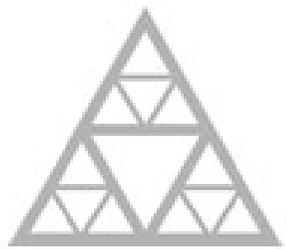


École des Ponts
ParisTech

Le revêtement des tunnels : les fondamentaux

Michel Pré





École des Ponts

ParisTech

Le revêtement des tunnels : les fondamentaux

1. Tunnels construits en méthode conventionnelle

2. Tunnels construits au tunnelier

Rôle général du revêtement

Béton coffré - Stabilité à long terme



Rôle général du revêtement

Support et protection de l'étanchéité



2022-2023

Rôle général du revêtement

Support d'équipements d'exploitation



Rôle général du revêtement

Limitation des coûts d'exploitation



2022-2023

Rôle général du revêtement

Confort des usagers



Le rôle de soutènement joué par le revêtement

1. Lors de la construction du revêtement, le soutènement est assuré par le soutènement initial de l'excavation réalisé au front. Le revêtement ne reprend aucun autre effort que son propre poids.
2. En revanche, dans la vie de l'ouvrage, le revêtement va jouer un rôle de soutènement plus ou moins important:
 - (i) Il va prendre le relais du soutènement initial, dont la pérennité n'est pas assurée (corrosion des éléments métalliques, perte d'efficacité des scellements et injections, béton projeté soumis aux attaques directes du terrain et des circulations d'eau)
 - (ii) Il va supporter la charge d'eau, en particulier dans le cas du revêtement étanche
 - (iii) Il va rendre des poussées de terrain augmentant avec le temps, lorsque le massif encaissant a un comportement différé actif (fluage à long terme, gonflements).

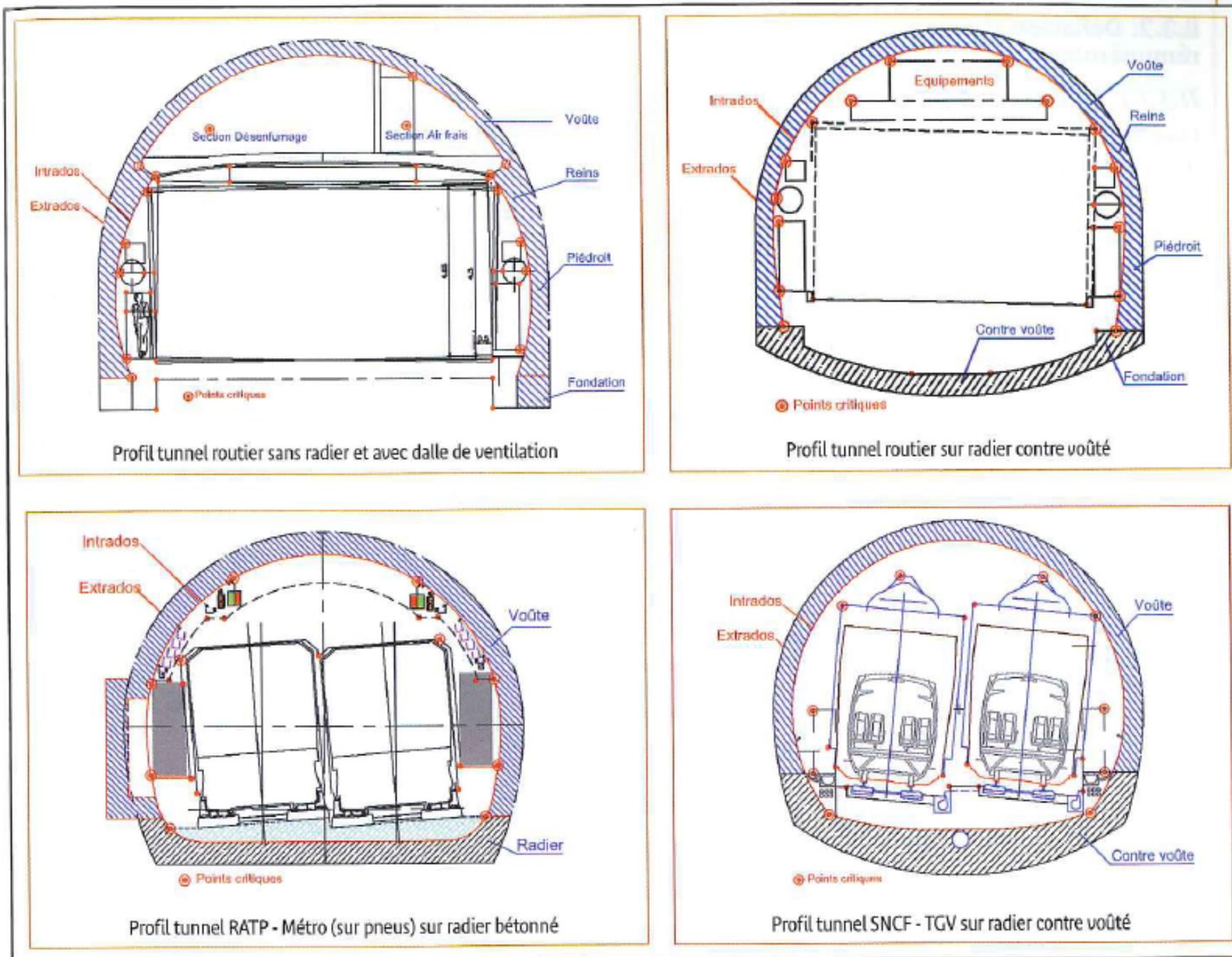


Figure 1 - Exemples de formes de tunnel "Routier - Rail"

