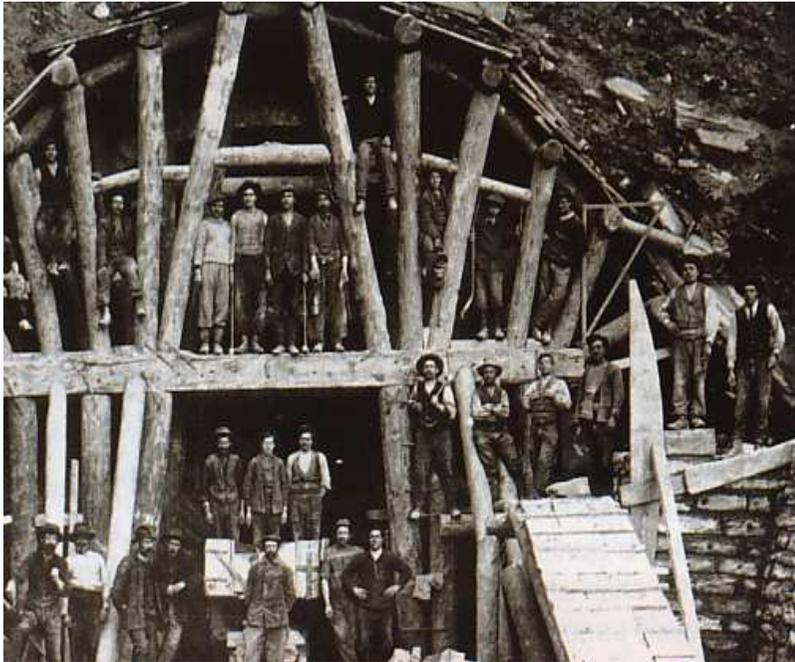
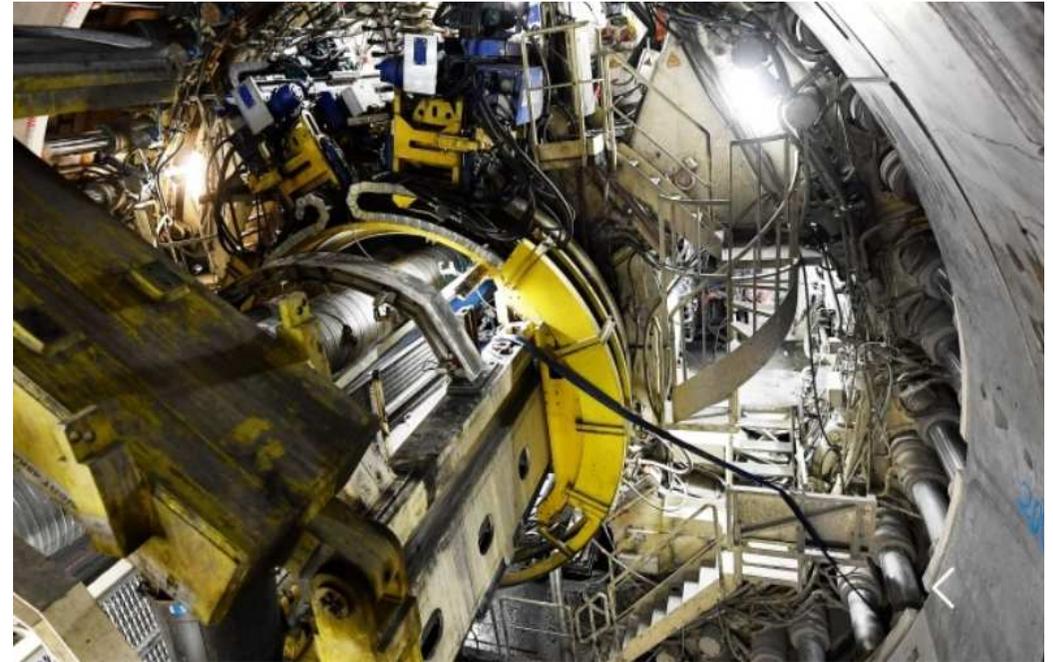


École des Ponts  
ParisTech

## CONCEPTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS



Lötschberg 1908

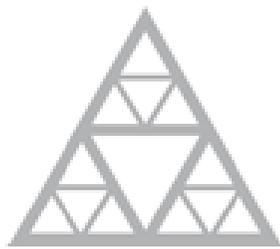


Saint-Martin-la-Porte 2018

Michel Pré



2022 - 2023



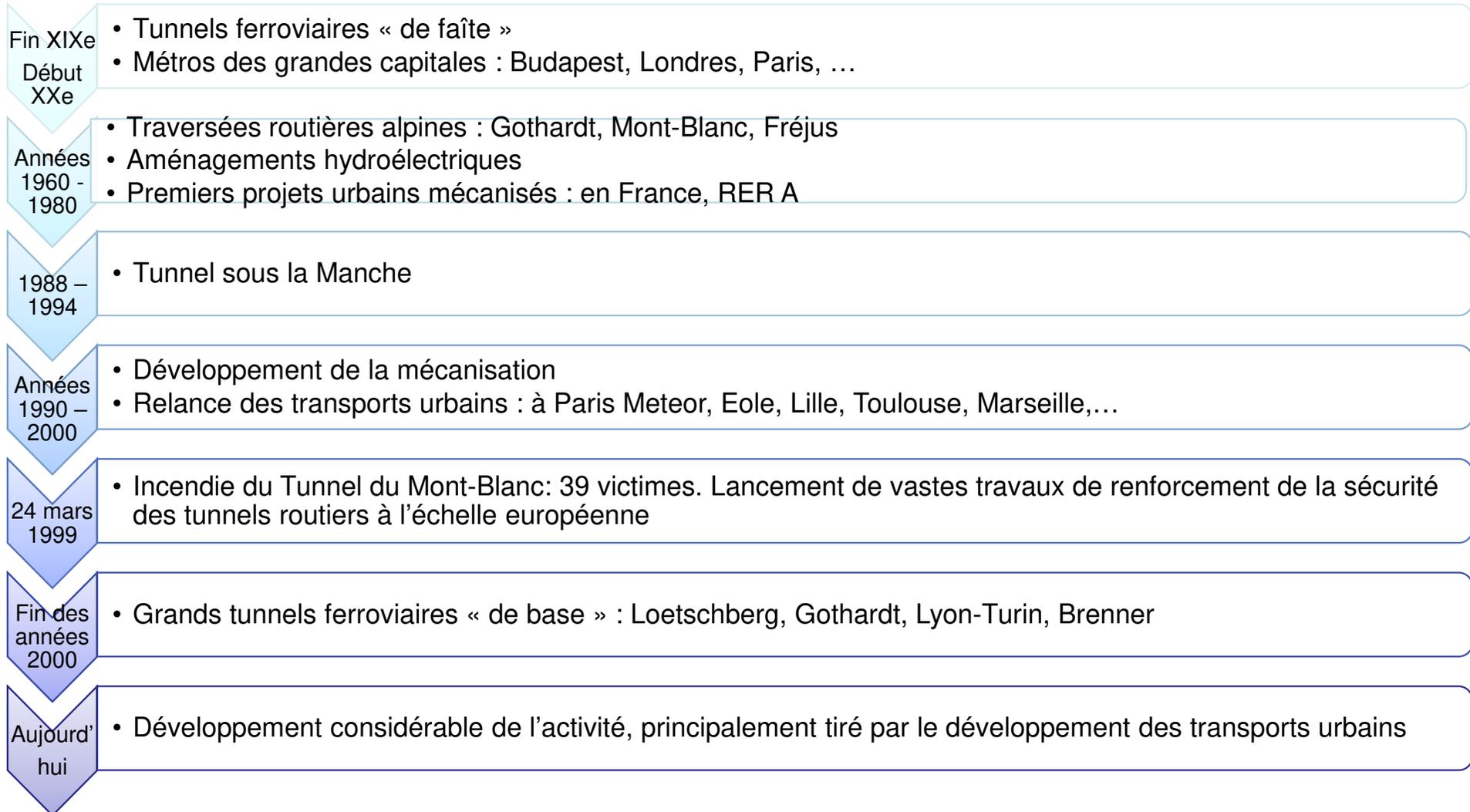
École des Ponts  
ParisTech

## CONCEPTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

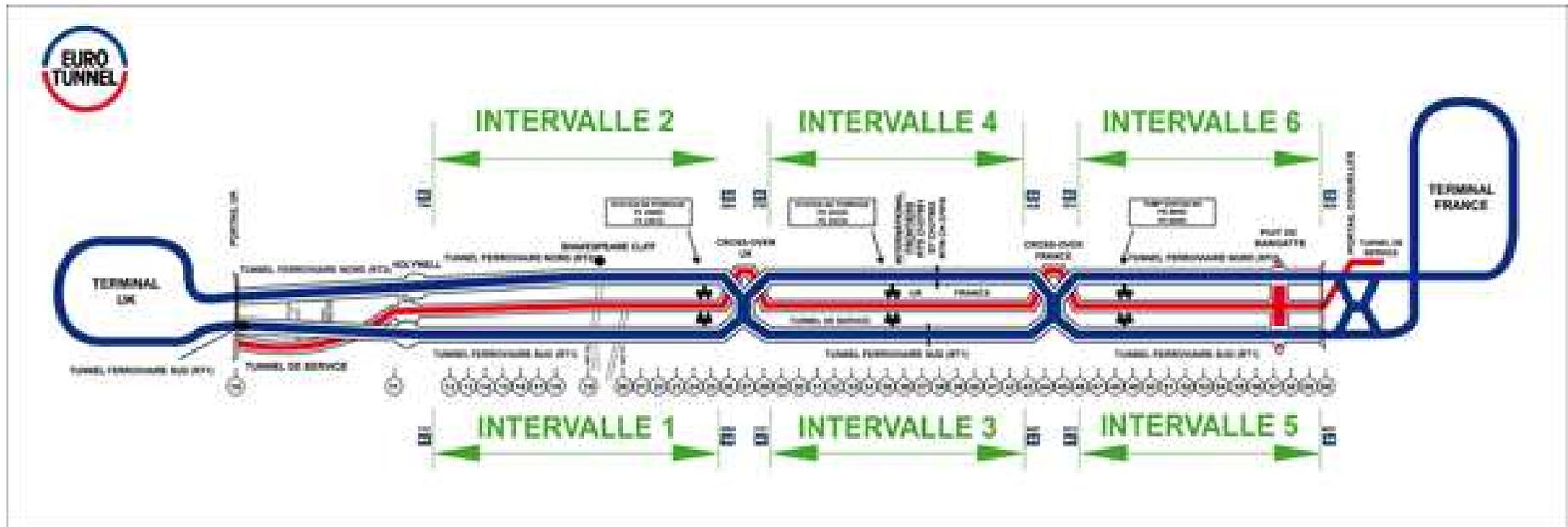
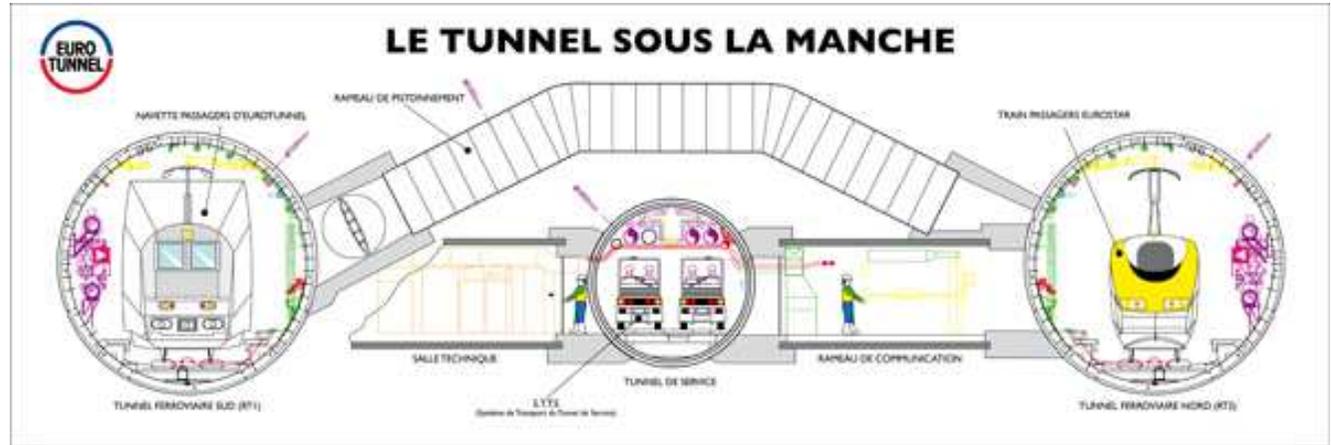
# Panorama général

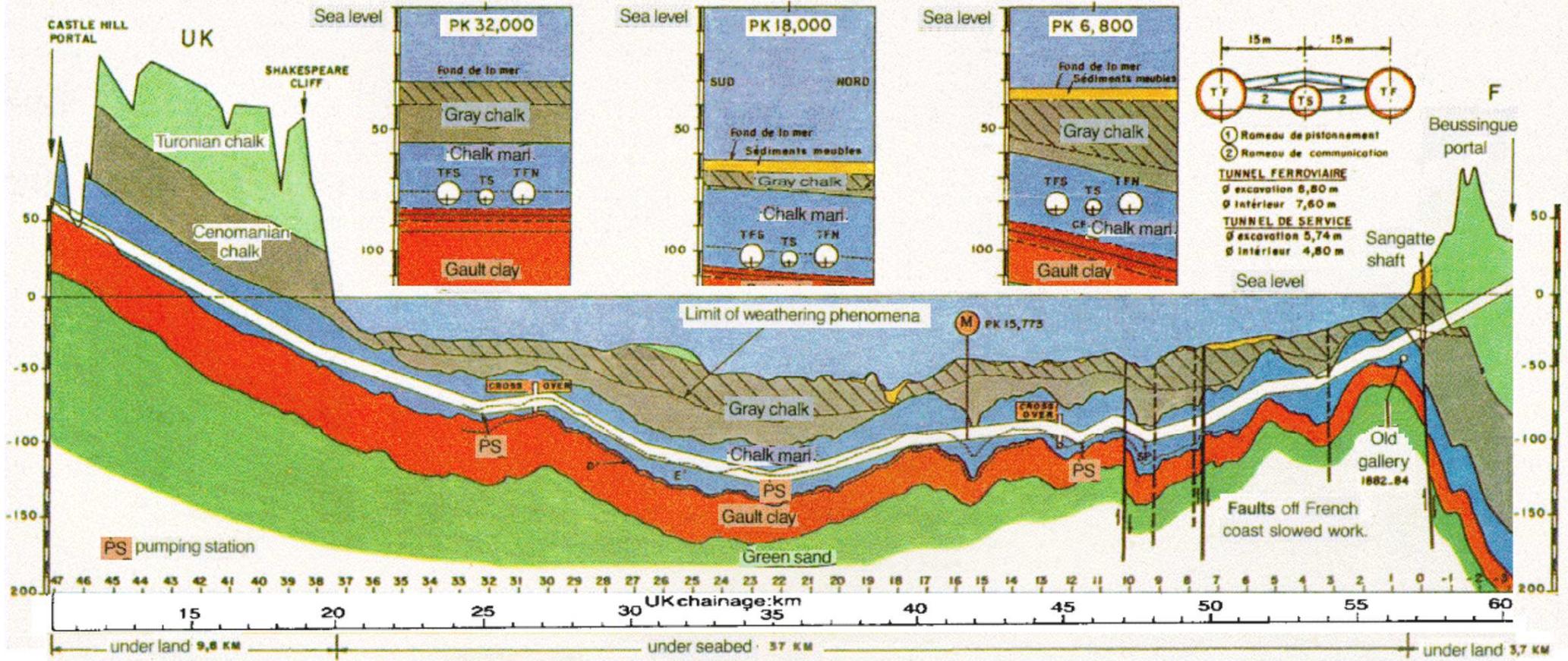
## Les ouvrages, leur nature

# Historique : grandes étapes



# Le Tunnel sous la Manche





2022 - 2023

**CROSS-OVER FRANCE**

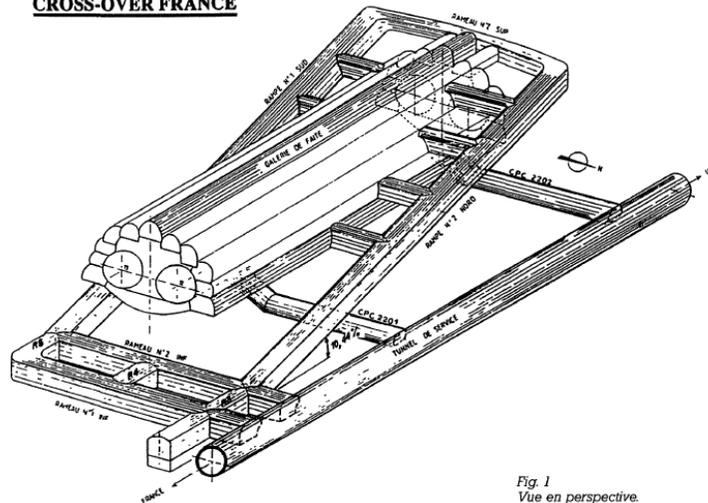


Fig. 1  
Vue en perspective.

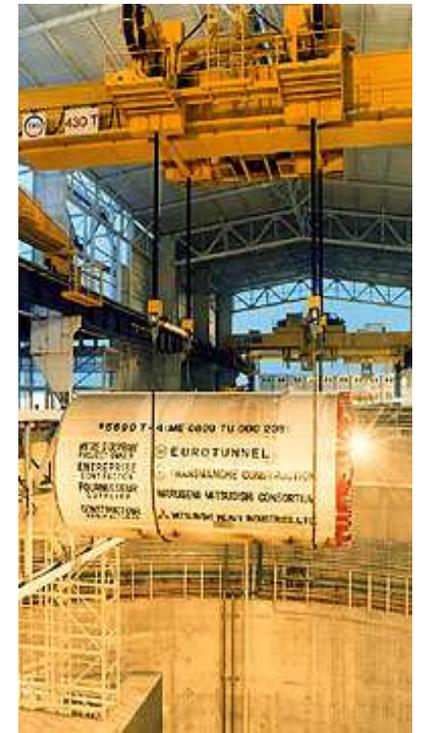
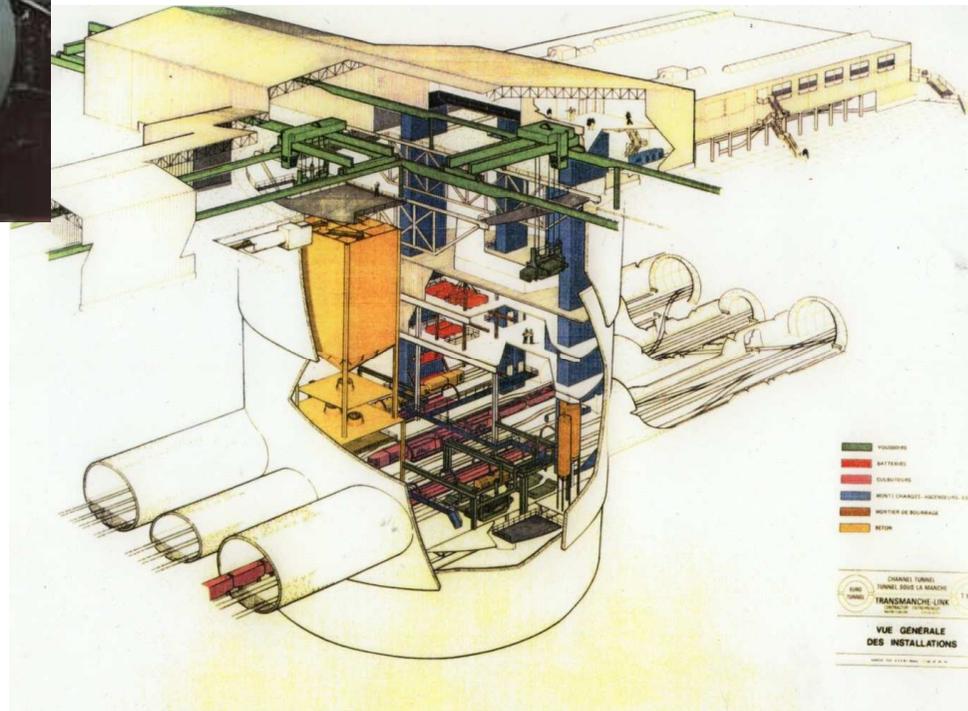


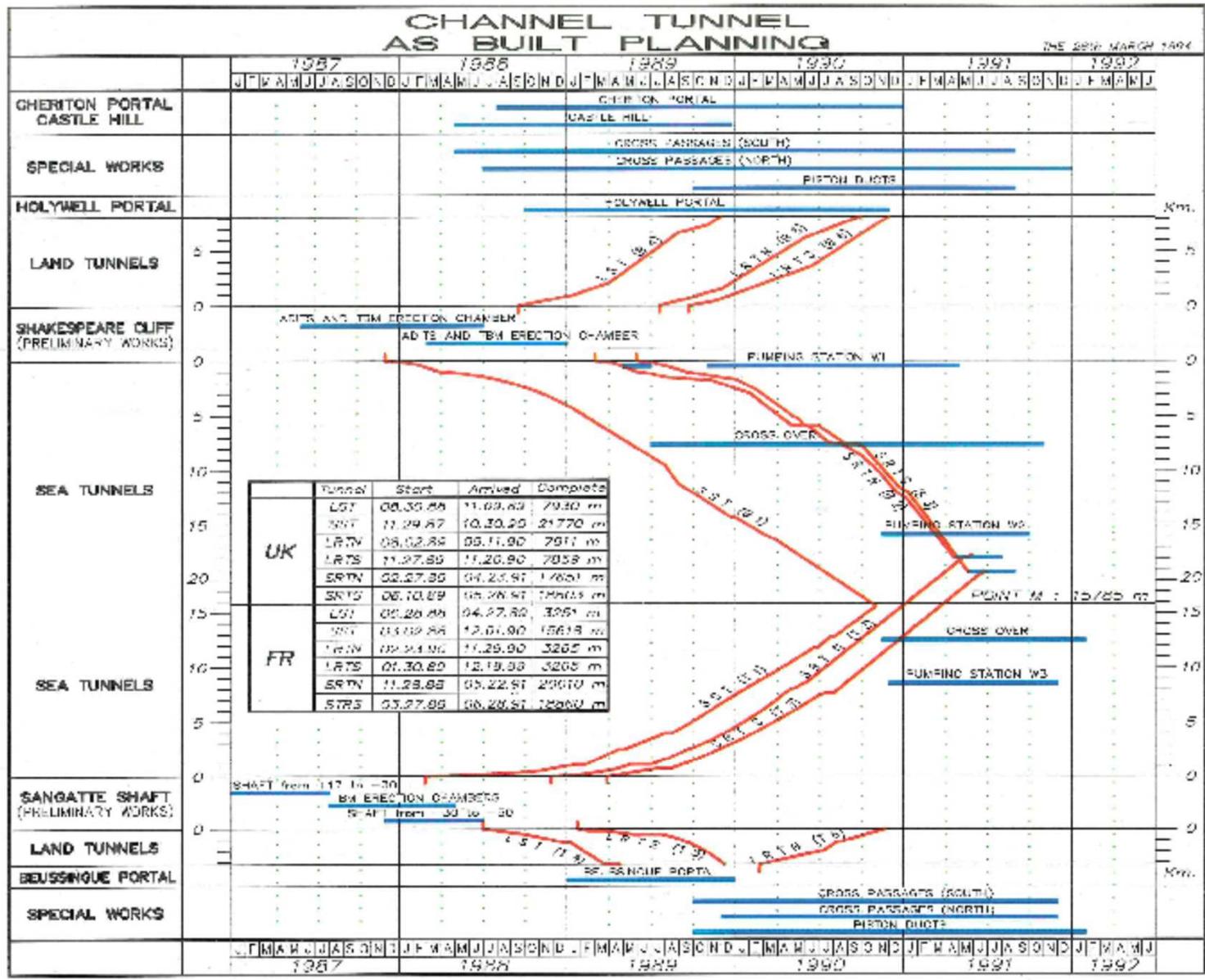
# Les tunneliers du tunnel sous la Manche

