



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



ÉTAT DES CONNAISSANCES

Techniques sans tranchée et dangers associés pour les infrastructures routières – Nouvelles installations

Août 2022

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Techniques sans tranchée et dangers associés pour les infrastructures routières – Nouvelles installations

Préparé par : Éric David, ing.
 Maxime Bolduc, ing.
 Direction de la géotechnique et de la géologie
 2700, rue Einstein, bloc F, 1^{er} étage
 Québec (Québec) G1P 3W8

Québec, le 25 août 2022

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	PORTÉE ET LIMITATIONS	2
3.	TECHNIQUES SANS TRANCHÉE	3
3.1.	Fonçage de tiges (<i>rod pushing</i>).....	6
3.1.1.	Description	6
3.1.2.	Déroulement des opérations	6
3.1.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	8
3.2.	Fonçage par poinçonnement (<i>impact moling</i>)	9
3.2.1.	Description	9
3.2.2.	Déroulement des opérations	9
3.2.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	10
3.3.	Forage dirigé (<i>horizontal directional drilling</i>).....	11
3.3.1.	Description	11
3.3.2.	Déroulement des opérations	11
3.3.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	14
3.4.	Fonçage horizontal par percussion (<i>pipe ramming</i> ou <i>push-pipe</i>).....	17
3.4.1.	Description	17
3.4.2.	Déroulement du fonçage	17
3.4.3.	Cas particulier du remplacement d'un ponceau par engouffrement	18
3.4.4.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	19
3.5.	Forage horizontal à la tarière (<i>auger boring</i>)	21
3.5.1.	Description	21
3.5.2.	Déroulement des opérations	21

3.5.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	23
3.6.	Forage horizontal au tube pilote (<i>pilot tube</i>).....	25
3.6.1.	Description.....	25
3.6.2.	Déroulement des opérations.....	25
3.6.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	28
3.7.	Forage ou fonçage horizontal guidé (<i>guided auger boring</i> ou <i>guided pipe ramming</i>).....	29
3.7.1.	Description.....	29
3.7.2.	Déroulement des opérations.....	29
3.7.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	32
3.8.	Forage horizontal par alésage dans le roc (<i>horizontal raise boring</i> ou <i>rock boring</i>).....	33
3.8.1.	Description.....	33
3.8.2.	Déroulement des opérations.....	33
3.8.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	35
3.9.	Forage horizontal au marteau fond-de-trou (<i>hammer drilling</i> ou <i>down-the-hole horizontal rock boring</i>) ...	37
3.9.1.	Description.....	37
3.9.2.	Déroulement des opérations.....	37
3.9.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	38
3.10.	Forage au tunnelier (<i>tunnel boring machine</i>).....	40
3.10.1.	Description.....	40
3.10.2.	Catégories de tunneliers.....	41
3.10.2.1.	Microtunneliers (<i>microtunnelling boring machine</i>).....	41
3.10.2.2.	Tunneliers standards (<i>tunnel boring machine</i> ou <i>pipe jacking</i>).....	42
3.10.2.3.	Tunneliers utilitaires.....	44
3.10.3.	Déroulement des opérations.....	45

3.10.3.1.	Microtunneliers et tunneliers standards.....	45
3.10.3.2.	Tunneliers utilitaires	45
3.10.4.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	45
3.10.5.	Modules d'excavation.....	47
3.10.5.1.	Bouclier à face ouverte.....	47
3.10.5.2.	Bouclier à face fermée	49
3.11.	Forage au microtunnelier dirigé (<i>directional microtunneling</i> ou <i>Direct Pipe</i> [®]).....	54
3.11.1.	Description	54
3.11.2.	Déroulement des opérations	54
3.11.3.	Applicabilité, avantages et inconvénients.....	55
4.	DANGERS POTENTIELS POUR LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES.....	57
4.1.	Dangers pouvant affecter les ouvrages.....	57
4.1.1.	Affaissement en surface.....	58
4.1.2.	Fracturation hydraulique et fissuration	60
4.1.3.	Formation de cavités sous la chaussée	61
4.1.4.	Décompaction	62
4.1.5.	Soulèvement ou poinçonnement du sol	62
4.1.6.	Contamination de l'infrastructure par des particules fines	63
4.1.7.	Lessivage et remplacement de sol.....	64
4.1.8.	Déviation de la trajectoire.....	64
4.1.9.	Abandon du trou de forage.....	65
4.1.10.	Coinçage ou refus d'avancement du forage.....	65
4.1.11.	Perte de contrôle de la face d'excavation.....	67
4.1.12.	Glissement de terrain	67

4.2. Dangers liés aux différentes techniques sans tranchée	68
4.3. Dangers liés aux types de sols.....	68
BIBLIOGRAPHIE.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques générales d'application du fonçage de tiges.....	8
Tableau 2 : Caractéristiques générales d'application du fonçage par poinçonnement à la torpille.....	10
Tableau 3 : Caractéristiques générales d'application du forage dirigé	16
Tableau 4 : Caractéristiques générales d'application du fonçage par percussion.....	19
Tableau 5 : Caractéristiques générales d'application du forage à la tarière	23
Tableau 6 : Caractéristiques générales d'application du forage au tube pilote	28
Tableau 7 : Caractéristiques générales d'application du forage par alésage dans le roc.....	35
Tableau 8 : Caractéristiques générales d'application du forage au marteau fond-de-trou	38
Tableau 9 : Caractéristiques générales d'application des différents types de tunneliers.....	46
Tableau 10 : Caractéristiques générales d'application du microtunnelier dirigé.....	55
Tableau 11 : Dangers liés aux différentes techniques sans tranchée	69
Tableau 12 : Dangers liés aux types de sols.....	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Techniques sans tranchée pour l'installation de conduites souterraines (adapté de The International Society for Trenchless Technology, 2022)	4
Figure 2 : Modes utilisés par les différentes techniques sans tranchée pour l'insertion de nouvelles conduites	5
Figure 3 : Fonçage de tiges – Étape 1	6
Figure 4 : Tirage de la conduite et de l'élargisseur conique – Étape 2	7
Figure 5 : Exemple de système utilisé pour le fonçage de tiges.....	7
Figure 6 : Fonçage par poinçonnement à la torpille	9
Figure 7 : Exemple de foreuse utilisée pour le forage dirigé	11
Figure 8 : Forage du trou pilote en mode poussée.....	12
Figure 9 : Alésage du trou pilote en mode traction.....	13
Figure 10 : Installation de la conduite en mode traction	13
Figure 11 : Fonçage horizontal par percussion	17
Figure 12 : Exemple de système de fonçage par percussion.....	18
Figure 13 : Remplacement d'un ponceau par engouffrement	19
Figure 14 : Forage horizontal à la tarière	21
Figure 15 : Exemple de forage horizontal à la tarière.....	22
Figure 16 : Module d'excavation SBU	23
Figure 17 : Tube pilote – Étape 1 – Fonçage et installation des tubes pilotes.....	25
Figure 18 : Exemple de l'étape du fonçage et de l'installation des tubes pilotes.....	26
Figure 19 : Tube pilote – Étape 2 – Forage, alésage et installation de tubes d'acier	26
Figure 20 : Tube pilote – Étape 3 – Installation de la conduite finale	27
Figure 21 : Exemple de l'étape d'installation de la conduite finale	27
Figure 22 : Fonçage ou forage horizontal guidé – Étape 1 – Fonçage et installation des tubes pilotes	29

Figure 23 : Exemple de forage horizontal guidé – Installation du tube pilote	30
Figure 24 : Fonçage ou forage horizontal guidé – Étape 2 – Installation de la conduite par fonçage à percussion ..	30
Figure 25 : Exemple de fonçage horizontal guidé par fonçage à percussion	31
Figure 26 : Fonçage ou forage horizontal guidé – Étape 2 – Installation de la conduite par forage horizontal à la tarière	31
Figure 27 : Exemple de forage horizontal guidé à la tarière	31
Figure 28 : Forage par alésage dans le roc – Étape 1 – Forage du trou pilote	33
Figure 29 : Exemple de l'étape de forage du trou pilote dans le roc.....	34
Figure 30 : Forage par alésage dans le roc – Étape 2 – Alésage.....	34
Figure 31 : Exemple de l'étape d'alésage dans le roc	35
Figure 32 : Forage horizontal au marteau fond-de-trou.....	37
Figure 33 : Exemple de marteau fond-de-trou.....	38
Figure 34 : Schéma général de la technique de tunnelier	40
Figure 35 : Schéma type des microtunneliers	41
Figure 36 : Exemple de microtunnelier	42
Figure 37 : Schéma de tunnelier standard à bouclier ouvert à excavation mécanisée.....	42
Figure 38 : Schéma de tunnelier standard à bouclier à tête rotative	43
Figure 39 : Exemple de tunneliers standards a) à bouclier ouvert et b) à bouclier fermé.....	43
Figure 40 : Exemple de tunnelier utilitaire	44
Figure 41 : Exemple de tunnelier utilitaire en fonction.....	44
Figure 42 : Exemple de bouclier ouvert a) à excavation mécanisée et b) à tête rotative.....	48
Figure 43 : Exemple de bouclier fermé stabilisé mécaniquement	50
Figure 44 : Exemple de bouclier fermé stabilisé par pression de boue	51
Figure 45 : Exemple de bouclier fermé stabilisé par pression de terre.....	52
Figure 46 : Forage au microtunnelier dirigé.....	54

Figure 47 : Forage au microtunnelier dirigé – Supports pour la conduite	55
Figure 48 : Problème d'affaissement ponctuel	58
Figure 49 : Problème d'affaissement systématique.....	59
Figure 50 : Problème d'affaissement systématique.....	59
Figure 51 : Problème de fissuration hydraulique	60
Figure 52 : Problème d'apparition d'une cavité en surface.....	61
Figure 53 : Problème de décompaction.....	62
Figure 54 : Problème de soulèvement.....	63
Figure 55 : Problème de contamination par des particules fines.....	63
Figure 56 : Service souterrain endommagé lors d'un forage.....	65
Figure 57 : Refus d'avancement du forage en raison d'un bloc sur la trajectoire	66
Figure 58 : Coinçage de la tarière à cause un bloc	66

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce rapport. Un merci tout particulier aux membres du comité ministériel sur les techniques sans tranchée :

- M. Daniel Leclerc, ing., directeur de l'exploitation de la Direction générale de la Mauricie (auparavant chef des centres de services de Trois-Rivières et de Shawinigan);
- M^{me} Naïma Zaaf, ing., Direction générale des services en gestion contractuelle (auparavant Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation);
- M. Normand Tremblay, ing., Direction générale à la coordination territoriale (auparavant chef du Service des opérations d'exploitation routière);
- M^{me} Solange Rodgers, ing., Direction des matériaux d'infrastructures;
- M. Pierre Dorval, ing., M. Sc., Direction de la géotechnique et de la géologie (retraité).

Nous souhaitons également remercier M^{me} Mélissa Raymond, technicienne en arts appliqués et graphiques, de la Direction de la géotechnique et de la géologie, pour la réalisation des nombreuses illustrations de ce rapport.

1. INTRODUCTION

Chaque année, le ministère des Transports doit traiter plusieurs demandes de permission de voirie liées à l'installation de divers services souterrains devant passer sous son réseau routier. Ces permissions sont délivrées conformément aux exigences normatives du chapitre 3, « Services publics », du *Tome IV – Abords de route*.

Les tierces parties (villes, municipalités, Hydro-Québec, Gaz Metro, Bell, etc.) doivent dorénavant recourir aux techniques sans tranchée pour faire passer leurs services sous les infrastructures routières du Ministère. Parfois, le Ministère lui-même a aussi recours aux techniques sans tranchée pour l'installation de divers conduites et ponceaux lui appartenant.