Les coffrages - outils



2022-2023



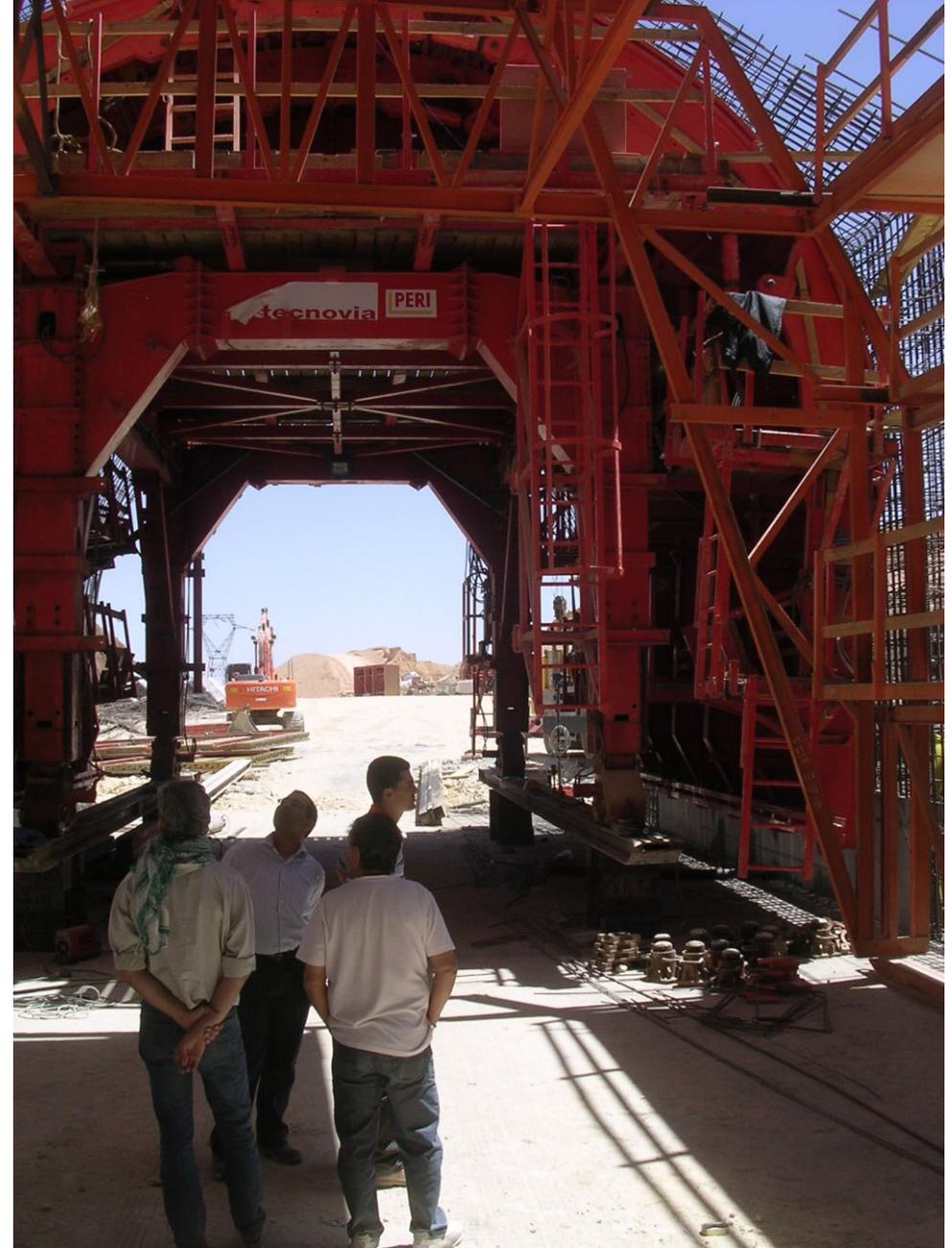
2022-2023



Tunnel de Chavanne



2022-2023



Tunnel de Zaouiat - Maroc

Les coffrages – outils : le bétonnage

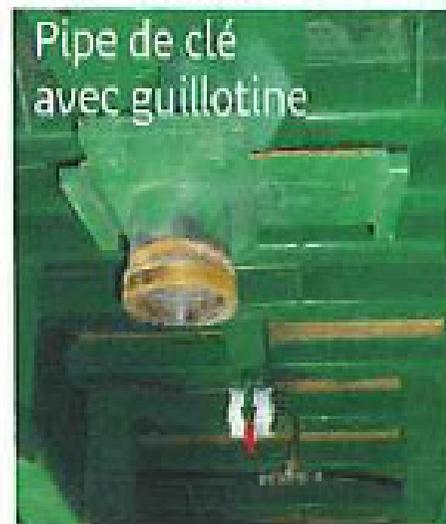


Figure 34 - Vibrateur à air comprimé sur coffrage

Les cycles de
bétonnage:
moyenne de 1 plot
de 10 à 12 m par
jour

Exemples de cycle complet

BETONNAGE DE LA VOUTE												
Plots		PM		Bétonnage				Décoffrage			Béton	
N°	long.	début	fin	Date	Heure début	Heure fin	Temps Béton	Date	Heure décof	Temps séchage	volume	m3/h
1	9	-2,00	7,00	24-mars-05	10:00	20:00	10:00		8:00	12:00	96,00	9,60
2	11	7,00	18,00	30-mars-05	10:00	19:45	9:45	31-mars-05	9:30	13:45	105,00	10,77
3	11	18,00	29,00	01-avr-05	7:20	14:00	6:40	2-avr-05	1:20	11:20	106,00	15,90
4	11	29,00	40,00	04-avr-05	9:00	14:00	5:00	4-avr-05	1:30	11:30	106,00	21,20
5	11	40,00	51,00	05-avr-05	8:30	19:30	11:00	6-avr-05	8:30	13:00	182,00	16,55
6	11	51,00	62,00	07-avr-05	7:30	14:30	7:00	8-avr-05	1:15	10:45	154,00	22,00
7	11	62,00	73,00	08-avr-05	9:00	18:20	9:20	9-avr-05	6:30	12:10	163,00	17,46
8	11	73,00	84,00	11-avr-05	7:30	21:20	13:50	12-avr-05	17:00	19:40	178,00	12,87
9	11	84,00	95,00	13-avr-05	7:30	18:15	10:45	14-avr-05	14:15	20:00	204,00	18,98
10	11	95,00	106,00	18-avr-05	7:40	14:00	6:20	19-avr-05	4:00	14:00	148,00	23,37
11	11	106,00	117,00	20-avr-05	7:45	18:00	10:15	21-avr-05	7:30	13:30	217,50	21,22
12	11	117,00	128,00	22-avr-05	7:30	18:00	10:30	23-avr-05	8:00	14:00	258,00	24,57
13	11	128,00	139,00	25-avr-05	7:30	14:45	7:15	26-avr-05	2:30	11:45	132,00	18,21
14	11	139,00	150,00	26-avr-05	8:10	13:00	4:50	27-avr-05	0:45	11:45	104,00	21,52
15	11	150,00	161,00	27-avr-05	8:30	12:45	4:15	28-avr-05	0:30	11:45	101,00	23,76
16	11	161,00	172,00	28-avr-05	8:15	12:30	4:15	28-avr-05	0:00	11:30	107,00	25,18
17	11	172,00	183,00	29-avr-05	8:00	12:30	4:30	29-avr-05	0:00	11:30	108,00	24,00
18	11	183,00	194,00	02-mai-05	8:00	12:15	4:15	2-mai-05	0:00	11:45	102,00	24,00
19	11	194,00	205,00	03-mai-05	7:30	14:10	6:40	4-mai-05	2:00	11:50	107,00	16,05
20	11	205,00	216,00	04-mai-05	10:20	16:00	5:40	5-mai-05	4:00	12:00	108,00	19,06
21	11	216,00	227,00	09-mai-05	8:15	13:00	4:45	10-mai-05	1:00	12:00	101,00	21,26
22	11	227,00	238,00	10-mai-05	7:45	12:10	4:25	10-mai-05	0:00	11:50	101,00	22,87
23	11	238,00	249,00	11-mai-05	7:45	13:00	5:15	12-mai-05	0:30	11:30	110,00	20,95
24	11	249,00	260,00	12-mai-05	7:50	11:35	3:45	13-mai-05	1:00	13:25	100,00	26,67
25	11	260,00	271,00	18-mai-05	7:30	13:30	6:00	19-mai-05	1:30	12:00	117,00	19,50
26	11	271,00	282,00	19-mai-05	8:00	11:45	3:45	19-mai-05	0:00	12:15	100,00	26,67
27	11	282,00	293,00	20-mai-05	7:15	11:45	4:30				103,00	22,89
28	11	293,00	304,00	23-mai-05	8:00	11:45	3:45	23-mai-05	0:00	12:15	112,00	29,87
29	11	304,00	315,00	24-mai-05	7:20	12:30	5:10	25-mai-05	0:15	11:45	109,00	21,10
30	11	315,00	326,00	25-mai-05	7:30	12:15	4:45	25-mai-05	0:00	11:45	114,00	24,00
31	11	326,00	337,00	26-mai-05	8:00	13:00	5:00	26-mai-05	23:30	10:30	113,00	22,60
32	11	337,00	348,00	27-mai-05	8:30	13:30	5:00	27-mai-05	0:00	10:30	127,00	25,40
33	11	348,00	359,00	30-mai-05	7:10	15:30	8:20	31-mai-05	3:15	11:45		0,00

Figure 45 - Bétonnage du revêtement du tunnel de Schirmeck

Béton non armé en tunnel

- difficultés de mise en œuvre d'armatures dans le béton coffré en tunnel
- caractère non déterminant de la fissuration pour la stabilité du béton non armé en tunnel

⇒ usage général du béton non armé

Béton non armé en tunnel

- Acceptabilité structurelle : limitation de la profondeur des fissures à la mi-épaisseur
- 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/m³ 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

Critères généraux de conception et de dimensionnement

- Aptitude au service:
 - géométrie
 - étanchéité, drainage
- Sécurité structurale:
 - rôle de soutènement, à court terme, à long terme
 - tenue au feu
 - tenue aux séismes

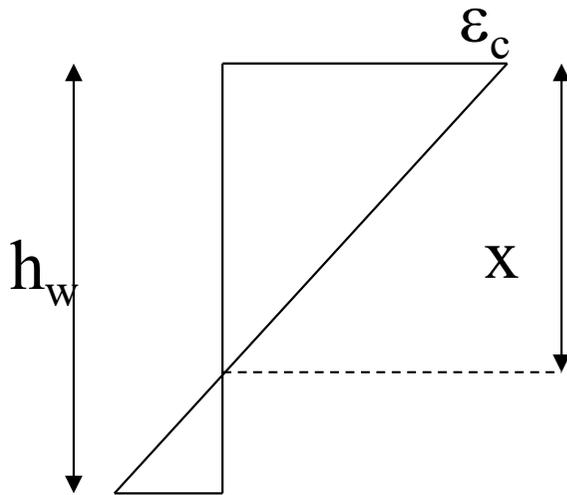
Pratique de la détermination des combinaisons d'action sur les revêtements de tunnels

1. Détermination des valeurs « caractéristiques » des paramètres du terrain
 - une valeur caractéristique ne peut être définie de la même manière que pour le béton ou l'acier; c'est une estimation prudente de la valeur du paramètre, définie à partir:
 - de l'étude géologique
 - des valeurs données par les essais
 - de la variabilité des paramètres ainsi que de la sensibilité du calcul à cette variabilité
 - de l'importance de la zone de terrain influencée par la réalisation de l'ouvrage
 - du mode de réalisation et du phasage de construction qui conditionnent le comportement du terrain encaissant
 - de la méthode de dimensionnement envisagée
 - du retour d'expérience du comportement de tunnels dans des contextes géotechniques similaires ou proches

Pratique de la détermination des combinaisons d'action sur les revêtements de tunnels

1. Calcul des sollicitations dues à l'interaction avec le terrain à partir des valeurs caractéristiques des paramètres géomécaniques, sans appliquer de coefficient de pondération à ces valeurs caractéristiques (principe d'ELS)
2. Valeur des sollicitations: $E = E (\gamma_G G, \gamma_Q Q)$
 - avec: $\gamma_G = 1$; $\gamma_Q = 1,11$
 - Nota: en tunnel, Q joue un rôle mineur, voire favorable (exemple: charges de véhicules à l'intérieur du tunnel)
3. À l'ELU, valeur de calcul: $E_d = 1,35 E$ (sauf situations accidentelles)
On s'intéresse principalement à N_{Ed} , M_{Ed} (rapport $e = M_{Ed} / N_{Ed}$)
4. Vérification à l'ELS pas nécessaire, l'aptitude de la structure au service étant assurée par sa conception même.

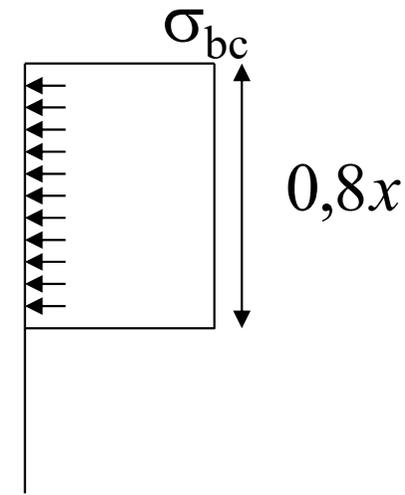
Béton non armé: vérification en flexion composée à l'ELU



Déformation

Condition de profondeur maxi de fissure

$$e = \frac{h_w}{2} - \frac{0,8x}{2} < 0,3h_w \text{ pour } x > 0,5h_w$$

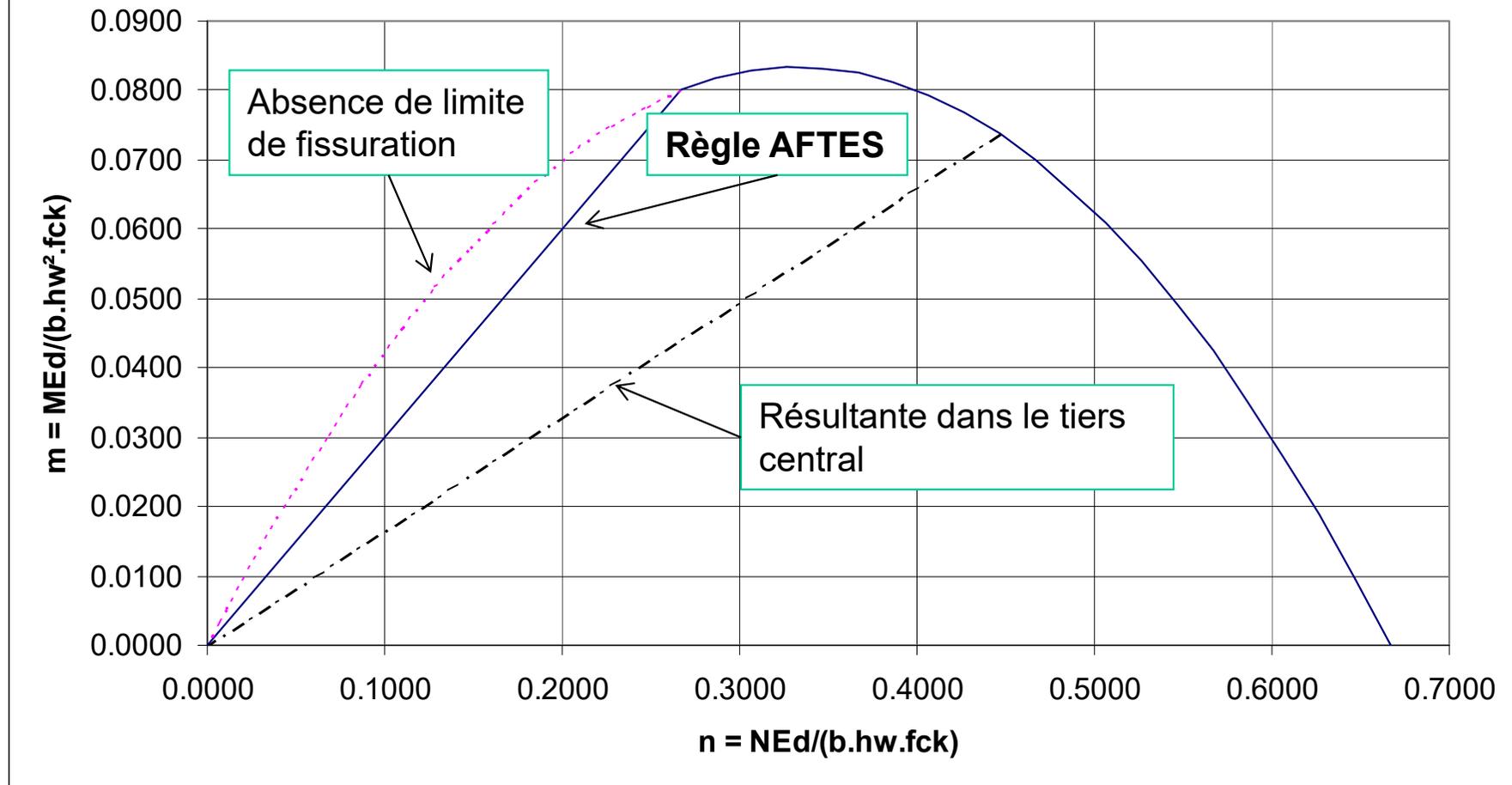


Contraintes (diagramme rectangle)