Un des 9 tunneliers

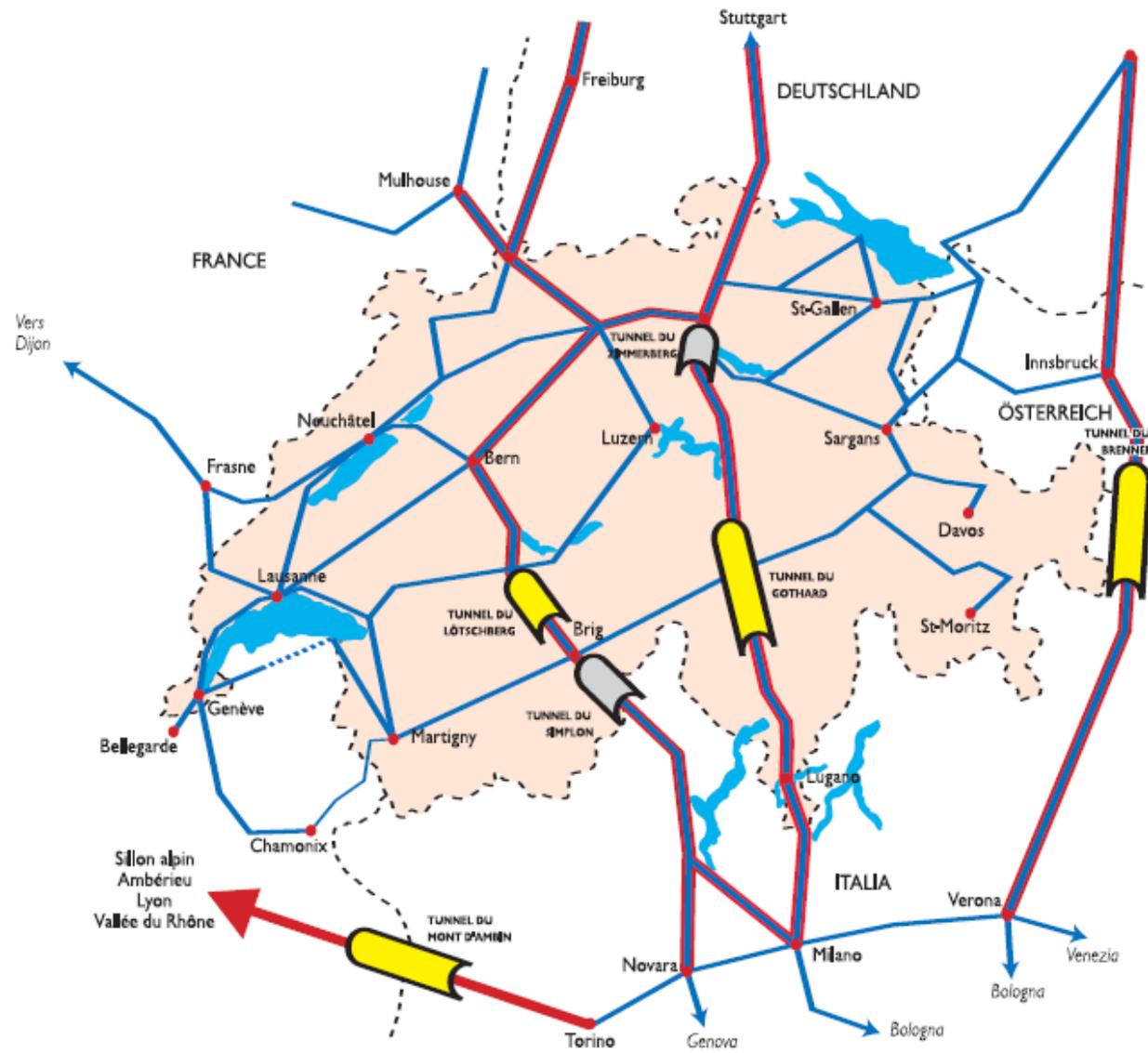


Logistique concentrée dans le puits de Sangatte

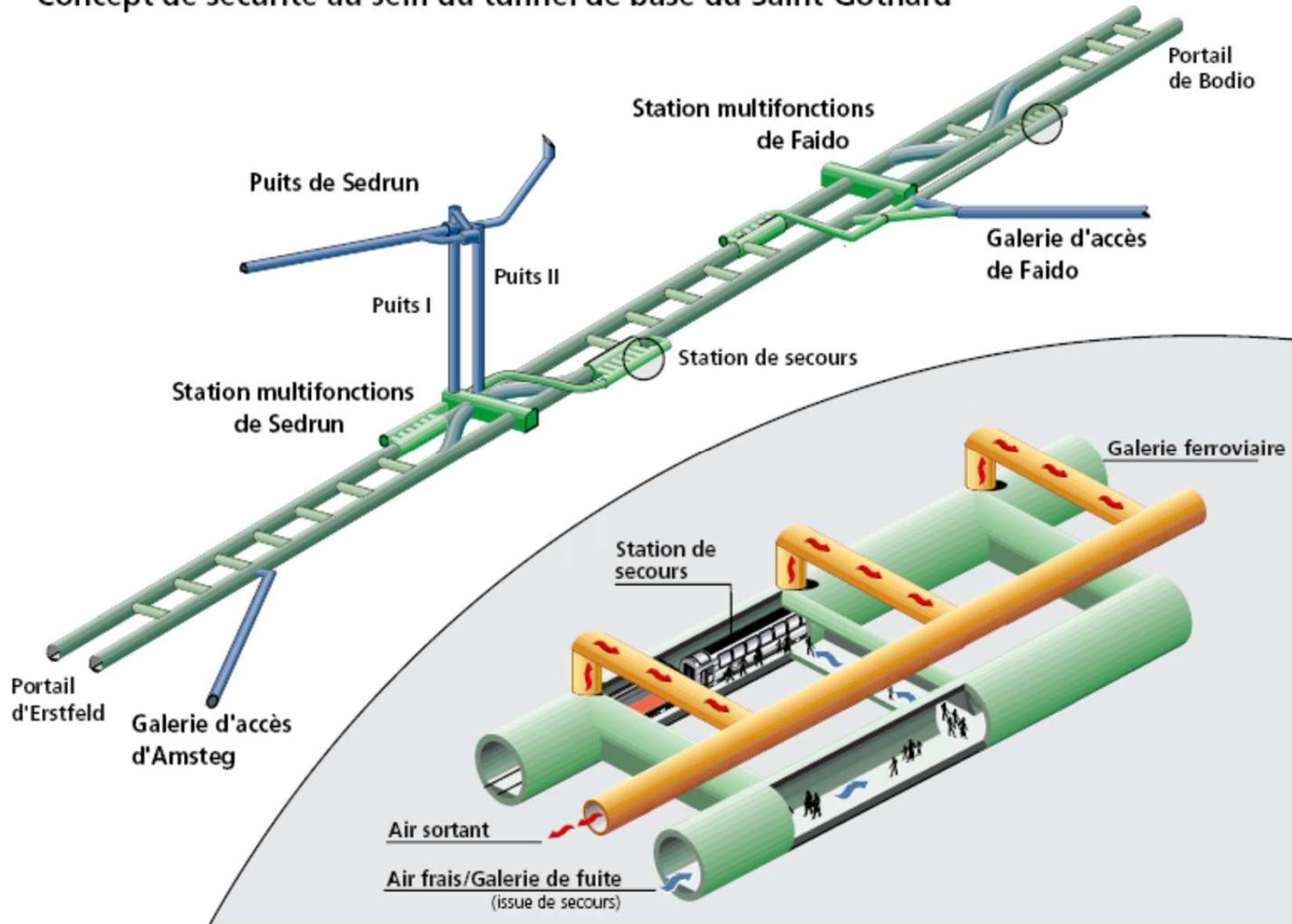




# Les nouvelles traversées ferroviaires alpines



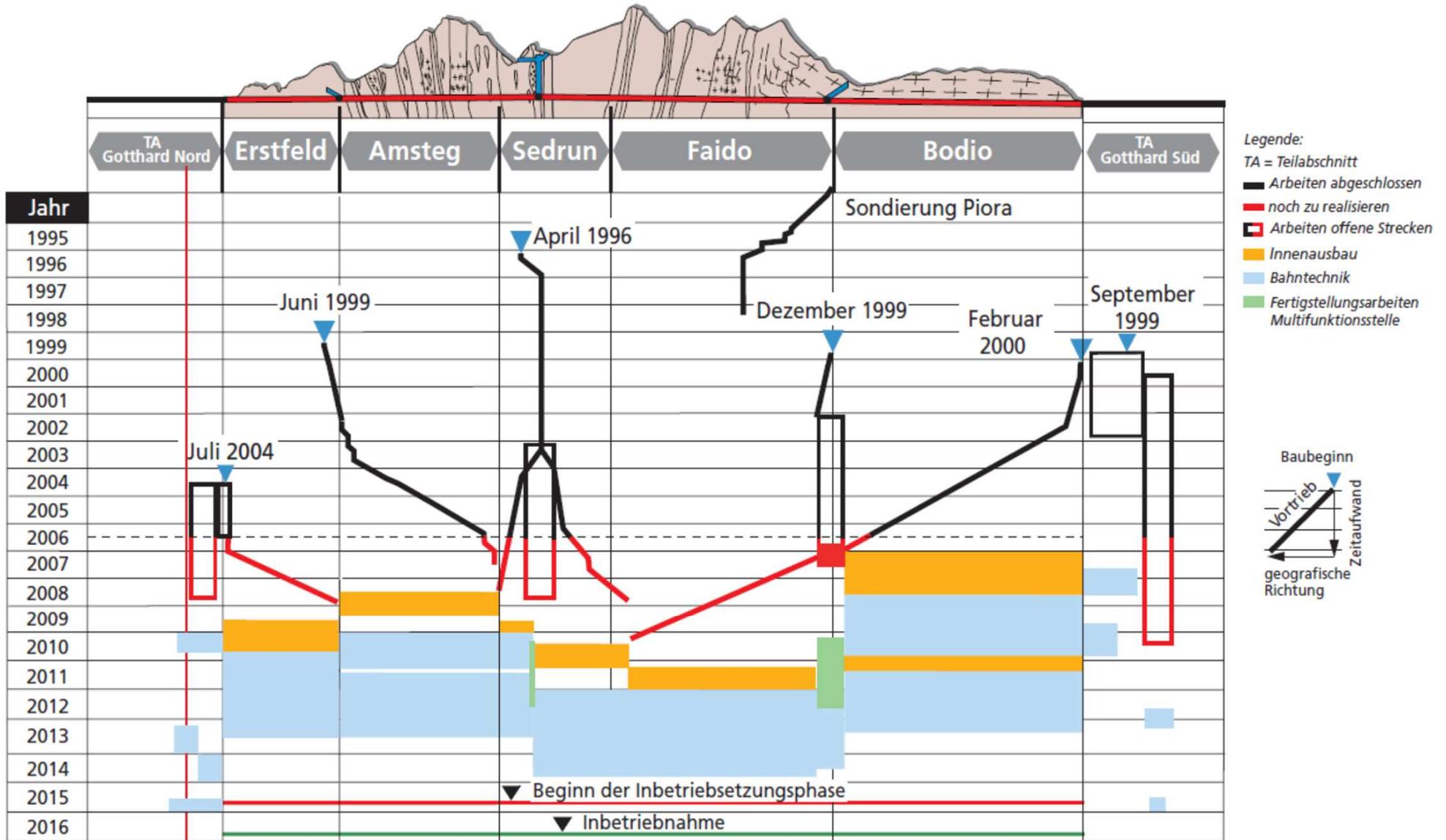
## Concept de sécurité au sein du tunnel de base du Saint-Gothard

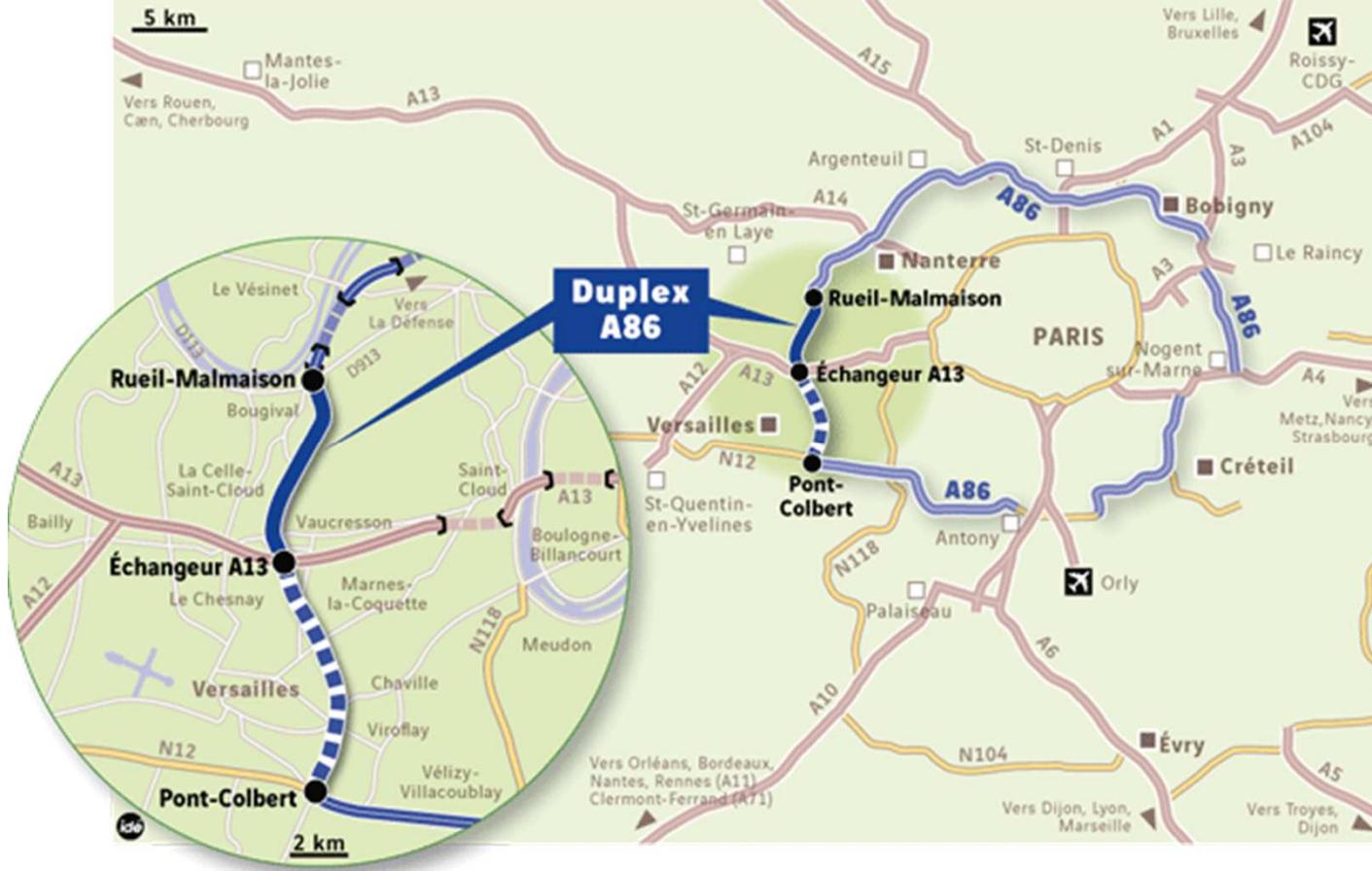


# Gotthard - Basistunnel

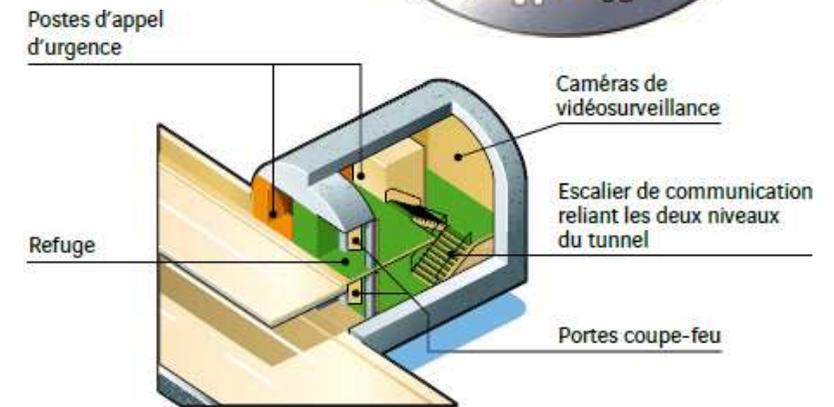
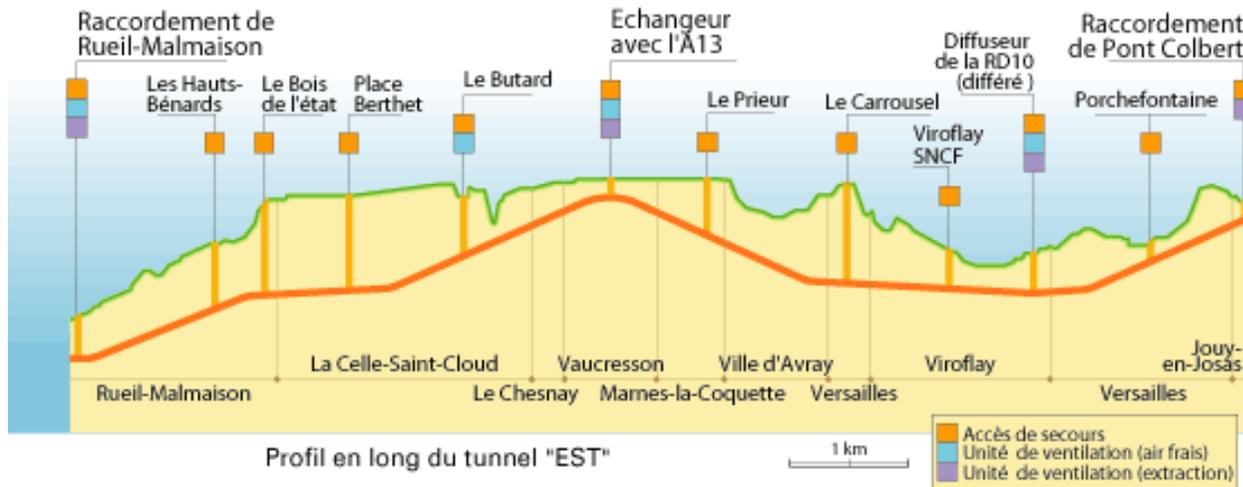
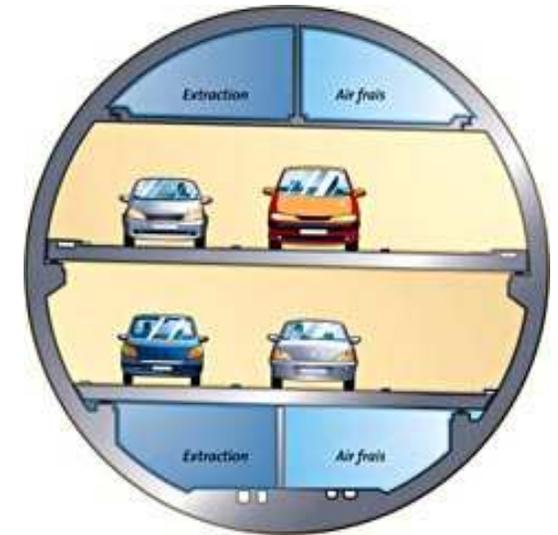
## Gesamtterminprogramm

Stand Juni 2006



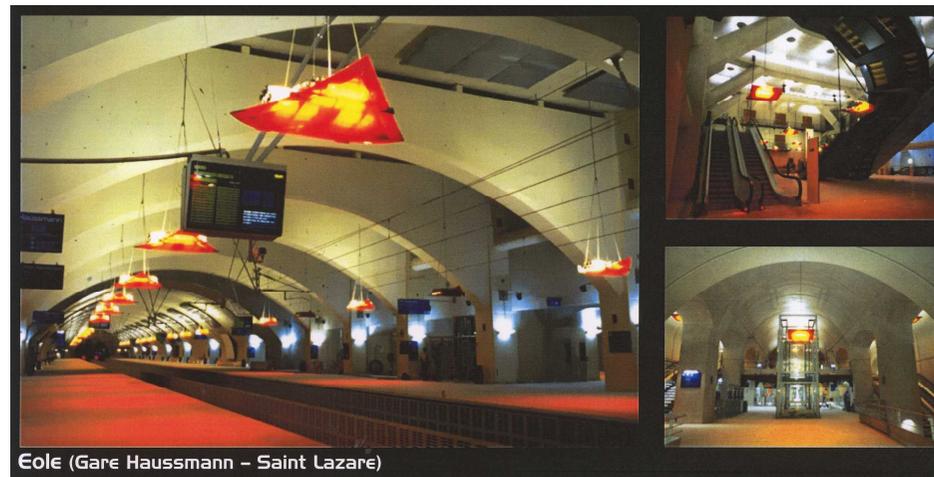
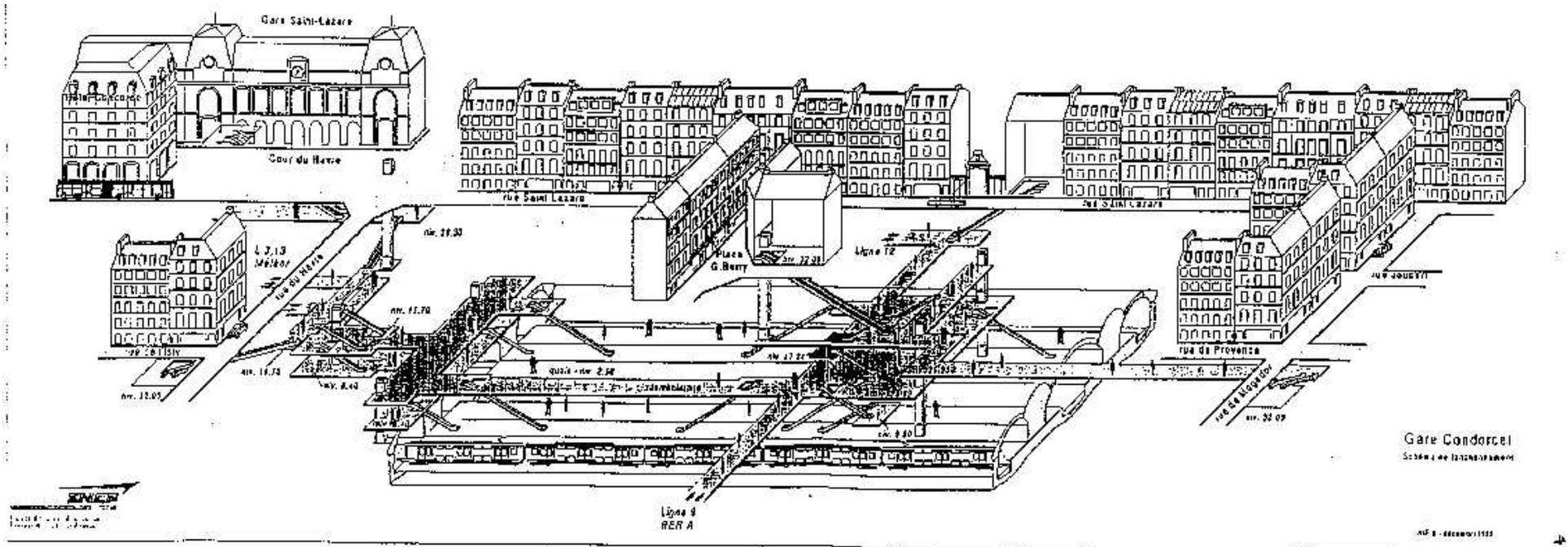


