoire' par un soutènement 'définitif'
- donner un aspect plus esthétique en béton vu à l'intrados (critère des plus classiques, mais plutôt subjectif)
- enchâsser une partie de la tuyauterie et des câbles, les protégeant ainsi contre un incendie éventuel
- protéger l'étanchéité.

La question qu'il y a lieu de se poser, et que beaucoup de spécialistes se posent, est la justification de ce procédé de nos jours. Le soutènement appelé 'provisoire'; par quoi pourrait-il en effet être dégradé de telle sorte qu'il faille absolument le remplacer par un deuxième étayage appelé 'définitif'.

Il y a deux réponses à cette question. L'une est technique: Rien, ou presque rien, ni d'un point de vue statique, ni d'un point de vue technologique, ne requiert la mise en place systématique d'un 'deuxième' soutènement.

L'autre se réfère aux normes et aux usages : Les éléments de l'anneau extérieur, donc du soutènement 'provisoire', ne sont actuellement pas normés pour pouvoir être qualifiés de durables, même si on peut être d'avis qu'un béton projeté ne se dégrade pas plus dans le temps qu'un béton coulé dans un coffrage. Notons à ce propos que des recherches scientifiques et des efforts en matière de normalisation sont en cours pour changer cet état des choses peu satisfaisant, mais fort coûteux.

L'épaisseur de l'anneau intérieur, pour des raisons technologiques et de mise en place notamment, est de 30 cm en moyenne. Sur la plupart du tracé, il n'est cependant pas armé, ce qui n'est encore point permis par la norme DIN 1045, normalement d'application au Grand-Duché, mais ce que, fort heureusement, les récents eurocodes admettent. Le profil en fer à cheval est en effet conçu de telle sorte, qu'il n'est guère sollicité par des moments de flexion mais par des bielles de compression, ce à quoi un béton non-armé résiste parfaitement.





## l'anneau intérieur en béton

En plus, la réglementation existante, estimant qu'un béton ne peut être soumis à des efforts de traction, n'est plus tenable, du moins pas dans le cas d'une voûte. (Ni dans l'Antiquité Romaine ni au Moyen-Age les voûtes n'ont été armées sans pour autant qu'elles se soient écroulées) Ainsi on peut démontrer, modèle mécanique réel à l'appui, qu'une section de béton non-armé, soumise à des petites à moyennes excentricités, ce qui est normalement le cas dans un tunnel, résiste beaucoup mieux à ces efforts que le modèle théorique normé en vigueur ne le présuppose.

La présence d'armatures dans le béton, abstraction faite de l'aspect pécuniaire, a encore d'autres désavantages: lors d'un incendie, le métal qui est un bon conducteur, se dilate et peut faire 'exploser' le béton qui l'enrobe, les armatures peuvent déchirer l'étanchéité lors du bétonnage et, enfin, elles compliquent outre mesure la mise en œuvre du béton dans le coffrage.

Cette mise en œuvre n'est effectivement et d'office pas évidente. Pour la réussir, il faut que la maniabilité du béton, son pompage par des orifices, judicieusement prévus en clé de voûte, sa pervibration par des fenêtres latérales dans le coffrage et son traitement après prise derrière le coffrage sur une longueur de plus de 30 mètres soient bien étudiés et fassent un ensemble indissociable rigoureusement appliqué dans le cadre d'une logistique spécialement conçue à cet effet.





# travaux et d'infrastructure parachevement



phasage des travaux

## Travaux d'infrastructure et parachèvement

Ces travaux comprennent :

- Caniveaux le long du tunnel, pour la pose des câbles, conduites d'incendie, signalisation, etc... Ces caniveaux sont couverts par une prédalle carrossable.
- 2 collecteurs diam. 400 mm avec des regards-siphons tous les 40 à 50 m.
- Caniveaux à fente pour une évacuation directe de tous produits liquides vers le regard-siphon, resp. le collecteur et les réseaux d'assainissement.
- La mise en place du canal à air. Alimentation en air frais dans les galeries transversales et mise en surpression.
- Le soubassement de la chaussée composé de 2 x 25 cm de grave laitier.
- Les regards de contrôle drainage, posés tous les 40 à 50 m, pour vérifier le drainage posé le long du tunnel entre la membrane d'étanchéité, le soutènement primaire et la couche de roulement de 8 cm.





galerie de liaison

sécurité

# les mesures techniques

description des équipements techniques

## description des équipements techniques

Garantir une sécurité maximale des utilisateurs du tunnel  
Réduction maximale du besoin en énergie électrique  
Garantir une haute disponibilité des installations techniques  
Protéger au maximum l'environnement

### I) garantir la sécurité des utilisateurs

- 1) Par des mesures constructives
- 2) Par des mesures techniques
- 3) Par des mesures organisatrices