Or, à plusieurs reprises déjà, des préjudices ont été causés aux ouvrages du Ministère à la suite de l'installation de conduites souterraines au moyen de techniques sans tranchée, en particulier avec le forage dirigé. Il s'agit souvent de problèmes survenant en cours de travaux ou après ceux-ci.

Jusqu'à récemment (2016), les normes du Ministère stipulaient que « si des câbles ou conduites [doivent] traverser une route ou autoroute existante, ils devraient être posés dans un conduit placé selon une méthode de tunnel ou de forage acceptée par le Ministère ». Cependant, aucune autre exigence n'était fournie par rapport à ces techniques d'installation. De plus, aucun document interne ne spécifiait les techniques acceptées par le Ministère. Le personnel technique traitant les demandes de permission était relativement dépourvu d'outils pour bien évaluer les risques, pour les ouvrages du Ministère, que représentait la technique sans tranchée proposée.

Afin d'évaluer ces enjeux, de définir les techniques de forage acceptées par le Ministère et de bonifier les normes en la matière, un comité technique a été créé sous la présidence de M. Daniel Leclerc, chef des centres de services de Shawinigan et de Trois-Rivières. La norme a par la suite été modifiée (2016-09-15) afin d'y inclure certaines exigences pour mieux encadrer la réalisation de ces techniques et ainsi de prémunir le Ministère contre d'éventuels préjudices.

Le présent rapport a pour but de dresser un portrait général (état des connaissances) des techniques sans tranchée, de les décrire et de les analyser. Cette revue de littérature a permis au comité de définir les techniques approuvées par le Ministère ou, du moins, de spécifier les techniques à proscrire, et d'orienter les modifications à inclure dans la mise à jour de la norme.

Ce document explicatif se veut également un outil de référence technique interne facilitant la compréhension des principes de fonctionnement des différentes techniques et de leurs caractéristiques générales d'application, ainsi que des dangers géotechniques liés à leur utilisation.

À certains moments, la terminologie anglaise est indiquée, car ces termes anglais sont couramment utilisés dans le vocabulaire usuel sur les chantiers.

2. PORTÉE ET LIMITATIONS

Ce document se veut une revue générale des techniques sans tranchée les plus couramment utilisées au Québec et de certaines techniques utilisées à l'international qui pourraient éventuellement voir le jour au Québec ou qui y sont déjà utilisées, mais plus marginalement.

Ce document ne présente pas toutes les techniques possibles ou toutes les variantes associées à chaque technique. Il s'agit plutôt d'un document visant à faciliter la compréhension des principes de fonctionnement généraux propres à chacune des techniques qui y sont décrites.

Ce rapport a été produit à la suite des travaux du comité ministériel sur les techniques sans tranchée, mais son contenu est destiné à tout le personnel du Ministère.

Ce document ne vise pas à exclure ni à avantager quelque fournisseur que ce soit. Ce rapport constitue uniquement un document explicatif. La faisabilité des techniques d'installation doit être évaluée pour chaque projet et cet état des connaissances peut servir à déterminer les principaux dangers potentiels liés à l'utilisation d'une technique ou d'une autre en fonction des caractéristiques propres au projet.

Ce document vise essentiellement les techniques employées pour de nouvelles installations de conduites souterraines. Les techniques sans tranchée approuvées par le Ministère pour la réhabilitation et la réfection de conduites existantes, notamment pour les ponceaux, sont présentées dans le *Manuel de conception des ponceaux*, conçu par la Direction générale des structures.

3. TECHNIQUES SANS TRANCHÉE

Les techniques sans tranchée (figure 1) représentent un ensemble de méthodes, de matériel et d'équipements permettant l'installation ou le remplacement de conduites et d'infrastructures souterraines passant sous un obstacle (ex. : route, rivière, chemin de fer, etc.) sans qu'il soit nécessaire de réaliser une excavation majeure sur la pleine longueur de la conduite à installer.

Les techniques sans tranchée permettent ainsi de réduire certaines conséquences majeures liées à la réalisation d'une tranchée ouverte. Elles permettent notamment de limiter les répercussions sur la circulation, les services souterrains existants, la structure de chaussée, l'entreposage de déblais, etc.

La plupart des techniques exigent la réalisation de puits d'accès de part et d'autre de l'obstacle à franchir et jusqu'à une profondeur légèrement supérieure à la profondeur d'installation de la conduite. Certaines techniques, quant à elles, n'exigent pas de puits d'accès puisqu'il s'agit de techniques dites « de surface à surface ».

Les prochaines sections présentent les principales techniques susceptibles d'être utilisées au Québec. Chaque section comprend une brève description de la technique, décrit sommairement le déroulement du forage ou du fonçage et présente quelques caractéristiques d'application ainsi que des avantages et inconvénients associés à la technique.

De manière générale, les techniques sans tranchée peuvent être regroupées en **deux** familles en fonction du **mode d'insertion** de la conduite, soit par compaction ou par extraction des matériaux (figure 2).

L'installation de conduites suivant le **mode par compaction** a pour effet de repousser entièrement le sol vers l'extérieur de la gaine ou de la conduite au fur et à mesure de son enfoncement. Ce mode d'insertion est généralement exclusif aux conduites de petit diamètre et est réalisable uniquement dans les sols meubles. Ce mode d'insertion est impossible dans le roc.

L'installation de conduites suivant le **mode par extraction** a pour effet d'excaver le sol ou le roc pour l'insertion de la conduite. Pour certaines techniques, l'insertion de la conduite se fait au fur et à mesure de l'extraction. Pour d'autres, l'insertion se fait une fois que l'extraction complète du sol ou du roc est terminée. Ce mode d'insertion se subdivise en deux catégories, selon que l'extraction se fait mécaniquement ou hydrauliquement.

La figure 1 présente, en orangé, les différentes techniques sans tranchée abordées dans le présent document, en fonction de leur mode d'insertion.

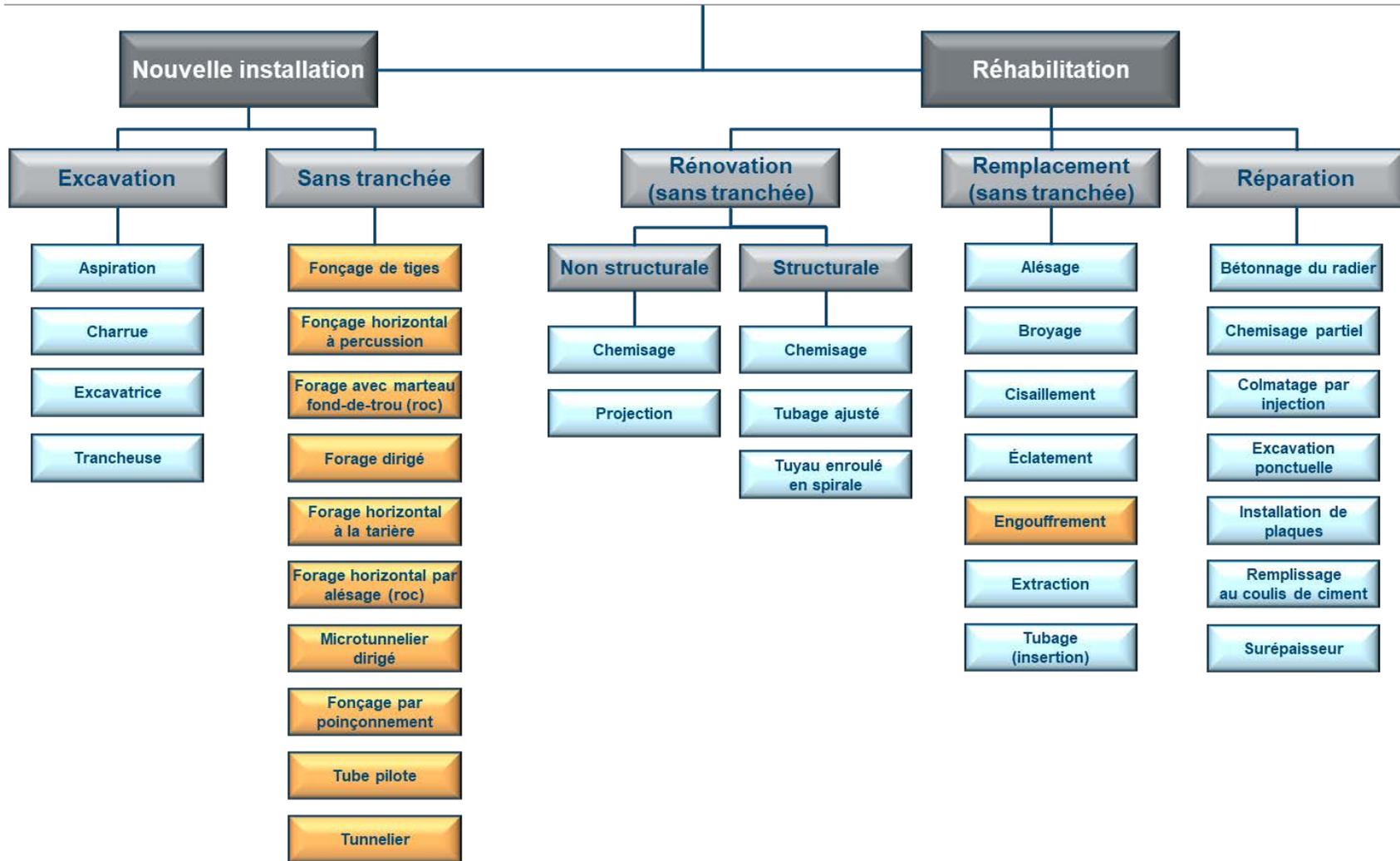


Figure 1 : Techniques sans tranchée pour l'installation de conduites souterraines (adapté de The International Society for Trenchless Technology, 2022)

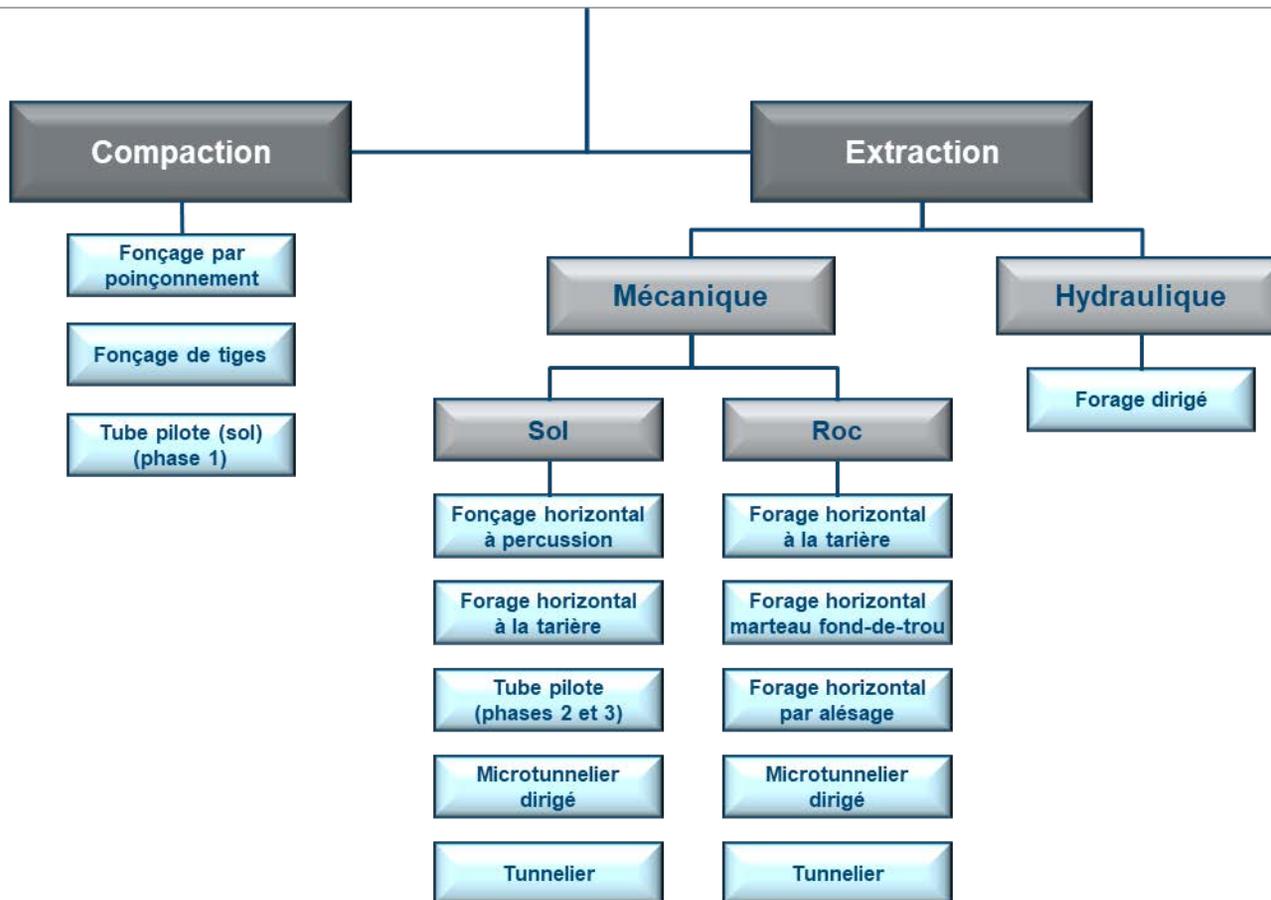


Figure 2 : Modes utilisés par les différentes techniques sans tranchée pour l'insertion de nouvelles conduites

