

Les mardis de l'AFTES
Paris - Soirée du 22 Novembre 2022



Adéquation des tunneliers à confinement au contexte d'un projet urbain et démarche de choix – Projet de recommandation du GT4

François RENAULT (*VINCI Construction Grands Projets*)
et Magali SCHIVRE (*INCAS Partners*)
Co-animateurs du GT4



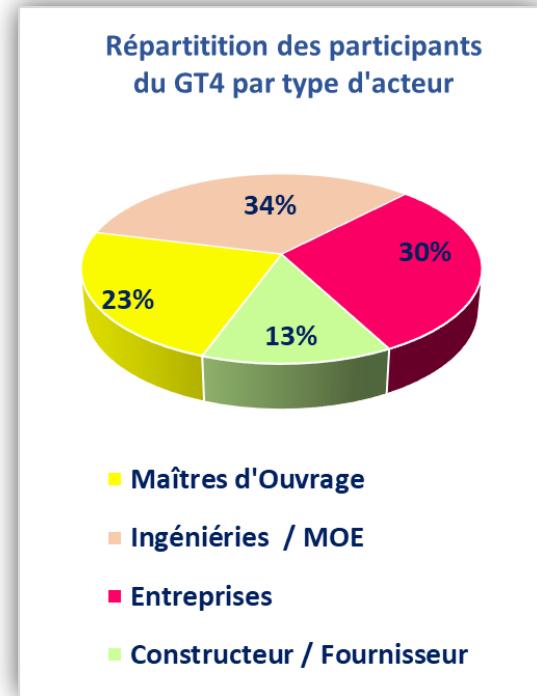
SOMMAIRE

ADÉQUATION DES TUNNELIERS À CONFINEMENT AU CONTEXTE D'UN PROJET URBAIN ET DÉMARCHE DE CHOIX

- 1. Notre Groupe de Travail , le GT4**
- 2. Les grands axes de notre recommandation**
- 3. Des machines de plus en plus polyvalentes**
- 4. Choix du confinement**
- 5. Méthodologie**
- 6. Conclusions et messages clefs**

Notre Groupe de Travail, le GT4

- ❖ 30 participants
- ❖ L'ensemble de la profession est représentée
- ❖ 4 à 5 réunions par an + 5 visites chantier depuis septembre 2019

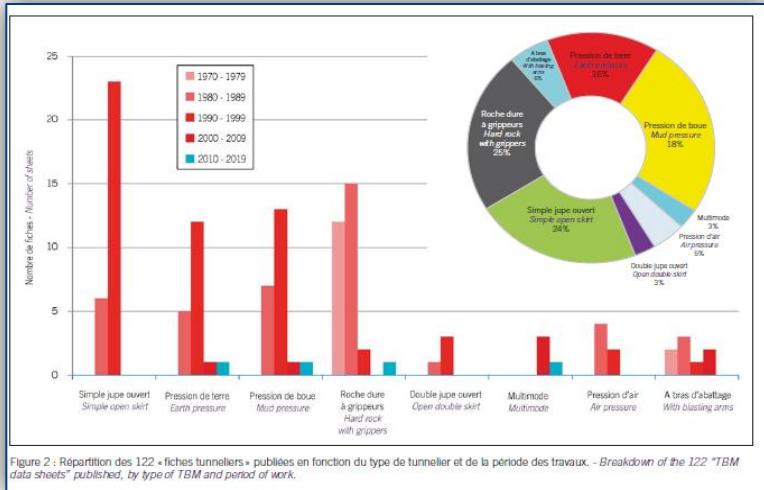


François RENAULT VINCI GP
Magali SCHIVRE INCAS Partners

Vincent BATEMAN	SIAAP
Pierre BEAU	SYSTRA
Yassine BEN DHAOUI	SETEC
Nicolas BERTHOZ	CETU
Pascal BINET	EOLE SNCF Reseau
Francois BONNAFOUS	EIFFAGE INFRASTRUCTURES
Frederic BUFFET	EGIS Rail
Guillaume CHAMPAGNE DE LABRIOLLE ARCADIS	
Laurent CHANTRON	BONNARD & GARDEL
Yvan CHIROL	RAZEL-BEC
Jean-Yves DE LAMBALLERIE	TISSEO-Ingénierie
Olivier DUFOURD	SYSTRA
Georgia EL KHAWAND	BOUYGUES
Alexandre GUILLAUME	MS
Arnaud HOCHARD	IMPLENIA
Emmanuel HUMBERT	TELT
Thierry HUYGHUES-BEAUFOND	Société du Grand Paris
Jean-Marc KOEBEL	SPIE BATIGNOLLES
Nicolas KOLODKINE	CSM-BESSAC
Guy LECHANTRE	HERRENKNECHT
Emmanuelle MARCUCCI	BOUYGUES
André MITILDJAN	CONSEIL D'AMI
Nima Nima Noroozipoor	ARTELIA
Alberto PULITI	EGIS Tunnel
Sylvain RAYNAUD	BASF
Michel ROIGNOT	SYTRAL
Daniel ROUSSEL	SPIE BATIGNOLLES
Remi SUBRA	SADE

FICHES TUNNELIERS, produites par le GT4

- ❖ 140 fiches publiées, dont 24 ces 4 dernières années
- ❖ Travail animé par Nicolas Berthoz du GT4 depuis la reprise en 2019



AFTES - Groupe de travail n°4

FICHES TUNNELIERS PUBLIÉES au 30/06/2022

Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain

AFTES

2. Les grands axes de la recommandation





Les axes principaux du projet de recommandation

ADÉQUATION DES TUNNELIERS À CONFINEMENT AU CONTEXTE D'UN PROJET URBAIN

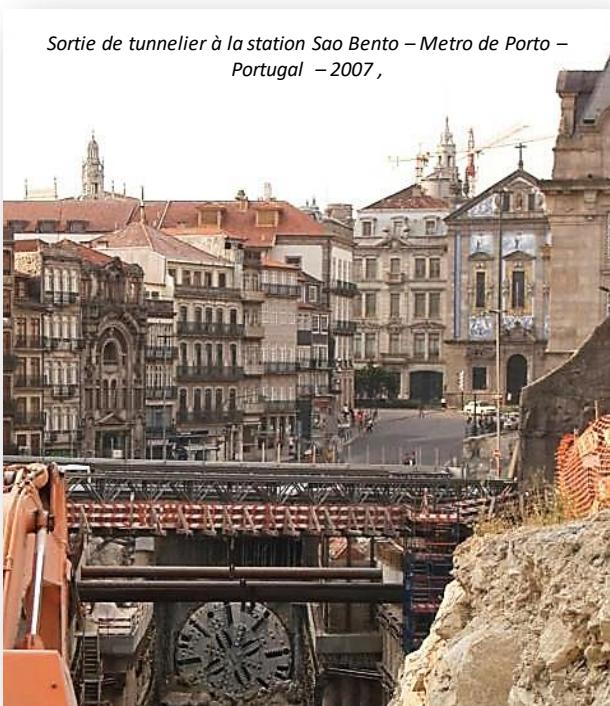
S'appuie sur l'état de l'art
publié en 2019

- ❖ Identification les **particularités d'un site urbain**
- ❖ Etude du **type de confinement possible** et non pas **du type de machine possible**
- ❖ Prise en compte de **l'ensemble des objectifs** et pas uniquement la géologie-géotechnique
- ❖ Prise en compte des **configurations spécifiques et des risques** pour définir le design du **tunnelier** et de ses **équipements complémentaires** (*ie : concasseur*)
- ❖ Proposition d'une démarche de choix de confinement et de tunnelier tracée et synthétisée dans une **maquette environnement & conditions de creusement**