# Duplex A86



# Les grandes gares souterraines de la ligne EOLE (construction 1994 -1999)

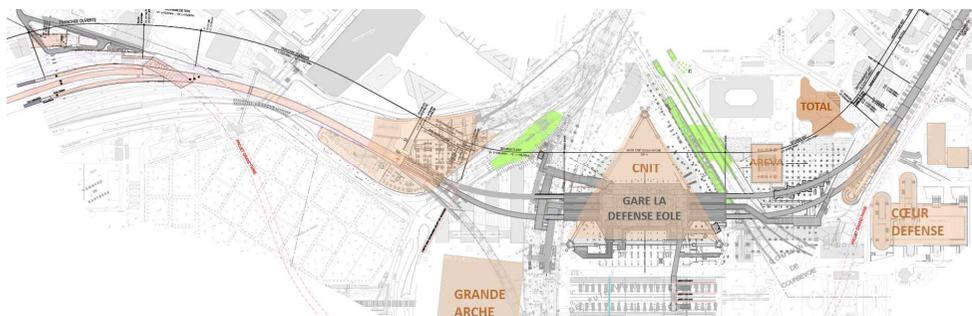
## Hausmann Saint Lazare



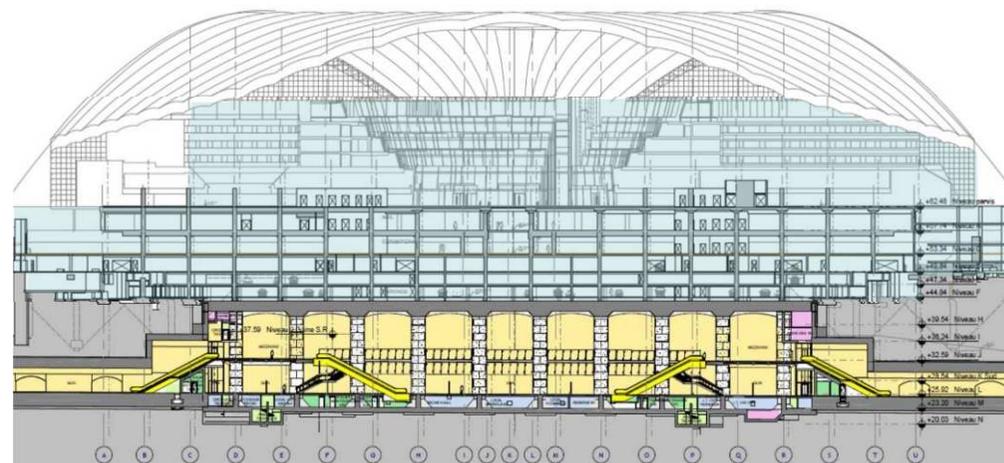
Eole (Gare Hausmann - Saint Lazare)

# Prolongement d'EOLE à l'Ouest : la gare La Défense sous la voûte du CNIT

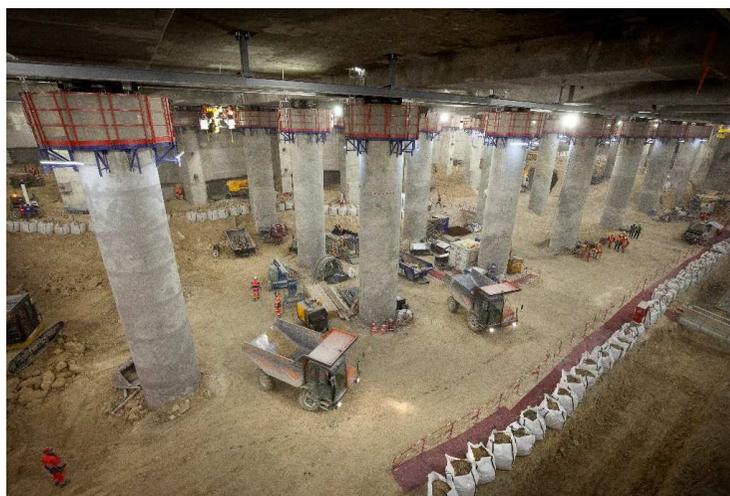
Implantation



Coupe longitudinale



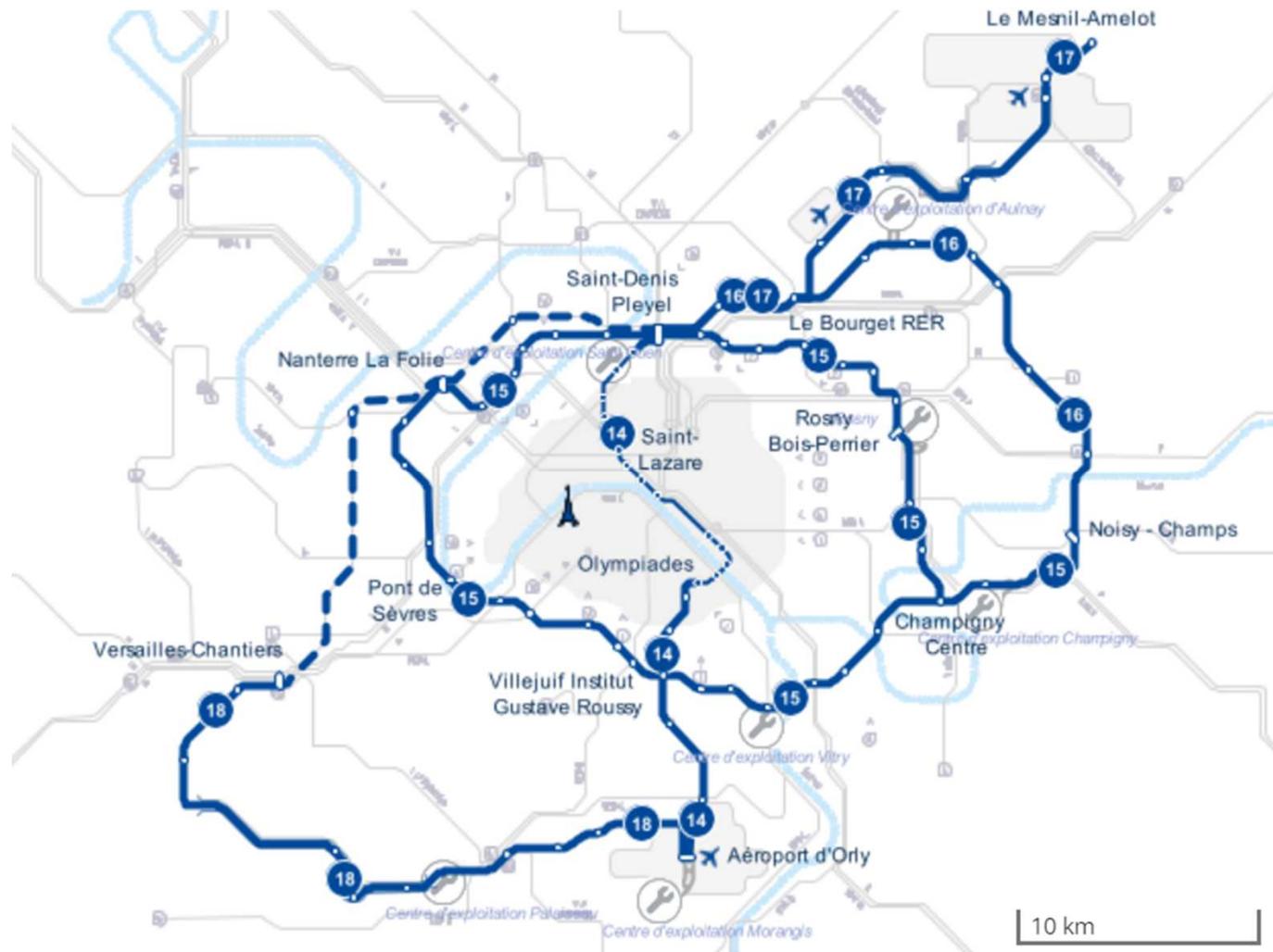
Etat récent des travaux



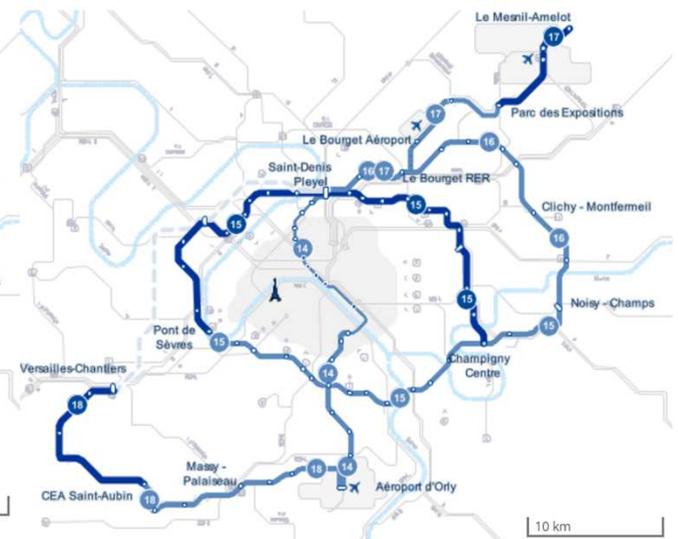
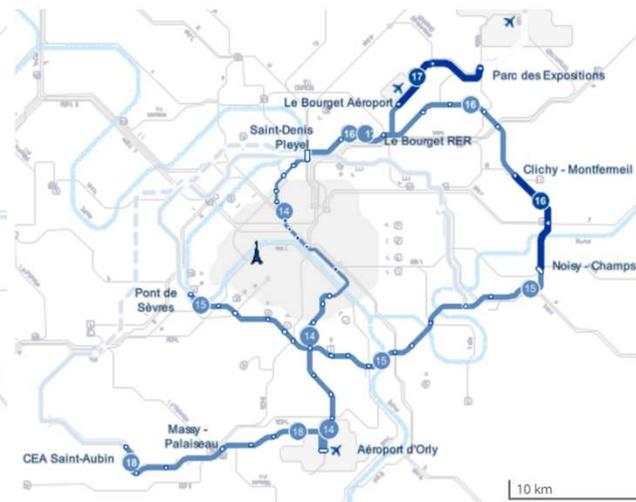
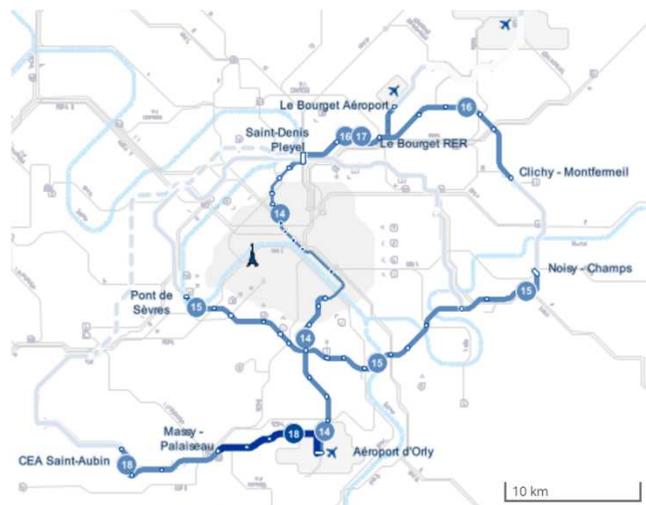
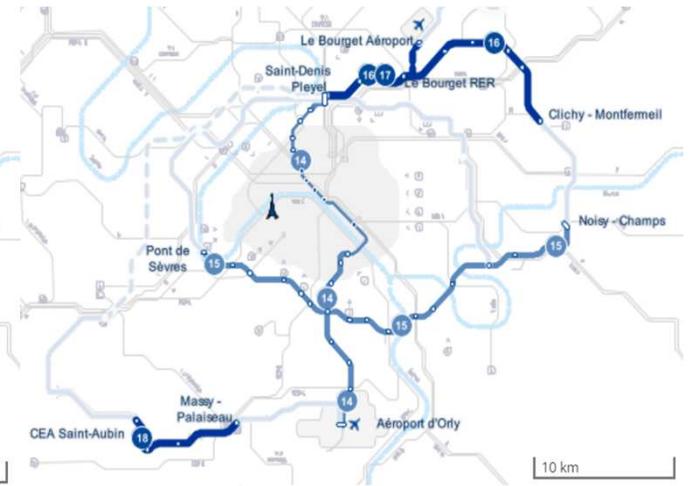
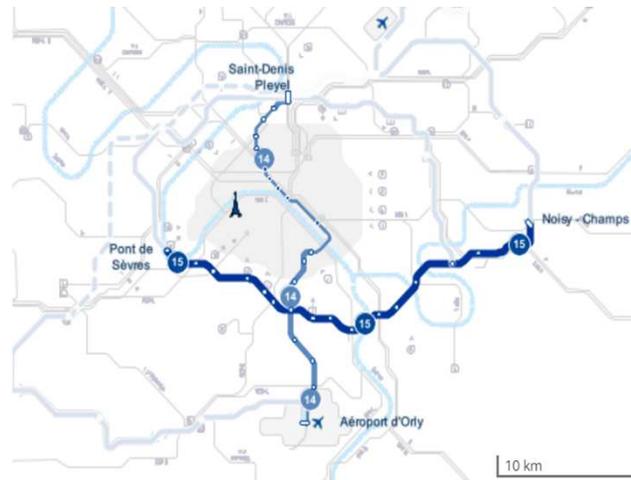
Vue d'architecte de l'état final



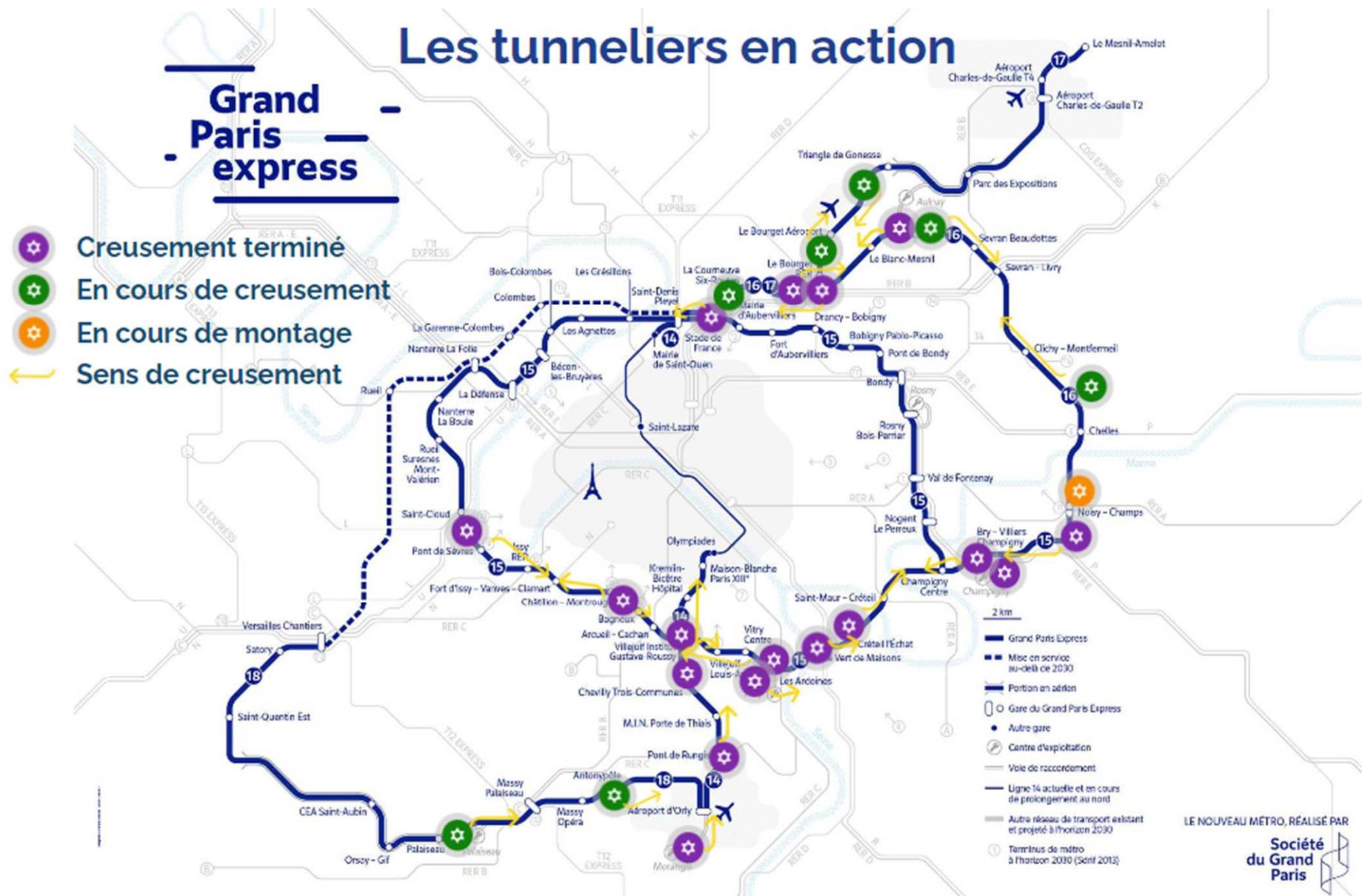
# Grand Paris Express : 200 km de ligne et 68 gares nouvelles



# Grand Paris Express : les grandes étapes de mise en service



# Grand Paris Express : les tunneliers de la première phase



# Grand Paris Express : les tunnels

Un métro entièrement automatique

Longueur des rames : 108 m

Vitesse 40-60 km/h, maximum 120 km/h

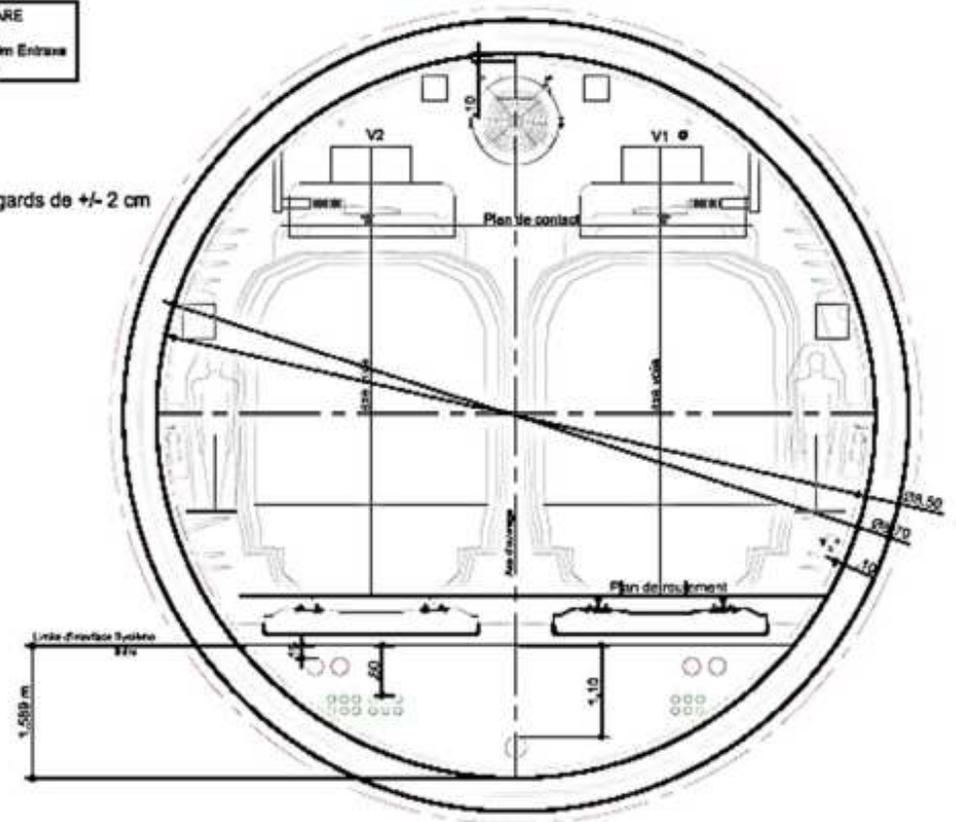
Cadence de pointe : 1 rame toutes les 85 secondes

Tunnel double voie, diamètre intérieur : 8.50 m

TUNNEL MONOTUBE INTERGARE  
ALIGNEMENT DROIT  
CATENAIRE RIGIDE - DIAMETRE 8.50m Entraxe  
3,5m - Hors Appareil de voie