Effort normal résistant de calcul

$$N_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot h_w \cdot \left(1 - 2 \frac{e}{h_w}\right)$$

diagramme d'interaction ELU sans dimensions



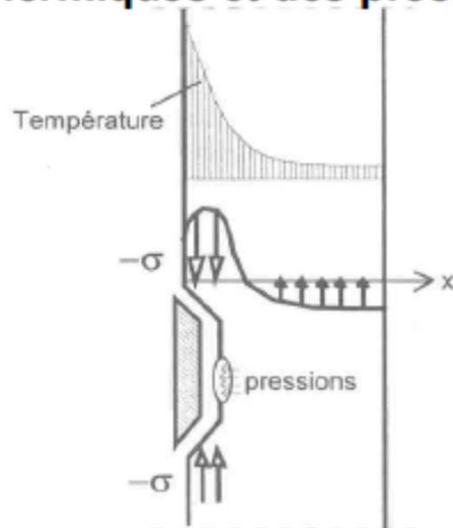


TUNNELS ROUTIERS - RESISTANCE AU FEU

- 1/ Traduction des textes
- 2/ Documents complémentaires
- 3/ Comportement au feu
- 4/ Objectifs résistance au feu
- 5/ Pérennité de l'ouvrage
- 6/ Dispositions communes
- 7 Typologie
- 8/ Béton-Protection des cables

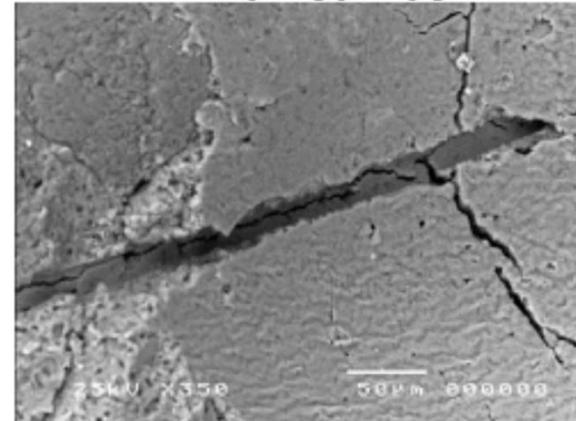
Ecaillage

Superposition des contraintes thermiques et des pressions de vapeur



Dimensionnement à chaud Protection incorporée

➤ **Fibres polypropylène**



➤ **Formulation du béton :
granulats calcaires, ciment au
laitier, etc.**

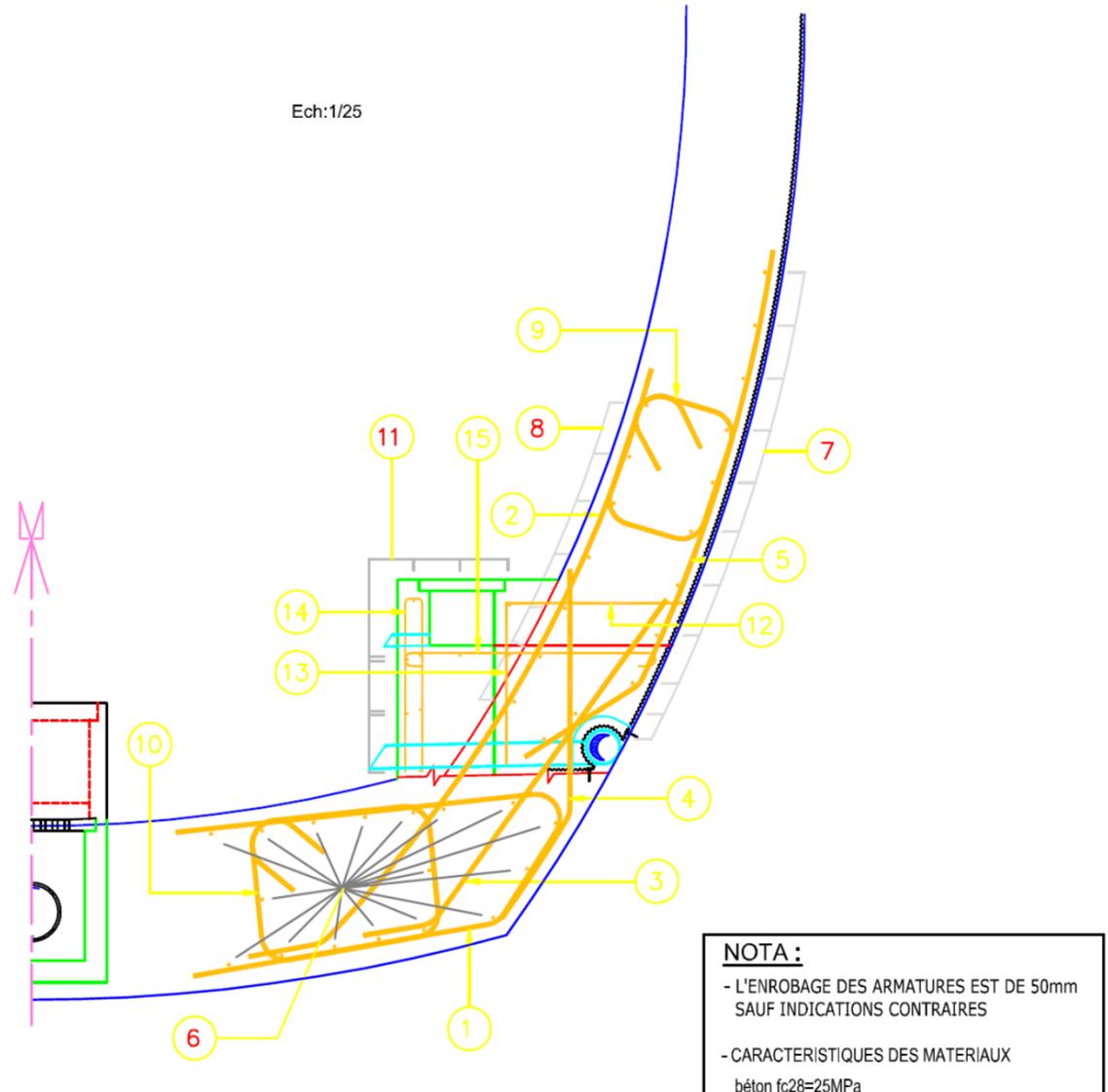
Essai en laboratoire

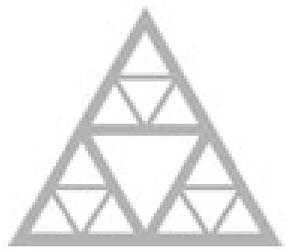
Journée technique de l'AFTES du 27 mars 2009

Exemple de ferrailage partiel:

NOMENCLATURE DES ACIERS D'UN ELEMENT DE 12 m
DE LA SECTION COURANTE

N°	travé	φ	Long. (m)	Esp. (mm)	Long. (m)	SCHEMA	Long. TOTAL (m)		
1	HA	20	59	1	59	0.20	3.86		227.74
2	HA	20	59	1	59	0.20	3.44		202.96
3	HA	20	59	1	59	0.20	2.17		128.03
4	HA	20	59	1	59	0.20	1.70		100.30
5	HA	20	59	1	59	0.20	2.73		161.07
6	HA	16	17	1	17	0.25	11.90		202.30
7	HA	16	11	1	11	0.25	11.90		130.90
8	HA	16	7	1	7	0.25	11.90		83.30
9	HA	20	59	1	59	0.20	2.70		159.30
10	HA	20	60	1	60	0.20	3.48		208.80
11	HA	10	9	1	9	0.25	11.90		107.10
12	DX	12	59	1	59	0.20	0.83		48.97
13	DX	12	59	1	59	0.20	0.75		44.25
14	DX	10	59	1	59	0.20	1.66		97.94
15	DX	10	59	1	59	0.20	1.39		82.01
* : Longueur moyenne									
RECAPITULATIF ACIERS									