Spécificités des tunnels urbains

Sortie de tunnelier à la station Sao Bento – Metro de Porto – Portugal – 2007,

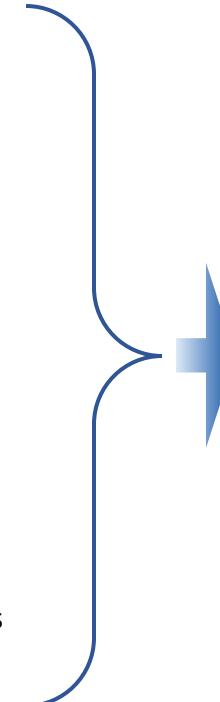


❖ INSERTION

- Contraintes de tracés fortes
- Espace disponible pour la construction très contraint et limité
- Présence de tiers + public
- Présence de structures avoisinantes en surface
- Sous sol exploité : présence d'objets anthropiques oubliés

❖ COMPLEXITE TECHNIQUE

- Qualité de terrain souvent médiocre + pollution + nappes
- Couverture souvent très faible



Objectifs majeurs pour un tunnelier pressurisé en contexte urbain

- 1 SECURITE
- 2 TRANSPARENCE
- 3 PERFORMANCE

Objectifs majeurs en contexte urbain



STABILITE DU FRONT



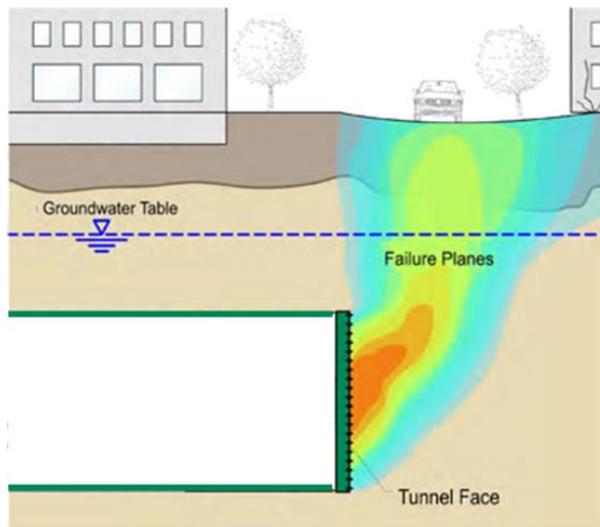
LIMITER LES IMPACTS
sur les AVOISINANTS



MAITRISER LES
RISQUES

❖ Assurer la sécurité des biens et des personnes :

- Pas d'instabilité
- Déformations acceptables



Pas
nécessaire



Limiter les
tassements



Eviter les
fontis

CONFINEMENT

=

Capacité de
stabiliser le front
et à s'opposer aux
déformations

Objectifs majeurs en contexte urbain



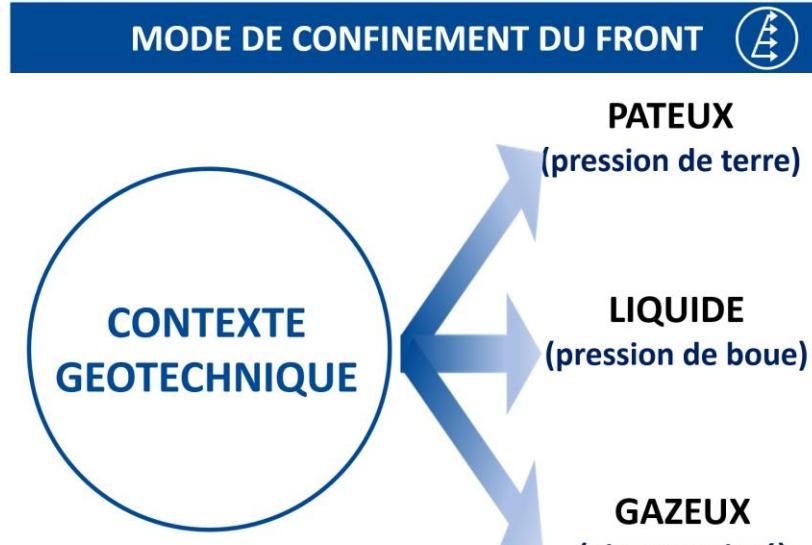
STABILITE DU FRONT



LIMITER LES IMPACTS
sur les AVOISINANTS



MAITRISER LES
RISQUES



Identification des modes de confinement possibles
dans le contexte du projet



ACCEPTABILITE



LOGISTIQUE



DEBLAIS

- ❖ **Minimiser les impacts et nuisances environnementales**
 - Bruit, Vibrations, Pollution
 - Gestion des déblais : volumes très important
→ *impact direct sur la logistique*

- ❖ **S'inscrire dans les emprises mises à disposition**
 - Installations de chantier
= *parties visibles du chantier, soit la vitrine du MOA*
 - Encombrement de voirie



EOLE Puits Gambetta

❖ A périmètre égal, les critères discriminants peuvent être:



COÛTS

- Coûts
 - TBM + Equipements spécifiques associés
 - Coûts de fonctionnement,
 - Coûts liés à l'évacuation des déblais



PLANNING

- Durée de réalisation
 - Temps de montage/démarrage
 - Durée de creusement

- ✓ ensemble de la chaîne logistique
- ✓ géologie versus technologie TBM

3. Des machines polyvalentes disposant d'équipements supplémentaires





Quantifier les évolutions des tunneliers pressurisés

- ❖ **Etat des lieux** des possibilités et des comportement des machines
 - **Quantifier** les évolutions technologiques
 - **Capitaliser** sur les difficultés rencontrées et les solutions implémentées
 - Base de données établie sur l'expérience des membres GT4 + constructeurs (*)

** Environ 300 chantiers renseignés et contrôlés, en France et/ou à l'international*





Caractéristiques principales des tunneliers pressurisés

FICHES DE SYNTHÈSE sur les tunneliers à confinement issues de l'état de l'art GT4R6F2

S SLURRY

BOUCLIER A PRESSION DE BOUE (SLURRY)

DESCRIPTION DU MODE DE FONCTIONNEMENT

Pour ce type de machine, le chambre d'abattage, étanche, est maintenue à une pression de confinement généralement supérieure à la pression hydrostatique. La régulation de cette pression peut se faire à travers l'utilisation d'une bulle d'air comprimée ou bien par un système de régulation des pompes (moins précis).

La suspension de bentonite forme sur le front de taille un film, le cake, qui est une membrane imperméable plus ou moins fine qui a pour but d'appliquer sur le front de taille un gradient de pression stabilisateur du front. L'efficacité du cake est directement liée aux propriétés et à la qualité de la bentonite bentonitique ainsi qu'à la perméabilité du sol. Il sera ainsi évité que la cake malade ou trop sèche ne laisse échapper les fluides de la chambre d'abattage et que la pression de confinement face à des perméabilités fortes. On touche ici la limite du processus car face à des perméabilités trop élevées (de l'ordre de 10^{-3} m/s) il sera extrêmement difficile de créer un cake même imprégnation, le différentiel de pression au front de taille ne sera alors plus maintenu au moyen de potentiels désordres de stabilité du front.

La circulation de bentonite est assurée par un système de pompage et de filtrage. Les déchets sont évacués vers la surface de séparation et la bentonite est régénérée et recyclée, en la séparant de l'eau et de la bentonite.

Autour d'elles, les frontières de la chambre d'abattage sont formées par la boue et la bentonite. La pression de la boue est contrôlée afin que soient maintenues les meilleures qualités thermiques et mécaniques. Ces caractéristiques mécaniques (concentration, viscosité, filtrage, ...) sont adaptées suivant la géologie rencontrée et équipement utilisé.

Un projet passe à une variation fréquente de la géologie, nécessite un ajustement fin et continu de la géologie de la boue et de la régulation des fluides. Des additifs (polymériques ou autres) peuvent être utilisés pour améliorer les propriétés rhéologiques de la boue.