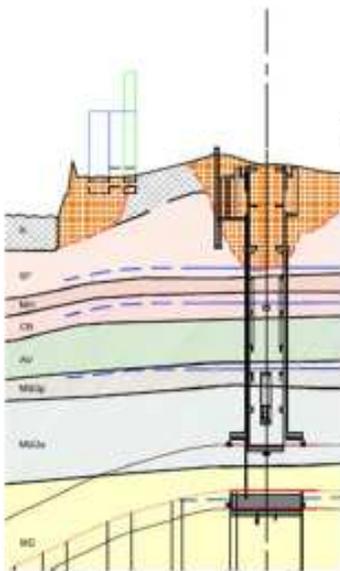
Légende:  
HTA  
Pneus  
Asservissement

Tolérance de pose infra des regards de +/- 2 cm

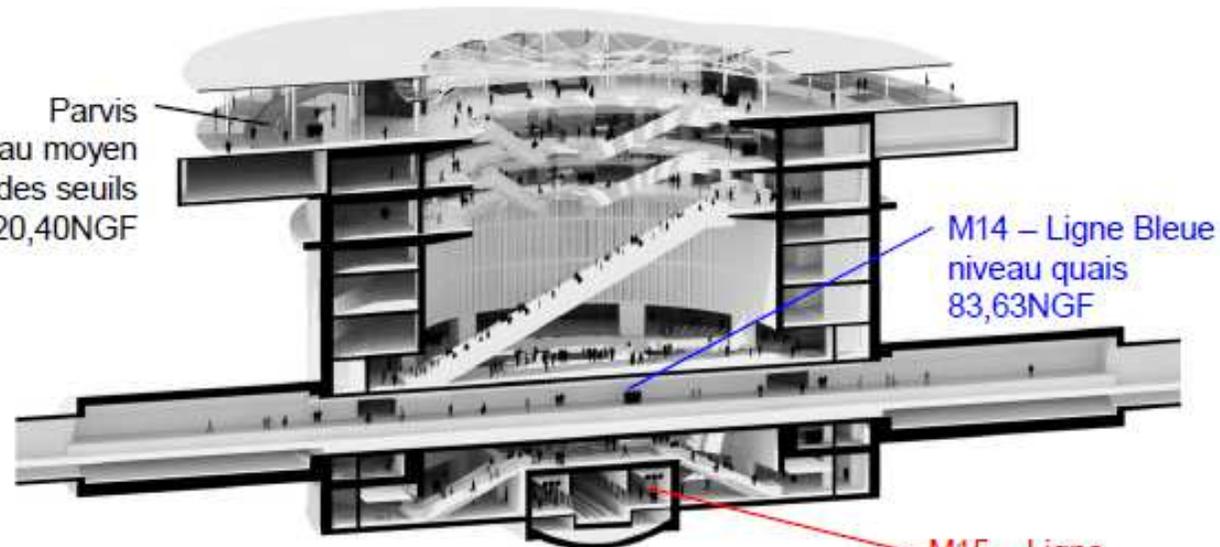


# Grand Paris Express : les gares

Exemple: Villejuif- IGR



Parvis  
niveau moyen  
des seuils  
120,40NGF

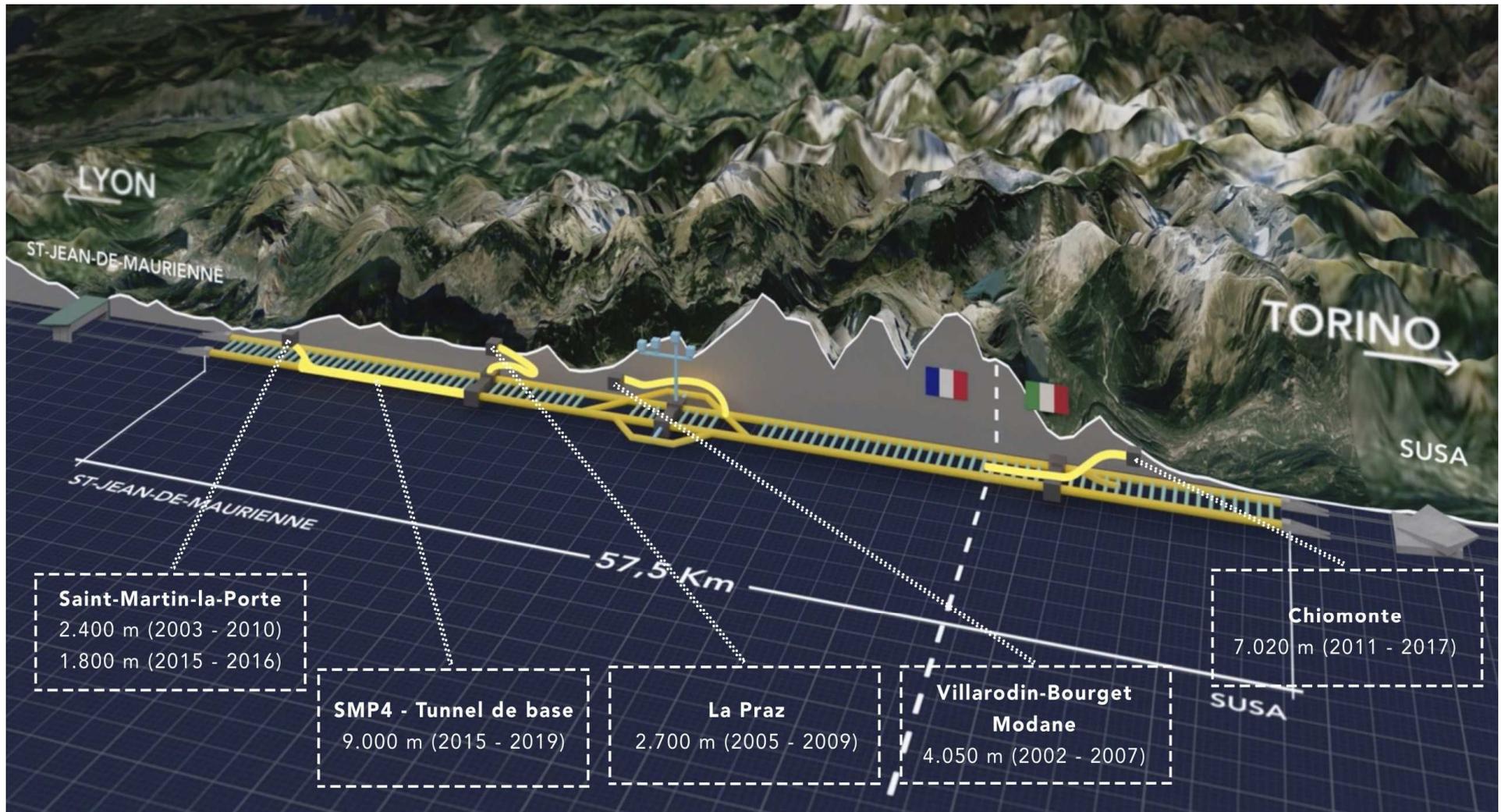


M14 – Ligne  
Bleue  
niveau quais  
83,63NGF

M15 – Ligne  
Rouge  
Niveau quais  
71,60NGF

Profondeur : 50 m  
Puits de 63 m de diamètre  
Parois moulées provisoires + coque béton  
Extrémités de quais en tunnel tradi NATM

# Lyon-Turin section transfrontalière



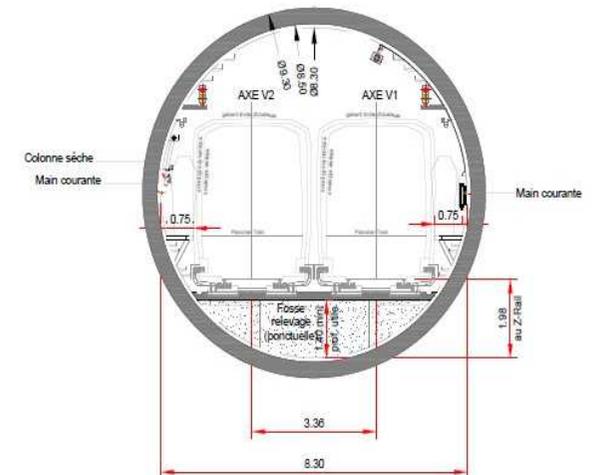
Septembre 2022 : 30km / 162 km de galeries creusées

Les travaux complétant la partie française, pour 3 Md€, sont en phase active de préparation.

## Toulouse : 3<sup>e</sup> ligne du Métro



27 km, dont 21 en tunnel

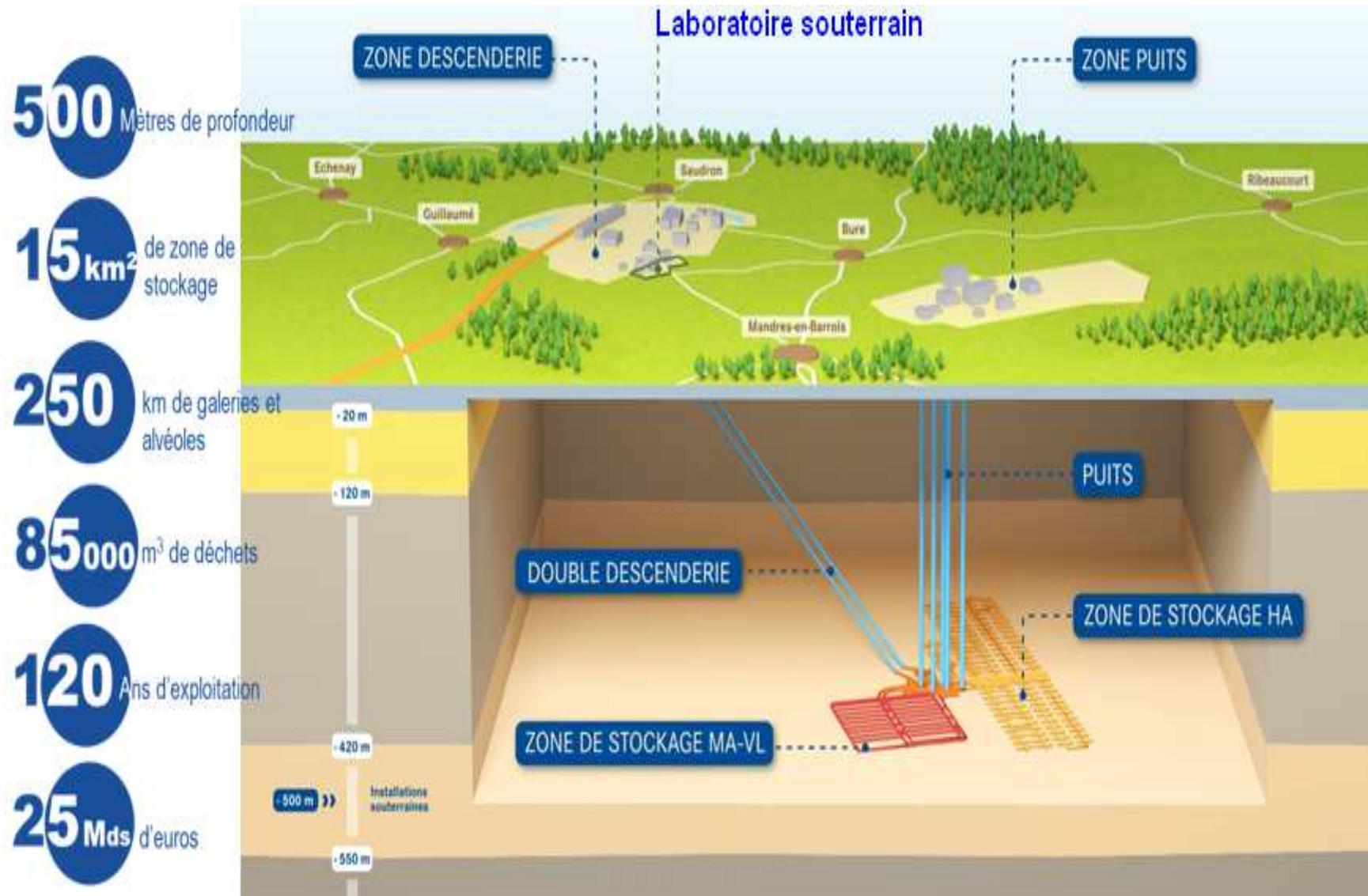


Diamètre d'excavation 9,50 m, à comparer aux 7,75m des lignes A et B

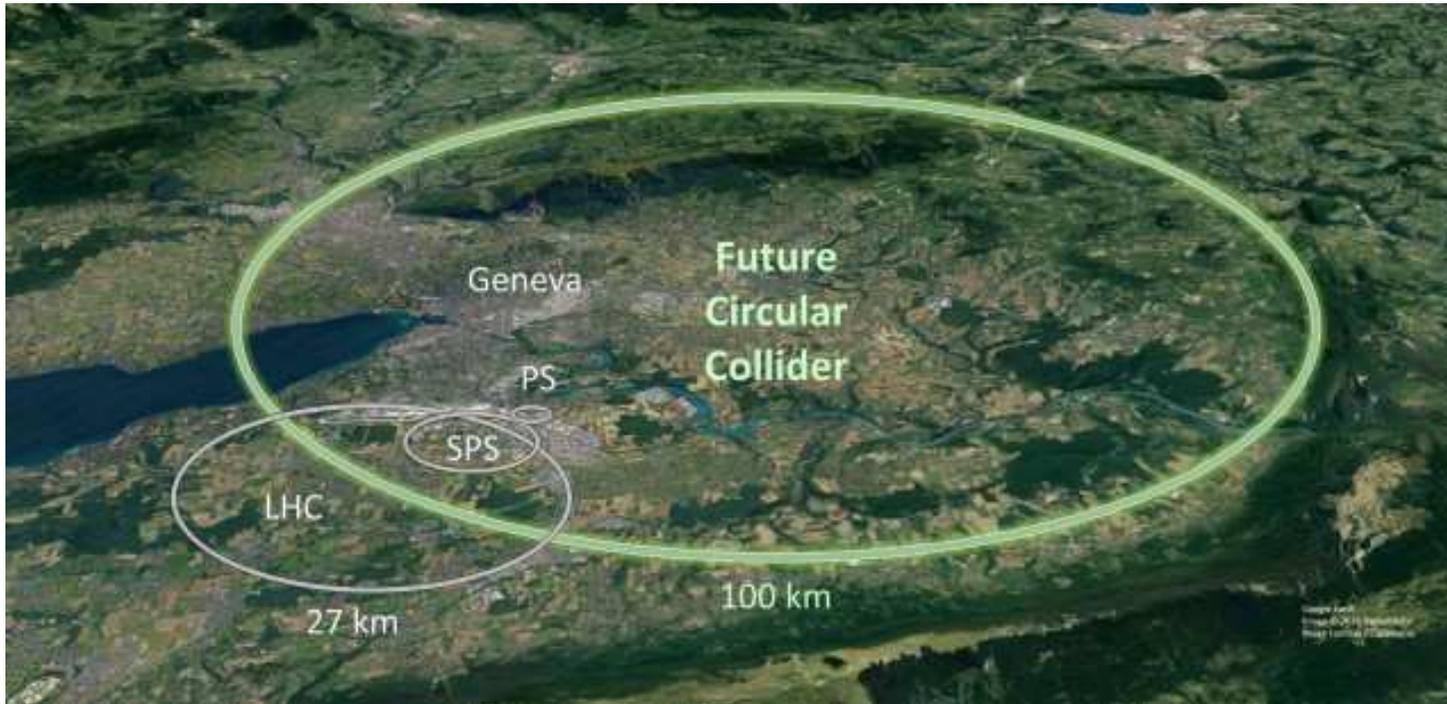
5 tunneliers

Autres projets importants à Marseille, Lyon

# ANDRA CIGEO



# CERN : le projet FCC

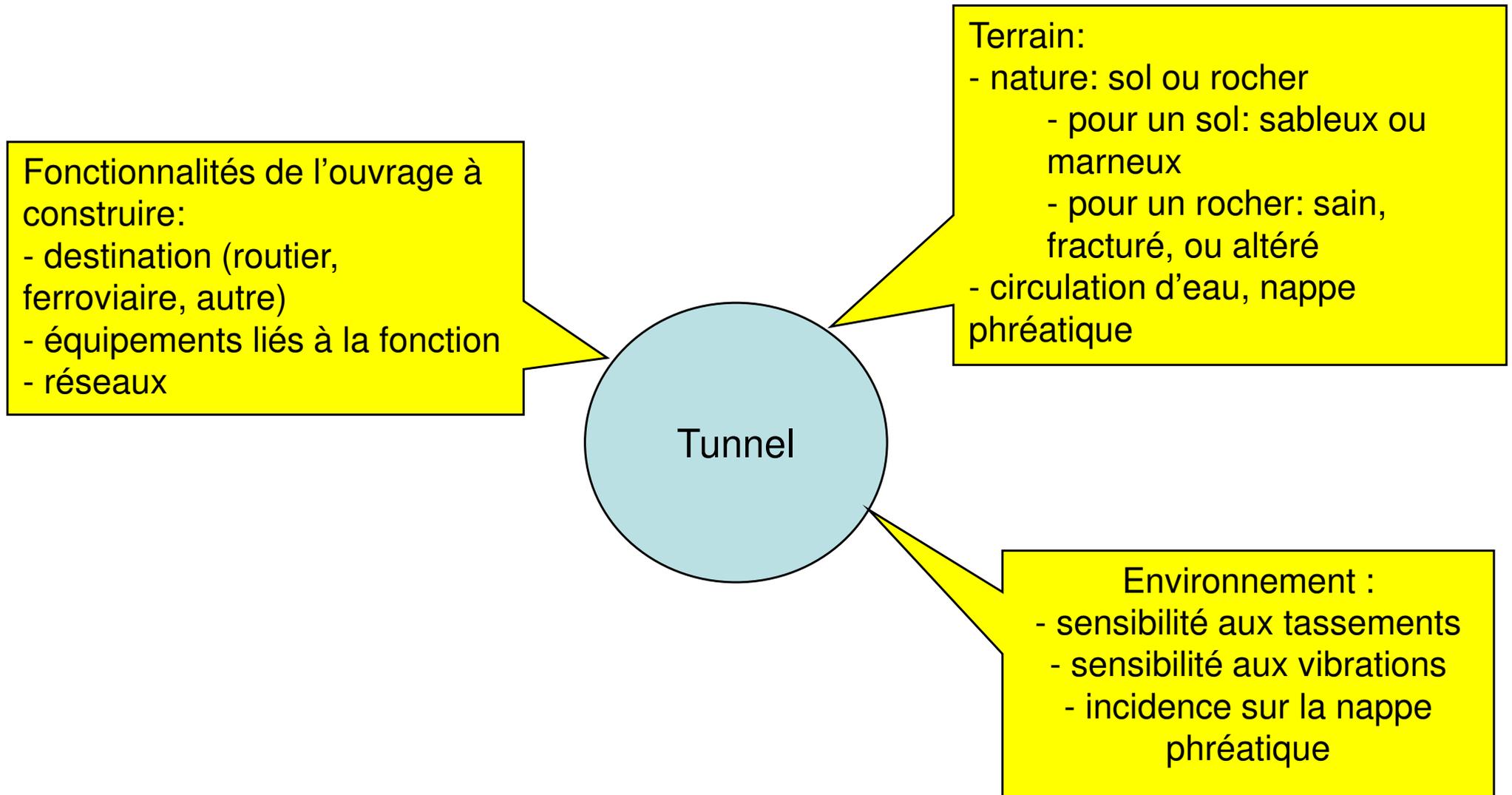


# En guise de conclusion de ce panorama :

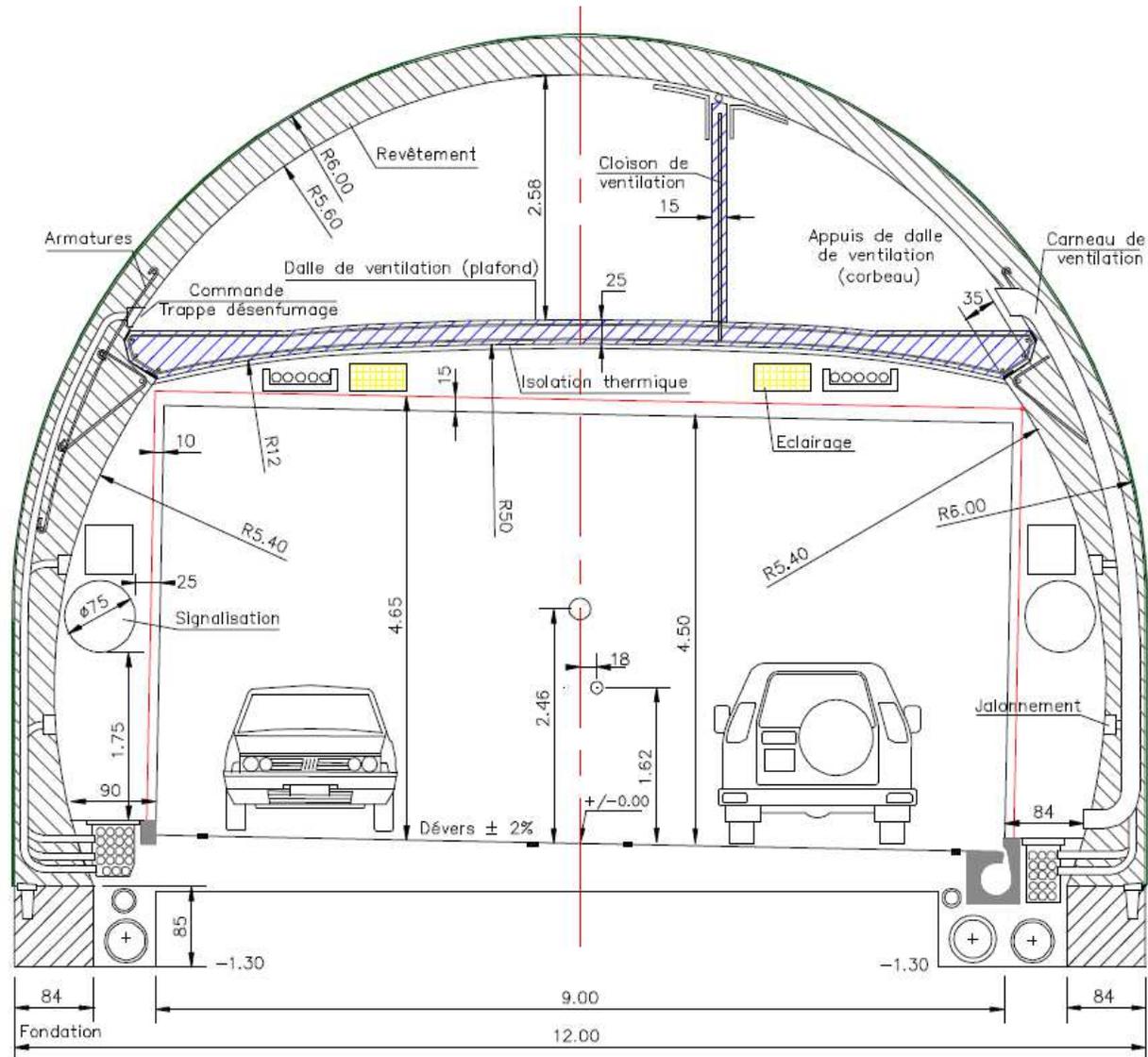
## ➤ **Fiabilisation et sécurisation des techniques de construction**

- Utilisation de techniques de creusement en souterrain là où l'on se contentait autrefois de tranchées ouvertes ou couvertes,
- Ouvrages placés dans des situations d'interaction de plus en plus complexe avec des ouvrages et bâtiments avoisinants
- Souci des impacts sur l'environnement des ouvrages (tassements, vibrations, impacts sur les nappes).
- Amélioration de la sécurité des chantiers : les risques de décès ont très largement décru:
  - début du XXe siècle: pas loin de 10 décès au km
  - années 1980: 1 décès pour 450 000 heures de travail en 1980
  - aujourd'hui: moins de 1 pour 2 à 3 millions d'heures aujourd'hui ; taux de décès plus de 2 fois inférieur à celui des autres secteurs du BTP

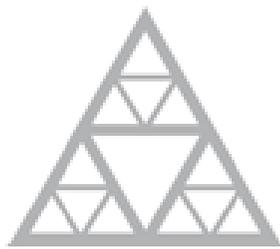
# Les entrants de la conception d'un tunnel



# Fonctionnalités : exemple de tunnel routier







École des Ponts

ParisTech

CONCEPTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Techniques conventionnelles ou  
« traditionnelles »

# Les techniques dites « traditionnelles » ou « conventionnelles » en travaux souterrains : principe

Tâches élémentaires se succédant selon un enchaînement cyclique (travail « séquentiel »):