École des Ponts

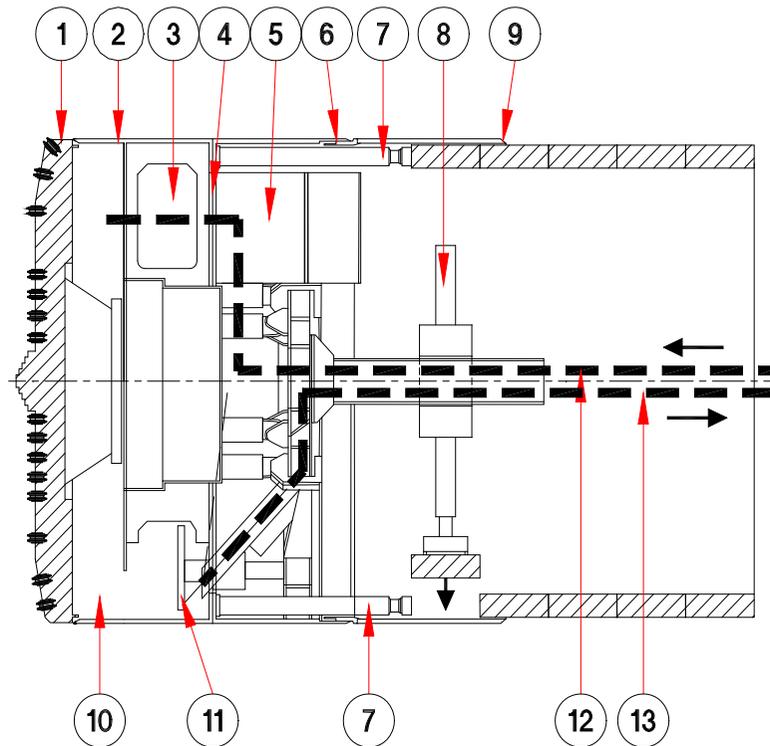
ParisTech

Le revêtement des tunnels : les fondamentaux

1. Tunnels construits en méthode conventionnelle

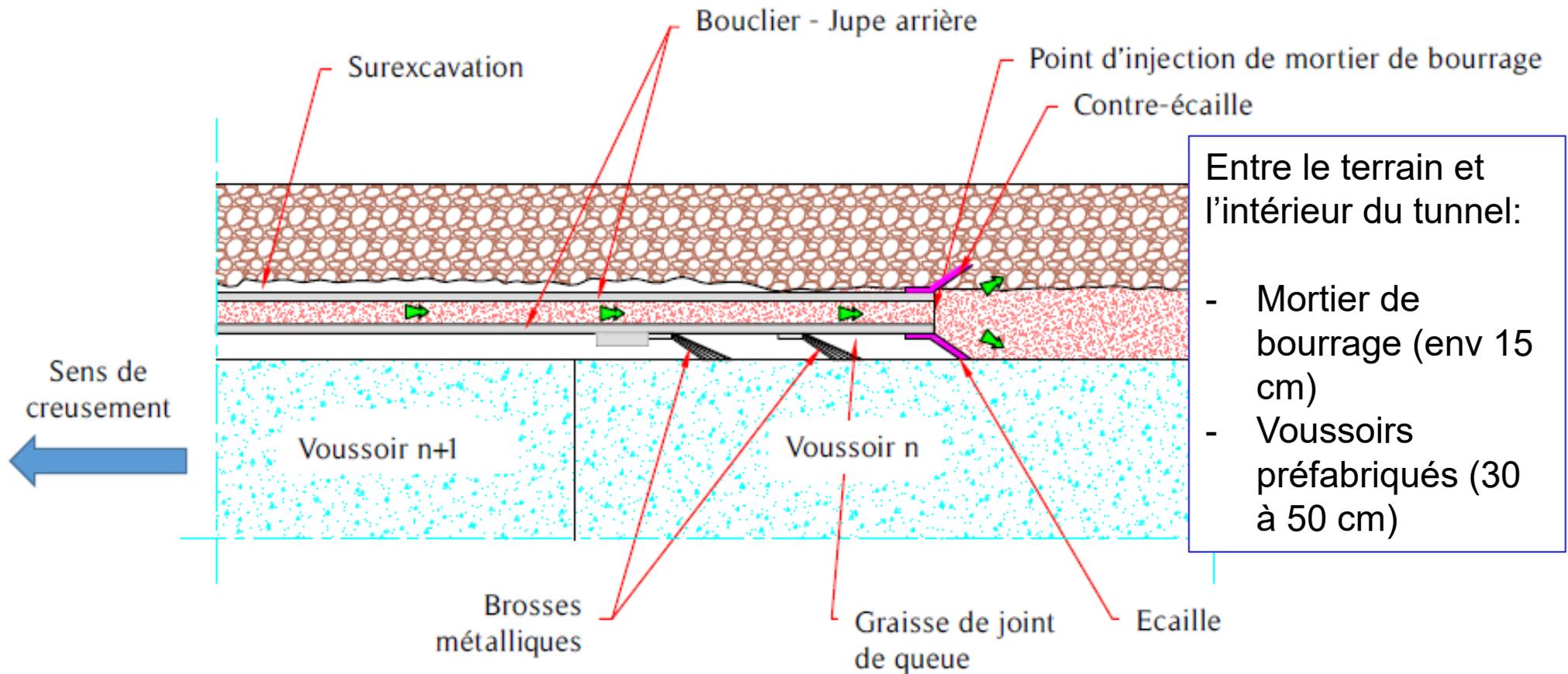
2. Tunnels construits au tunnelier

Voussoirs préfabriqués dans l'emprise de la jupe d'un tunnelier



- | | | | |
|---|--------------------------------------|----|--|
| 1 | Tête d'abattage | 8 | Erecteur |
| 2 | Bouclier | 9 | Joint d'étanchéité (dit de "queue") |
| 3 | Bulle d'air (option) | 10 | Chambre d'abattage |
| 4 | Cloison étanche | 11 | Agitateur (option) |
| 5 | Sas d'accès à la chambre d'abattage | 12 | Conduite d'alimentation de boue bentonitique |
| 6 | Articulation jupe arrière (option) | 13 | Conduite de refoulement de boue bentonitique |
| 7 | Vérin de poussée | | |

Composition du revêtement



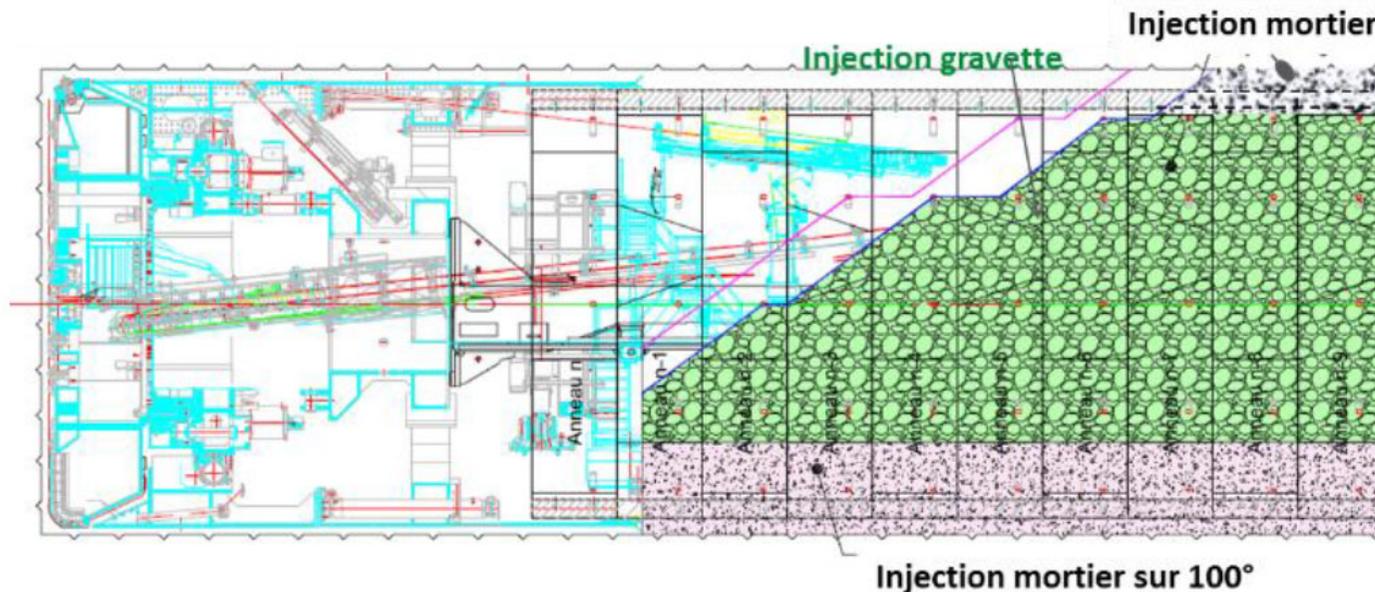
Mortier de bourrage

- Injection du vide annulaire par des canules noyées dans la jupe
- L'épaisseur du vide annulaire peut varier en fonction:
 - de la surcoupe
 - de la conicité du bouclier et de la jupe
 - de l'épaisseur de la jupe
- Importance de la qualité du remplissage (pas de ses caractéristiques mécaniques, car son volume est confiné) pour:
 - la maîtrise des tassements
 - la qualité de l'alignement du revêtement
- Composition classique: sable / ciment (entre 40 et 80 kg/m³) / bentonite / filler / eau / additifs

Mortier de bourrage

Variantes:

- Coulis bi-composant censé résoudre les problèmes de colmatage des buses: composant A super-fluide (eau, bentonite, ciment et agents retardateurs), composant B (gélifiant accélérateur de prise) ajouté juste avant l'injection à l'arrière du joint de queue
- Absence de liant (« gravette ») dans certains cas particuliers (rocher, avec un vide annulaire important): mise en œuvre à travers les anneaux:



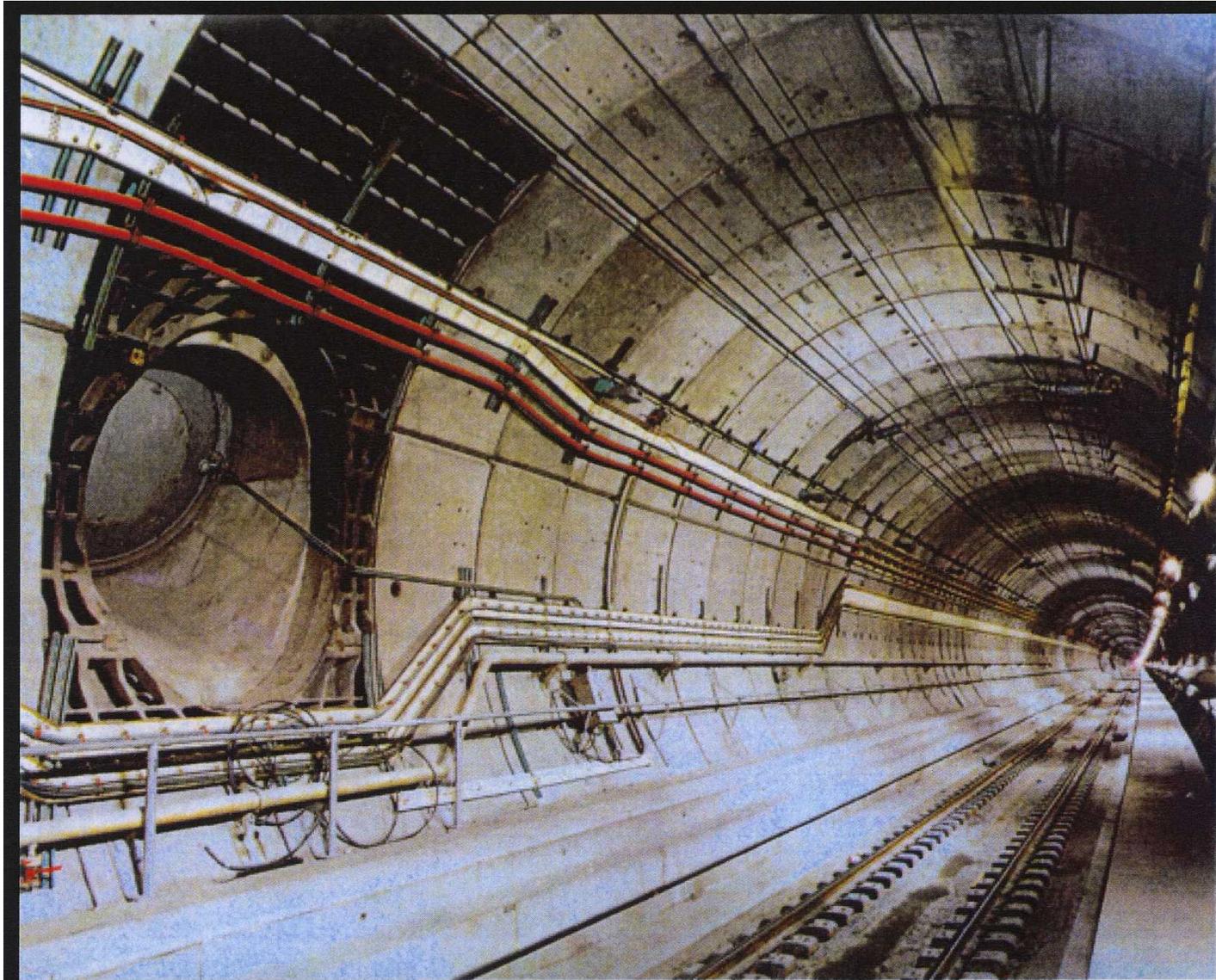
cas de la galerie de sécurité du Fréjus: mixte mortier (en bas et en haut) et gravette