Ces machines sont également adaptées pour le creusement dans des terrains sablo-graveleux à callo-limoneux avec fortes perméabilités dans la nappe phréatique. Néanmoins, dans les sols très perméables (avec perméabilités au-delà de 10^{-3} m/s) il y a un risque de défaillance du sol à cause de la difficulté de formation du cake au front de taille. Dans ce cas, on peut se remettre dans le domaine d'application du Slurry en dépassant la géologie du sol (en ajoutant des polymères par exemple) pour renforcer un cake d'oxygénation dans les perméabilités les plus fortes.

AVANTAGES

- Finesse de la régulation et de mesure de la pression de confinement grâce au dispositif de bulle d'air de régulation (précision, qualité et fiabilité des mesures).
- Génération de pression de confinement par pression d'écoulement.
- Simplicité d'accès au front pour les interventions hydrauliques par rapport aux machines EPB.
- Besoin moindre en puissance de machine par rapport à l'EPB, notamment avec l'augmentation du diamètre d'excavation.

INCONVENIENTS

- Risque de perte de boue et du confinement (peut générer des instabilités de front) en présence de vides de taille, importante et/ou de contraste de perméabilité élevé entre différents terrains.
- Nécessité d'une centrale de séparation :
 - coûts de l'installation et du fonctionnement de la centrale,
 - consommation d'espaces au niveau des installations de chantier
 - Capacité de traitement des fines de la centrale impactant directement la cadence de creusement

E EPB

BOUCLIER A PRESSION DE TERRE (EPB)

DESCRIPTION DU MODE DE FONCTIONNEMENT

Pour ce type de bouclier, on réalise le confinement du front de taille en assurant par la pressurisation d'une « pâle » dans la chambre d'abattage. Cette « pâle » est obtenue par le conditionnement des déblais issus de l'abattage entrant dans la chambre par de l'eau et des additifs appropriés (mousse ou polymères). L'extraction des matériaux d'abattage remplissant la chambre est faite au moyen d'un vis d'Archimède. Le marquage est renommé par la vis d'extraction qui alimente le tapis d'abattage.

La stabilité du front de taille est assurée par une homogénéisation du matériau abattu dans le but de créer un matériau suffisamment pâleux pour permettre d'appliquer à front la pression requise par le calcul. Particulièrement à cette régulation l'écart entre le débit entrant (abattage) et le débit sortant (sortie de la vis). Enfin, le vis permet de réduire la pression entre le front de taille et l'extensio au tapis d'excavation (ce plus le vis est long plus la perte de charge est élevée). La pression de la pâle peut être assurée par un moyen mécanique ou hydraulique au front. La mesure du poids et du volume (extracto) de matériau extrait est utilisée pour le contrôle de l'avancement.

Le remplissage complet de la chambre d'abattage (mode EPB) nécessite deux types de machines complémentaires : par exemple, l'ajout de bentonite dans la chambre haute, venir de l'air pressurisé. Les progrès en matière de machines et de matériaux utilisés permettent de contrôler le remplissage de la chambre.

Il convient de préciser ici que l'homogénéisation du matériau dans la chambre d'abattage peut être parfois complexe, en effet, suivant le type de terrain rencontré à front et, notamment suivant la teneur en eau, il n'est pas toujours possible de créer une pâle. De cette difficulté, résultent des implications sur la mesure de pression à front, il faut alors ajouter des matériaux pour retrouver un comportement du marin plus compatible avec la précision recherchée pour la pression à front.

Les EPB sont à présent de plus en plus utilisées dans les sols très perméables et opèrent avec des pressions hydrostatiques jusqu'à $3-4$ bars à l'air, ce qui équivaut à une pression de 30-40 m d'eau. Le domaine d'application idéal de cette machine est donc dans des sols cohésifs argileux avec une faible perméabilité.

Toutefois, depuis plusieurs années le domaine d'application typique des EPB a été étendu notamment grâce aux progrès faits dans plusieurs domaines (additifs et équipements)

AVANTAGES

- Coût d'investissement moins important, en cas d'équipement standard
- Besoin moins fort en termes d'espace logistique pour les tunneliers à pression de boue.
- Risque de perte du confinement est moins important que pour un EPB pour la traversée des terrains avec présence de vides.
- Moindre sensibilité au colmatage

INCONVENIENTS

- Difficulté à garantir un remplissage complet de la chambre d'abattage
- Moindre précision dans le contrôle de la pression au front par rapport au tunnelier à pression de boue.
- Besoin d'un fort puissance de machine par rapport au Slurry pour l'énergie de broyage et également avec l'augmentation du diamètre d'excavation.
- Géométrie de pression de confinement atteignables plus faible.
- Sensibilité plus importante à l'usure.
- Matériau en sortie de tunnel qui peuvent être difficilement pelletables, et nécessiter soit de l'espace de stockage suffisant pour essorer, soit un traitement avant leur transport (chaux)

M MULTIMODE

BOUCLIERS MULTIMODES - EPB/SLURRY

DESCRIPTION DU MODE DE FONCTIONNEMENT

Les tunneliers à densité variable combinent les avantages des deux méthodes dans une seule machine. Sans modification mécanique la machine peut évoluer progressivement entre les modes de fonctionnement suivants, mode à pression de terre (EPB), avec éventuel complément de bentonite ; mode à pression basse, à basse et haute densité.

Le transfert entre ces modes peut se faire graduellement sous contrôle permanent de la pression de confinement et sans intervention dans la chambre d'abattage. Les changements géologiques et hydrogéologiques le long du tracé peuvent ainsi être gérés avec la plus grande flexibilité.

MULTIMODE

Le bouclier est équipé d'une chambre d'abattage étanche similaire à celle d'un EPB mais avec un vis d'Archimède plongeante. L'extraction du terrain de la chambre d'abattage se fait par une vis qui alimente une chambre de marquage et un circuit de marquage. Un circuit de marquage hydraulique transporte le terrain jusqu'à une station de séparation en surface.

La chambre de marquage d'après le fonctionnement de la machine est étanche avant le bouclier entre les deux parties plongeante et étanche. La connexion entre la bulle d'air pressurisé et la chambre d'excavation est assurée par des tuyaux de communication entre ces deux chambres. En mode EPB le réservoir de bentonite pressurisé peut également être utilisé comme volume de remplissage automatique en cas de chute de pression souterraine dans la chambre d'excavation.

Les pressions de la terre et de fer sont également par le diagramme de pression de la barre classique de densité 1.05. Si la pression est importante et que la couche de boue soit supérieure à la hauteur de couverture, il existe un risque que la boue migre jusqu'en surface et que la pression soit perdue. La solution consiste à ce que d'augmenter la densité du fluide de confinement afin d'augmenter le gradient de pression. Le point de pression nulle se trouve alors à un niveau inférieur à celui de la nappe phréatique, il ne peut y avoir de remontée de boue en surface dans ce cas.

Le principe de fonctionnement du tunnelier à densité variable est de permettre une adéquation régulière et proportionnée de la pression au front de taille afin d'assurer la stabilité quelle que soit la nature des sols à traverser.

Cette capacité d'adaptation fait de cette machine un outil capable de passer pratiquement d'un mode EPB à un mode Slurry et inversement. Équipé d'une vis d' extraction combinée à un système de marquage hydraulique ce tunnelier peut être configuré pour fonctionner dans les deux modes de manière indépendante ou en mode combiné. Le mode EPB peut être introduit dans la chambre d'abattage. Enfin, une bulle d'air offre la flexibilité de la pression appliquée au front de taille. Le marquage est éjecté hydrauliquement quel que soit le mode appliquant pour l'abattage (Slurry ou EPB) en effet, un émetteur en sortie de vis permet de régler la granulométrie et également de diluer le marin dans le fluide de transport vers la centrale de séparation des boues.