## ❖ Cinématique au front

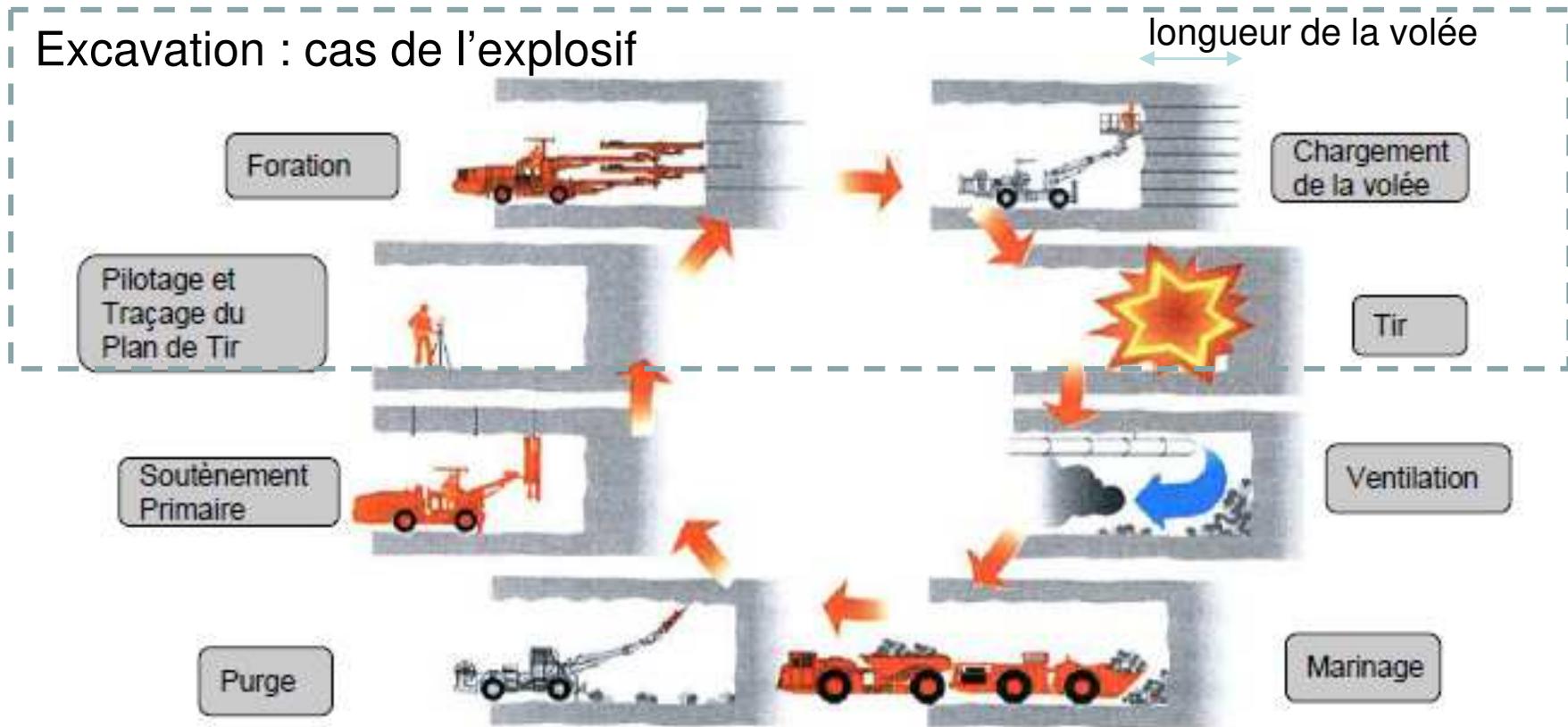
- 1) excavation: abattage mécanique (pelle, fraise), explosif
- 2) marinage: traction thermique, traction électrique, par convoyeur à bande
- 3) soutènement: cintres métalliques, béton projeté, boulons radiaux
- 4) compléments: amélioration du terrain, présoutènement

## ❖ Cinématique à l'arrière du front

- 1) étanchéité: géomembrane
- 2) revêtement: béton coulé en place

# ❖ Cinématique au front

Cycle de production à répéter à chaque « volée »  
Une volée: 2 à 4 m selon les conditions de terrain

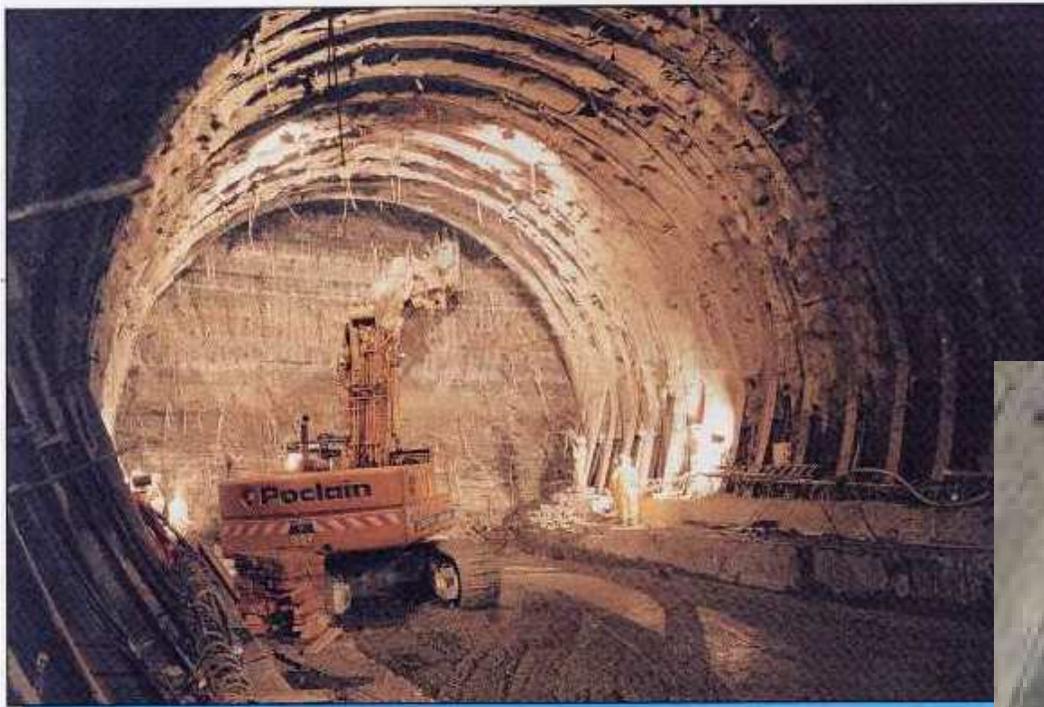


# L'excauation

- Pelle mécanique
- Machine à attaque ponctuelle
- Explosif

# Excavation : abattage mécanique

## La pelle mécanique et le brise-roche



# Excavation : abattage mécanique

## La fraise ou machine à attaque ponctuelle (« MAP ») *Roadheader*

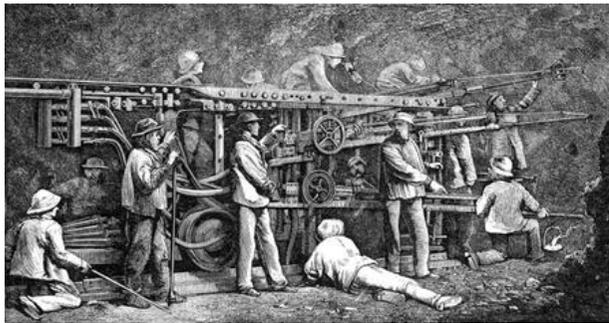
Principe :



# Excavation

## L'excavation à l'explosif *drill and blast*

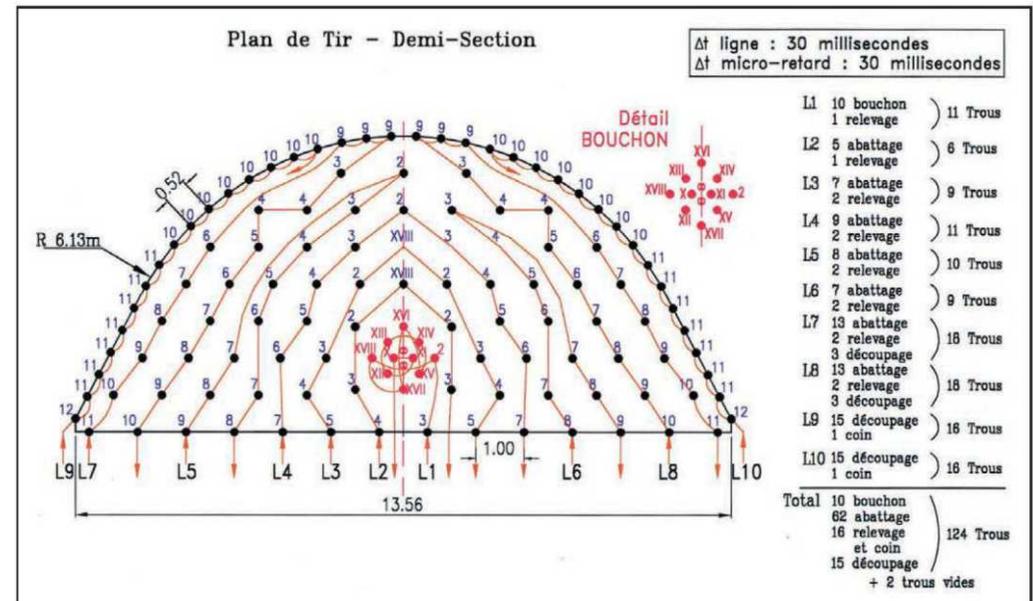
Perforatrice à air comprimé de Sommeillier (vers 1860):



Sa version moderne :



Tir séquentiel



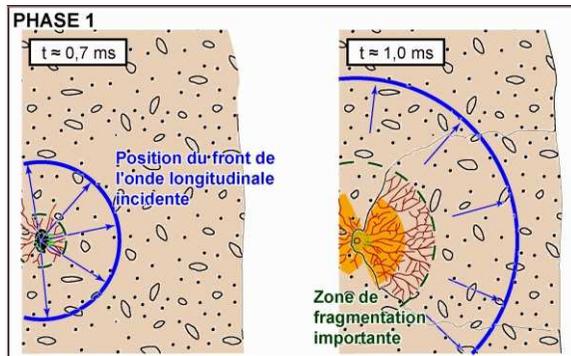
Exemple 3 : Tunnel de la Chamoise - Plan de tir séquentiel - Pleine section

# Excavation

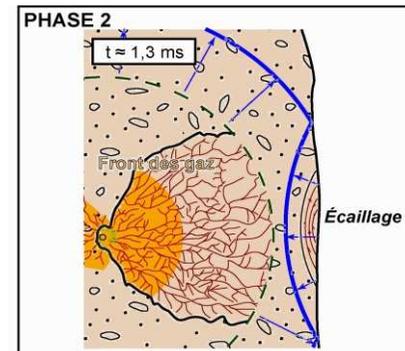
## L'excavation à l'explosif

Schéma des événements à la suite de la détonation NITRAM

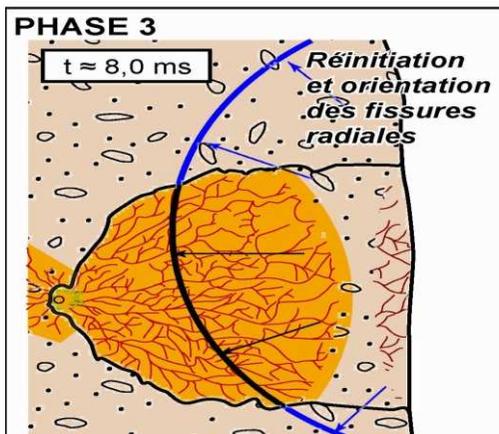
Phase 1 : 0,7 à 1,0 milliseconde



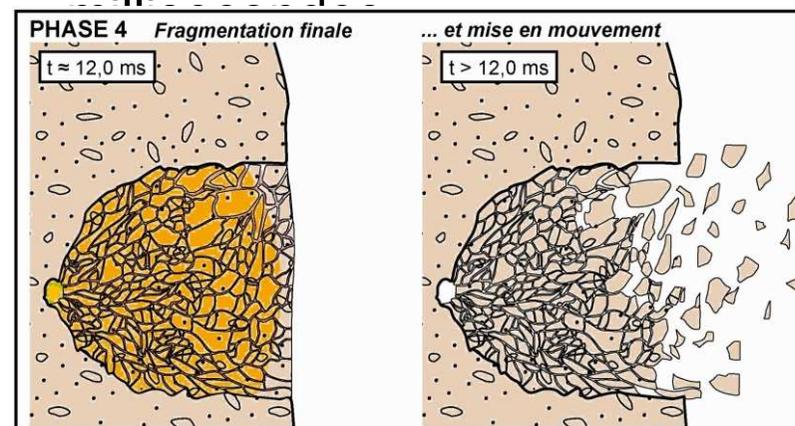
Phase 2 : 1,3 millisecondes



Phase 3 : 8



Phase 4 : 12

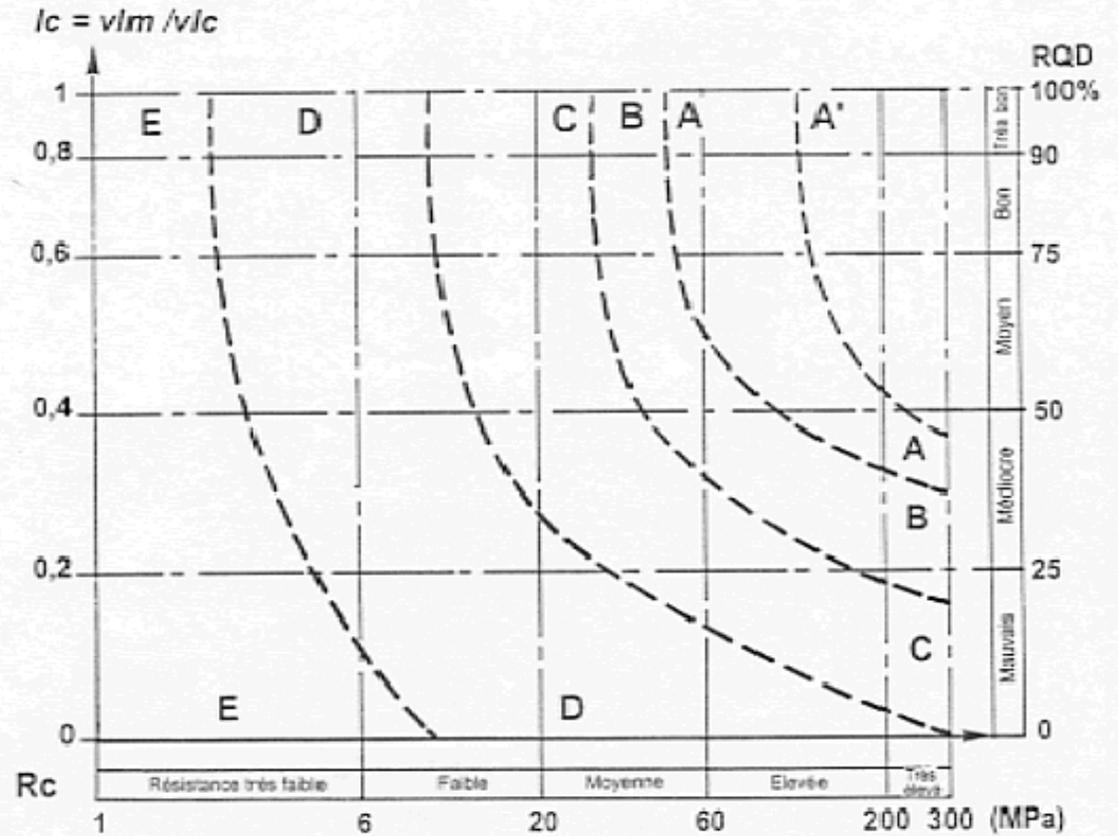


$I_c$  = indice de continuité  
 $v_{lm}$  = vitesse de propagation d'onde sur échantillon  
 $v_{lc}$  = vitesse calculée à partir de la composition minéralogique

B, C, D :  
 Machine attaque ponctuelle  
 A, A', B :  
 Explosifs  
 E :  
 Pelle mécanique avec renforcement préalable du terrain

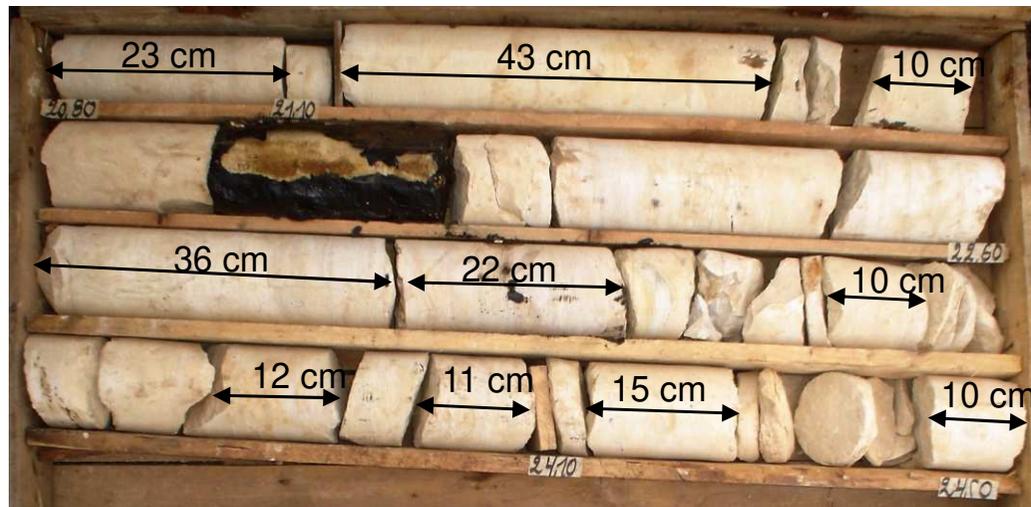
▲ Fig. 4.8.2

Choix des méthodes d'abattage



← 1m →

$$RQD (Rock Quality Designation) = 100 \times \frac{\sum \text{longueurs de carottes} > 10\text{cm}}{\text{longueur totale}}$$



# Marinage



purge

# Marinage

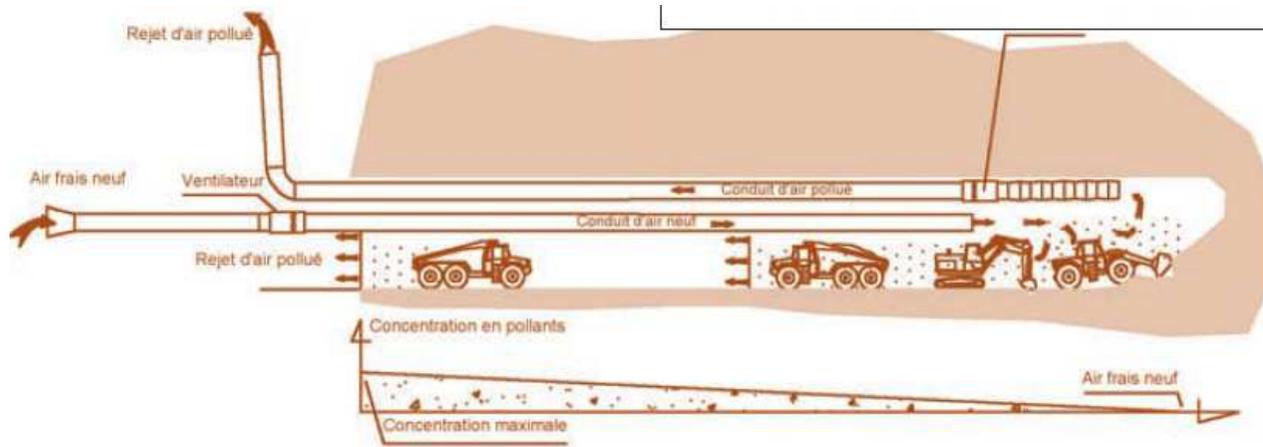


Dumpers



Convoyeur à bande

# Ventilation



Aspiration: fumées de tir,  
poussières

Soufflage: dilution gaz  
d'échappement

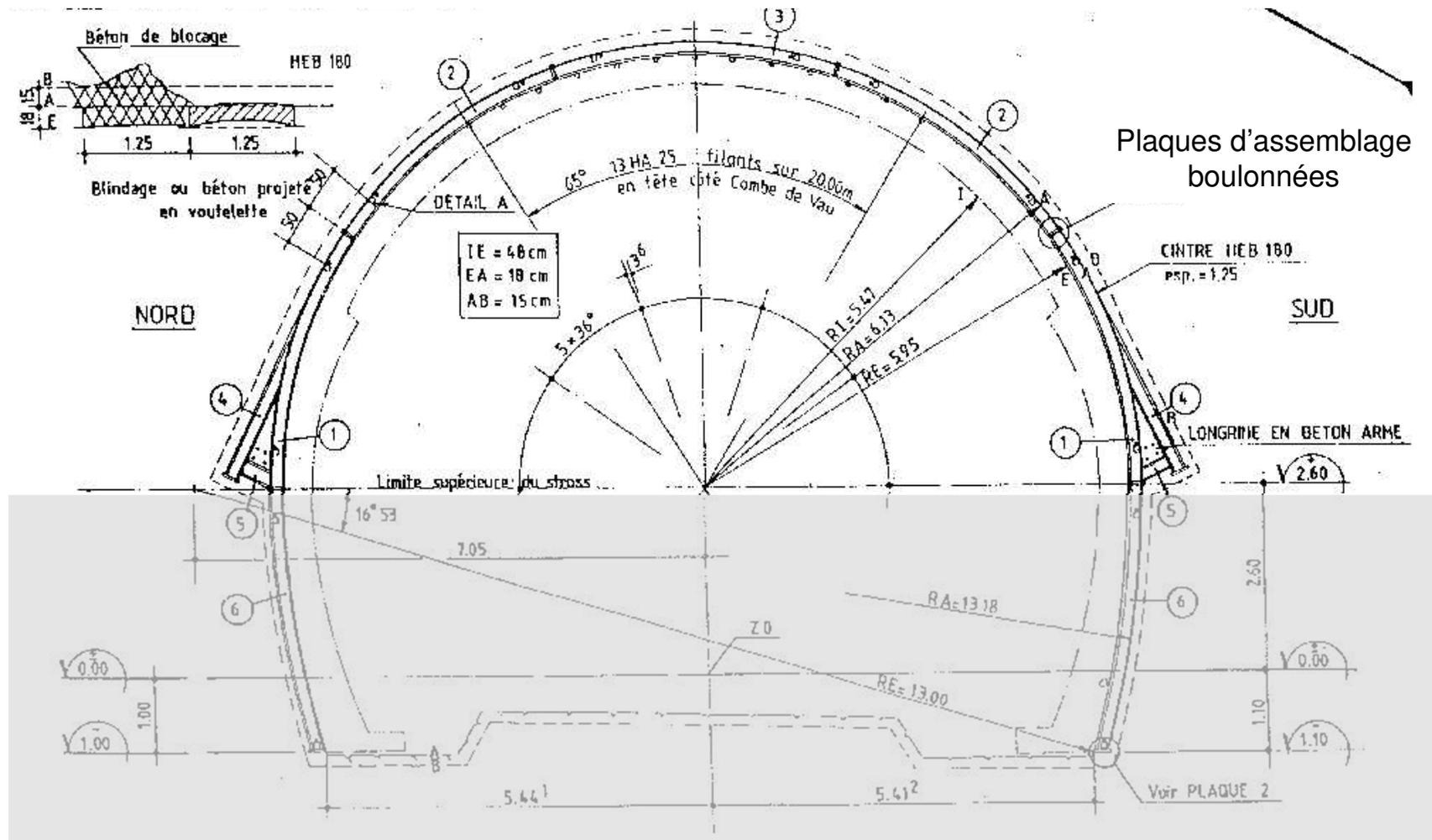


# Le soutènement

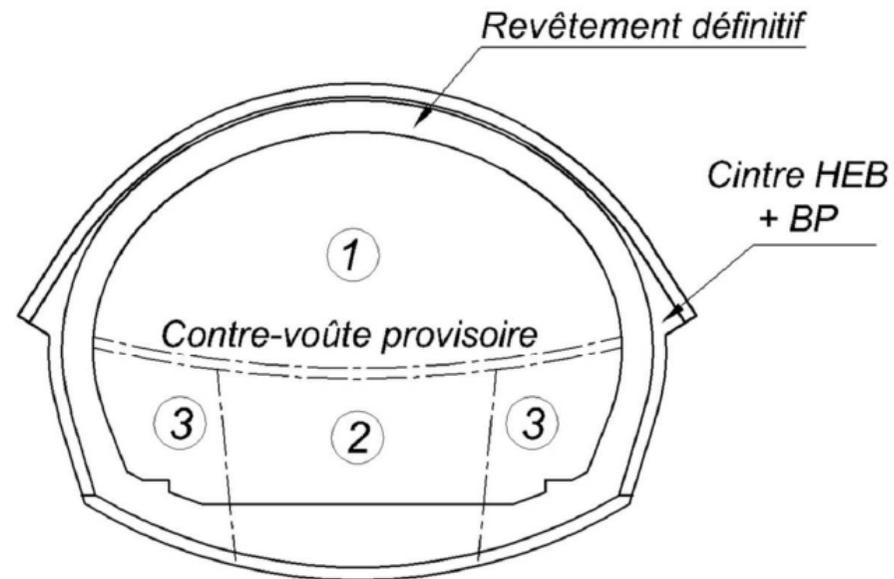
*expression équivalente : soutènement provisoire ,  
terme anglais : primary lining*