3.1. Fonçage de tiges (*rod pushing*)

3.1.1. Description

Le fonçage de tiges est une technique sans tranchée qui permet d'installer une conduite à l'horizontale selon une trajectoire rectiligne en poussant les tiges au moyen d'un vérin hydraulique. En s'enfonçant, la tête de fonçage et l'élargisseur compactent les sols en les repoussant vers l'extérieur pour permettre le passage des tiges et de la conduite. Il s'agit d'une technique employée à de faibles profondeurs et pour des conduites de petit diamètre. Le mode d'insertion est de type « **compaction** ».

Cette technique est utilisée principalement pour la pose d'équipements de services publics de petit diamètre et sur de courtes distances.

3.1.2. Déroulement des opérations

À partir du puits de départ, à l'aide d'un vérin hydraulique, des tiges en acier sont foncées dans le sol jusqu'au puits d'arrivée (figure 3). La pointe (tête de fonçage) située à l'extrémité des tiges est ensuite remplacée par un élargisseur conique et la conduite est fixée derrière l'élargisseur. Finalement, le train de tiges, l'élargisseur et la conduite sont tirés vers le puits de départ, toujours à l'aide du même vérin hydraulique (figure 4). L'élargisseur permet de déplacer et de compacter le sol tout juste avant le passage de la conduite. Un exemple d'équipement utilisé est présenté à la figure 5.

Pour certains systèmes récents, il existe une tête de fonçage biseautée munie d'une sonde de localisation qui permet de suivre la trajectoire de fonçage et d'assurer une meilleure précision.

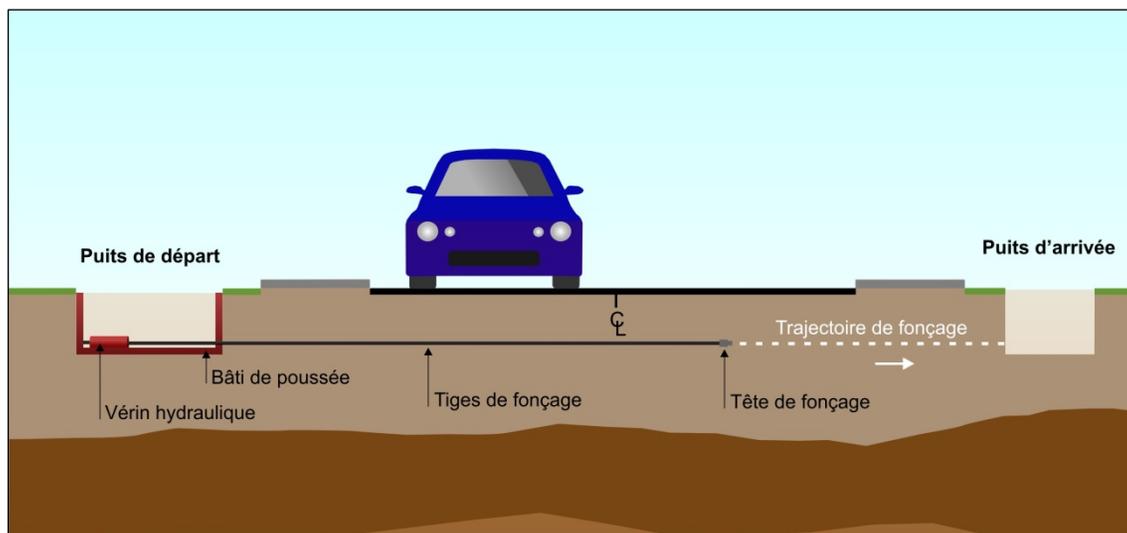


Figure 3 : Fonçage de tiges – Étape 1

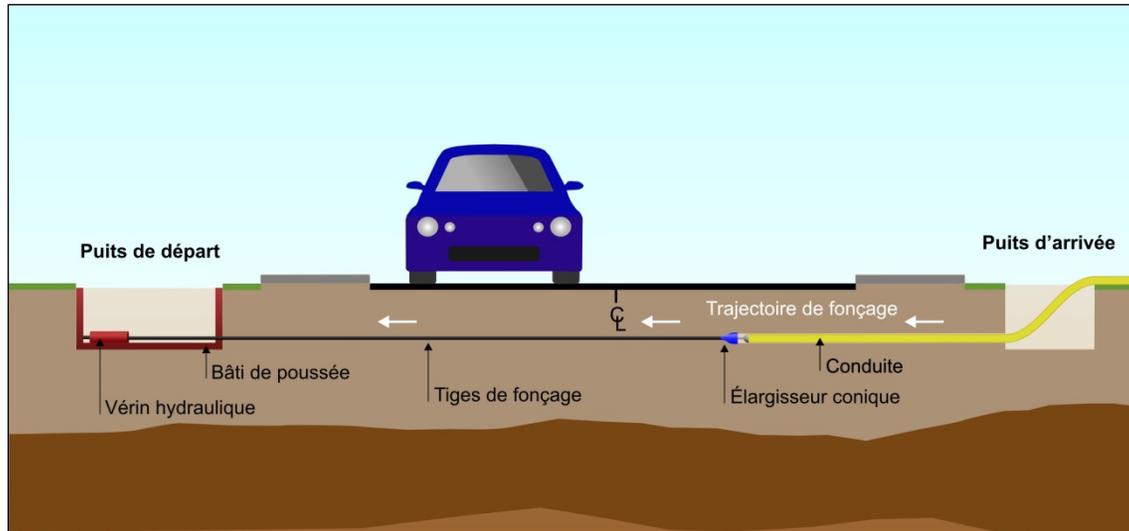
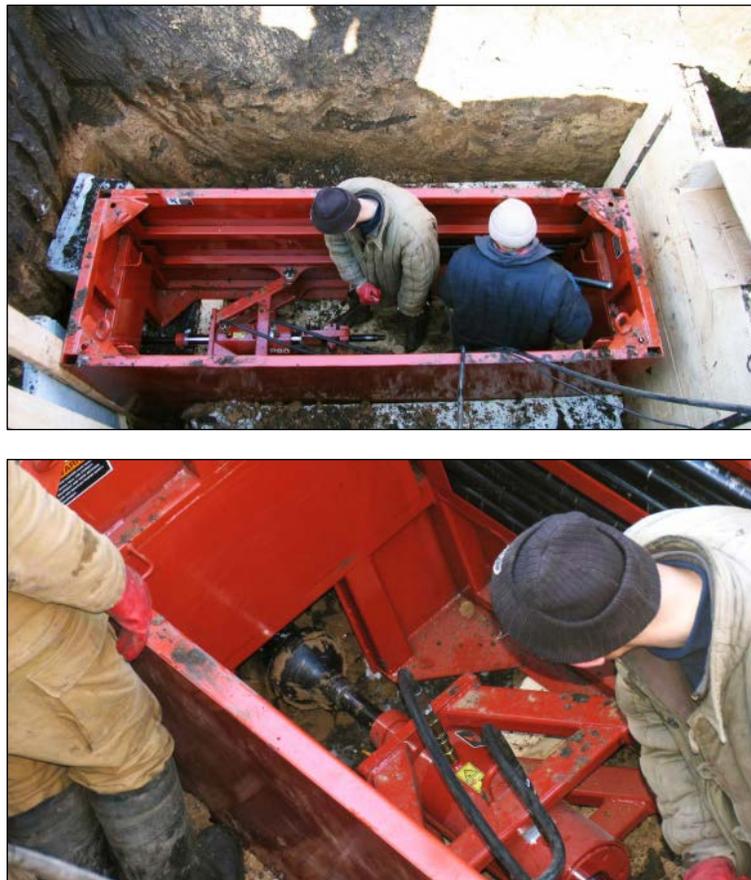


Figure 4 : Tirage de la conduite et de l'élargisseur conique – Étape 2



Source : Ditch Witch [www.ditchwitch.com]

Figure 5 : Exemple de système utilisé pour le fonçage de tiges

3.1.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 1 présente les caractéristiques générales d'application du fonçage de tiges.

Tableau 1 : Caractéristiques générales d'application du fonçage de tiges

Diamètre nominal de la conduite (D_{conduite})	19 mm (3/4 po) – 200 mm (8 po)
Longueur de forage	≤ 15 m (généralement 5 à 10 m)
Profondeur minimale requise	$\geq 1,5$ m
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	<p>Sol compactable</p> <p>Sol pulvérulent, lâche à compact</p> <p>Sol cohérent, très mou à raide</p> <p>Sol sans cailloux ni blocs</p> <p>Utilisation difficile dans les graviers ou les sols graveleux</p>

Les principaux avantages du fonçage de tiges sont les suivants :

- puits d'accès de petite dimension;
- faible coût;
- simple et rapide.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- faible degré de précision;
- aucun contrôle sur la direction du fonçage ou contrôle partiel en utilisant une tête de fonçage biseautée munie d'une sonde de localisation;
- forte possibilité de déviation ou de refus d'enfoncement en présence de graviers, de cailloux ou de blocs;
- possibilité de soulèvement du terrain en surface si le forage est à trop faible profondeur;
- très courtes distances de fonçage;
- technique limitée aux conduites de petit diamètre;
- technique limitée aux faibles profondeurs d'installation.

3.2. Fonçage par poinçonnement (*impact moling*)

3.2.1. Description

Le fonçage par poinçonnement à la torpille ou à la fusée (*impact moling* ou *piercing tool*) est une technique sans tranchée qui permet d'installer une conduite à l'horizontale selon une trajectoire rectiligne en déplaçant et en compactant le sol. La torpille (ou fusée) est une petite sonde à embout conique qui contient un marteau pneumatique à l'intérieur. Les coups du marteau font avancer la torpille dans le sol. La torpille travaille généralement à de faibles profondeurs et pour de petits diamètres de conduites. Le mode d'insertion est de type « **compaction** ».

Il est à noter qu'en raison des nombreux désavantages et dangers liés à cette technique, le fonçage par poinçonnement à la torpille est interdit sous les ouvrages du Ministère.