AVANTAGES

- Compatible avec une grande variété de terrains
- Finesse de la régulation + mesure de la pression de confinement
- Passer pratiquement d'un confinement piézostatique à un confinement liquide >> les changements géologiques et hydrogéologiques le long du parcours peuvent ainsi être gérés avec la plus grande flexibilité
- Possibilité de mise en œuvre de bout techniques à haute densité (boule lourde) avec les équipements adéquats (utilisation en zones karstiques par exemple)

INCONVENIENTS

- Coût d'investissement & coût d'utilisation plus élevé
- Centrales de séparation de la boue
- Machines sophistiquées plus complexes à utiliser
- Pas de possibilité d'injecter des additifs pour le conditionnement



Synthèse des évolutions des TBMS pressurisés

- ❖ Augmentation des pressions de confinement, et ce particulièrement pour les SLURRY
- ❖ Amélioration de la gestion de la précision du confinement, par injection de bentonite pressurisée pour compenser les variations de pression en chambre (*bulle intégrée, pressurisation du vide annulaire...*)

- ❖ Adaptabilité à des terrains de granulométries et perméabilités différentes



- Mesures anti-colmatage et amélioration du comportement dans les sols cohérents
- Gestion de la stabilité du front de taille par la capacité à générer un cake

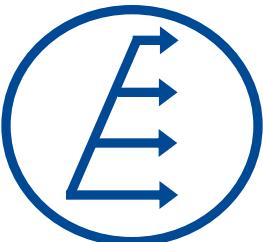


- Modifications des propriétés mécaniques des terrains excavés par utilisation d'adjuntoirs directement dans la chambre d'abattage

Ajout d'équipements supplémentaires pour compenser des défauts



↗ recouvrement des domaines d'utilisation



Type de confinement et type de tunnelier

TYPE DE TUNNELIER PRESSURISE				
MODE DE CONFINEMENT	Pression de terre « EPB » E	Pression de Boue « SLURRY » S	Air comprimé	Multimode M
Pâteux	XX			X ⁽³⁾
Liquide		XX		X ⁽³⁾
Gazeux	X ⁽¹⁾	X ⁽²⁾	XX	X ⁽³⁾

XX Mode de confinement classique

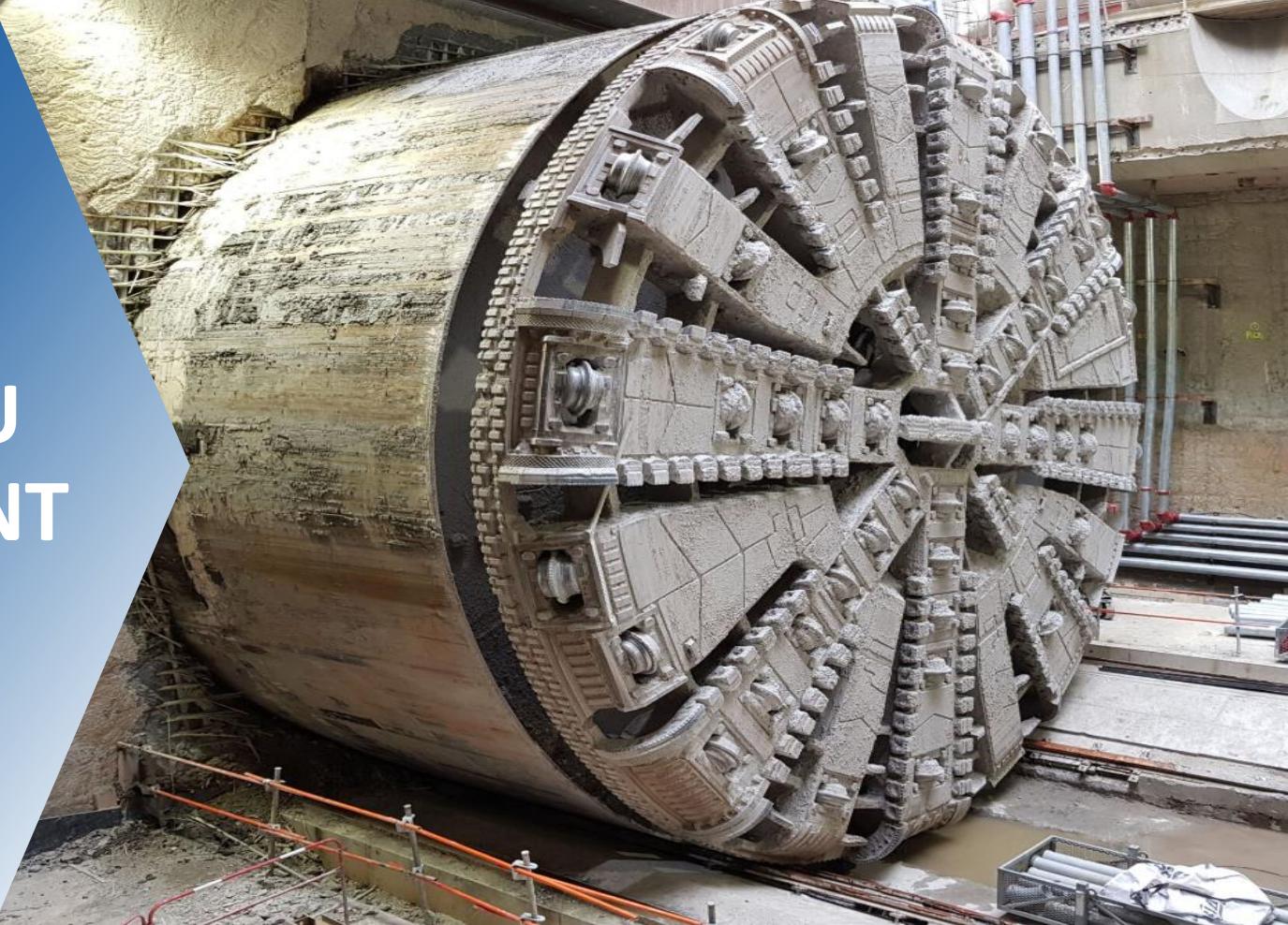
X Mode de confinement possible sous réserve de l'évaluation des avantages/inconvénients/risques associés à ce mode.

(1) EPB : remplissage partiel de la chambre d'excavation

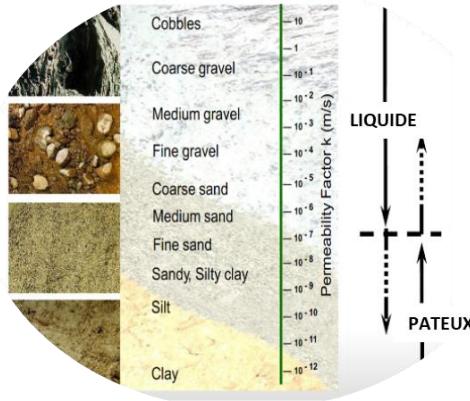
(2) SLURRY : mise en communication de la bulle d'air avec la chambre d'excavation

(3) MULTIMODE : dépend de la typologie du tunnelier multimode

4. CHOIX DU CONFINEMENT



❖ Définition des conditions optimales selon :



- **granulométrie**
- **limites d'Atterberg et teneur en eau**
- **conditions hydrogéologiques**
- **résistance mécanique** affectant la **pression de confinement minimale** à respecter,
- **déformabilité des terrains** de couverture pouvant conduire à des valeurs élevées de **pression de consigne**

3 OBJECTIF 1 : SECURITE

3.1 CONFINEMENT DES ZONES TECHNIQUES HOMOGENES

3.1.1 Confinement pâteux

- 3.1.1.1 Fonctionnement du confinement pâteux
- 3.1.1.2 Conditions optimales de mise en œuvre du mode de confinement pâteux