# les mesures constructives

- Deux tubes séparés avec circulation unidirectionnelle
  - En cas d'accident: pas de répercussions sur le trafic de l'autre direction.
  - En cas d'incendie: utilisation du tube non sinistré comme issue de secours.
  - En cas de travaux d'entretien: fermeture uniquement d'un tube et non pas du tunnel entier.
- Galeries de liaison entre les deux tubes
  - Dans le cas d'un incendie, une évacuation rapide des utilisateurs est garantie par 8 galeries de liaison, reliant les deux tubes tous les 300 m.
  - Les galeries GA3 et GA6 peuvent aussi être utilisées par les véhicules des corps de sauvetage.
- Niches SOS
  - Tous les 100 m, 26 niches SOS équipées par des installations de communications modernes et fiables sont installées sur le côté droit de la chaussée.
  - L'utilisateur y prend contact avec la Protection Civile pour l'informer de son problème.
  - Les niches, les portails et les galeries transversales principales sont équipés par un système d'extinction à base de mousse, permettant une lutte efficace contre un incendie (LENZING).
  - La niche est observée par caméra vidéo; ainsi l'opérateur du 112 a une meilleure analyse de la situation sur le terrain, et peut intervenir en cas d'actes de vandalisme.
- Deux bâtiments de services séparés aux droits des portails du tunnel.
- Deux galeries de liaison supplémentaires aux droits des portails.
- Caniveaux en fente avec dispositifs coupe-feu assurant une évacuation rapide des produits inflammables.
- Conduites incendie dans chaque tube.
- Hydrants pompiers au droit de chaque niche SOS, des galeries et des portails.
- Accès aux portails garanti, même en cas de congestion sur l'autoroute.

# 2

## ventilation des deux tubes techniques de ventilation

- Ventilation longitudinale des deux tubes
- Minimum 12 ventilateurs (boosters) par tube
- Commande rapide des ventilateurs suivant la densité du trafic
- Commande des ventilateurs en fonction du taux de remplissage du tunnel et du lieu du sinistre
- Supervision des valeurs-limites de l'oxyde de carbone (CO) et de l'opacité.
- Déclenchement automatique de programmes spécifiques en cas de détection d'un incendie
- Ventilation indépendante des galeries de liaison

Les galeries de liaison, qui sont prévues comme issues de secours sont mises sous pression par des ventilateurs indépendants de la ventilation du tunnel. Pendant le temps de l'exploitation normale, les locaux techniques situés dans les galeries techniques seront ainsi protégés contre toute pollution. En cas d'incendie, la mise en surpression des galeries empêchera la propagation de la fumée d'un tube à l'autre.

## techniques de communication

- Niches SOS fermées permettant une communication indépendante du niveau de bruit dans le tunnel.
- Appareils de communication digitaux avec caméra permettant une communication claire et précise entre l'utilisateur et les opérateurs du 112.
- Supervision des niches SOS par caméras vidéo.
- Système de sonorisation publique performant installé dans le tunnel et dans les galeries.
- Retransmission de toutes les stations radio courantes dans le tunnel.
- Emission de messages vocaux sur tous les programmes radio émis à l'intérieur du tunnel avec transmission du signal ARI indiquant qu'il s'agit d'un message de radiodiffusion pour la circulation routière.
- Retransmission des fréquences utilisées par les services de sauvetage et les forces de l'ordre à l'aide d'un système de radiotransmission protégé contre l'interruption en cas d'incendie.
- Retransmission des deux réseaux GSM (LUXGSM et TANGO) par antennes.
- Affichage de messages variables sur les panneaux CITA situés en amont et en aval du tunnel, permettant une information précise sur la situation du trafic à l'intérieur du tunnel (Avertissement conducteurs en cas de non-respect du code de la route, en cas de fermeture du tunnel en indiquant la raison, en cas de voiture en panne, etc...)
- Afin d'assurer une communication sûre et efficace, la transmission de tous les signaux à l'intérieur du tunnel est effectuée par des fibres optiques.
- Mise à disposition aux services de sauvetage de tableaux de commande et de visualisation aux droits des portails, permettant une commande à distance de tous les équipements vitaux, ainsi qu'une visualisation des différentes parties du tunnel supervisées par caméras vidéo.
- Information des conducteurs par voie de sonorisation sur la situation du trafic en cas de bouchons.

# techniques de mesure et de supervision

- Supervision permanente du trafic à l'aide de caméras vidéo.
  - Supervision assurée 24/24h à partir du poste de commande CITA.
  - Détection automatique d'un accident (DAO), d'un ralentissement ou de toute autre perturbation du trafic à l'aide d'un système informatique performant.
  - Enregistrement en permanence des images vidéo, permettant une reconstruction du scénario en cas d'accident ou d'incident.
  - Fermeture automatique du tunnel en cas d'incendie ou de perturbation du trafic, ou dans le cas d'un dépassement des valeurs critiques de la qualité d'air, etc...
  - Système indépendant de détection d'incendie, permettant une détection incendie rapide et précise avec une mesure de température en voûte tous les 10 m.
  - Système de prédétection d'incendie rapide et fiable basé sur l'analyse numérique des signaux vidéo des caméras (DAO).
  - Mesure de toutes les valeurs relatives à la qualité d'air à plusieurs endroits par tube et intégration dans le système d'automates programmables.
  - Détection de tous les paramètres météorologiques et information des conducteurs (CITA).
  - Captage de toutes les caractéristiques techniques relatives à la maintenance et mise à disposition aux techniciens de maintenance.
- Système de supervision et de gestion du tunnel indépendant.