- Mortiers compressibles (cas rares) en présence de convergences importantes

Voussoirs préfabriqués

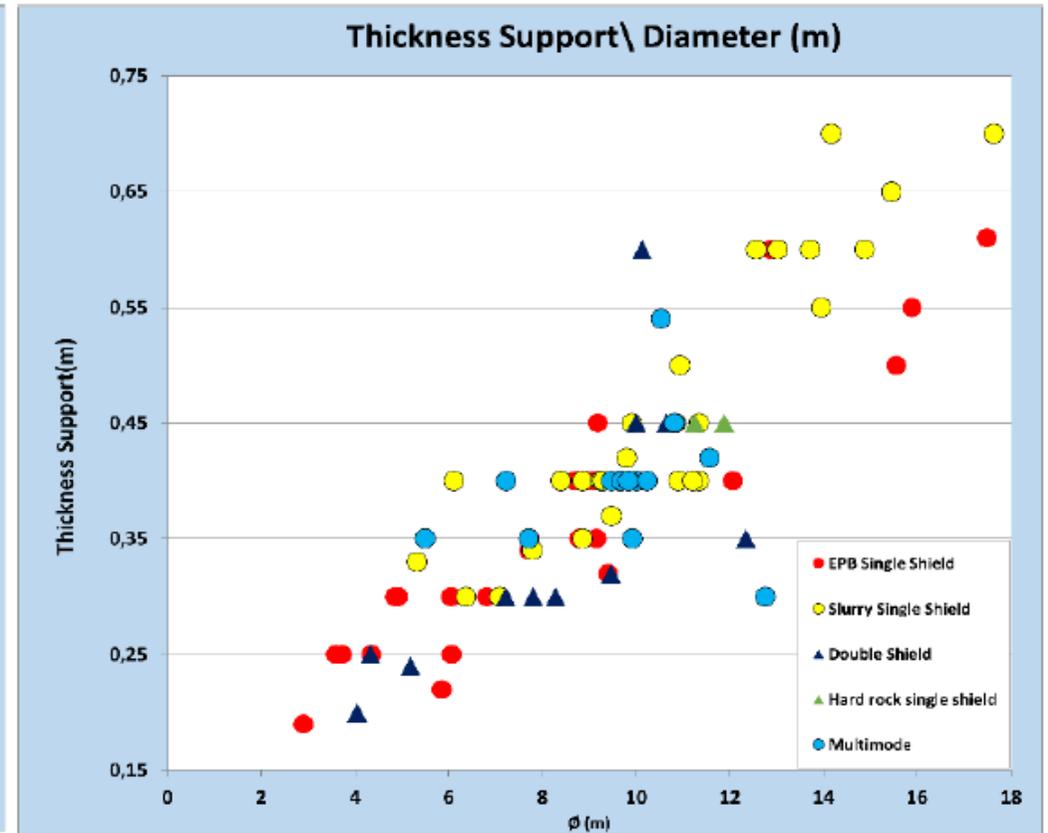
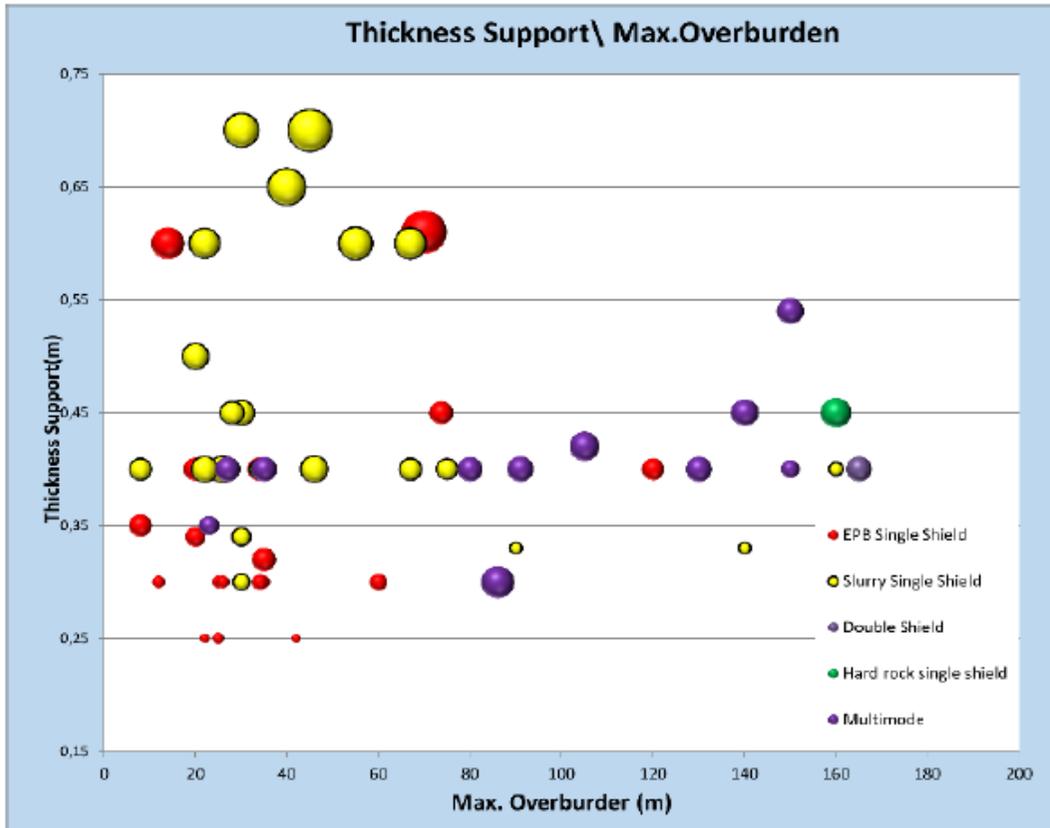


Exemple d'aspect intérieur d'un tunnel réalisé au tunnelier : tunnel TGV de Villejust



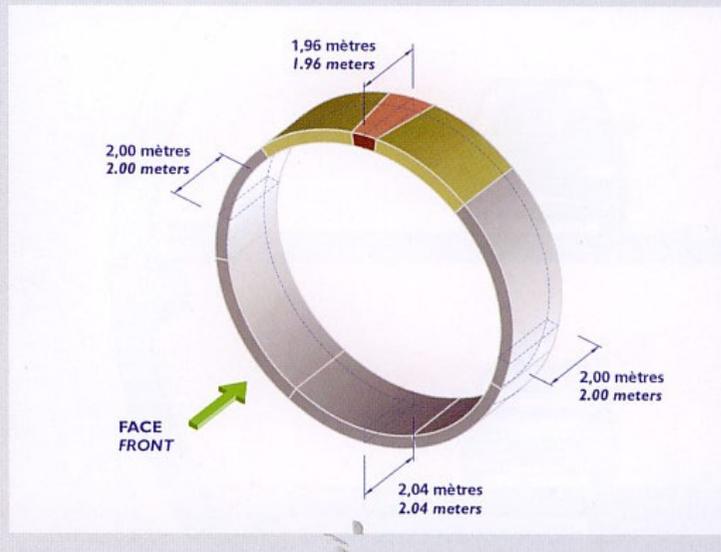
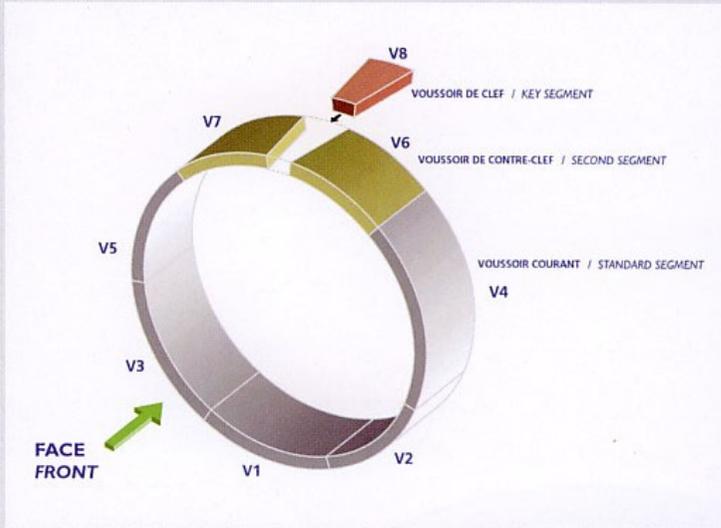
Tunnel sous la Manche

Extrait document AFTES



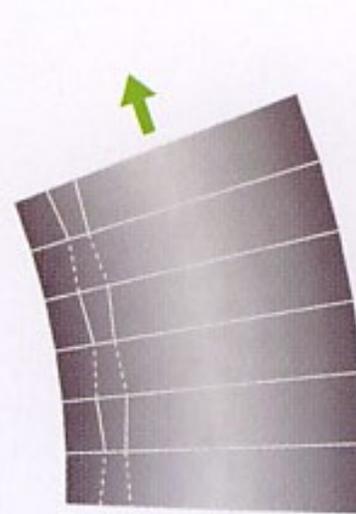
-> paramètre principal : le diamètre

Voussoirs et principe des anneaux universels Segments and universal ring principle



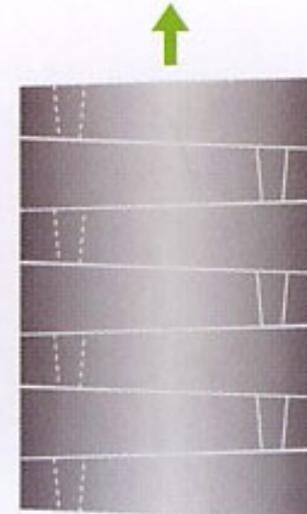
Virage à gauche
avec des anneaux universels
et des clefs à gauche

Left-hand bend with
universal rings,
and key segments on the left



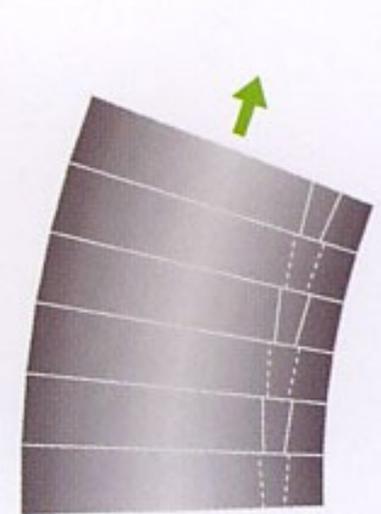
Alignement droit
avec des anneaux universels
et des clefs alternativement
à gauche et à droite