3.1.2 Confinement liquide

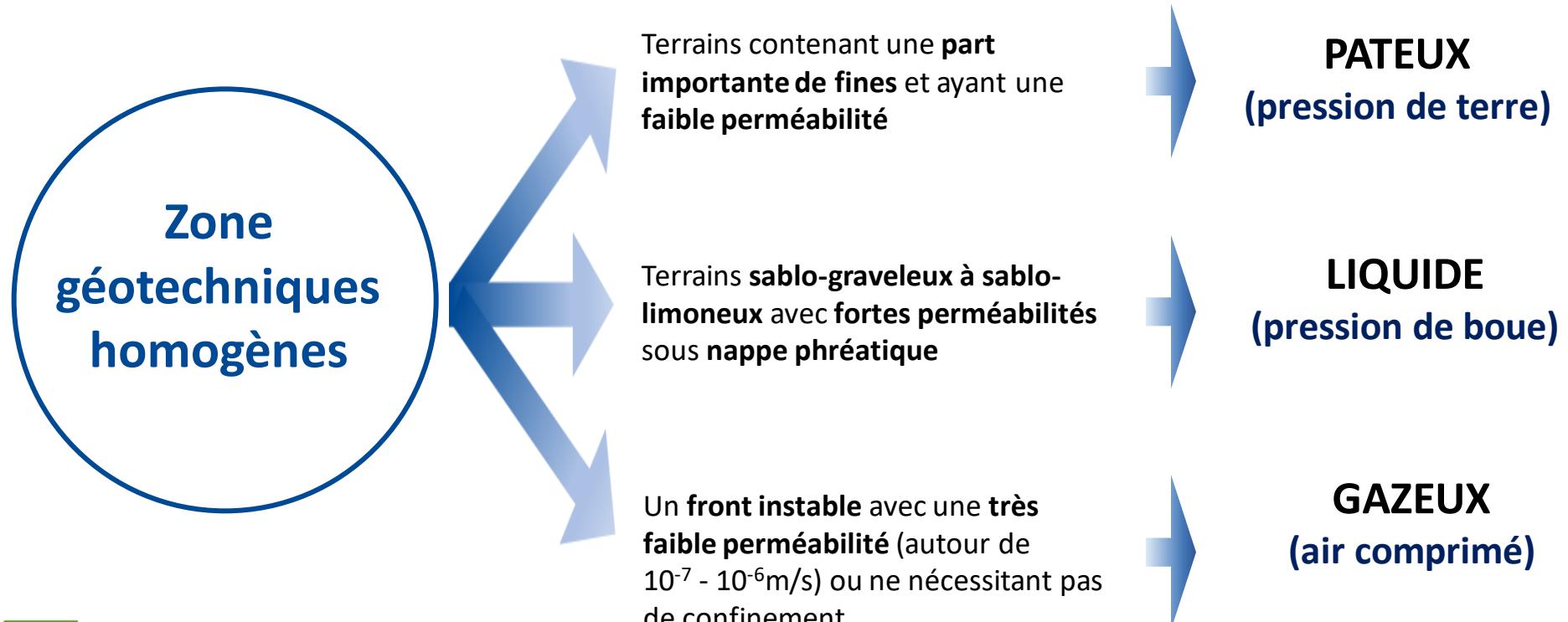
- 3.1.2.1 Fonctionnement du confinement liquide
- 3.1.2.2 Conditions optimales de mise en œuvre du mode de confinement liquide

3.1.3 Confinement gazeux

- 3.1.3.1 Fonctionnement du confinement gazeux
- 3.1.3.2 Conditions optimales de mise en œuvre du mode de confinement gazeux



PATEUX,
LIQUIDE ou
GAZEUX ?



Configurations spécifiques et risques

1

SECURITE

CONSTAT

- ❖ Moindre adaptabilité des tunneliers comparé aux méthodes conventionnelles
- ❖ Certaines configurations peuvent être rédhibitoires



- ❖ Conséquences qui peuvent être très lourdes
- ❖ A prendre en compte lors de la sélection du tunnelier et de ses équipements les mieux appropriés



ANTICIPATION des MESURES
D'ATTENUATION ou CONTRE-
MESURES pour MINIMISER LES
CONSEQUENCES

CONFIGURATIONS SPECIFIQUES

- ❖ Singularités naturelles ou anthropiques
- ❖ Transitions entre des horizons géotechniques de fort contraste



3.2 CONFIGURATIONS SPECIFIQUES, CONSEQUENCES ET CONTREMEURES

3.2.1 Identification des configurations spécifiques

- 3.2.1.1 Terrains collants / colmatant
- 3.2.1.2 Blocs erratiques et Obstacles anthropiques
- 3.2.1.3 Vide d'origine naturelle ou anthropique
- 3.2.1.4 Front Mixtes
- 3.2.1.5 Pollution du sol

Objectif = se doter d'un **langage commun** :

- Définition du phénomène,
- Evénements redoutés principaux,
- Indication sur la capacité à anticiper la survenue du phénomène, sa localisation ou sa caractérisation
- Configurations géologiques favorisant sa survenue
- Illustrations

Blocs erratiques / Obstacle Anthropique

Définition du phénomène

Bloc(s) erratique(s) de taille significative allant de quelques décimètres à une taille métrique dans une matrice tendre.

Définition de « erratique » : qui est instable, ne manifeste aucune tendance cohérente ; aléatoire. (Larousse)

Rencontre d'un obstacle d'origine anthropique par le tunnelier. Cet obstacle peut être une fondation, un tirant, une palplanche, un forage. Cet obstacle peut être en service ou abandonné.

Evènement redouté principal

Ces blocs nécessitent d'être fragmentés pour pouvoir être excavés. Ils peuvent générer des dommages à la roue de coupe et ses outils, en cas de déchaussement. Ils peuvent se coincer dans les ouvertures de la roue de coupe et en perturber le fonctionnement.

Après leur passage dans la chambre d'abattage, ils peuvent aussi endommager la chaîne de marinage (obstruction, casse, panne, ...)

Pourrait engendrer des difficultés de stabilité de front

Qualification de la PREVISIBILITE du phénomène	BLOCS ERRATIQUES		
	Existence	Localisation	Caractérisation
		Obstacle Anthropique	

Conditions géologiques – hydrogéologiques

Pour les blocs erratiques :

- Alluvions fluviatiles du Quaternaire
- Moraines et alluvions fluvioglaciaires
- Altération de massif granitique

Illustration



Seattle



Los Angeles Regional Connector Project

Configurations spécifiques et risques

1

SECURITE

3.2.2 Impacts, conséquences et contremesures des configurations spécifiques selon le type de confinement

CONSEQUENCES - Blocs erratiques ou terrains indurés						
Identification des conséquences sur le maintien du confinement et sur le tunnelier	Niveau d'IMPACT (initial)		localisation		COMMENTAIRES EXEMPLES PRATIQUES	
	PATEUX	LIQUIDE	GAZUEUX	Chambre d'abattage	Roue de coupe	Boîtier / logistique interne
Bloc d'une taille supérieure au calibrage de la roue engendrant un arrêt pour pouvoir l'extraire	3	3	3	X		Arrêt de la machine Besoin d'intervention en hyperbare
Rupture / casse de molettes ou d'outils de coupe sous l'impact qui nécessiteront un arrêt temporaire pour son remplacement	1	1	1	X		Dans certains cas extrêmes les casses de molettes pourraient engendrer un arrêt
Usure, endommagement des conduits de buse en cas extrême et répétitif	0	1	0		X	lié à l'abrasivité en général
Endommagement dans la chaîne de mariage (convoyeurs)	2	0	2		X	Si pas de présence de concasseur en arrière de la vis ; chute de blocs du convoyeur (risque humain)
Rupture de l'arbre de la vis	2	0	2	X		Déchirure de bande
Difficultés de guidage et de maîtrise du confinement	1	1	1	X	X	

CONSEQUENCES ET NIVEAU D'IMPACT (initial) sur le tunnelier	
Les conséquences possibles des principaux risques géotechniques ou configurations spécifiques sont évaluées pour les différents types de confinement, en ce qui concerne leur impact sur l'exploitation du tunnelier et sur la sécurité des travailleurs.	
0	Négligeable ou non concerné.
1	Acceptable - Mesures d'atténuation pas nécessaires
2	Non désiré : Des mesures d'atténuation des risques doivent être identifiées. Les mesures sont mises en œuvre pour autant que leur coût ne soit pas disproportionné par rapport à la réduction des risques obtenue
3	Inacceptabile Le risque doit être réduit au moins à "Non désiré", quel que soit le coût de l'atténuation des risques.