3.2.2. Déroulement des opérations

À partir du puits de départ, un marteau pneumatique (torpille) relié à un compresseur est placé sur une rampe de lancement pour orienter et aligner la trajectoire (figure 6). Dans un mouvement de va-et-vient, le marteau pneumatique avance lentement et pénètre dans le sol jusqu'au puits d'arrivée. La sonde est constamment suivie d'un boyau d'alimentation en air comprimé.

Selon le type de sol, la conduite peut être installée en même temps qu'a lieu l'opération de fonçage en la fixant au boyau d'alimentation en air comprimé. La conduite peut aussi être installée une fois le fonçage terminé, en l'attachant à la tête du marteau pneumatique et en actionnant la marche arrière de la sonde (CERIU, 2002b).

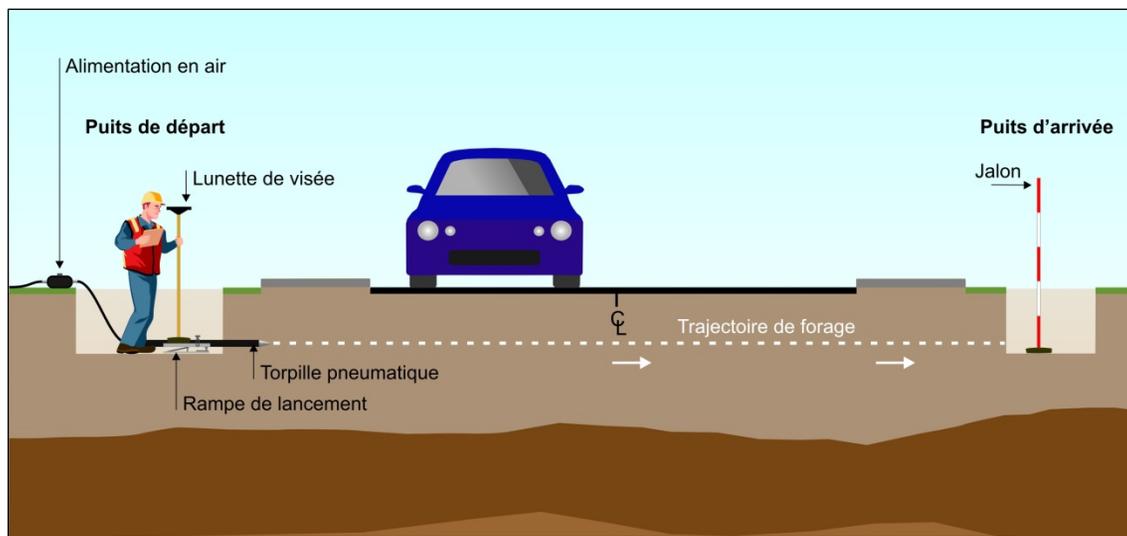


Figure 6 : Fonçage par poinçonnement à la torpille

3.2.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 2 présente les caractéristiques générales d'application du fonçage par poinçonnement à la torpille.

Tableau 2 : Caractéristiques générales d'application du fonçage par poinçonnement à la torpille

Diamètre nominal de la conduite (D_{conduite})	19 mm (3/4 po) – 200 mm (8 po)
Longueur de forage	≤ 15 m
Profondeur minimale requise	$\geq 1,5$ m
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Sol compactable Sol pulvérulent, lâche à compact Sol cohérent, très mou à raide Sol sans cailloux ni blocs Utilisation difficile dans les graviers ou les sols graveleux

Les principaux avantages du fonçage à la torpille sont les suivants :

- puits d'accès de petites dimensions;
- faible coût;
- simple et rapide.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- difficulté à contrôler et à suivre le parcours de la torpille une fois celle-ci lancée;
- très faible degré de précision;
- forte possibilité de déviation en présence de graviers, de cailloux ou de blocs;
- possibilité de perdre complètement la sonde dans le sol;
- possibilité accrue de soulèvement en surface si le fonçage est à faible profondeur;
- possibilité d'endommager les ouvrages à proximité;
- possibilité d'affaissement du trou si la conduite est placée après le fonçage;
- tendance à l'enfoncement de la torpille dans un sol lâche;
- nécessité d'excaver pour récupérer une torpille hors trajectoire;
- très courtes distances de fonçage possibles.

3.3. Forage dirigé (*horizontal directional drilling*)

3.3.1. Description

Le forage dirigé est une technique sans tranchée qui permet d'installer une nouvelle conduite en partant de la surface, d'un côté de l'obstacle à franchir, et en ressortant en surface de l'autre côté de l'obstacle (technique dite « de surface à surface »). Le mode d'insertion est de type « **extraction hydraulique** ».

Le forage suit une trajectoire variable, préétablie et contrôlée par l'opérateur de la foreuse. Cette technique permet notamment de sortir dans un cours d'eau (émissaire) en utilisant une barge comme point d'arrivée. Il n'y a pas de puits d'accès à faire (figures 7 et 8). Cependant, deux puits relativement petits sont nécessaires pour l'évacuation et la récupération des débris et du fluide de forage (figure 8), ainsi qu'en cas de raccordement aux conduites existantes.



Source : « Own work » par l'entremise de Wikimedia Commons

[\[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vermeer_D16x20A_Navigator_horizontal_directional_drilling_machine_\(1\).jpg\]](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vermeer_D16x20A_Navigator_horizontal_directional_drilling_machine_(1).jpg)

Figure 7 : Exemple de foreuse utilisée pour le forage dirigé

3.3.2. Déroulement des opérations

Le forage dirigé se réalise généralement en trois étapes :

1. Réalisation du trou pilote (figure 8)

Selon un angle donné par rapport à la surface du sol (10 à 30° selon le calibre de la foreuse), des tiges de forage sont poussées une à une dans le sol par la foreuse. Celle-ci entraîne simultanément un mouvement de rotation aux tiges. À l'extrémité du train de tiges de forage, une tête de forage biseautée creuse le sol selon une trajectoire

préétablie. Cette trajectoire est établie selon la profondeur de l'obstacle à traverser et doit respecter le rayon de courbure admissible par les tiges de forage ou la conduite à installer. Un fluide de forage est injecté en même temps par la tête de forage afin de lessiver le sol, d'évacuer les déblais, de consolider les parois du trou, et de lubrifier et refroidir le train de tiges et les outils de forage. Ce fluide est généralement composé d'un mélange d'eau et de bentonite. Des additifs sont ajoutés au besoin.

La tête de forage est munie d'une sonde permettant de connaître en tout temps sa position et son orientation. Pour qu'il soit possible de guider le forage, la trajectoire du forage est suivie en temps réel (*wire-line*) ou de façon ponctuelle (*walk-over*) à partir de la surface à l'aide d'un localisateur de sonde.

Dans le cas d'un forage dans le roc, la tête de forage est munie d'un trépan et d'un marteau pneumatique ou d'un moteur à boue de forage (*mud motor*).

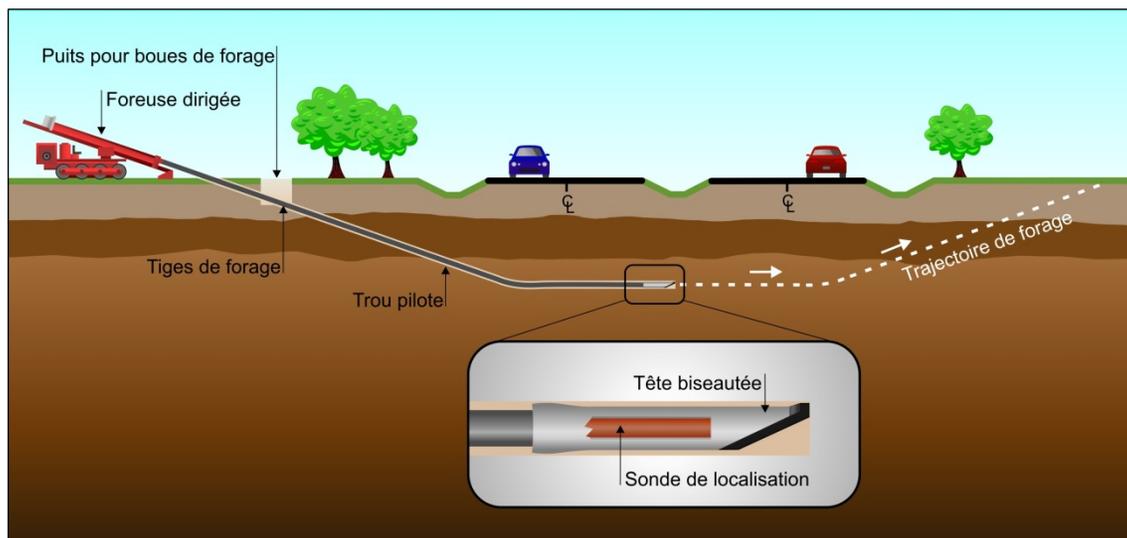


Figure 8 : Forage du trou pilote en mode poussée

2. Alésage du trou pilote (figure 9)

Lorsque la tête de forage refait surface au point de sortie, elle est enlevée et remplacée par un aléreur pour agrandir le trou de forage. La foreuse, toujours dans un mouvement de rotation, tire le train de tiges de forage et l'aléreur. Au fur et à mesure que l'aléreur avance dans le trou (retour vers le point de départ), un fluide de forage est injecté et de nouvelles tiges de forage sont ajoutées derrière l'aléreur, et ce, pour qu'il y ait en permanence des tiges de forage tout le long du trou alésé. Selon le diamètre de la conduite et le type de sol, il est possible d'aléser à plus d'une reprise (plusieurs passes).

Le diamètre final du trou de forage ainsi alésé est généralement 1,5 fois le diamètre extérieur de la conduite à installer. La boue de forage comble le vide créé et assure la stabilité des parois du trou alésé (pendant les travaux).

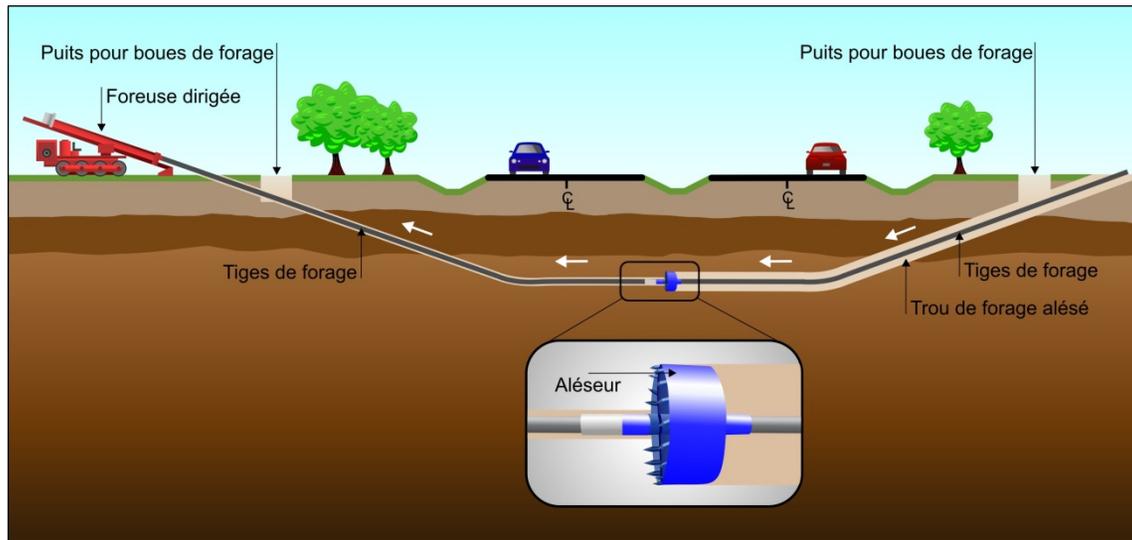


Figure 9 : Alésage du trou pilote en mode traction

3. Installation de la conduite (figure 10)

La conduite, assemblée en une seule section, est attachée à l'extrémité du train de tiges au moyen d'une tête de tirage et est tirée dans le trou de forage alésé. Un aléreur ou un aléreur centreur est placé devant la conduite pour veiller à ce qu'il n'y ait pas d'obstacles sur la trajectoire de celle-ci lors de son insertion dans le trou. L'aléreur permet également de centrer la conduite dans le trou. Un pivot permet de faire le lien entre l'aléreur et la tête de tirage. De la boue de forage est injectée pendant l'opération de tirage et assure la stabilité des parois du trou alésé et la lubrification afin de limiter le frottement de la conduite sur les parois du trou de forage.