- Supportage: cintres
- Consolidation de terrain: boulons
- Confinement: béton projeté
- Confinement et armature: boulons+ béton projeté

Exemple de supportage par cintres lourds : soutènement d'une demi-section supérieure par des cintres HEB 180 disposés tous les 1,25m



## Creusement en demi-section avec cintres lourds :



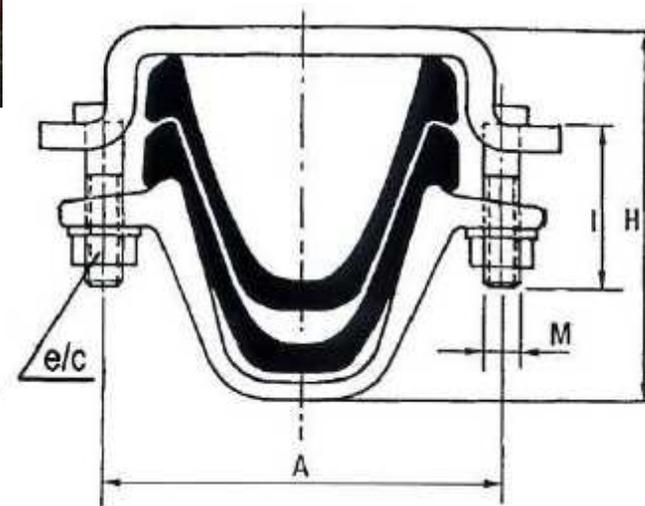
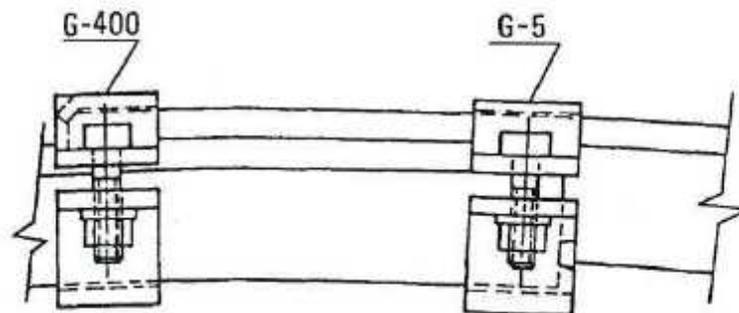
### **SOLUTION SECTION DIVISEE + CINTRES LOURDS**

- 1 - *Demi section supérieure*
- 2 - *Stross central*
- 3 - *Abattages latéraux par plots*

# Cintres coulissants



Exemple de coulissement



## Cintres coulissants : utilité !!!



**Galerie de Saint-Martin-la-Porte 2006 – cas extrême de fluage**

# Consolidation par boulonnage



# Soutènement : l'action du boulonnage

## Deux objectifs principaux



Assurer la stabilité locale et générale

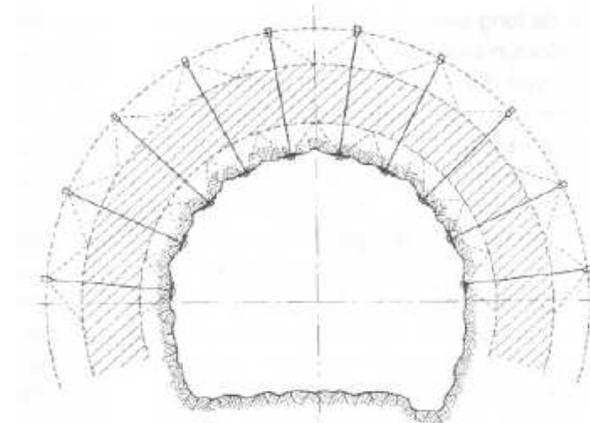
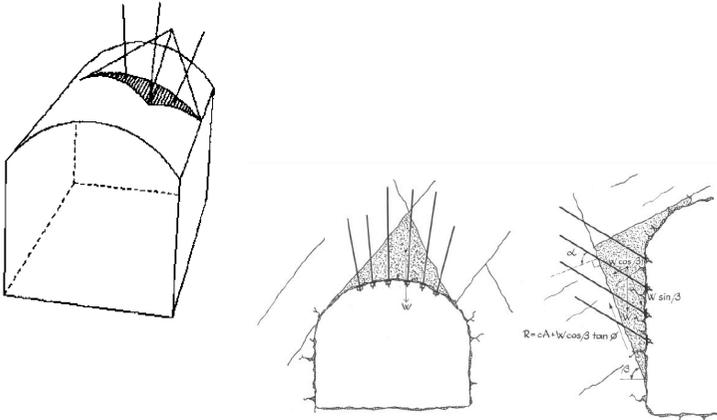


Limiter les déformations du terrain

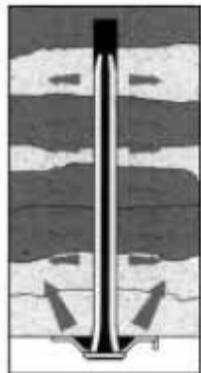
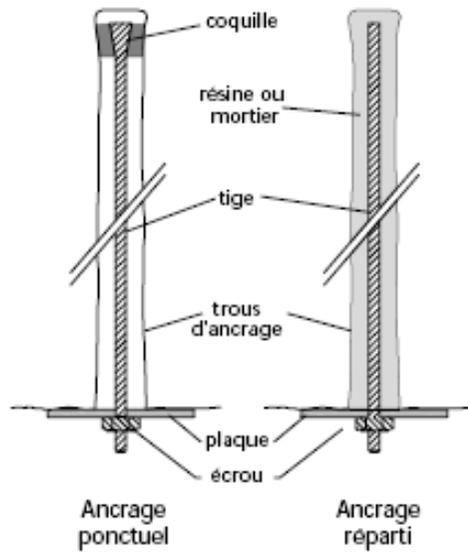
## Deux modes de fonctionnement

**Fonction "d'accrochage"**  
Rôle Porteur

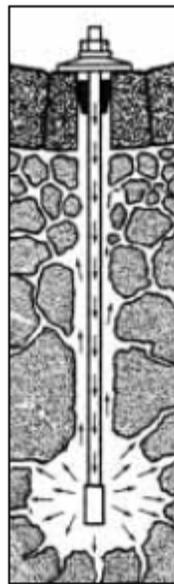
**Fonction "de Renforcement"**  
Rôle de confinement  
Rôle de Renforcement



# Divers types de boulons d'ancrage

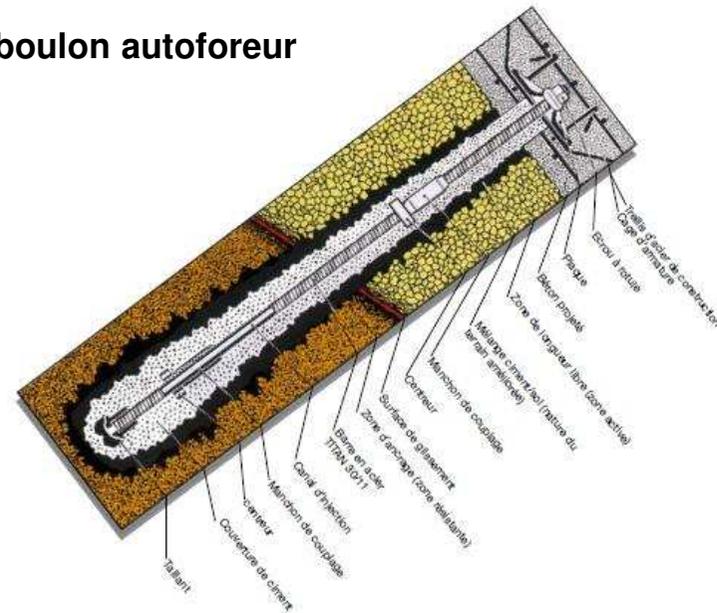


Boulon à ancrage par compression

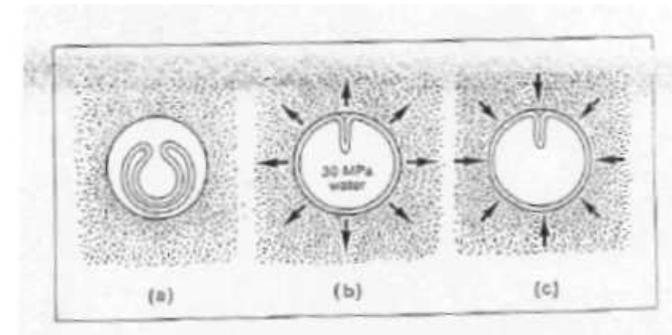
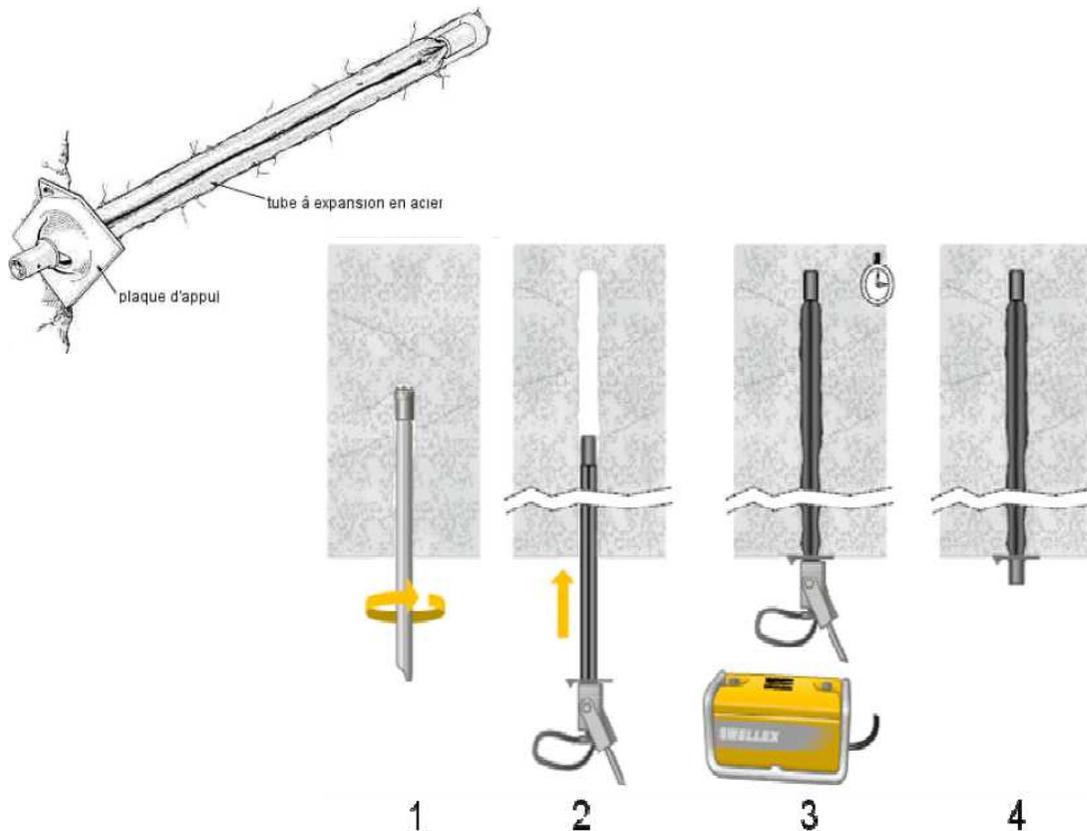


Boulon injecté

## boulon autoforeur



## Le boulon à friction type Swellex :



Interaction entre le terrain encaissant et le boulon Swellex pendant sa mise en œuvre:

(a) Swellex placé dans le forage

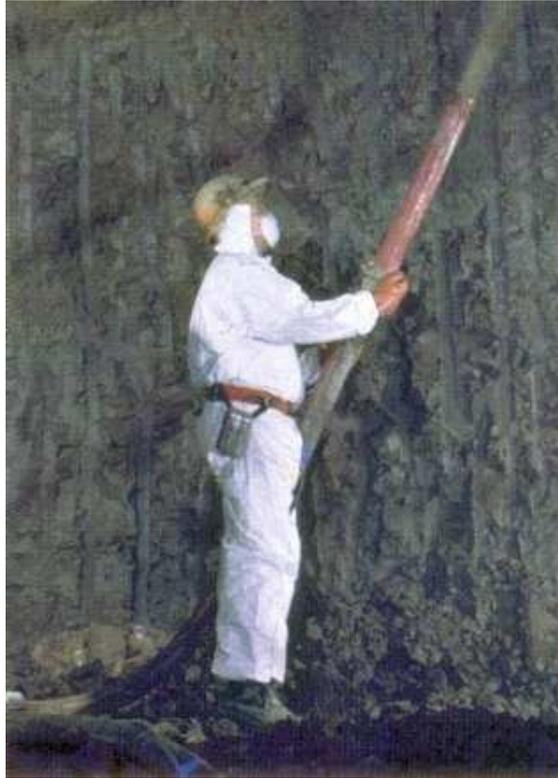
(b) haute pression d'eau gonflant le tube et provoquant une petite expansion du diamètre du forage

(c) relâchement de la pression d'eau: le terrain encaissant se contracte, en provoquant le « serrage » du boulon

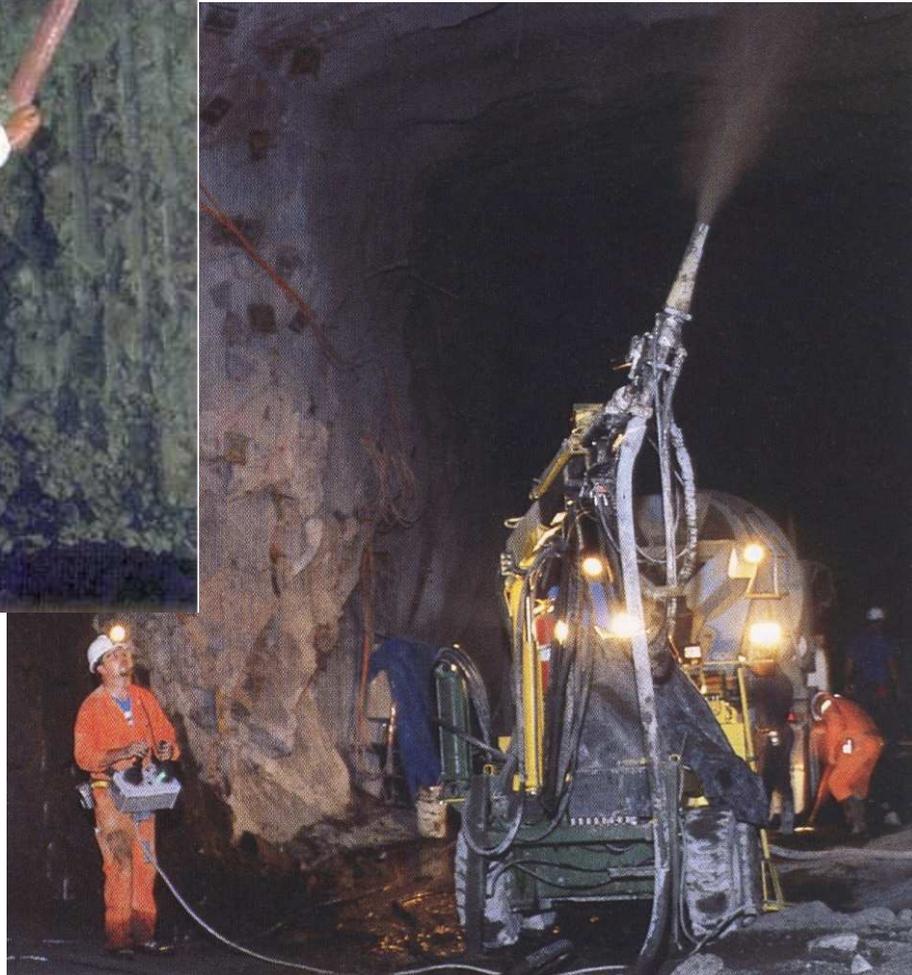
# Confinement par béton projeté

mise en œuvre

manuelle :



robotisée :



# Le béton projeté : modes de fonctionnement

## **TYPE 1** **peau protectrice** **(2 à 5 cm)**

évite l'altération  
du terrain encaissant:

- dessiccation par l'atmosphère du tunnel
- délavage des matériaux
- amorces de gonflement liées à la migration de l'eau interstitielle
- phénomènes de micro-rupture

## **TYPE 2** **peau résistante** **(8 à 20 cm,** **en plusieurs couches)**

Cimentation des fissures

Clavage des blocs instables

Filet tendu entre les boulons ou les cintres (béton projeté fibré ou armé d'un treillis soudé)

## **TYPE 3** **anneau de** **structure** **(10 à 30 cm,** **en plusieurs couches)**

Limitation des déformations élasto-plastiques du terrain

Confinement des terrains non Boulonnables

Confinement des terrains Gonflants

Réparations de tunnels

# Béton projeté: deux modes de projection

Voie sèche :



*Machine à rotor et son tapis d'alimentation*

rotor



*Lance de 25 mm pour projection en voie sèche*

Voie humide :



# Le béton projeté

## L'incorporation de fibres dans les bétons projetés (voie humide) (macro-fibres)



*Exemples de fibres métalliques*



*Exemples de macro-fibres synthétiques*



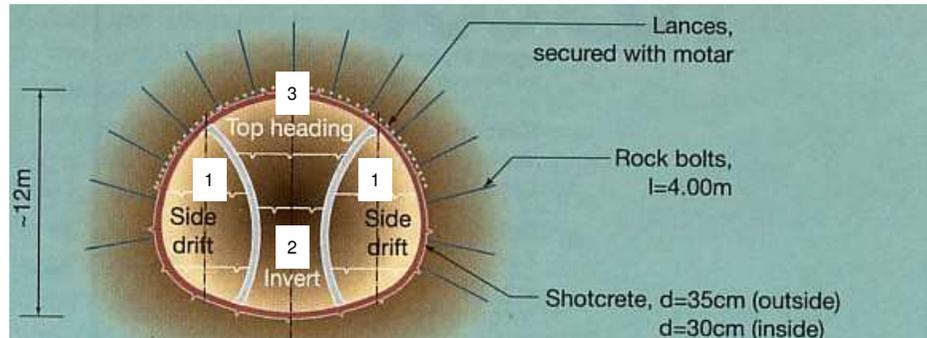
### Intérêt:

- Donner un comportement ductile au béton
- Absorber l'énergie de fissuration et redistribuer les contraintes mécaniques
- Limiter le rebond

Inconvénient des fibres métalliques : blessure de l'étanchéité

-> généralisation de l'emploi de fibres synthétiques et abandon de solutions de type treillis soudé ou fibres métalliques avec couche finale non fibrée

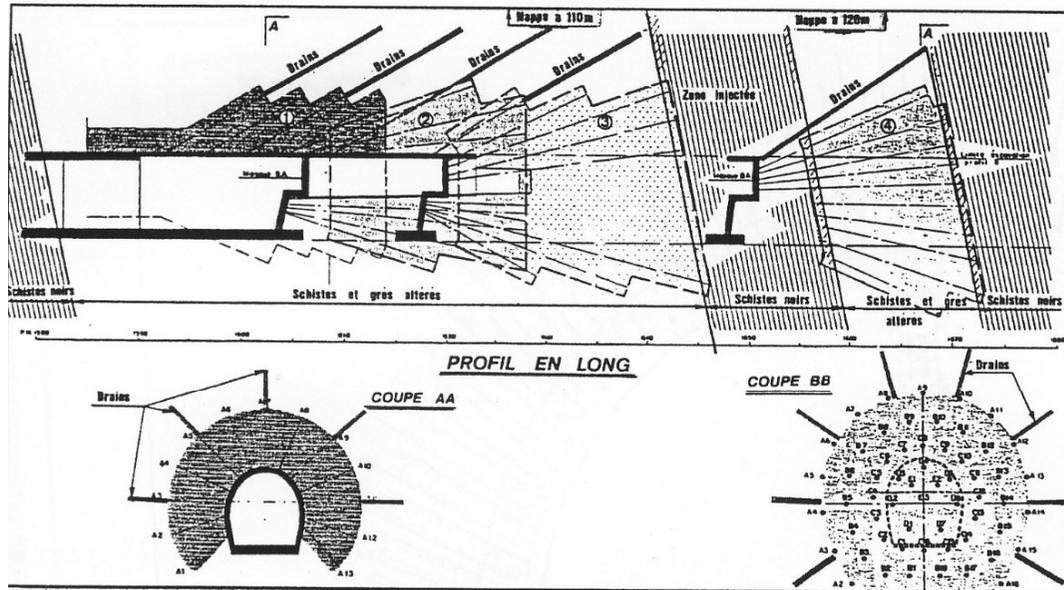
# Mise à profit de l'association du boulonnage et du béton projeté (type 2) : la célèbre méthode NATM (« Nouvelle Méthode Autrichienne »)



# L'amélioration du terrain et le présoutènement

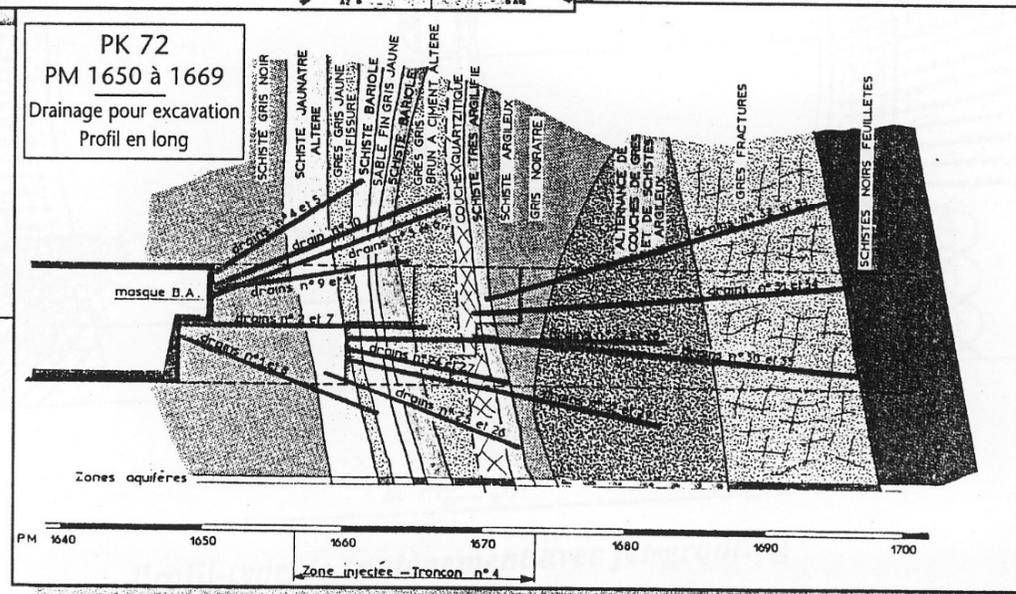
- Injections, drainage
- Boulonnage du front de taille
- Voûte parapluie
- Congélation