CONTRE-MESURES Blocs erratiques ou terrains indurés						
Identification des contre-mesures (correctives ou mesures préventives) qui pourraient être implémentées	Préventives (P)		Correctives (C)		Niveau de Difficulté de sa mise en œuvre	COMMENTAIRES EXEMPLES PRATIQUES
	PATEUX	LIQUIDE	GAZUEUX			
Équiper le tunnelier d'un concasseur à mâchoires	P	⚠️	✓			Pour les confinements pâteux, le concasseur est derrière la vis, alors qu'il se trouve en bas de la chambre d'abattage pour les Slurry
Dimensionnement des ouvertures de la roue de coupe et de renforts éventuels	P	⚠️	✓	✓		
Dimensionnement adéquat de la vis (pas, résistance, diamètre)	P	⚠️	NC	?		Limité selon la taille des blocs et les ouvertures de la roue
Disposer des moyens adéquats pour réaliser des opérations hyperbariques	P	⚠️	✓	⚠️		
Ouvertures de la roue de coupe à définir en fonction du calibrage souhaité	P	✓	✓	✓		La roue de coupe doit arriver à rogner progressivement le/les blocs
Protection de la face de la roue de coupe contre l'usure	P	✓	✓	✓		
Conduites de bâti compatibles avec la bloc-métrie en sortie du concasseur avec des grilles de maille adéquate	P	NC	✓	NC		
Instrumentation des molettes => économie de l'usure de l'outil, donc moins de changements	P	✓	✓	✓		L'instrumentation permet de détecter la rencontre de blocs/obstacles et de réduire le risque de casse de molettes est réduit.
Disposer un détecteur de métaux pour déceler une casse d'outil potentiel		✓	⚠️	✓		Dans le cas du mariage liquide, la détection ne peut se faire que en surface
Maintenance préventive des molettes et des outils	C	⚠️	✓	⚠️		Augmenter la fréquence d'inspection et de maintenance es molettes et des outils
Prévoir des trappes d'inspection pour dégager des éléments métalliques ou faciliter les réparations (Pièges à cailloux devant les pompe ou trappes de visites sur une vis)	P	✓	✓	✓		

Difficulté à mettre en œuvre les mesures d'atténuation sur le site		
Pas concerné		
✓	Facile à mettre en œuvre sur site, à prendre en compte au préalable lors de la conception	
⚠️	Difficulté moyenne de mise en œuvre ; nécessite une dextérité particulière et des compétences spécifiques	
❗	Très difficile à mettre en œuvre (pourrait avoir une incidence sur les objectifs du projet)	

Pour chaque configuration spécifique, aider le concepteur à :

- Identifier les **conséquences selon le type de confinement**
 - Evaluer le niveau d'impact
- Prévoir les **contre-mesures préventives ou correctives adaptées**
 - Anticiper les **impacts sur le design machine et ses équipements (ie : concasseur)**
 - Evaluer la **difficulté d'implémentation**

4 OBJECTIF 2 : TRANSPARENCE

4.1 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES TRAVAUX

4.1.1 Déblais

- 4.1.1.1 Nature chimique du marinage par convoyeur/berlines
- 4.1.1.2 Nature chimique du marinage dans le cas d'un transport hydraulique
- 4.1.1.3 Différence de quantités de déblais selon le type de marinage :
- 4.1.1.4 Possibilité de réemploi ou de valorisation ultérieure :

4.1.2 Vibrations

4.1.3 Bruit

4.1.4 Pollution existante (hydrocarbure, métaux lourds, H2S, sulfates)

4.2 CONTRAINTES URBAINES D'INSTALLATION DE CHANTIER

4.2.1 Espace disponible en surface pour les installations et accès

4.2.2 Taille du puits de démarrage

- ❖ Zoom uniquement sur les aspects qui diffèrent les confinement et impactent le choix de l'une ou l'autre des technologies

4.1 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES TRAVAUX

4.1.1 Déblais

❖ Choix du dispositif de marinage :

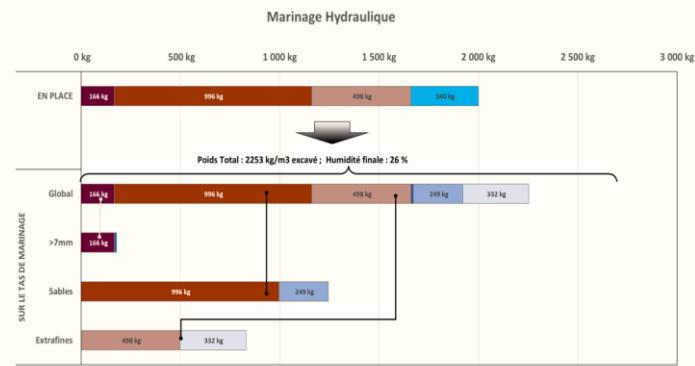
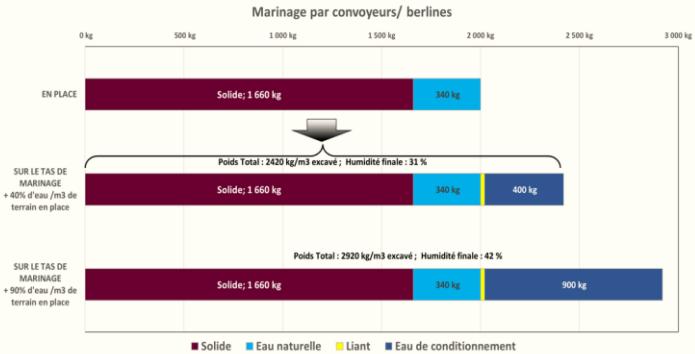
- Hydraulique + centrale de séparation (*adaptés aux 3 modes de confinement*)
- Convoyeurs/Berlines (*adapté à un confinement pâteux et/ou gazeux*)

Terrain en place
≠
tas de marinage

❖ Impacts sur :

- Nature des matériaux
- Quantités à évacuer → *impact direct sur le nombre de camions*
- Potentiel de réemploi (*) *selon GT35R1F2 « La gestion et l'emploi des matériaux excavés »*

CAS PRATIQUE



Installations de chantier

2

TRANSPARENCE

4.2 CONTRAINTES URBAINES D'INSTALLATION DE CHANTIER

4.2.1 Espace disponible en surface pour les installations et accès



EOLE – Centrale de Séparation - L=6km – Ø11,4m

Les mardis de l'AFTES - Paris – 22/11/2022

Adéquation des tunneliers à confinement au contexte urbain - F. Renault et M. Schivre