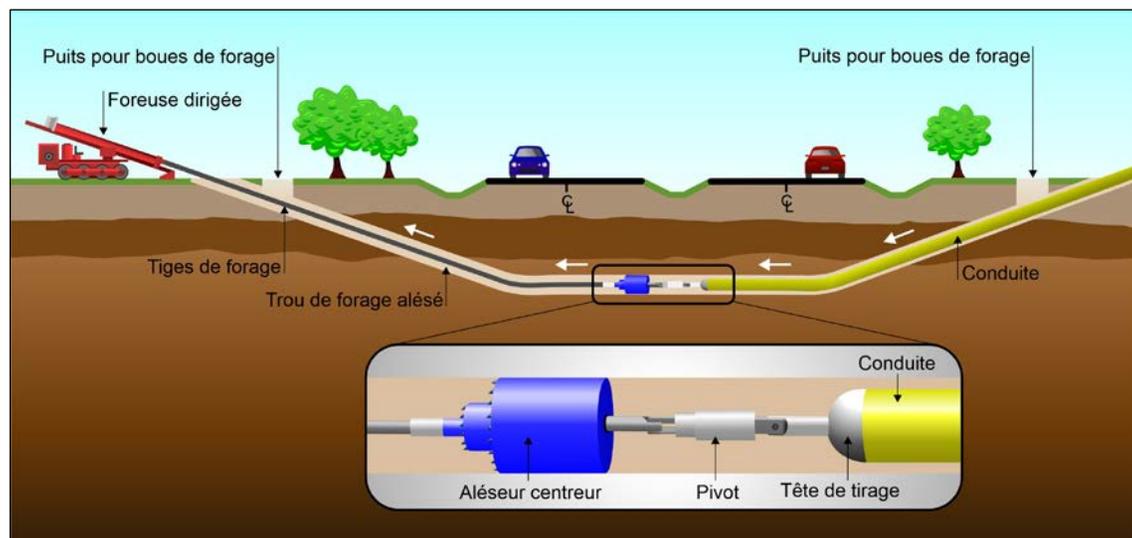


Figure 10 : Installation de la conduite en mode traction

Parfois, il arrive que les étapes 2 et 3 soient réalisées en même temps, si la nature des sols le permet, pour gagner du temps.

Il est à noter que, pour des conduites d'aqueduc, d'égout ou de gaz qui ne sont pas en acier, l'installation est généralement accompagnée d'un fil conducteur (cuivre ou aluminium) pour permettre de les retracer ultérieurement au moyen d'équipements géophysiques.

Note : Les fluides de forage sont généralement composés d'environ 95 % d'eau, de 2 à 5 % de bentonite et, au besoin, d'additifs de forage. Comme le mélange est composé d'au plus 5 % de matières solides, il **ne permet pas** de combler le vide contenu entre le trou alésé et la conduite. À la suite des travaux, la bentonite en suspension sédimente et le sol environnant, en raison de la gravité, va combler le vide créé. Des mouvements de sols à la surface sont donc à prévoir. Il existe cependant des règles de calculs théoriques pour évaluer le mouvement des sols et les répercussions à la surface.

3.3.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

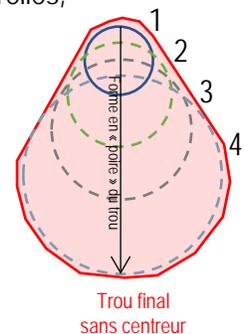
Le tableau 3 présente quelques caractéristiques générales d'application du forage dirigé selon la catégorie de foreuse utilisée.

Les principaux avantages du forage dirigé sont les suivants :

- pas d'excavation majeure;
- contrôle de la trajectoire du forage et possibilité de l'orienter;
- degré de précision élevé lorsque les conditions sont optimales;
- possibilité de forer sur de grandes distances;
- traverse d'obstacles profonds facilitée, alors que cela est plus difficilement réalisable avec les autres techniques de forage et de fonçage horizontal nécessitant des puits d'accès.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- possibilité de fracturation hydraulique et de déversement de fluides de forage;
- risque d'infiltration du fluide de forage dans les sols perméables et les discontinuités naturelles, augmentant ainsi le potentiel de soulèvement au gel;
- risque de création de cavités et de développement de cheminées si le débit d'extraction du sol est trop important par rapport à la vitesse d'avancement;
- risque de surexcavation si aucun **dispositif de centrage** n'est utilisé lorsqu'il est prévu de faire plusieurs opérations d'alésage successives au moyen d'alésurs de différents diamètres. Dans ce contexte, l'alésur a



tendance à excaver davantage la partie inférieure ou supérieure du trou lors de chaque passage. Le trou prend alors l'allure d'une « poire » orientée vers le bas (par gravité) ou vers le haut (par l'effet du tirage), augmentant significativement la taille du trou final et le danger de voir apparaître des déformations du terrain en surface;

- affaissement du sol en surface par effondrement du trou de forage;
- risque de blocage des tiges de forage par les cailloux et les blocs;
- risque de blocage de la conduite au moment de l'installation si l'alésage n'a pas été effectué correctement;
- possibilité de blocage dans le roc altéré, lequel a plus de risque de subir des effondrements ponctuels;
- contraintes liées à la gestion et à la disposition de la boue de forage pour respecter les normes du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques;
- grandes distances à franchir entre le point d'entrée et le point de sortie afin de respecter l'angle de fonçage minimal requis;
- utilisation plus difficile, voire impossible, lorsque des transitions sol-roc, ou l'inverse, sont rencontrées, car les équipements pour un type de sol ne sont pas nécessairement adaptés pour l'autre.

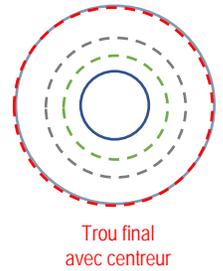


Tableau 3 : Caractéristiques générales d'application du forage dirigé

Calibre de la foreuse	Mini	Midi	Maxi
Force de poussée et de traction (<i>thrust et pullback</i>)	≤ 90 kN (20 000 lbf)	90 kN (20 000 lbf) à 445 N (100 000 lbf)	445 kN (100 000 lbf) à ≥ 445 000 kN (100 000 000 lbf)
Couple (<i>torque</i>)	1 250 Nm (950 pi-lb)	1 200 Nm (900 pi-lb) à 13 500 Nm (10 000 pi-lb)	≤ 170 000 Nm (125 000 pi-lb)
Diamètre nominal de la conduite	50 mm (2 po) à 300 mm (12 po)	300 mm (12 po) à 600 mm (24 po)	600 mm (24 po) à 1 500 mm (60 po)
Longueur de forage	< 180 m	180 m à 275 m	≤ 3 000 m
Profondeur de forage	< 9 m	9 m à 20 m	20 m à 60 m
Profondeur minimale requise	≥ 2 m	≥ 4 m	≥ 10 m
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Sol cohérent, très mou à très raide Sol pulvérulent, très lâche à dense Sol sans cailloux ni blocs	Sol cohérent, très mou à très raide Sol pulvérulent, très lâche à dense Roc peu altéré à sain, de moyenne à excellente qualité Utilisation difficile en présence de cailloux et de blocs Utilisation plus difficile dans le roc altéré et très fracturé	Sol cohérent, très mou à très raide Sol pulvérulent, très lâche à dense, peu altéré à sain, de moyenne à excellente qualité Utilisation difficile en présence de cailloux et de blocs Utilisation plus difficile dans le roc altéré et très fracturé

3.4. Fonçage horizontal par percussion (*pipe ramming* ou *push-pipe*)

3.4.1. Description

Le fonçage horizontal par percussion est une technique sans tranchée qui permet d'enfoncer une gaine en acier en la battant avec un marteau pneumatique. Le mode d'insertion est de type « **extraction mécanique** ».

Le marteau est placé derrière la gaine en acier et attaché à l'aide d'une sangle de retenue. Le marteau transmet une force d'impact directement sur la gaine pour l'enfoncer graduellement dans le sol en suivant une trajectoire subhorizontale et rectiligne. La figure 11 ci-après illustre la technique.

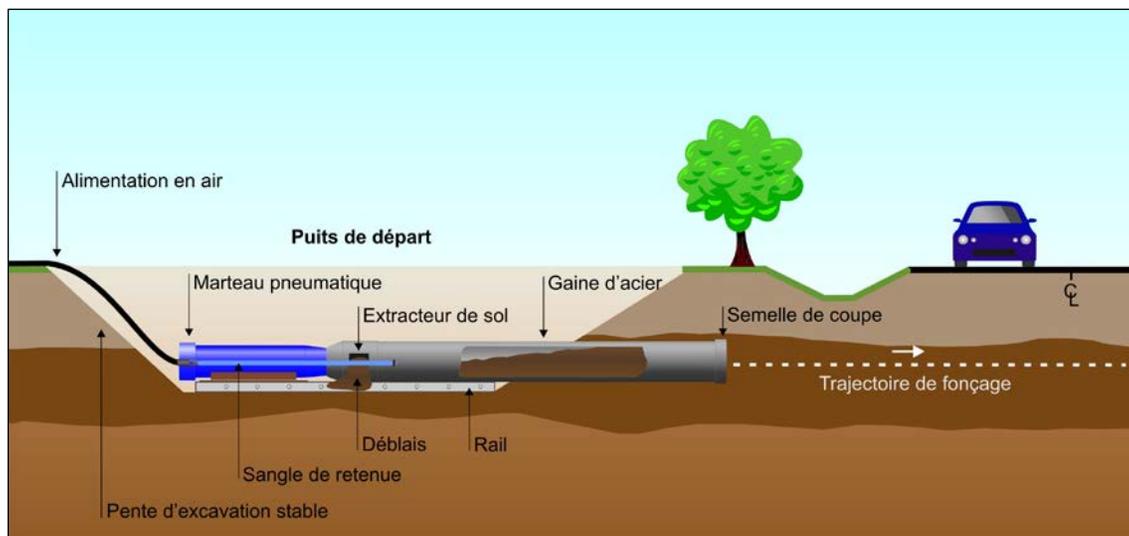


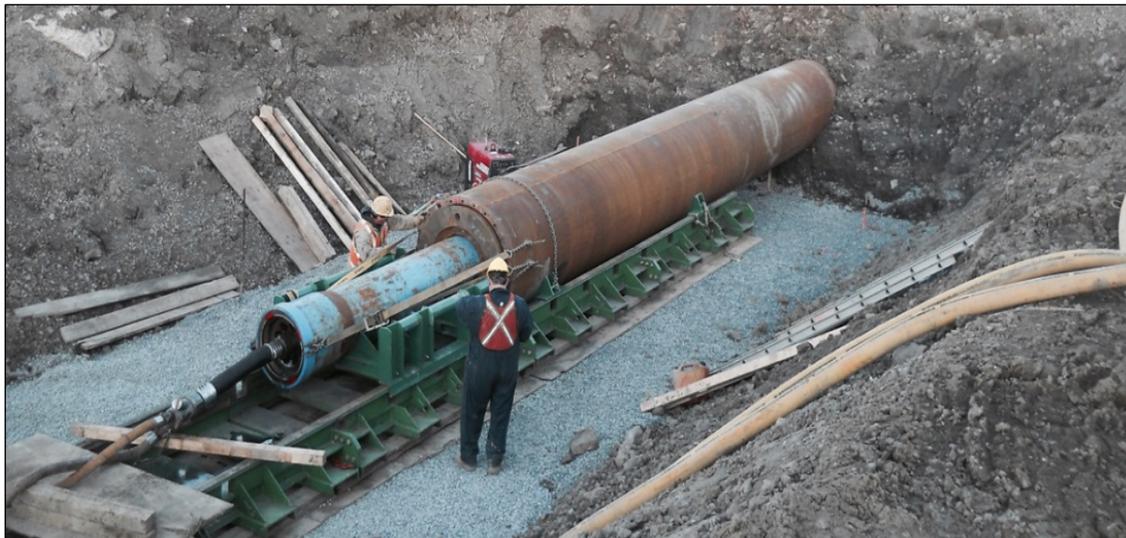
Figure 11 : Fonçage horizontal par percussion

3.4.2. Déroulement du fonçage

Le fonçage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés dans le sol.