# Injection, drainage

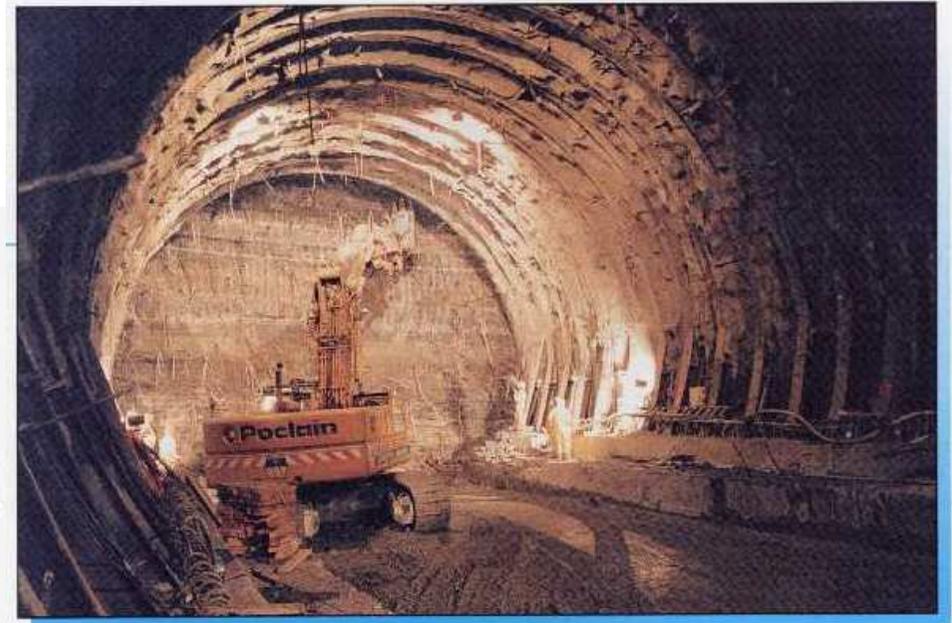
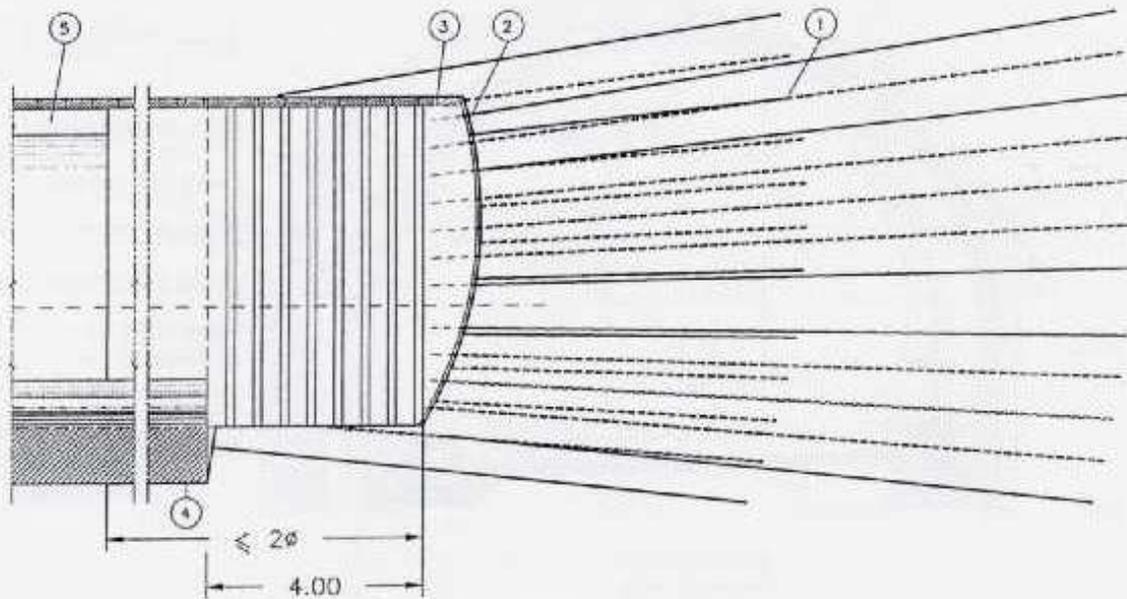


*Injection  
à l'avancement*

*Drainage  
à l'avancement*



# Boulonnage du front de taille

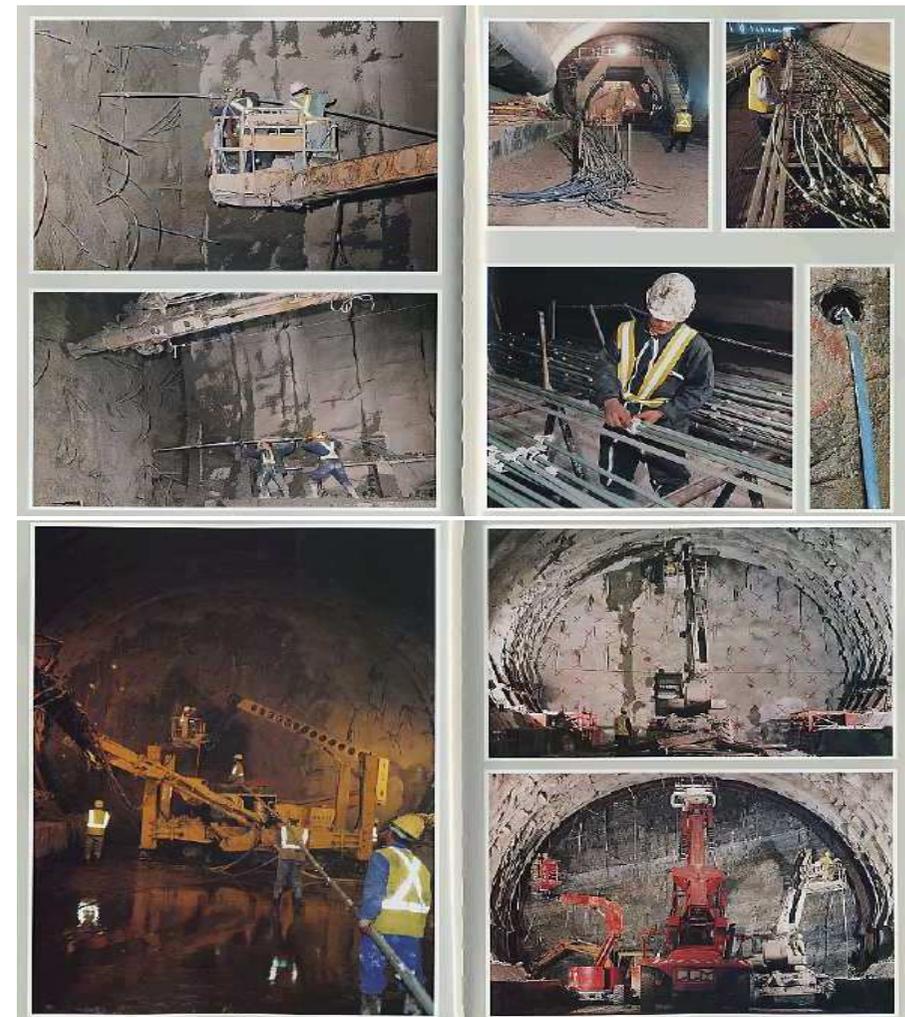
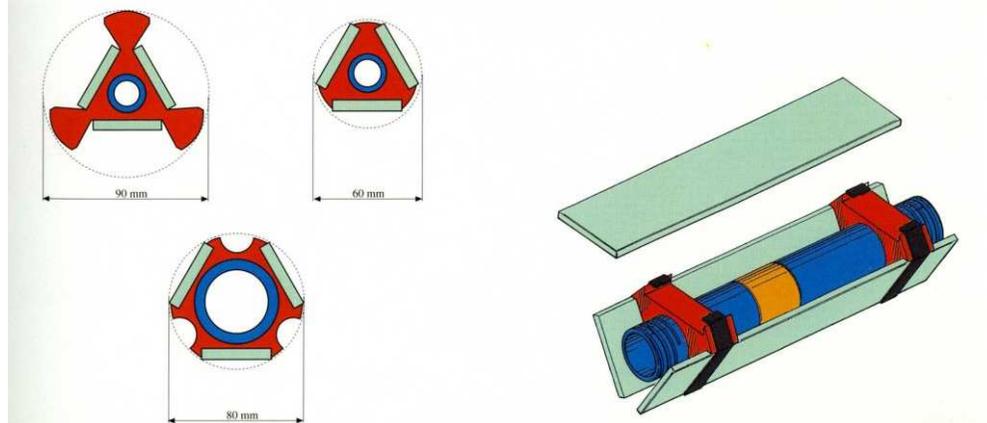


- ① - Renforcement du noyau
- ② - Façonnage du front de taille
- ③ - Soutènement (cintres + béton projeté)
- ④ - Bétonnage du radier
- ⑤ - Bétonnage de revêtement

# Boulons en fibre de verre:

**DURGLASS FL®** Elemento strutturale brevettato  
Patented structural element  
Élément structural breveté

Codice Code Code	Larghezza piatto Flat bar width Largeur du plat mm	Spessore piatto Flat bar thickness Épaisseur du plat mm.	Resistenza alla trazione Tensile strength Résistance à la traction KN
ES35	30	4	350
ES50	40	4	500
ES60	40	5	600
ES70	40	6	700
ES80	40	7	800
ES90	40	8	900
ES100	40	9	1000
ES110	40 </td <td>10</td> <td>1100</td>	10	1100
ES140	40	12	1400
ES180	40	15	1800



Nom du tunnel			Toulon	Tartaiguille	San Vitale
Type de boulon			VTR*	Durglass Fl**	VTR*
Section (fibre de verre uniquement)	$S_b$	[mm <sup>2</sup> ]	1570	840	1180 à 1570
Module d'élasticité	$E_b$	[MPa]	20 000	40 000	19 000
Contrainte limite élastique	$\sigma_{yb}$	[MPa]	500	1000	600
Allongement à la rupture	$\epsilon_{yb}$	[-]			2%

\* tube en résine de polyester renforcé de fibre de verre

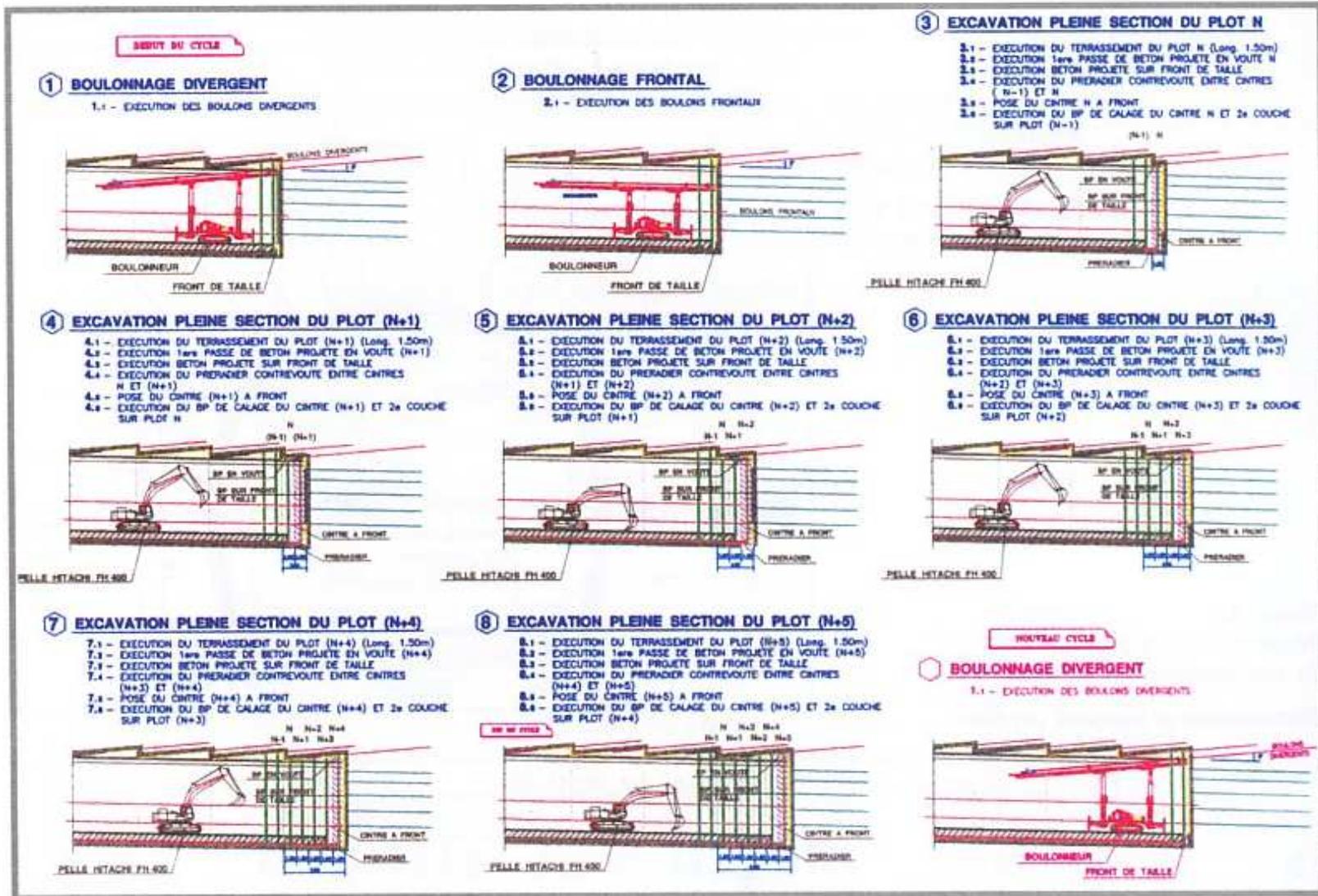
\*\* boulon constitué de trois plaquettes en fibre de verre entourant un tube PVC

2022 - 2023  
Tableau I.2. Caractéristiques des boulons en fibre de verre utilisés pour trois chantiers différents

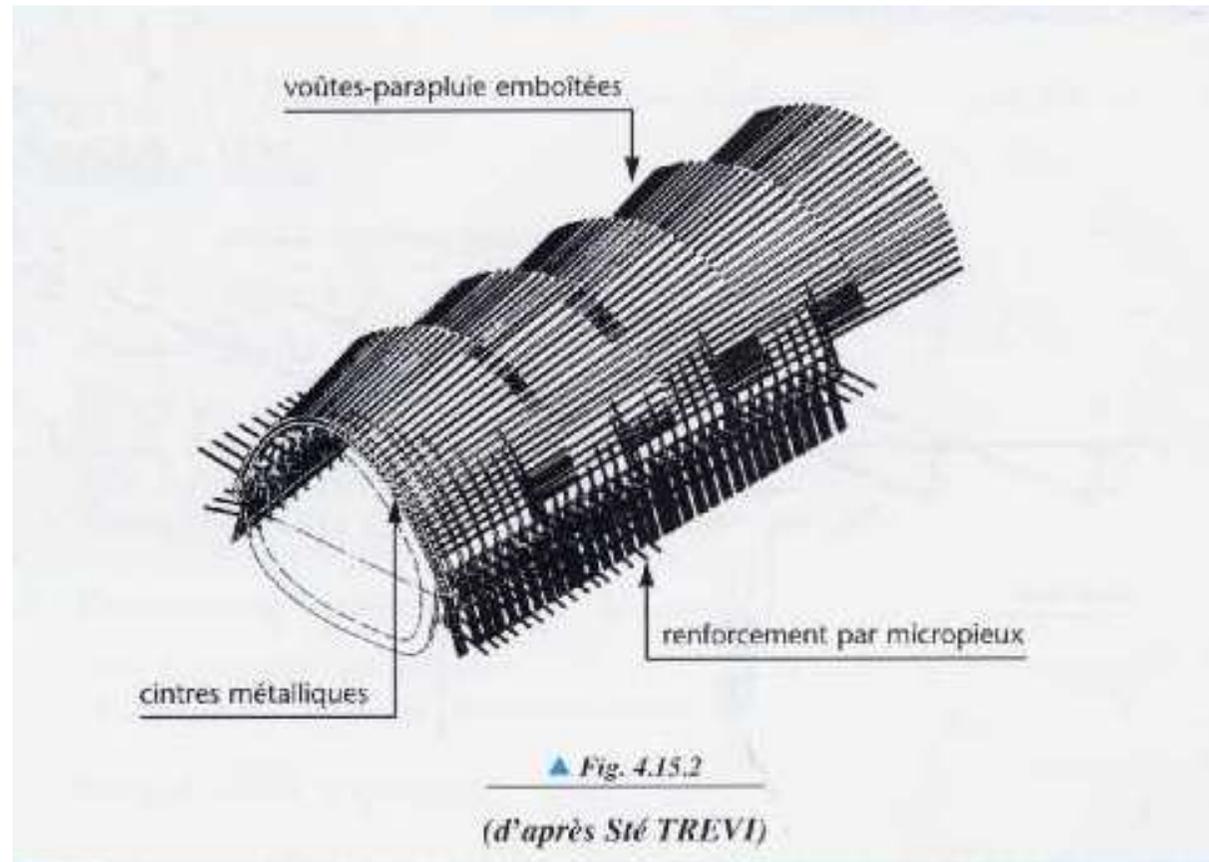
# Boulons en fibre de verre

La méthode italienne du prof. Lunardi

ADECO-RS: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli



# Principe des voûtes-parapluies



- Congélation :

Procédé mis en œuvre en dernier recours, quand les autres méthodes ne marchent pas, du fait de la nature des terrains, difficilement injectables : sols fins, avec une trop faible perméabilité, ces difficultés étant aggravées par la présence d'eau non circulante.

Principe: création de colonnes de terrain congelé (-10 °C) autour de forages équipés de tubes creux où circule le liquide de refroidissement (saumure ou azote liquide) provenant d'un groupe froid.

- Congélation :

Exemple: Mairie d'Aubervilliers ligne 12

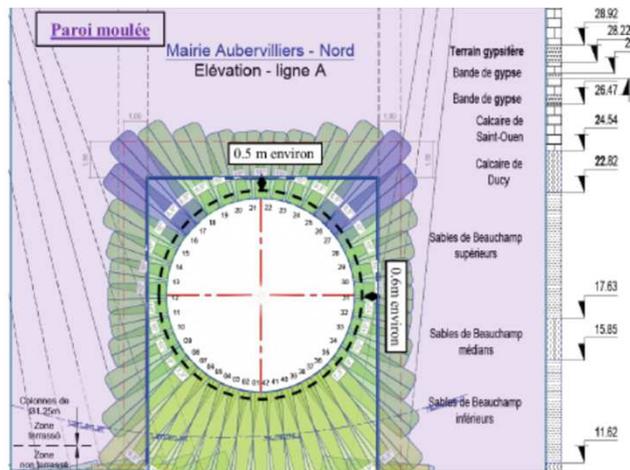


Figure 4 Configuration de la congélation au droit du tympan Nord de la station Mairie d'Aubervilliers.

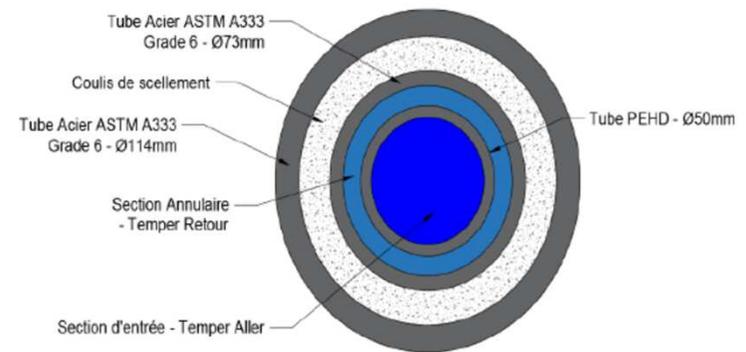


Figure 5 Coupe d'une sonde de congélation



# Le revêtement

*expression équivalente : revêtement définitif*

*termes anglais : secondary lining, final lining*

- Stabilité de l'excavation
- Étanchéité
- Fonctions liées à l'exploitation

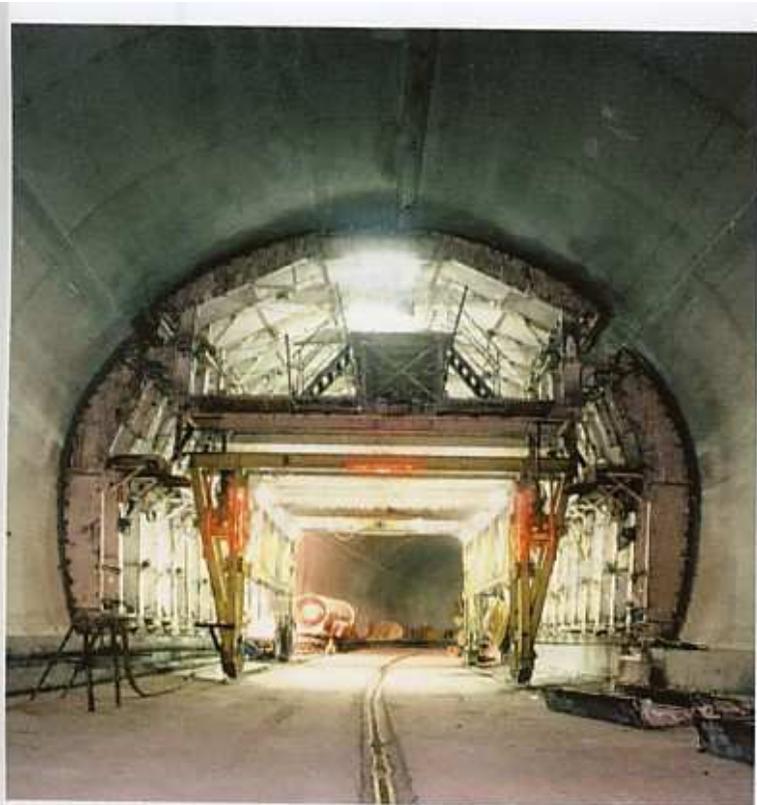
# Étanchéité et revêtement

L'étanchéité par D.E.G. (Dispositif d'Etanchéité par Géomembrane)