S'inscrire dans les espaces mis à disposition



GRAND PARIS EXPRESS L16-1 - Installations pour caractérisation des déblais

4.2 CONTRAINTES URBAINES D'INSTALLATION DE CHANTIER

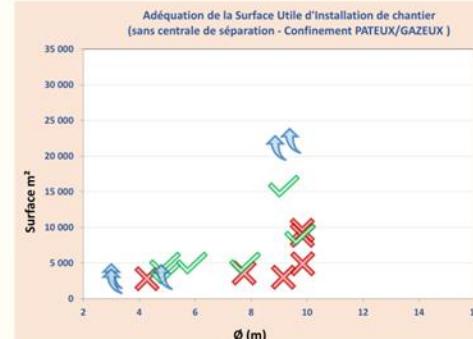
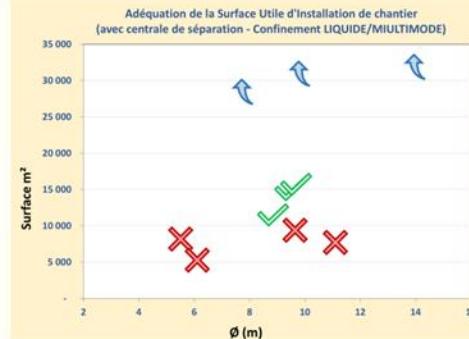
4.2.1 Espace disponible en surface pour les installations et accès

❖ Surface utile d'installation de chantier (SUI)

- Diamètre
- Organisation des travaux
- Vitesse de creusement maximale
- Mode confinement et de marinage
- Gestion et caractérisation des déblais
- Coactivités

SUI \nearrow avec le diamètre
Centrale de séparation = + d'espace

Benchmark de différents projets



ADEQUATION DE LA SURFACE UTILE D'INSTALLATION DE CHANTIER DISPONIBLE	
Espace surabondant par rapport au besoin	
Espace adapté n'ayant pas généré de gêne spéciale en matière de sécurité ou de productivité	
Espace insuffisant ayant provoqué des gênes en matière de sécurité ou de productivité	

5 OBJECTIF 3 : PERFORMANCE

5.1 CRITÈRES INFLUENÇANT LES COÛTS

5.1.1 Evaluation des coûts d'investissement matériel

5.1.2 Evaluation des coûts de fonctionnement :

5.2 ACTIVITÉS INFLUENÇANT LA DUREE DE CREUSEMENT

Temps d'arrêts de tunnelier à confinement			
Tâches inévitables => arrêts planifiés	Temps d'attente	Maintenance	Pannes
Rallongement des conduites de marinage	Temps morts ; Attente du train sur pneu ou autre appro voussoirs ;	Maintenance journalière ; Opérations hyperbariques.	Tunnelier Trains d'approvisionnement Centrale à mortier Des pompes de marinage ; Déchirure de bande
Installations de pompes relais	Attente de la station de traitement des boues (bourrage au trommel par exemple)		
Rallongement de bandes	Bourrages tapis		
Installation de boosters	Attente de la centrale à mortier (interruption du creusement si pas de mortier à injecter).		
Rallongement des servitudes (air/eau/exhaure) ;			
Rallongement du câble d'alimentation électrique			
Rallongement de la ventilation ;			
Nettoyage des conduites d'injection de mortier			

Tunnelier à confinement liquide à marinage hydraulique / Tunnelier à confinement pâteux à marinage par convoyeurs / Tout type de confinement

❖ Par exemple la **durée de réalisation** dépend :

1) Montage / démarrage

2) Cadences de creusement vs géologie

- Fortement dépendantes de la **présence d'argile**
- Influencées par la **résistance** des terrains et leur **abrasivité**
- Dépend de la **taille de la SUI**, et du dimensionnement de la **centrale de séparation** en cas de marinage liquide

3) Temps d'arrêts + maintenance

5. Méthodologie





METHODOLOGIE



- ❖ Constituer une « maquette environnement & conditions de creusement»

- **Expliquer** ses choix
 - Assurer la **träçabilité**
 - Localiser les **spécificités** le long du tracé
 - Identifier les **modes de confinement possibles**
 - Définir les **équipements complémentaires nécessaires** du tunnelier et les mesures préventives / pilotage / traitements de terrains éventuels

MAQUETTE ENVIRONNEMENT & CONDITIONS DE CREUSEMENT

PROJET

CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

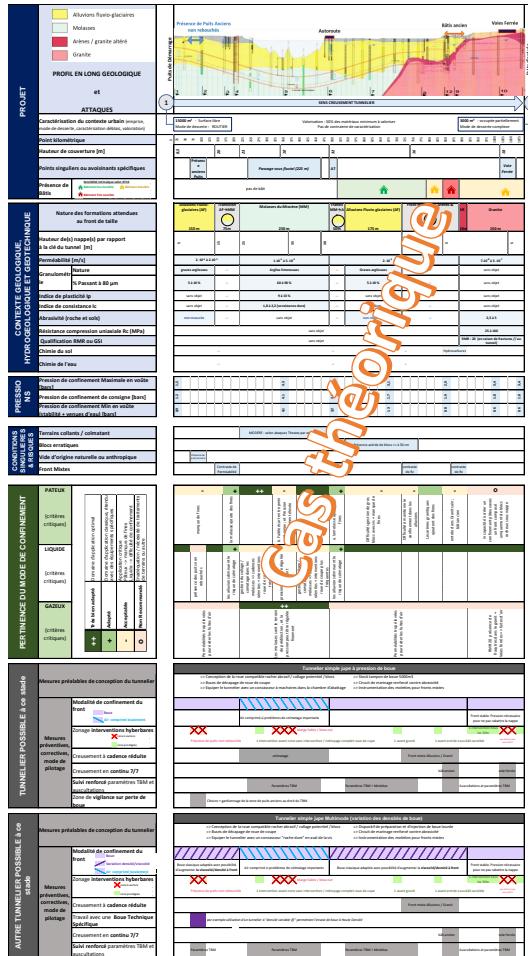
PRESSIONS de CONF.

IDENTIFICATION DES CONDITIONS SINGULIERES & RISQUES

PERTINENCE DU MODE DE CONFINEMENT PATEUX / LIQUIDE / GAZEUX)

TUNNELIER & Equipements POSSIBLE à ce stade

MESURES PREVENTIVES & PILOTAGE





METHODOLOGIE

MAQUETTE ENVIRONNEMENT & CONDITIONS DE CREUSEMENT (1/3)