Un rail, sur lequel est placée la gaine suivie du marteau, est généralement placé au fond du puits de départ. Le tout est positionné suivant la trajectoire souhaitée.

Au rythme de l'enfoncement de la gaine, le sol s'engouffre à l'intérieur de celle-ci. Des sections de gaines supplémentaires sont ajoutées et soudées à la gaine précédente au fur et à mesure de l'enfoncement. Une fois que la gaine a atteint le puits d'arrivée, le sol est retiré de l'intérieur de celle-ci. La vidange et le nettoyage de la conduite se font généralement au moyen d'une vis sans fin, d'un bouchon poussé par de l'air comprimé, par lessivage ou par succion (vers le puits d'arrivée). La figure 12 illustre un exemple de système de fonçage par percussion.



Source : Forages Nella inc. [www.nella-drilling.com]

Figure 12 : Exemple de système de fonçage par percussion

Si, pendant l'enfoncement, un coincage ou un refus survient (ex. : formation d'un bouchon de sol, obstruction ou coincage par des blocs), il peut s'avérer nécessaire de vidanger la conduite partiellement ou complètement et d'introduire des outils pour débloquer le front d'avancement.

Selon Najafi (2013), il existe une variante pour le fonçage de conduites en acier de petit diamètre (< 200 mm) et sur de petites distances. L'extrémité de la conduite peut être fermée avec une tête conique. Le mode d'insertion devient ainsi de type « compaction ». Le sol est alors repoussé vers l'extérieur et compacté autour de la gaine, au lieu de s'engouffrer à l'intérieur. De cette façon, la gaine reste libre de tout matériau après son fonçage. Le déplacement du sol peut cependant provoquer un soulèvement en surface et cette variante est plus sujette à subir des déviations.

Pour les gaines de grand diamètre enfoncées dans des sols pulvérulents, un lubrifiant de fonçage est parfois utilisé, au pourtour de la gaine, pour réduire le frottement.

3.4.3. Cas particulier du remplacement d'un ponceau par engouffrement

Dans le cas du remplacement d'une conduite existante (ex. : ponceau) qui doit être effectué au même endroit, il est possible de foncer une gaine d'un diamètre supérieur autour de la conduite existante. Au moment de l'installation, la conduite s'engouffre à l'intérieur de la gaine (figure 13). Une fois la gaine enfoncée, elle est vidée de son contenu et devient la nouvelle conduite. La technique de réhabilitation est nommée *remplacement de ponceau par engouffrement (pipe swallowing)*, mais utilise exactement le même principe de fonçage que le fonçage horizontal par percussion pour une nouvelle conduite.

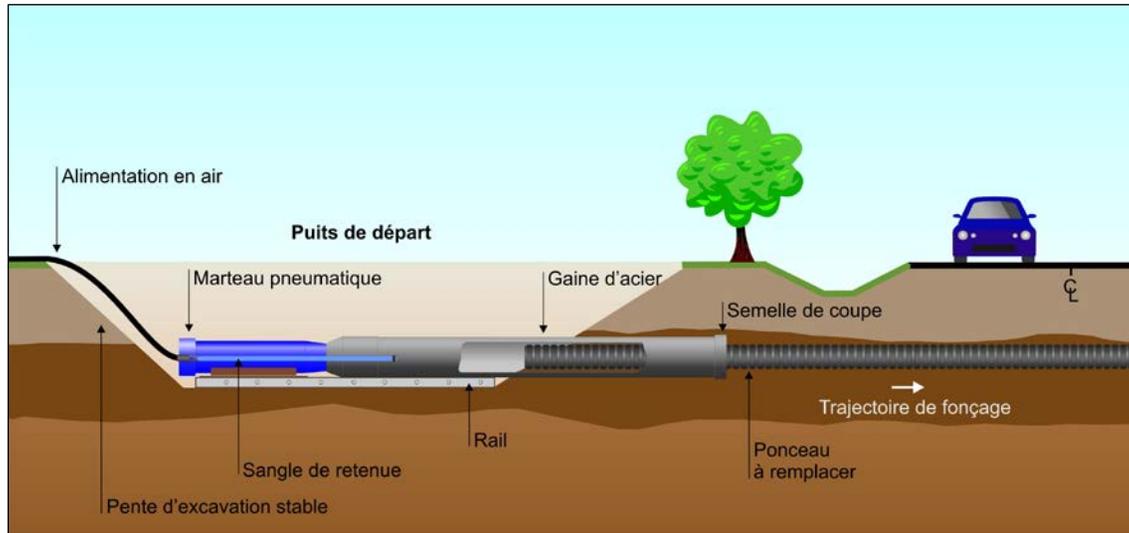


Figure 13 : Remplacement d'un ponceau par engouffrement

3.4.4. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 4 présente quelques caractéristiques générales d'application du fonçage par percussion.

Tableau 4 : Caractéristiques générales d'application du fonçage par percussion

Diamètre nominal de la conduite ($D_{conduite}$)	100 mm (4 po) à 2 400 mm (96 po) (possible jusqu'à 3 600 mm [144 po])
Longueur de forage	≤ 60 m
Profondeur minimale requise	$\geq 1,5$ m ou $2D_{conduite}$
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Sol cohérent, très mou à très raide Sol pulvérulent, très lâche à dense Sol contenant des cailloux Sol avec présence occasionnelle de blocs ($D_{bloc} < D_{conduite}$)

Les principaux avantages du fonçage par percussion sont les suivants :

- degré de précision relativement bon dans les conditions optimales (déviation normale d'environ 1 % de la longueur de la conduite);
- installation de conduites de grand diamètre;
- possibilité d'utiliser des sections de conduites de différentes longueurs lorsque l'espace disponible pour le puits de départ est restreint;

- bon contrôle de la face d'excavation, car le sol reste emprisonné dans la gaine pendant l'insertion;
- limitation de la quantité de matériaux excavée ou déplacée lors du passage de la gaine;
- possibilité de faire un fonçage dans presque toutes les conditions de sol;
- possibilité de surdimensionner la gaine lorsque des cailloux et des blocs sont anticipés;
- possibilité d'utiliser un tube pilote pour minimiser les déviations et augmenter le degré de précision des travaux (voir la section 3.8);
- réduction des dangers d'affaissement en surface;
- possibilité d'utiliser une gaine de fonçage (*dummy*) pour éviter toute répercussion sur la conduite principale (*slick boring*).

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- aucun contrôle sur la direction une fois le fonçage commencé. L'utilisation d'ailettes ou d'un tube pilote permet cependant de minimiser les déviations;
- possibilité de déviation sur des cailloux et des blocs, surtout dans le cas de conduites de petit diamètre;
- possibilité de soulèvement du terrain en surface, en présence de cailloux et de blocs si le forage est à faible profondeur;
- possibilité de déviation lors de changements stratigraphiques ou de densité des sols;
- perturbation du sol si un caillou ou un bloc obstrue l'extrémité de la conduite;
- vibrations provoquées par le marteau pneumatique (dommages possibles aux éléments existants avoisinants);
- sous la nappe phréatique, possibilité de drainage des sols pulvérulents ou arrivée d'eau par la gaine si des précautions ne sont pas prises;
- possibilité d'ovalisation ou de déformation de l'extrémité;
- possibilité de blocage et de refus d'avancement;
- possibilité de compaction des matériaux lâches, au pourtour de la gaine, causée par les vibrations, pouvant mener à des déformations en surface.

3.5. Forage horizontal à la tarière (*auger boring*)

3.5.1. Description

Le forage à la tarière est une technique sans tranchée qui permet d'enfoncer une gaine en acier dans le sol au moyen d'une vis sans fin (tarière), en suivant une trajectoire subhorizontale et rectiligne. Le mode d'insertion est de **type « extraction mécanique »**. La figure 14 ci-après illustre la technique.

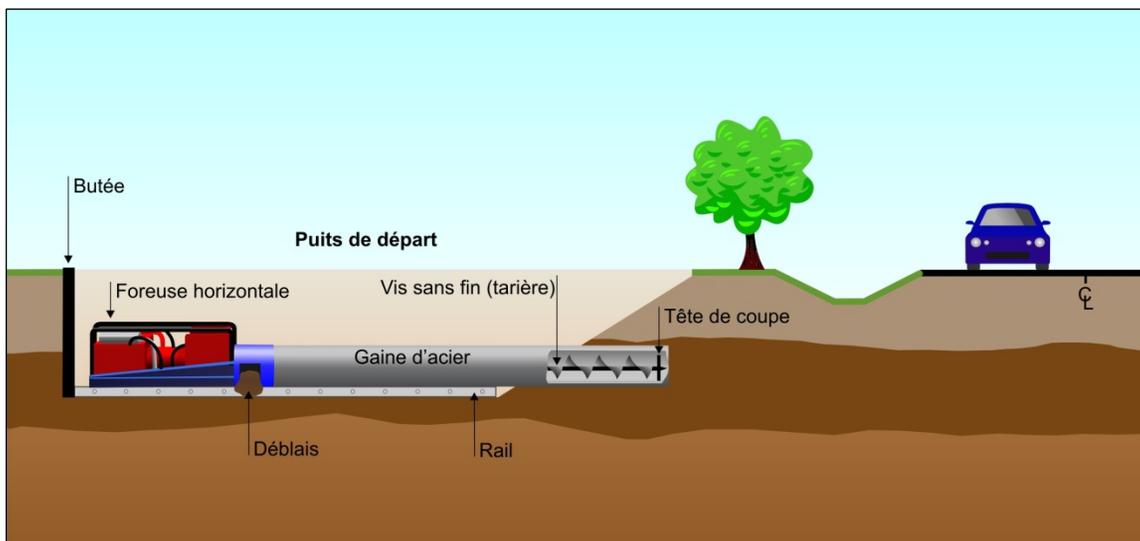


Figure 14 : Forage horizontal à la tarière

3.5.2. Déroulement des opérations

Le forage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés dans le sol. Une butée doit être aménagée dans le puits de départ et est utilisée comme appui pour la foreuse horizontale.

Une vis sans fin (tarière) munie d'une tête de coupe (*cutting head*) est placée à l'avant, à l'intérieur de la gaine d'acier, et est reliée à une foreuse horizontale (*boring machine*). La tête de coupe peut prendre différentes formes selon les conditions de sols anticipées. Le tout est placé sur un rail positionné en fonction de la trajectoire souhaitée.

La foreuse active le mouvement de rotation de la tarière et pousse simultanément la gaine d'acier pour enfoncer l'ensemble dans le sol jusqu'au puits d'arrivée. Des sections de gaines supplémentaires sont ajoutées et soudées à la gaine précédente au rythme de l'enfoncement. Des sections de tarière sont également ajoutées en même temps pour chaque section de gaine supplémentaire.

Les matériaux forés s'engouffrent dans la gaine d'acier par la rotation de la tarière et sont éjectés dans le puits de départ au fur et à mesure de l'avancement du forage. La figure 15 illustre un exemple de forage horizontal à la tarière.