Straight portion with
universal rings,
and key segments alternately on the
left and on the right



Virage à droite
avec des anneaux universels
et des clefs à droite

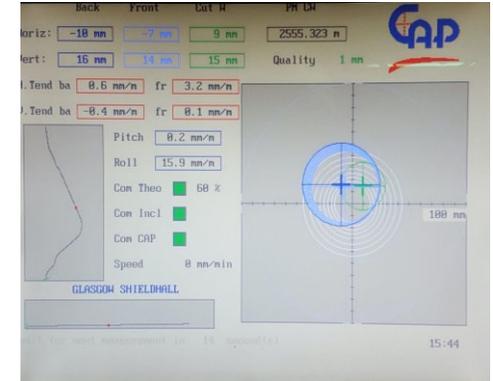
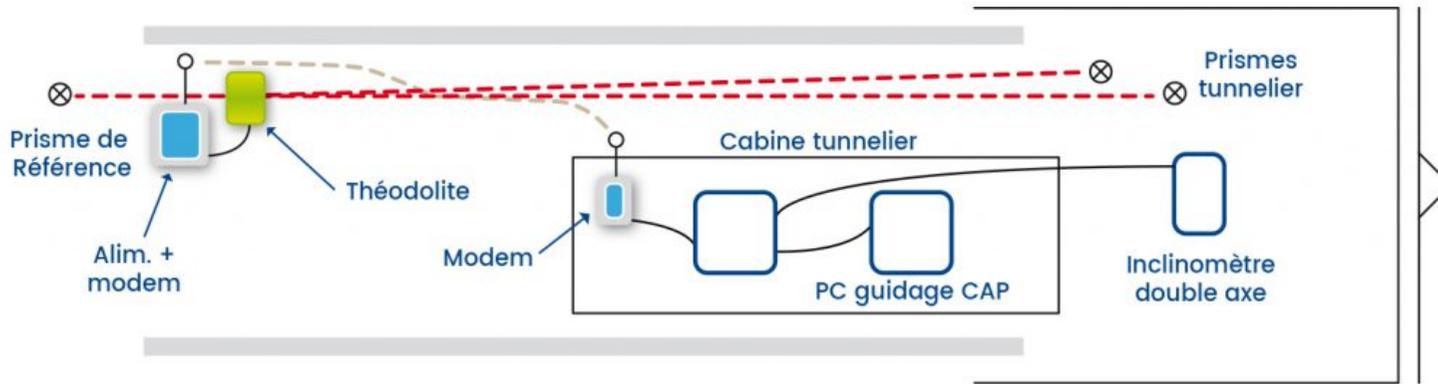
Right-hand bend with
universal rings,
and key segments
on the right



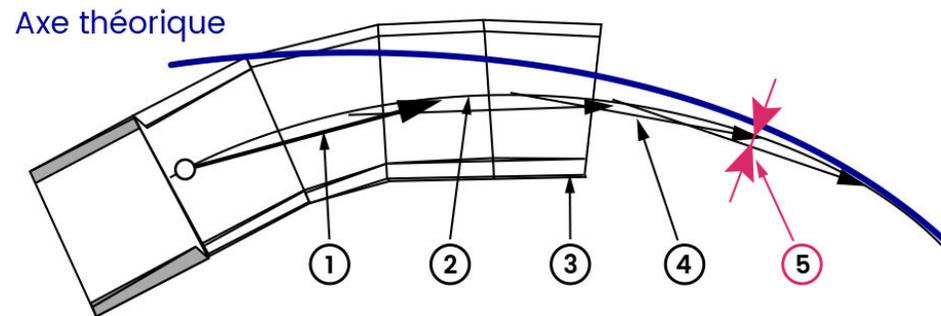
- Le revêtement s'adapte au tracé réel en faisant pivoter les anneaux les uns par rapport aux autres.

La détermination de la séquence des anneaux est déduite des données de navigation en temps réel :

- navigation



- guidage



- 1 - relevé de position
- 2 - choix de la courbe de rattrapage
- 3 - détermination de la séquence d'anneaux
- 4 - calcul des consignes de guidage
- 5 - calcul des surcoupes

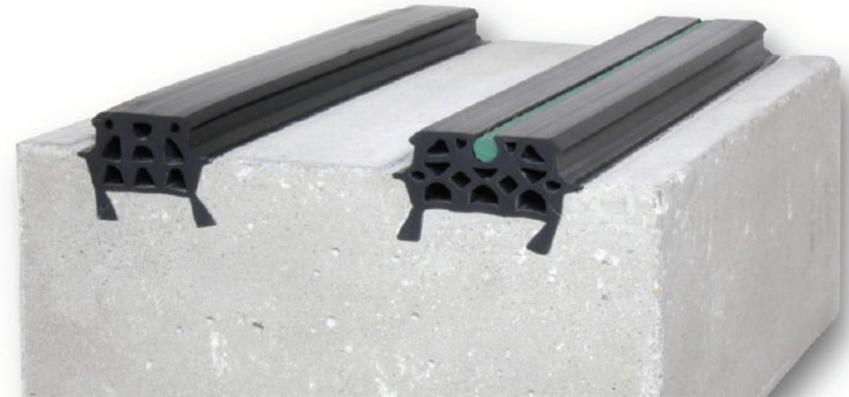
Garnitures d'étanchéité : joint compressible / joint hydrogonflant

Joint compressible collé



(mis en place après décoffrage)

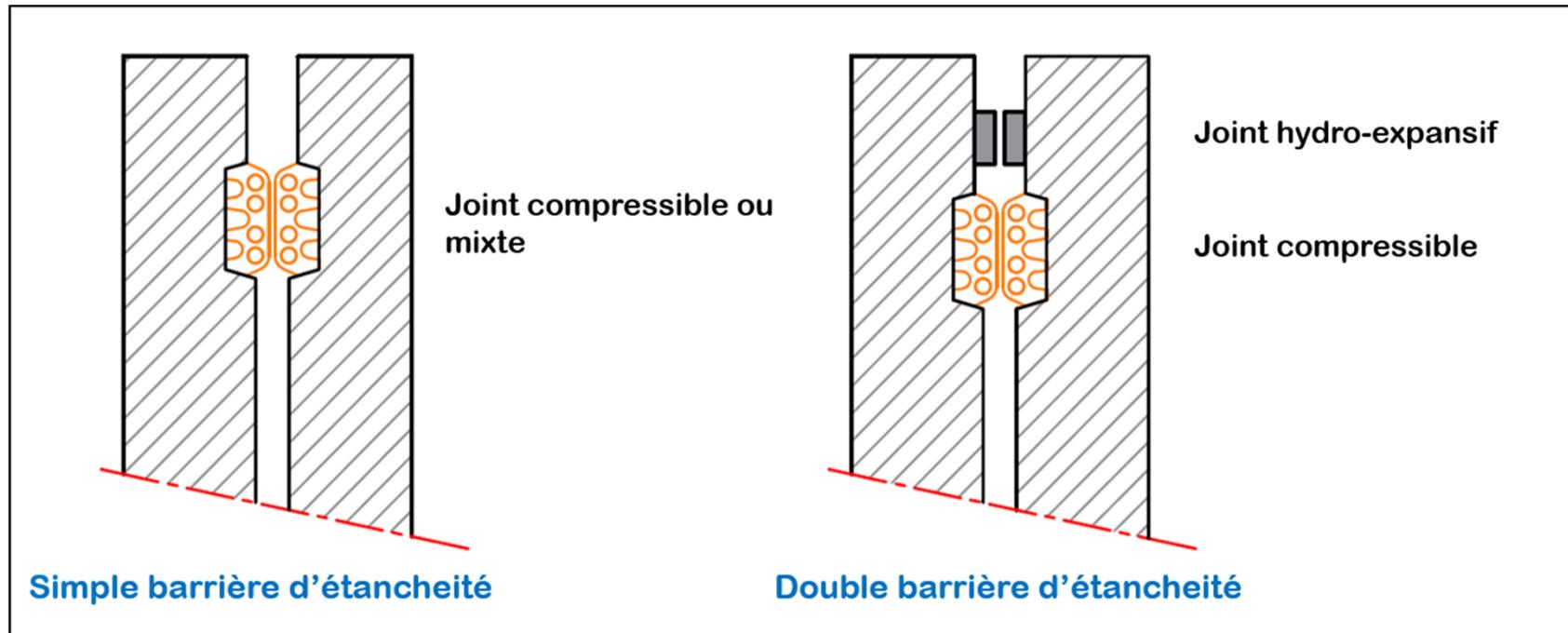
Joint compressible ancré sans et avec
joint hydrogonflant



(mis en place dans le moule avant bétonnage)



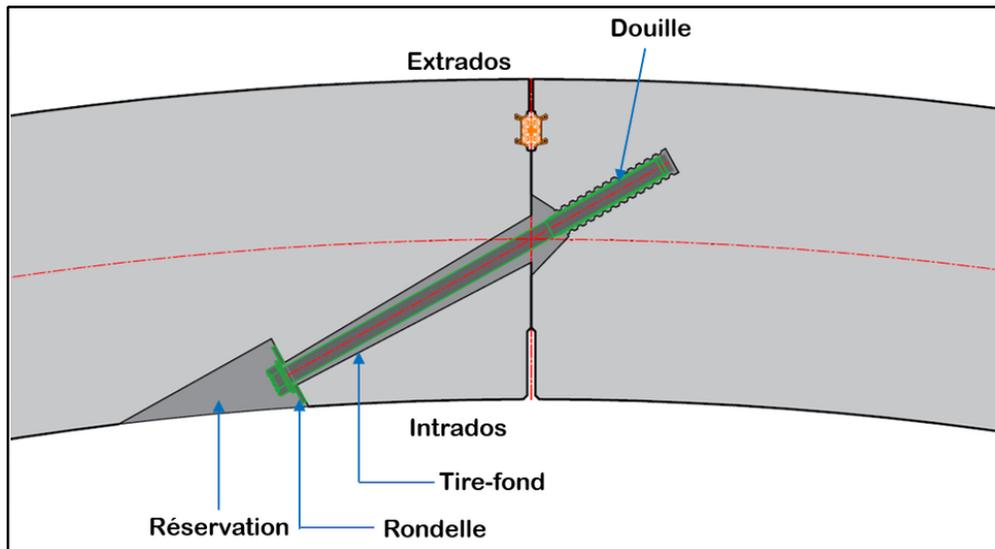
Garnitures d'étanchéité : joint compressible / joint hydrogonflant