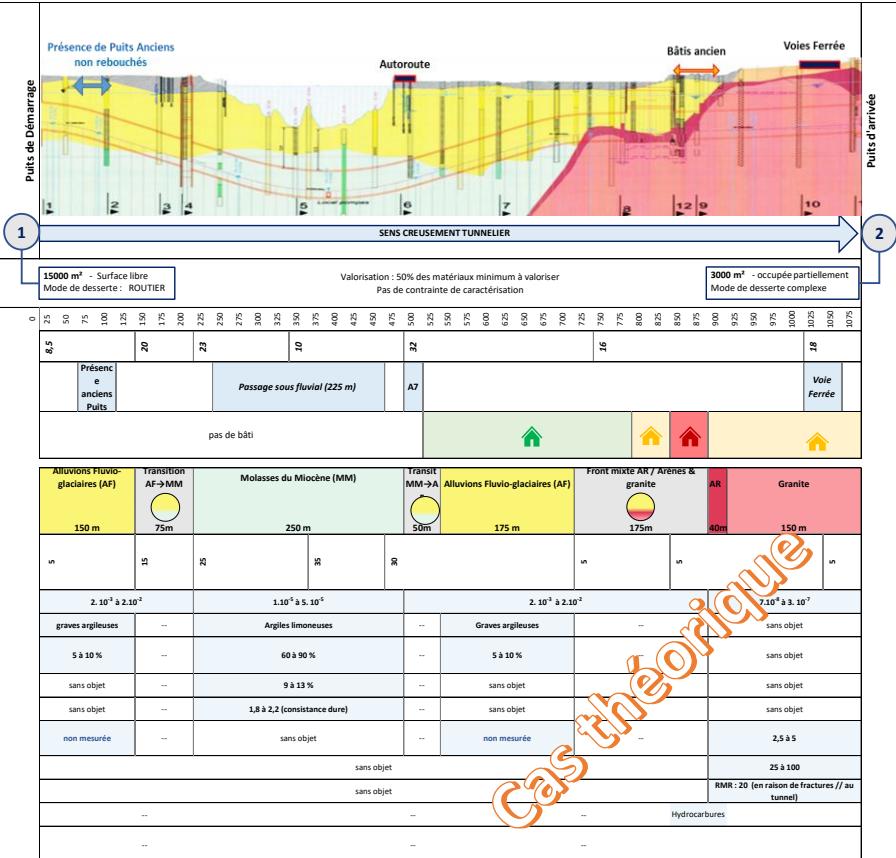


PROJET

CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

PROJET	 Alluvions fluvioglaciaires  Molasses  Arènes / granite altéré  Granite
	PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE
	et
	ATTAQUES
	Caractérisation du contexte urbain (emprise, mode de desserte, caractérisation déblais, valorisation)
Point kilométrique	
Hauteur de couverture [m]	
Points singuliers ou avoisinants spécifiques	
Présence de Bâti	Sensibilité intrinsèque selon GT16
	 Bâtiment Peu Sensible  Bâtiment Sensible  Bâtiment Très sensible
Nature des formations attendues au front de taille	
Hauteur de(s) nappe(s) par rapport à la clé du tunnel [m]	
Permeabilité [m/s]	
Granulométrie	Nature
	% Passant à 80 µm
Indice de plasticité Ip	
Indice de consistance Ic	
Abrasivité (roche et sols)	
Résistance compression uniaxiale Rc (MPa)	
Qualification RMR ou GSI	
Chimie du sol	
Chimie de l'eau	



175 m	175m	40m	150 m
	si	si	
$2 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$			$1 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-3}$
Graves argileuses	--		sans objet
5 à 10 %			sans objet
sans objet			sans objet
sans objet			sans objet
non mesurée	--		2,5 à 5
			25 à 100
		RMR : 20 (en raison de tunnel)	
--			Hydrocarbures



METHODOLOGIE

MAQUETTE ENVIRONNEMENT & CONDITIONS DE CREUSEMENT (1/3)



PRESSIONS de CONF. Prévisionnelles

IDENTIFICATION DES CONDITIONS SINGULIERES & RISQUES

PERTINENCE DU MODE DE CONFINEMENT (PATEUX / LIQUIDE / GAZEUX)

NIQUE	Nature des formations attendues au front de taille
-------	--

PRESSIO NS	Pression de confinement Maximale en voûte [bars]
	Pression de confinement de consigne [bars]
	Pression de confinement Min en voûte (stabilité + venues d'eau) [bars]

CONDITIONS SINGULIERES & RISQUES	Terrains collants / colmatant
	Blocs erratiques
	Vide d'origine naturelle ou anthropique
	Front Mixtes

PERTINENCE DU MODE DE CONFINEMENT	PATEUX (critères critiques)		
	LIQUIDE (critères critiques)		
GAZEUX (critères critiques)			
++	Très bien adapté	Domaine d'application optimal	
+	Adapté	Domaine d'application limité, étendu avec des équipements spécifiques	
-	Acceptable	Application critique Pâteux > manque de fines liquides > difficulté de confinement	
○	Non Recommandé	Inadéquation / nécessité de traitements de terrains ou autre	

Alluvions Fluvio-glaçiaires (AF)	Transition AF→MM 75m	Molasses du Miocène (MM)	Transit MM→A 50m	Alluvions Fluvio-glaçiaires (AF)	Front mixte AR / Arènes & granite	AR 175m	Granite 40m	150 m
----------------------------------	-------------------------	--------------------------	---------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------	----------------	-------

1.0	1.2	1.5						
4.0	4.1	4.3						
5.0	5.5							
6.0	6.1							
7.0	7.2	7.5						
8.0	8.1	8.5						
9.0	9.1	9.5						
10.0	10.1	10.5						
11.0	11.1	11.5						

		MODERE : selon abques Thewes par exemple					
					Présence avérée de blocs >> 50 cm		
Présence de puits anciens		Contraste de Permeabilité		Contraste de Permeabilité		Contraste de de Rc	contraste de Rc

Présence des puits non réduites	+	+	++	+	++	+	++	+
les alluvions diminuent le risque de comitage / génération de blocs / génération de blocs / risques de débordement des molasses +/ ou rénier +/ ou rôle de route plus fréquentes								
Les molasses sont de préférence la pression peut être régulée finement								
les alluvions diminuent le risque de colmatage / comitage / dans les molasses +/ ou rénier +/ ou rôle de route plus fréquentes								
Difficulté à maintenir le confinement dans les alluvions	-							
Les artères granitiques ajoutent des fines								
entrée dans Granit : an ; bâti ancien	-							
incapacité à créer un confinement suffisant avec un front composé de rocheux sous un nappe	○							
RMR 20 : présence de fractures dans le granite + voies ferrées > 500 mètres d'air								



METHODOLOGIE

MAQUETTE ENVIRONNEMENT & CONDITIONS DE CREUSEMENT (1/3)



TUNNELIER & Equipements POSSIBLE à ce stade + MESURES PREVENTIVES & PILOTAGE

TIQUE	Nature des formations attendues au front de taille
-------	--

TUNNELIER POSSIBLE à ce stade	Mesures préalables de conception du tunnelier
	<p>Modalité de confinement du front</p> <p>Zonage interventions hyperbares</p> <p>Creusement à cadence réduite</p> <p>Creusement en continu 7/7</p> <p>Suivi renforcé paramètres TBM et auscultations</p> <p>Zone de vigilance sur perte de boue</p>

AUTRE TUNNELIER POSSIBLE à ce stade	Mesures préalables de conception du tunnelier
	<p>Modalité de confinement du front</p> <p>Zonage interventions hyperbares</p> <p>Creusement à cadence réduite</p> <p>Travail avec une Boue Technique Spécifique</p> <p>Creusement en continu 7/7</p> <p>Suivi renforcé paramètres TBM et auscultations</p>

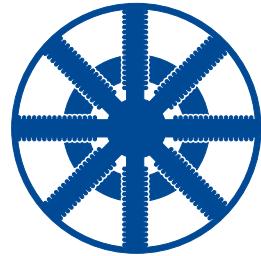
Alluvions Fluvio-glaçaires (AF)	Transition AF→MM	Molasses du Miocène (MM)	Transit MM→A	Alluvions Fluvio-glaçaires (AF)	Front mixte AR / Arénies & granite	AR	Granite
150 m	75m	250 m	50m	175 m	175m	40m	150 m

Tunnelier simple jube à pression de boue							
>> Conception de la roue compatible rocher abrasif / collage potentiel / blocs				>> Stock tampon de boue 5000m ³			
>> Buses de décapage de roue de coupe				>> Circuit de mariage renforcé contre abrasivité			
>> Equiper le tunnelier avec un concasseur à mâchoires dans la chambre d'abattage				>> Instrumentation des molettes pour fronts mixtes			
</							

6. Conclusions



MESSAGES CLEFS



+ Recouvrement
des domaines
d'utilisation,
mais un TBM ne
passe pas partout!

1. Parler d'un « type de tunnelier » est maintenant trop réducteur
 - ✓ Il faut revenir au **choix d'un mode de confinement**, incluant l'analyse des configurations spéciales et des risques,
 - ✓ Puis, choisir un type de tunnelier , et **anticiper son design** complété par des équipements complémentaires si nécessaire
2. En contexte urbain, le choix doit répondre à **trois objectifs**
 - ✓ l'exigence de **sécurité**,
 - ✓ l'inscription du projet dans son **environnement**,
 - ✓ l'optimisation des **coûts et délais**
3. Tracer et synthétiser les raisons des choix dans une **maquette environnement & conditions de creusement**
4. L'expérience de l'utilisateur au type de machine retenu est un facteur de réussite important, il s'agit de déployer des équipes expérimentées travaillant en étroite collaboration depuis la **conception jusqu'à la réalisation**