Source : ForAction inc. [www.foraction.ca]

Figure 15 : Exemple de forage horizontal à la tarière

Pour avoir une meilleure précision, il est possible d'utiliser un tube pilote préalablement installé. Ce tube est foncé avec une tête de forage munie d'une sonde de localisation afin d'obtenir la trajectoire souhaitée. Une fois le tube pilote installé, le front de la gaine est attaché à l'arrière du tube pilote avec un adaptateur spécial. Pendant la progression du forage et de la gaine, le tube pilote permet de conserver la trajectoire (*guided auger boring*) et ainsi de limiter les déviations (voir la section 3.6).

Il est également possible d'ajouter une tête de forage sur pivot dirigeable (*steering head*) à l'avant de la gaine d'acier pour corriger légèrement la direction du forage. Cette correction se fait généralement sur deux axes : horizontal et vertical.

Pour les gaines de grand diamètre enfoncées dans des sols pulvérulents, un lubrifiant de forage est parfois utilisé au pourtour de la gaine pour réduire le frottement.

Note : Bien qu'il soit possible d'effectuer un forage à la tarière **sans gaine d'acier** (*free boring*), cette technique **n'est pas recommandée**, car les parois du trou de forage ne sont pas soutenues. Le risque de surexcavation par effondrement constant de la paroi et d'affaissement en surface est donc très élevé, surtout dans les sols granulaires (gravier, sable et silt), contrairement aux sols cohérents (argile).

Il est possible de faire des forages dans le roc à l'aide d'un module d'excavation SBU (*small boring unit*). Il s'agit d'une petite tête de coupe semblable à celle des boucliers à face fermée utilisés pour forer dans le roc (voir la figure 27 à la section 3.8). Le module SBU est fixé à l'avant de la gaine d'acier et des tarières (figure 16). C'est la rotation des

tarières qui fait tourner simultanément le module SBU. Ce module remplace la tête de coupe traditionnelle utilisée dans le sol.



Source : The Robbins Company [www.therobbinscompany.com]

Figure 16 : Module d'excavation SBU

3.5.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 5 présente quelques caractéristiques générales d'application du forage horizontal à la tarière.

Tableau 5 : Caractéristiques générales d'application du forage à la tarière

Diamètre nominal de la conduite (D_{conduite})	100 mm (4 po) à 1 800 mm (72 po)
Longueur de forage	≤ 120 m
Profondeur minimale requise	$\geq 1,5$ m ou $2D_{\text{conduite}}$
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Sol cohérent, très mou à dur Sol pulvérulent, compact à dense, <u>au-dessus</u> de la nappe phréatique Graviers et cailloux $\leq 1/3 D_{\text{conduite}}$ Roc altéré ou sol fermement cimenté Roc sain (avec équipement adapté)

Les principaux avantages du forage horizontal à la tarière sont les suivants :

- rapidité d'exécution;
- degré de précision relativement bon dans les conditions optimales;
- technique adaptée pour forer dans les argiles de consistance raide à très raide;
- installation de gaines de grand diamètre;
- possibilité d'utiliser un tube pilote pour minimiser les déviations et augmenter le degré de précision (voir la section 3.8);
- possibilité d'utiliser une tête de forage sur pivot dirigeable;
- possibilité de rétracter légèrement la tarière et la tête de coupe pour laisser un petit bouchon de sol dans la gaine à son extrémité, avoir un meilleur contrôle de la face d'excavation et limiter la surexcavation.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- aucun contrôle sur la direction du forage en l'absence d'une tête de forage sur pivot dirigeable. L'utilisation d'un tube pilote permet cependant de minimiser, voire d'empêcher les déviations;
- possibilité de corriger, au moyen des têtes de forage sur pivot dirigeable, seulement de légères déviations et non de donner des trajectoires courbes;
- possibilité de soutirage ou de surexcavation dans des sols pulvérulents;
- possibilité de formation de cavités à l'avant de la gaine, surtout si la tarière est en mode rotation sans que la gaine d'acier avance;
- possibilité de déviation lors de changements stratigraphiques ou de densité des sols;
- contrôle très partiel de la face d'excavation, sauf en cas d'utilisation de têtes de forage particulières;
- possibilité d'évacuer seulement les cailloux et les blocs qui ont un diamètre inférieur au tiers de celui de la conduite;
- possibilité de coinçage de cailloux dans la tarière;
- impossibilité de forer en présence de blocs, sauf en utilisant le module SBU;
- possibilité de perte de contrôle du front d'excavation si la tarière doit être retirée;
- nécessité de concevoir un puits de départ pour assurer une butée suffisante à la foreuse.

3.6. Forage horizontal au tube pilote (*pilot tube*)

3.6.1. Description

Le forage au tube pilote est une technique sans tranchée qui permet d'enfoncer des sections de conduites en fonçant un trou pilote selon une trajectoire subhorizontale et rectiligne, pour ensuite se servir des tubes du trou pilote comme guides pour l'installation de la conduite.

Il s'agit d'un système très compact permettant d'installer une conduite dans des zones de travail restreintes. Le mode d'insertion est de **type « compaction »** pour la phase initiale du trou pilote. Par la suite, le mode d'insertion est de **type « extraction mécanique »**.

3.6.2. Déroulement des opérations

Le forage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés dans le sol. Il y a essentiellement deux ou trois étapes.

1. Fonçage et installation des tubes pilotes (figure 17)

Le système est placé dans un puits de départ, contre les parois de celui-ci. Des tubes de forage, généralement de 1 m de longueur, sont enfoncés successivement dans le sol pour foncer un trou pilote jusqu'au puits d'arrivée. Une tête de forage biseautée, placée au front d'avancement, permet de repousser les sols sur les côtés pour laisser place aux tubes de forage tout en permettant de suivre la trajectoire établie.

Le fonçage du trou pilote se fait sans injection de boue de forage pour évacuer les déblais. Le passage du tube pilote se fait donc uniquement par compaction du sol environnant. Un laser passant à l'intérieur des tubes de forage permet de connaître en temps réel l'orientation et le niveau de la tête de forage par rapport à la trajectoire initiale, ce qui permet de corriger les déviations. La figure 18 est un exemple de l'étape de fonçage et d'installation des tubes pilotes.

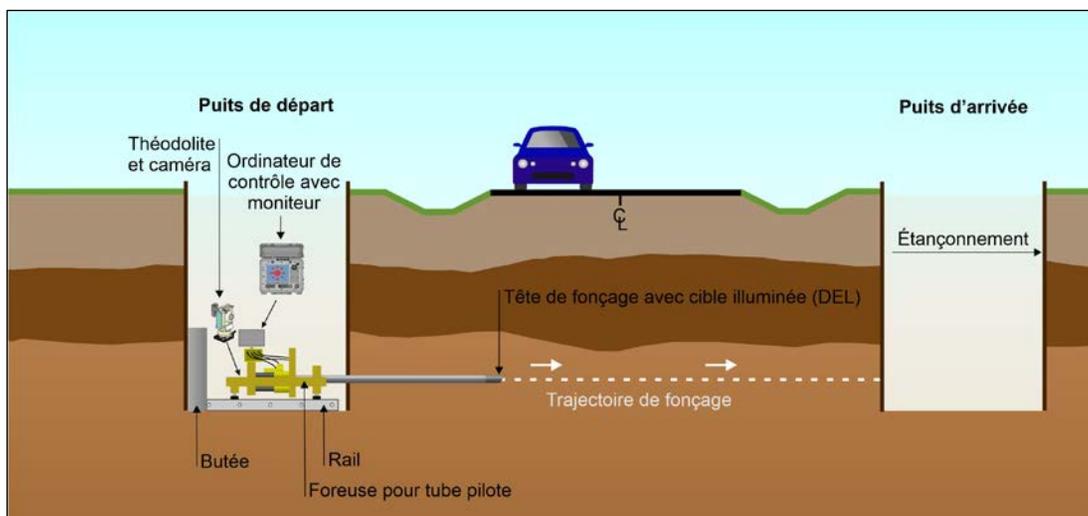


Figure 17 : Tube pilote – Étape 1 – Fonçage et installation des tubes pilotes



Source : ACS Construction Group [www.acsconstructiongroup.com]

Figure 18 : Exemple de l'étape du fonçage et de l'installation des tubes pilotes

2. Forage, alésage et installation du tubage d'acier (figure 19)

Une fois le trou pilote terminé, l'extrémité arrière du tube pilote est détachée de la foreuse et reliée à une tête de coupe (*cutting head*) ou à une tête d'alésage (*reaming head*) d'un diamètre légèrement supérieur à la conduite à mettre en place. Des sections de tubage en acier (*casing*) sont ensuite insérées derrière la tête de coupe, entre celle-ci et la foreuse. Une vis sans fin (tarière) est reliée à la tête de coupe par l'intérieur du tubage.

La foreuse active le mouvement de rotation de la tarière et pousse simultanément le tubage pour enfoncer l'ensemble dans le sol jusqu'au puits d'arrivée. Les matériaux forés s'engouffrent dans le tubage et sont retirés par la tarière au fur et à mesure de l'avancement. Les sections du tube pilote sont poussées simultanément dans le puits d'arrivée.

En fonction du diamètre de la conduite, plusieurs séquences d'alésage, employant des diamètres de tube de plus en plus grands, peuvent être réalisées.

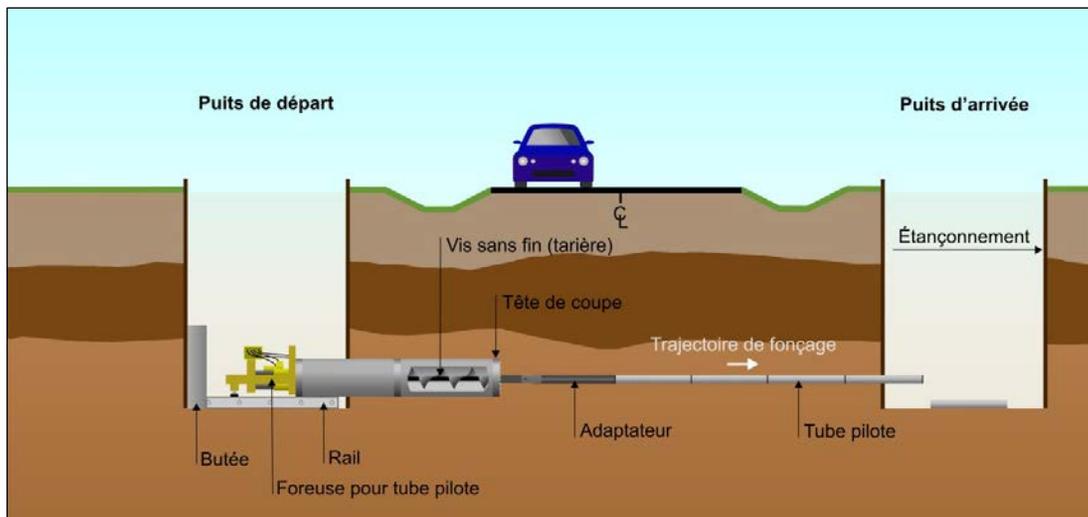


Figure 19 : Tube pilote – Étape 2 – Forage, alésage et installation de tubes d'acier

3. Installation de la conduite finale (figure 20)

Dès que l'étape 2 est terminée, l'extrémité du tubage est détachée de la foreuse. La conduite finale à installer est placée derrière le tubage avec un adaptateur et est reliée à la foreuse. Les sections de conduites sont ensuite poussées une à une jusqu'au puits d'arrivée. Les sections de tubage préalablement installées lors de l'alésage sont poussées simultanément dans le puits d'arrivée. Ces sections sont généralement des conduites spécialement conçues pour la technique du tube pilote. La figure 21 illustre un exemple d'installation de la conduite finale au moyen de la technique de forage horizontal au tube pilote.