# Étanchéité et revêtement

## Le coffrage par coffrages-outils



Coffrage de voûte

Arch shuttering

b) Plan type 2

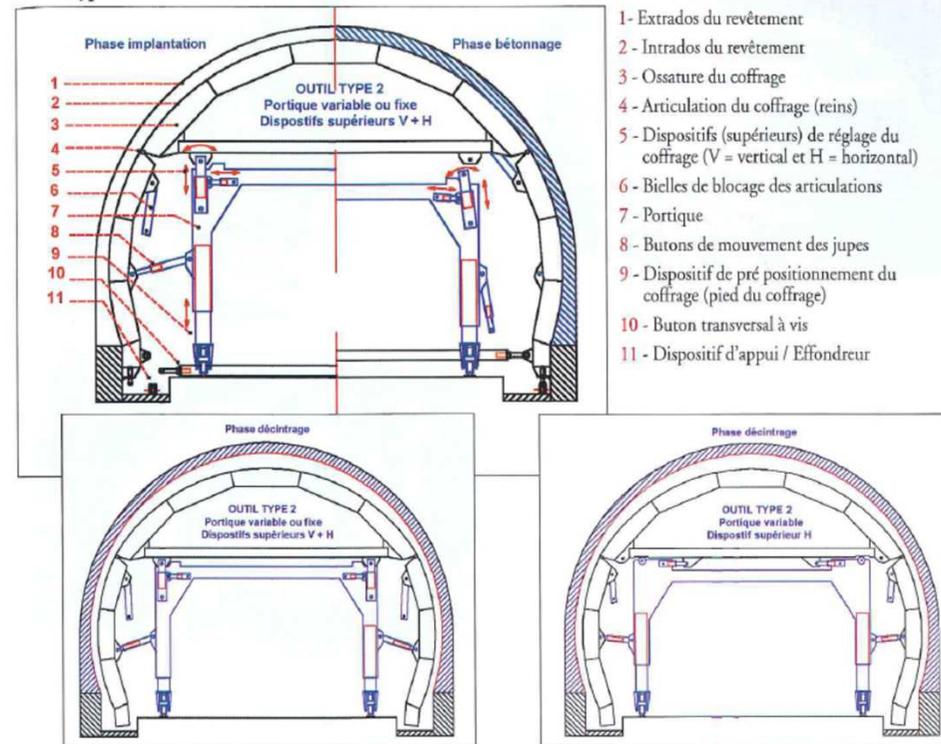


Figure 12 - Plans schématiques et légendes des outils type 2

# Étanchéité et revêtement

## Bétonnage et vibrage

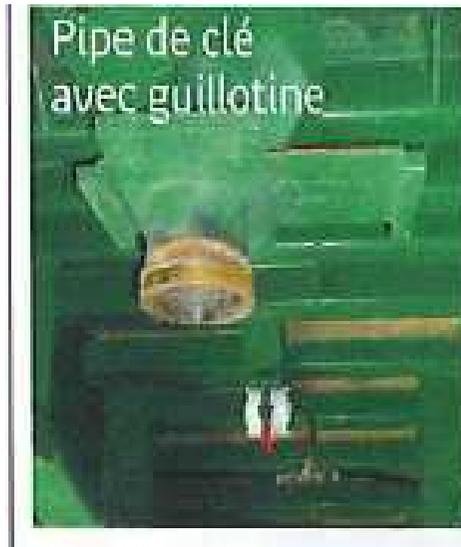
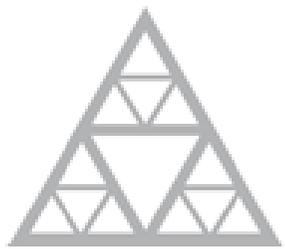


Figure 34 - Vibrateur à air comprimé sur coffrage

## Béton non armé en tunnel: composition et conditions de mise en œuvre

- limitation de l'exothermie et du retrait, tout en restant compatible avec les cycles de bétonnage
  - => mixte CEM I/CEM II 350 kg/m<sup>3</sup> max
- épaisseur minimum: 20 à 30 cm
- fortes épaisseurs difficiles à vibrer (vibreurs extérieurs au coffrage)
- pas de joints de retrait (inutiles), mais plots de bétonnage limités à 8 à 10 m



École des Ponts  
ParisTech

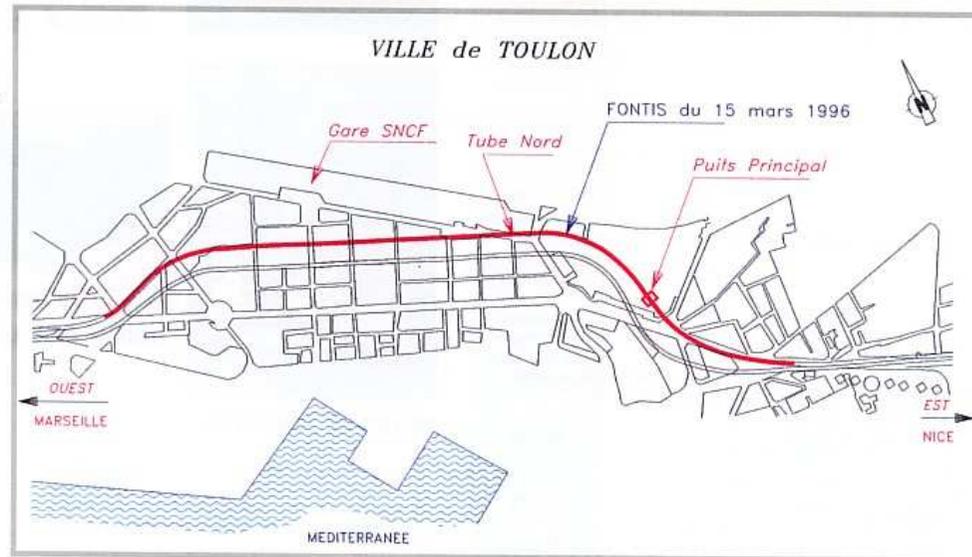
## CONCEPTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

# Les risques

Le fontis  
The subsidence  
cavity

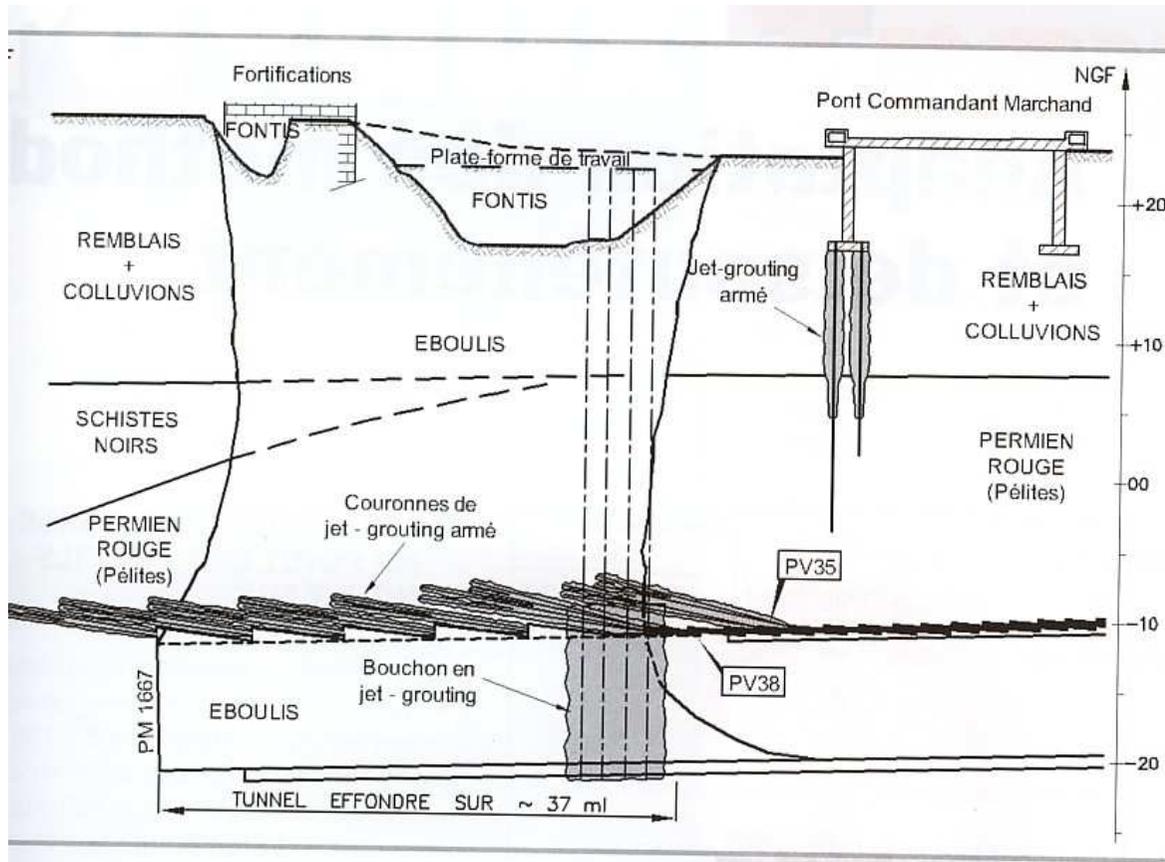


Figure 1  
Plan  
de situation  
Location drawing



## Tunnel de Toulon 15/03/1996

2022 - 2023



**Figure 4**  
**Profil longitudinal des travaux de reprise**  
**dans la zone du fontis**  
*Longitudinal profile of underpinning work*  
*in the subsidence cavity region*

Paris ligne 14,  
station Olympiades  
21/02/2003



© RATP PIL - Didier Dupuy

560n10 - 21/02/2003



© RATP PIL - Didier Dupuy

671n22a - 05/03/2003

bord gauche du fontis

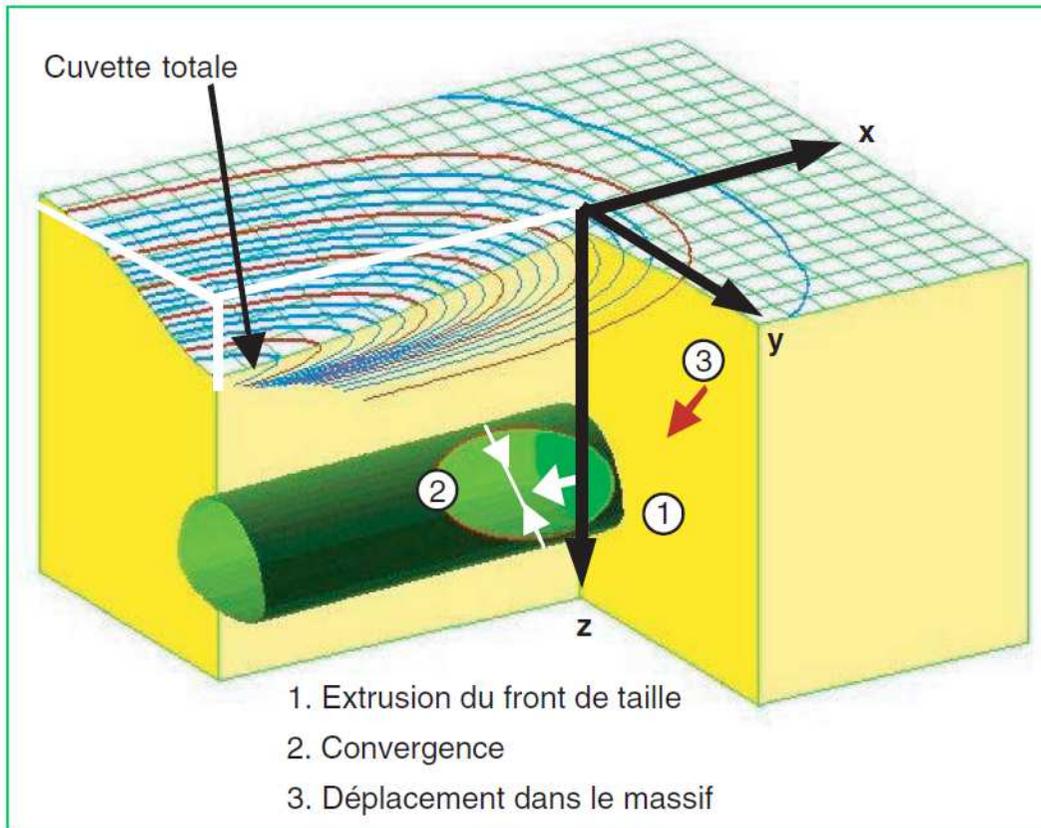


© RATP PIL - Didier Dupuy

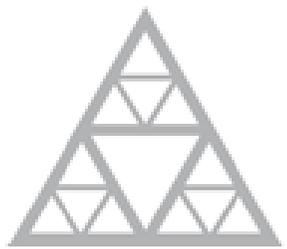
570n15 - 05/03/2003

bord droit du fontis

Mais aussi des risques plus “ordinaires” :  
désordres aux constructions avoisinantes dus aux  
tassements



Heathrow 1994



École des Ponts

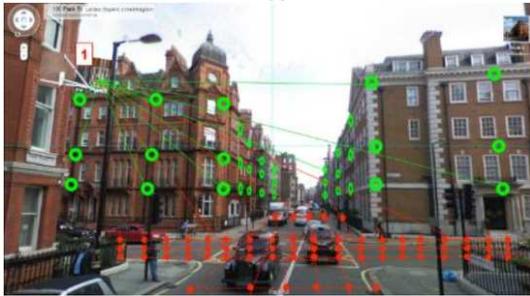
ParisTech

## CONCEPTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

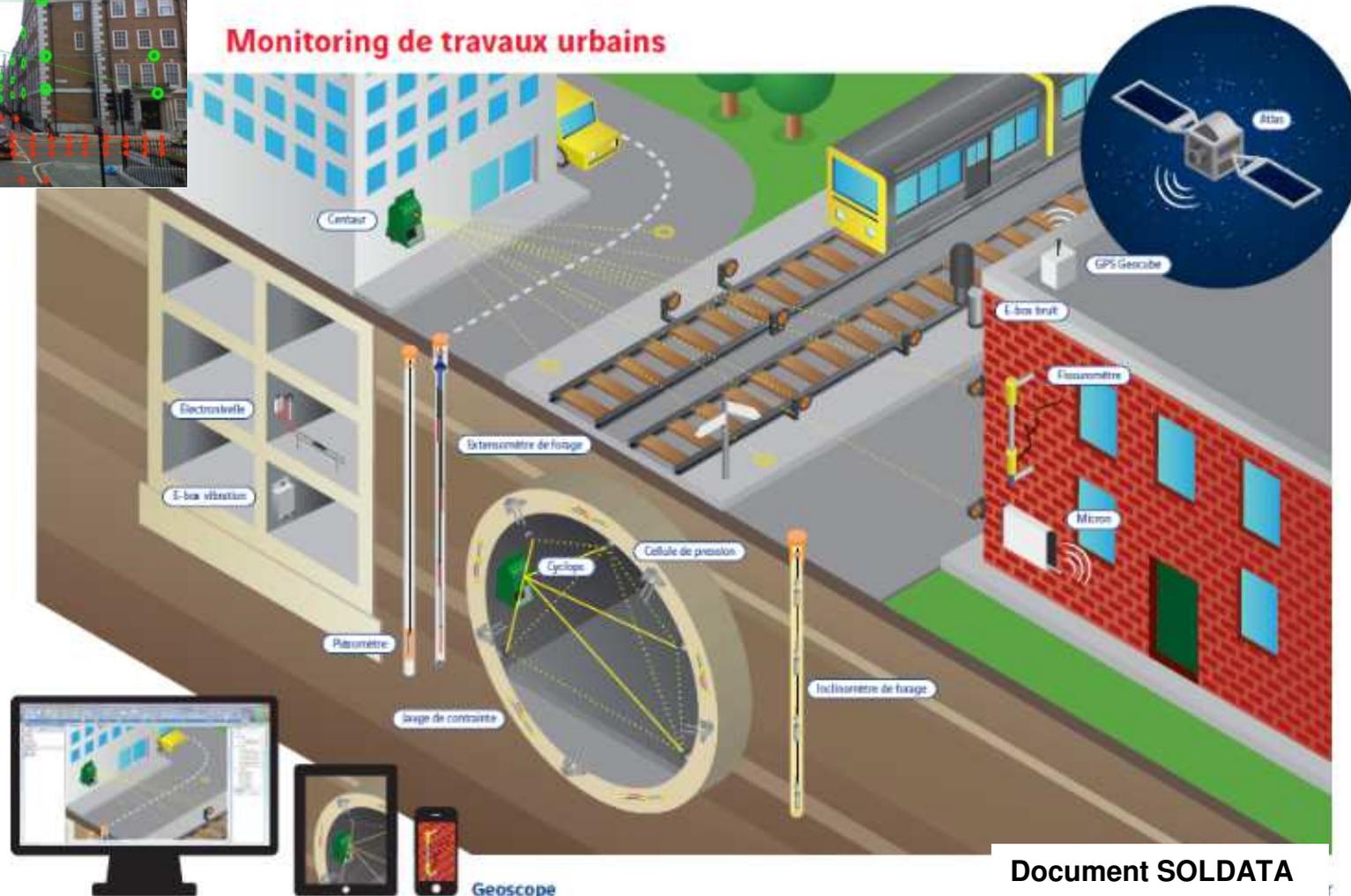
Les principes régissant l'amélioration continue de la construction en vue d'une meilleure maîtrise des risques

## Monitoring de tunnels & métros

Inclinomètres, extensomètres, piézomètres, jauges de contrainte etc. fonctionnant en système intégré pour le suivi des projets urbains

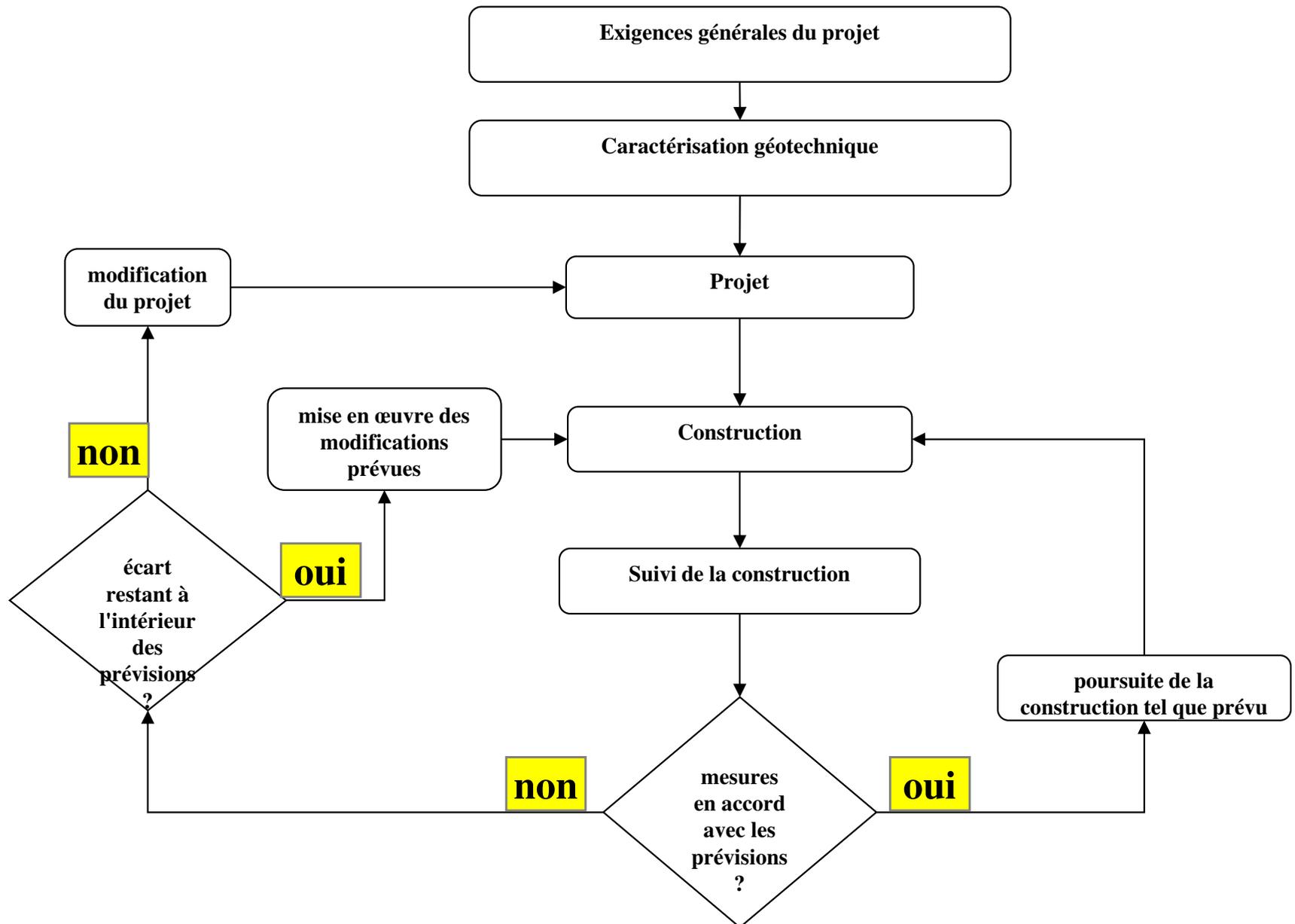


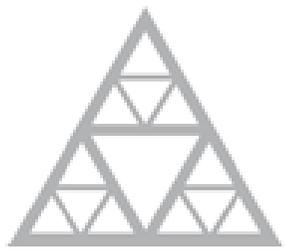
### Monitoring de travaux urbains



Document SOLDATA

# Diagramme de suivi de la construction méthode observationnelle





École des Ponts  
ParisTech

CONCEPTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

# Organisation du module

# Contenu prévisionnel du programme du module

## Ouvrages souterrains

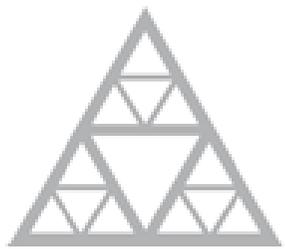
- Cours magistraux et « petites classes » (12 séances)
  - 50% de cours magistraux délivrés par différents spécialistes des disciplines concernées
  - 50% de petites classes, une moitié consacrée à la géotechnique appliquée aux travaux souterrains, une autre consacrée aux méthodes de calcul
- Contrôle des connaissances: test sur table en fin de module

Nota: l'ensemble de la documentation du module (supports de cours, annales des contrôles, liens utiles) est disponible sur le site <https://educnet.enpc.fr/> . Le nom du cours est COTU1

# Contenu prévisionnel du programme COTU

## Calendrier détaillé et intervenants

Date	Sujet	Intervenants	Type de séance
Séance 1	Méthodes conventionnelles	M.Pré	Amphi
Séance 2	Tunneliers	B.Demay	Amphi
Séance 3	Des fonctionnalités dimensionnantes en tunnels routiers et ferroviaires : sécurité, ventilation	C.Castel	Amphi
Séance 4	Géologie, géotechnique, mécanique des roches appliquées aux travaux souterrains I	J.Marlinge, F.Binet	TD
Séance 5	Géologie, géotechnique, mécanique des roches appliquées aux travaux souterrains II	J.Marlinge, F.Binet	TD
Séance 6	Tunnels en terrain rocheux – la pratique de l'explosif	Loïc Thévenot	Amphi
Séance 7	Géologie, géotechnique, mécanique des roches appliquées aux travaux souterrains III	J.Marlinge, F.Binet	TD
Séance 8	Calculs en convergence-confinement I	H.Thiébaud, L.Bérend	TD
Séance 9	Première partie : Revêtement final des tunnels : fonctions, mode de réalisation, conception Deuxième partie : L'étanchéité des ouvrages souterrains : Conception, mise en œuvre, contrôles	M.Pré  J.L. Mahuet	Amphi
Séance 10	Calculs en convergence-confinement II	H.Thiébaud, L.Bérend	TD
Séance 11	Première partie : tunnels en milieu urbain, incidences bâti Deuxième partie : instrumentation et suivi d'un chantier de tunnel	M.Pré  E.Gastine	Amphi
Séance 12	Calculs en convergence-confinement III	H.Thiébaud, L.Bérend	TD
Composition	Test final : - Première partie géotechnique - Deuxième partie calculs		



École des Ponts  
ParisTech

MERCI DE VOTRE ATTENTION :  
C'EST LE BOUT DU TUNNEL !