Dispositifs d'assemblage entre voussoirs d'un même anneau

par tire-fonds

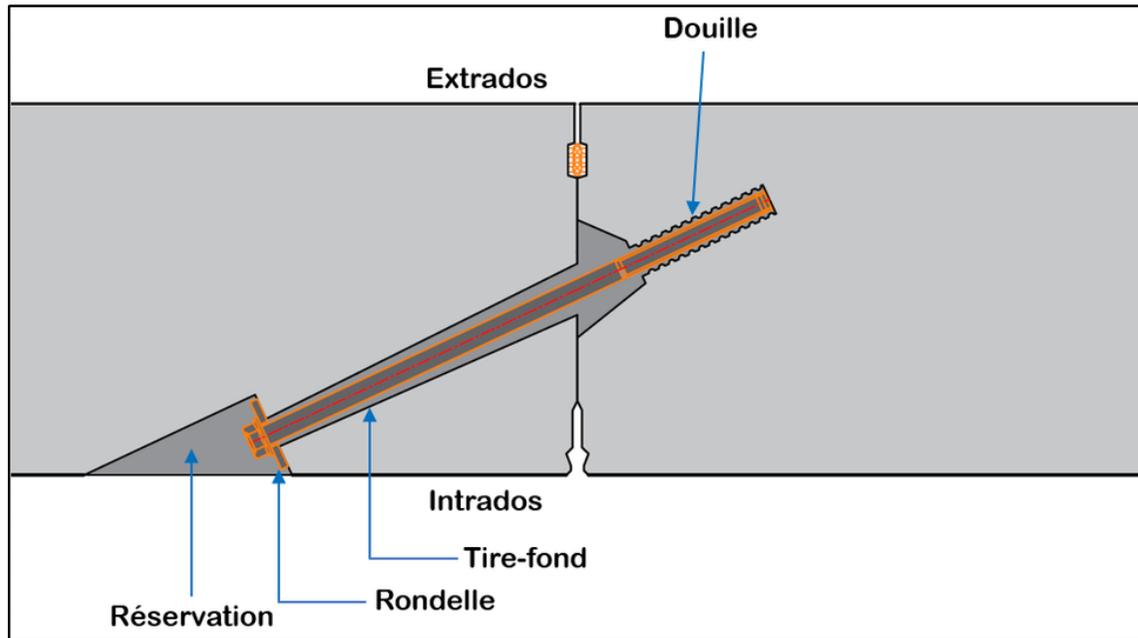
par barres de guidage



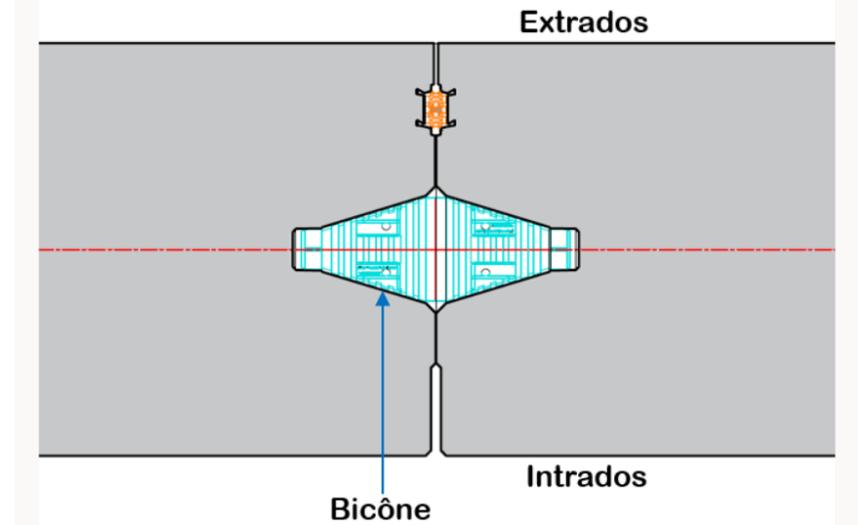
(peuvent être combinés)