## techniques d'éclairage

- Eclairage moderne et économique.
- Adaptation automatique des seuils d'éclairage aux conditions d'éclairage extérieures, permettant une entrée et une sortie sûres et sans aveuglement.
- Eclairage de secours installé à 60 cm au-dessus du trottoir, permettant une orientation aussi en cas de perturbation de vue causée par la fumée.
- Eclairage de balisage installé tous les 10 m au bord du trottoir commuté en cas d'un incendie de façon à indiquer le chemin de secours.
- Réduction de la consommation en énergie électrique en utilisant des couleurs claires pour les parois du tunnel.

## techniques de signalisation

- Identification précise et individuelle des niches SOS et des issues de secours.
- Utilisation de panneaux modernes à fibres optiques permettant un gain de place du fait qu'un panneau peut visualiser plusieurs types de signalisation.
- Signalisation précise de la fermeture d'un tube ou d'une voie.
- Commande rapide des panneaux de signalisation assistée par ordinateur à partir du centre de contrôle CITA.
- Possibilité de commander la signalisation localement en cas de nécessité.
- Possibilité de réagir de façon préventive sur le trafic en amont du tunnel.
- Barrières automatiques pour assurer la fermeture du tunnel

## technique d'alimentation en énergie électrique

- Alimentation en énergie électrique à partir de deux réseaux CEGEDEL indépendants.
  - Plusieurs transformateurs indépendants.
  - Deux groupes électrogènes indépendants.
  - Toutes les fonctions vitales seront alimentées à partir de ces groupes en cas d'interruption totale des réseaux CEGEDEL.
  - Alimentation sans coupure supplémentaire pour tous les équipements informatiques.
  - Alimentation par batterie des installations de détection d'incendie.
  - Conception modulaire des armoires électriques de distribution permettant une maintenance très rapide.
- Supervision de tous les paramètres de distribution électriques vitaux par le système de supervision du tunnel.

# 3 mesures organisatrices

- Coordination centrale de toutes les activités de sauvetage à partir du centre de la Protection Civile.
  - Le directeur du groupe d'intervention est toujours informé de la situation sur le terrain et dispose de toutes les techniques de communication.
  - Dans le cas d'un incendie, les conducteurs enfermés sont invités, par tous les moyens de communication à disposition, à quitter leurs véhicules et à rejoindre la galerie de liaison la plus proche.
  - Information des conducteurs par voie de sonorisation sur la situation en cas de bouchons.
  - A partir d'une certaine ampleur du sinistre, le directeur du groupe d'intervention déclenchera le plan de catastrophe.
  - Dans ce cas, une cellule d'intervention et de coordination sera installée sur place et coordonnera les activités de sauvetage.
  - Avant l'ouverture du tunnel, la population luxembourgeoise sera informée sur le comportement correct en cas d'accident ou d'incident dans le tunnel.
  - Les interventions de sauvetage seront exercées régulièrement ensemble avec les conducteurs dans des conditions réelles. Les expériences qui en résulteront seront la base pour une amélioration éventuelle des interventions de sauvetage.
  - La population luxembourgeoise sera informée du résultat de ces essais de sauvetage.
- Tous les équipements de sécurité seront contrôlés régulièrement par des bureaux de contrôles agréés.

## réduction de la consommation en énergie électrique reduction de la consommation en **énergie** électrique

- Conception des parois du tunnel en teinte claire, mise en peinture du tunnel, utilisation d'une couche de roulement en teinte claire spécialement conçue pour le tunnel.
  - Optimisation de la régulation de l'éclairage.
  - Optimisation de la régulation des ventilateurs.
- Production d'énergie électrique avec les groupes électrogènes pendant les heures de pointes.

## haute disponibilité des équipements techniques haute disponibilité des équipements techniques

- Réalisation de l'entretien et de la maintenance des équipements techniques par des firmes spécialisées.
- Enregistrement des travaux effectués sur les équipements dans la base de données du système de supervision du tunnel, permettant un contrôle à distance efficace effectué par les ingénieurs des Ponts et Chaussées.
- Supervision de toutes les activités de maintenance par le système de supervision du tunnel.
- Un contrôle d'accès permet un suivi à distance des présences des équipes de maintenance dans les locaux techniques.
- Les équipes de maintenance sont informées automatiquement en cas d'un défaut ou d'un dépassement des heures de fonctionnement d'une machine, facilitant ainsi un entretien préventif suivant les règles d'art.

Les firmes chargées par la maintenance auront accès au système de supervision du tunnel moyennant une communication sécurisée