Dispositifs d'assemblage entre anneaux

par tire-fonds

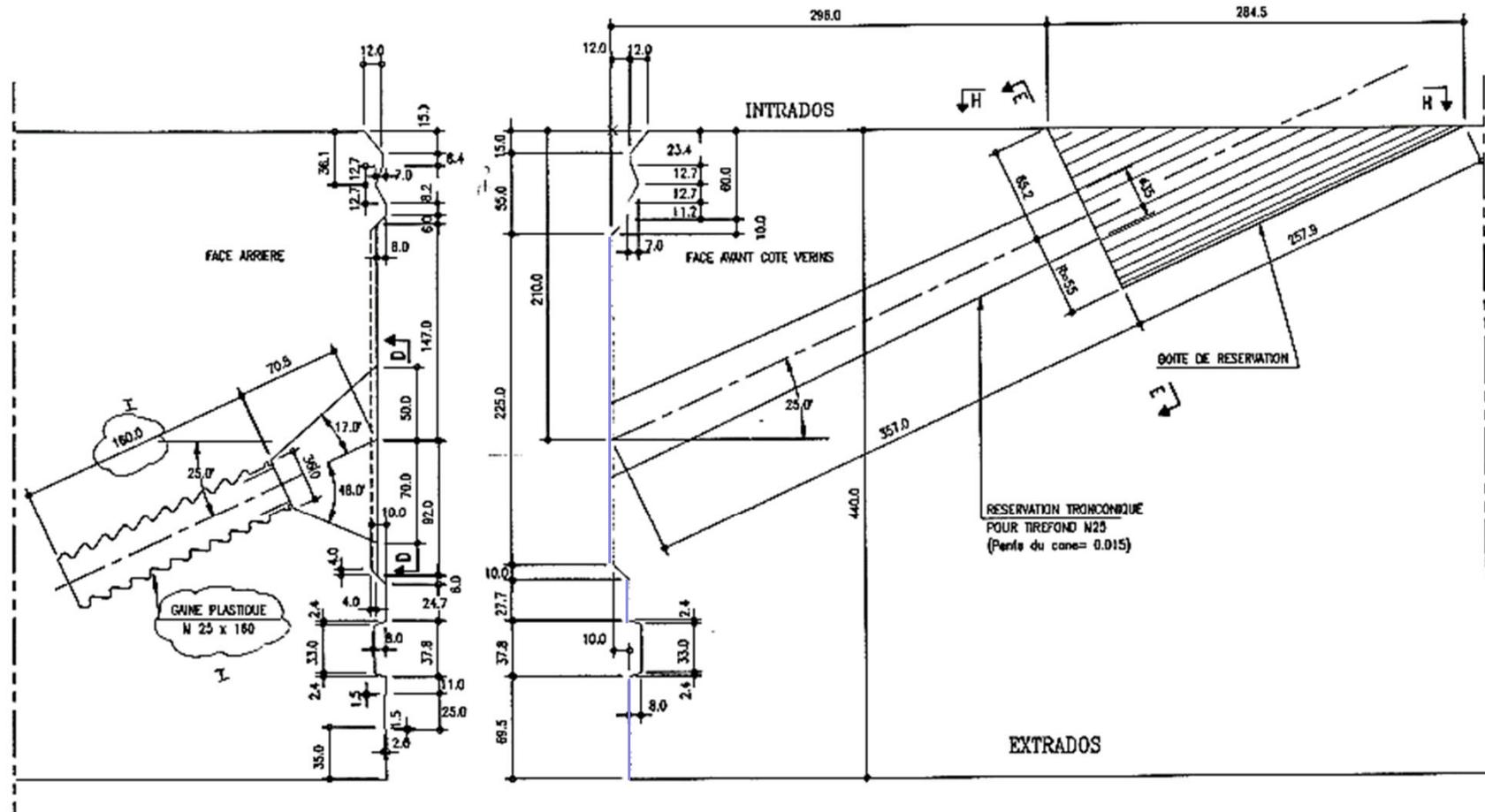


par bicônes



Exemple de coffrages de joints
entre voussoirs assemblés par tire-
fonds

COUPE TYPE DU JOINT ENTRE ANNEAUX



La préfabrication

Moule et armatures



Bétonnage



Talochage extradados



Étuvage



Décoffrage



2022-2023

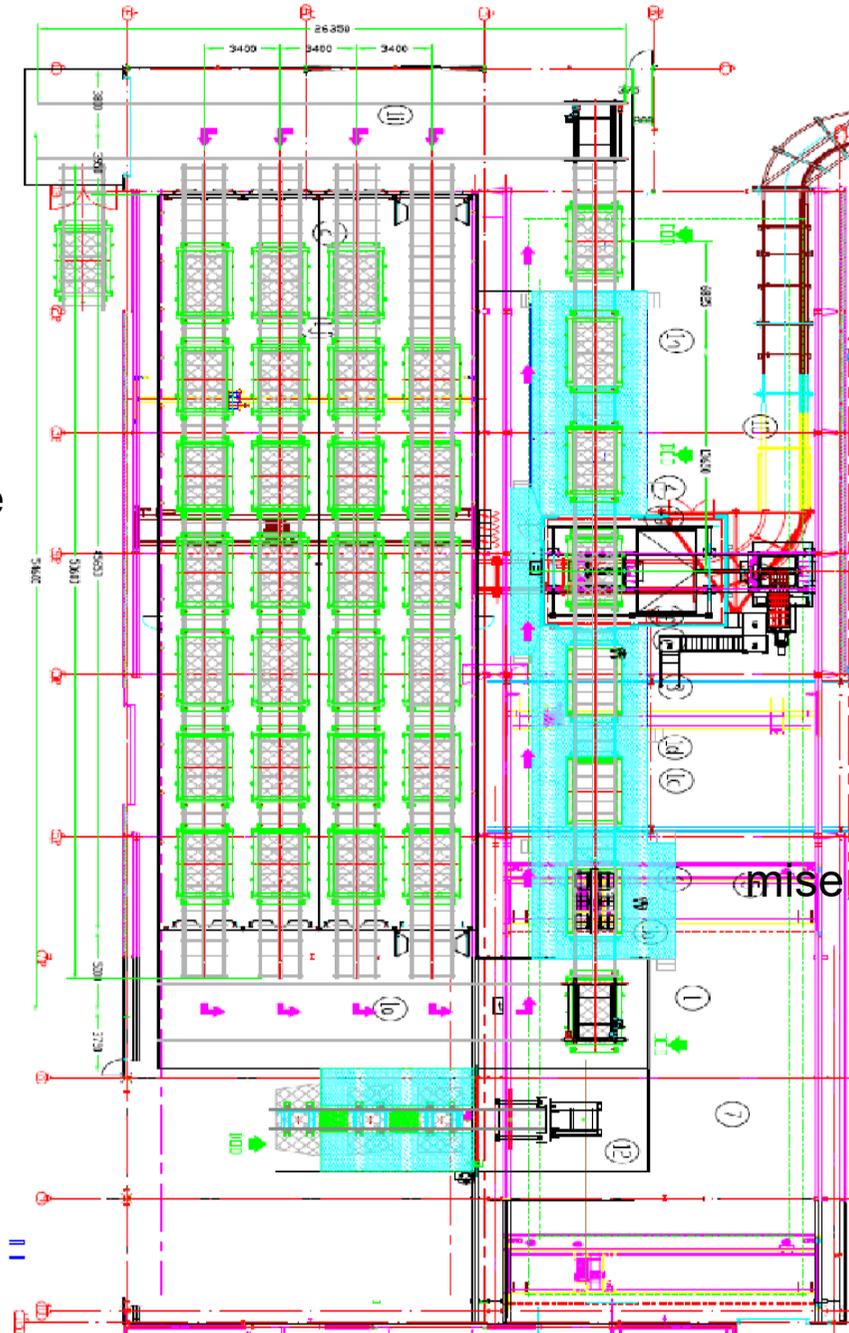
La préfabrication

Exemple de carrousel

tunnel d'étuvage

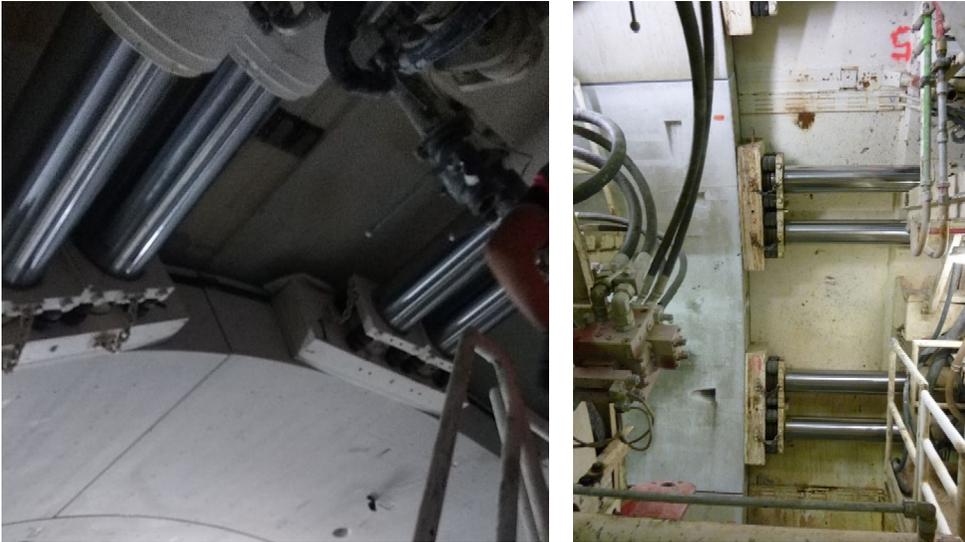
poste de bétonnage

mise en place armatures

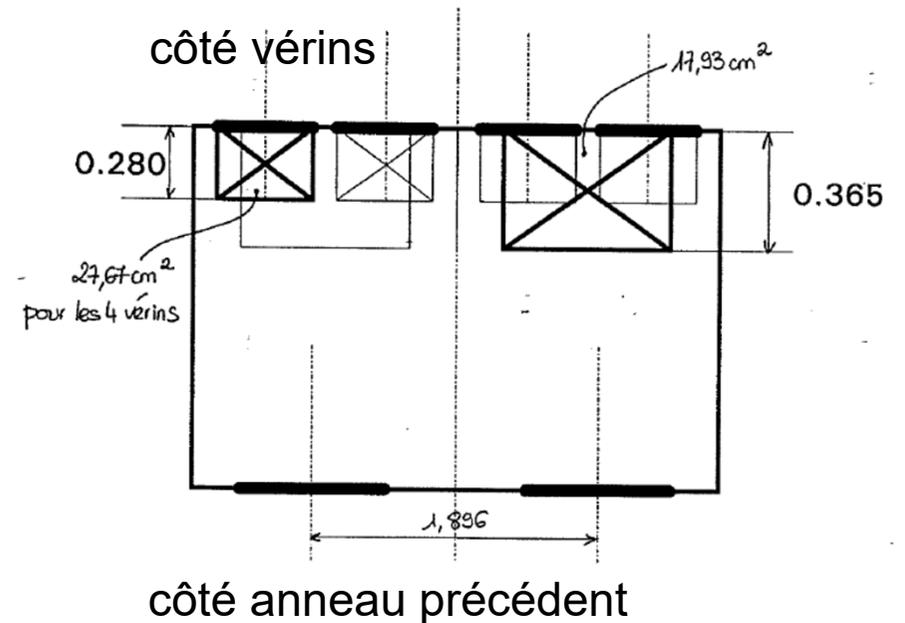


Besoin en armatures dans les voussoirs

effet des poussées des vérins



Principe du ferrailage : armatures de diffusion et anti-fendage (cf cônes d'ancrage de précontrainte)



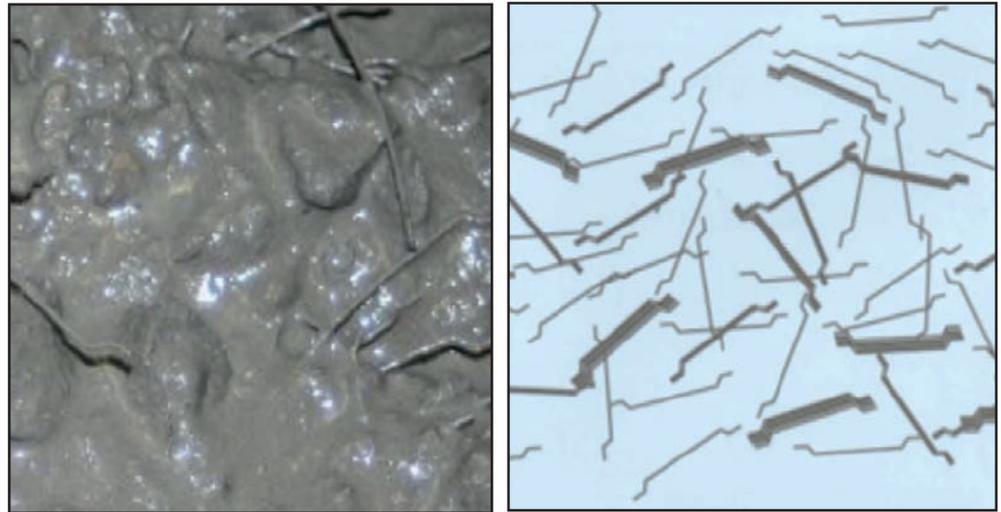
Autres besoins :

- *démoulage, stockage, transport, manutention*
- *Ovalisation et autres effets de l'interaction sol-structure*
- *Compressions localisées aux points d'assemblage et de contact entre voussoirs*

Voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM)



diam. 0.4 à 0.6 mm, long. 15 à 40 mm



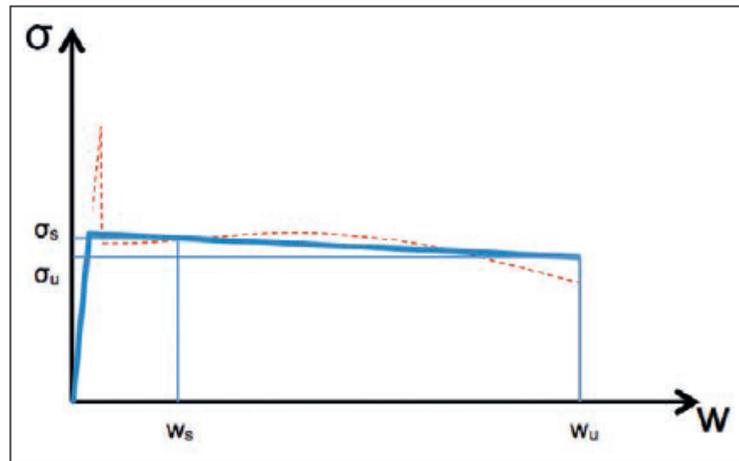
Distribution des fibres dans la matrice

Voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM)

Situation de dimensionnement	Les fibres peuvent-elles remplacer les armatures ?
Ovalisation de l'anneau par poussée du terrain et interaction sol-structure	À vérifier par des essais
Compression localisée aux points d'assemblage entre voussoirs, zones d'appui des patins, etc...	À vérifier par des essais : un complément d'armatures est le plus souvent nécessaire
Démoulage et stockage	À vérifier par des essais
Transport et manutention	Oui
Réactions d'appui concentrées d'un voussoir sur un autre	Non, en général; peut éventuellement être vérifié par des essais
Tractions par retrait différentiel	Oui

Voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM)

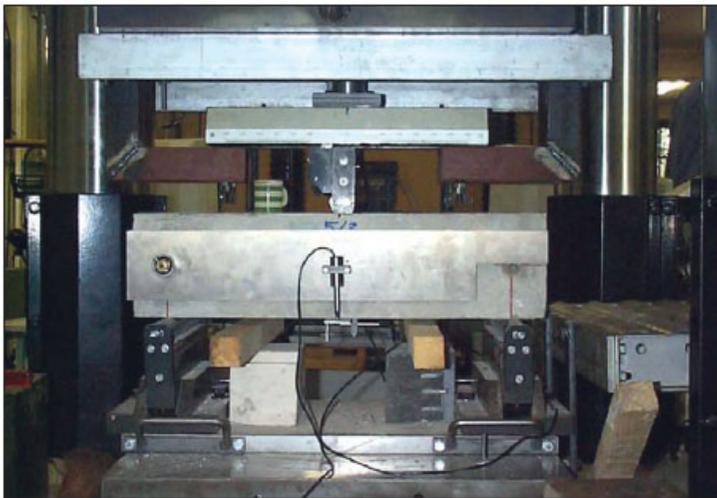
1. Dimensionnement selon le Model Code 2010 de la fib portant sur les bétons fibrés: prise en compte d'un comportement post-fissuration, selon une loi (traction vs ouverture de fissure) du type:



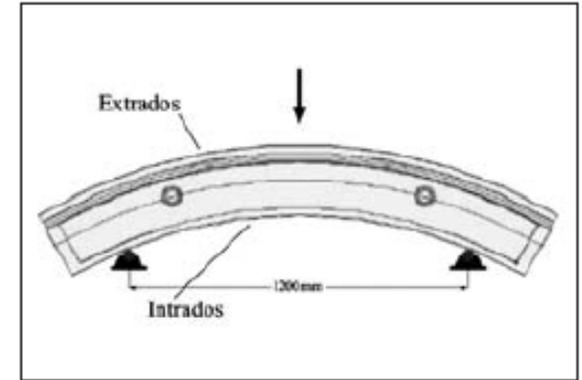
2. Essais de convenance
3. Essais de contrôle

Voussoirs en béton renforcé de fibres métalliques (BRFM)

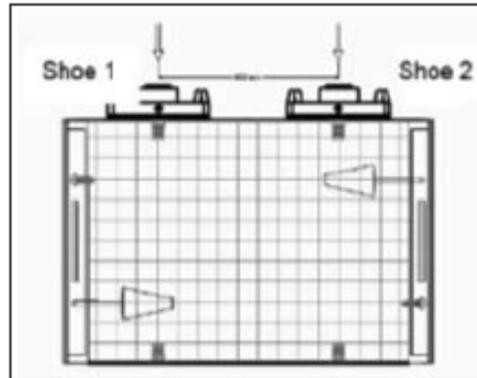
Types d'essais :



Flexion 3 points pour la loi de comportement post fissuration



Essai de flexion réalisé sur un voussoir prototype à l'échelle 1 (Université de Rome)



Essai de pression localisée (simulant l'action des vérins de poussée du tunnelier) sur un voussoir prototype à l'échelle 1. (Université de Rome)

Essais sur voussoirs complets