Parfois, il arrive que les étapes 2 et 3 soient réalisées en même temps pour gagner du temps, si la nature des sols et le diamètre de la conduite à installer le permettent. À ce moment, soit le tubage d'acier devient la conduite, soit la conduite finale est utilisée comme tubage lors du forage et de l'alésage ou lors de la dernière phase d'alésage si plusieurs phases étaient requises.

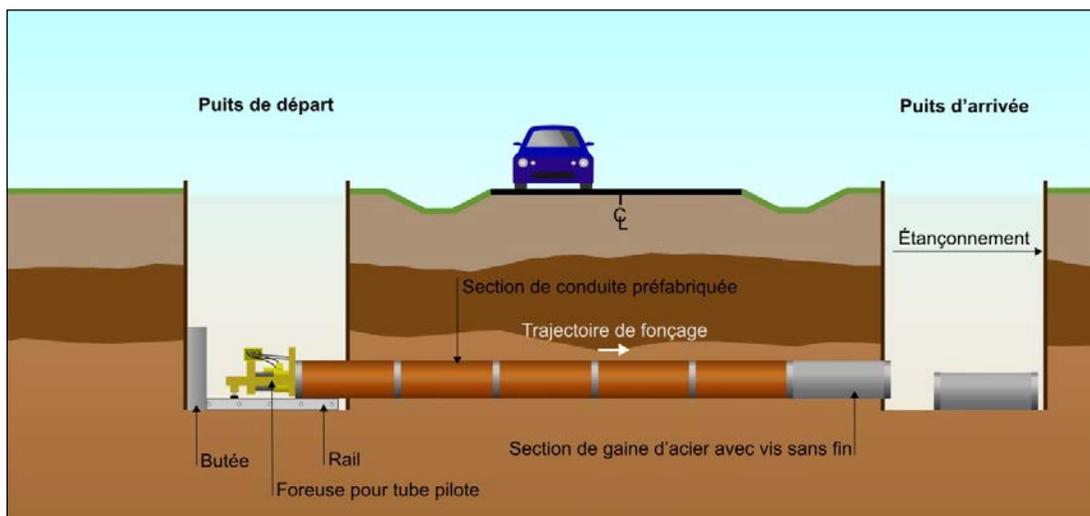


Figure 20 : Tube pilote – Étape 3 – Installation de la conduite finale

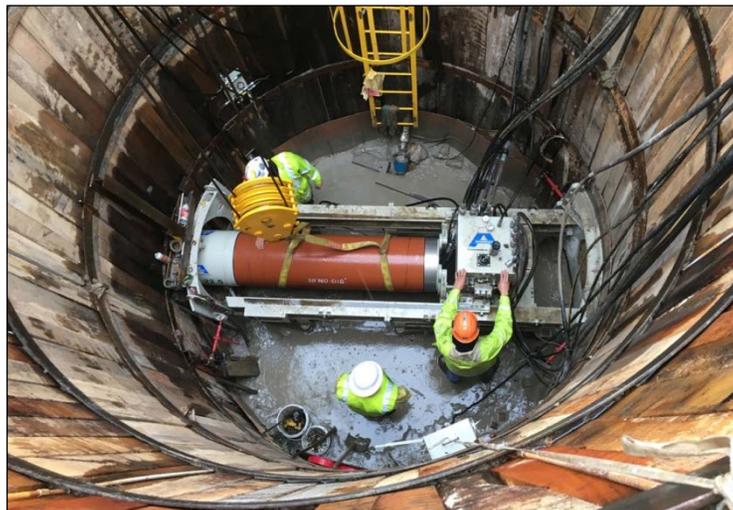


Figure 21 : Exemple de l'étape d'installation de la conduite finale

3.6.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 6 présente sommairement les caractéristiques générales d'application du forage au tube pilote.

Tableau 6 : Caractéristiques générales d'application du forage au tube pilote

Diamètre nominal de la conduite (D_{conduite})	150 mm (6 po) à 750 mm (30 po)
Longueur de forage	≤ 80 m (possible jusqu'à 120 m)
Profondeur minimale requise	$\geq 1,5$ m et $\leq 6,0$ m
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Sol compactable Sol cohérent, très mou à très raide Sol pulvérulent, très lâche à dense Sol sans cailloux ni blocs Utilisation difficile dans les graviers ou les sols graveleux

Les principaux avantages du forage au tube pilote sont les suivants :

- degré de précision très élevé dans les conditions optimales;
- possibilité d'effectuer des forages en milieu restreint;
- limitation de la pression sur la conduite finale lors de son installation.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- nécessité d'obtenir une trajectoire parfaitement rectiligne lors de l'installation des tubes pilotes;
- difficulté, voire impossibilité de procéder à l'installation des tubes pilotes en présence de cailloux, de blocs ou de sols très denses.
- possibilité de déviation ou de refus d'avancement sur des cailloux ou des blocs;
- possibilité de déviation lors de changements stratigraphiques ou de densité des sols;
- possibilité de soutirage ou de surexcavation des sols pulvérulents, ou d'arrivée d'eau par le tubage;
- possibilité de formation de cavités à l'avant du tubage;
- contrôle partiel de la face d'excavation;
- nécessité de concevoir un puits de départ pour assurer une butée suffisante pour la foreuse;
- nécessité d'utiliser des conduites spécifiques à cet usage;
- technologie plus dispendieuse, car plus avancée.

3.7. Forage ou fonçage horizontal guidé (*guided auger boring* ou *guided pipe ramming*)

3.7.1. Description

La technique du forage ou du fonçage horizontal guidé est une technique hybride entre le forage horizontal au tube pilote et le fonçage horizontal par percussion ou le forage horizontal à la tarière.

Cette technique hybride permet d'enfoncer d'abord des sections de conduites en fonçant un trou pilote selon une trajectoire subhorizontale et rectiligne, pour ensuite se servir des tubes du trou pilote comme guides pour l'installation de la conduite finale. L'installation de la conduite se fait par la suite en employant soit la technique de fonçage horizontal par percussion (voir la section 3.4), soit la technique par forage horizontal à la tarière (voir la section 3.5).

La technique du forage ou du fonçage horizontal guidé est très comparable au forage horizontal au tube pilote en ce qui a trait au déroulement du forage, mais ne permet pas de travailler en zone restreinte. Le mode d'insertion est de **type « compaction »** pour la phase initiale du trou pilote. Par la suite, le mode d'insertion est de **type « extraction mécanique »**.

3.7.2. Déroulement des opérations

Le forage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés dans le sol.

1. Fonçage et installation des tubes pilotes (figures 22 et 23)

Le système de fonçage du trou pilote est placé dans le puits de départ sur les rails de la foreuse horizontale à la tarière, sur les rails du marteau à percussion ou directement au fond du trou. Dans tous les cas, il doit y avoir une butée suffisante à l'arrière du système. Le trou pilote est foré et les tubes sont installés de la manière décrite à la section 3.6.2 (étape 1 du forage horizontal au tube pilote). La figure 23 illustre un exemple de l'étape de fonçage et d'installation des tubes pilotes.

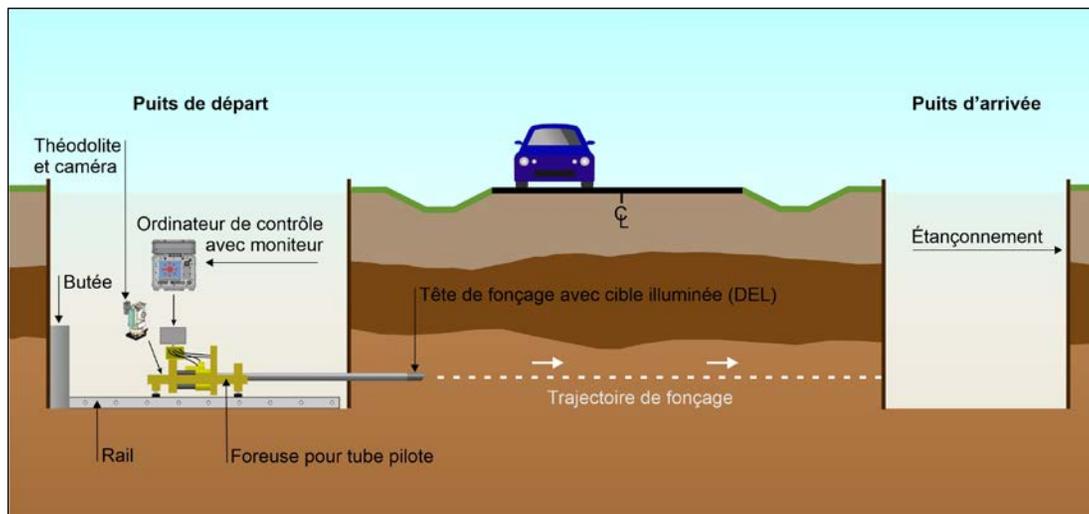


Figure 22 : Fonçage ou forage horizontal guidé – Étape 1 – Fonçage et installation des tubes pilotes



Source : Akkerman [www.akkerman.com]

Figure 23 : Exemple de forage horizontal guidé – Installation du tube pilote

2. Installation de la conduite (figures 24 à 27)

Une fois l'installation des tubes pilotes terminée, le système d'installation est retiré du puits. Une première section de conduite est installée devant la foreuse (ou le marteau pneumatique), puis reliée aux tubes pilotes au moyen d'un adaptateur et d'une tête d'alésage ou d'une tête de coupe conçue pour cet usage. Les figures 25 et 27 illustrent des exemples d'installation de la conduite, soit par percussion, soit par forage horizontal à la tarière.

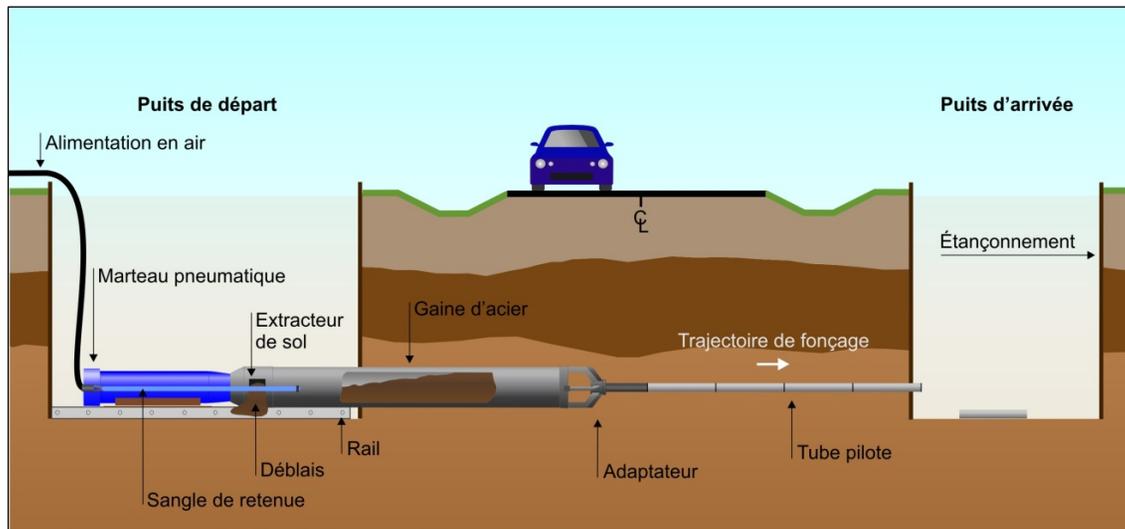


Figure 24 : Fonçage ou forage horizontal guidé – Étape 2 – Installation de la conduite par fonçage à percussion



Source : Akkerman [www.akkerman.com]

Figure 25 : Exemple de fonçage horizontal guidé par fonçage à percussion

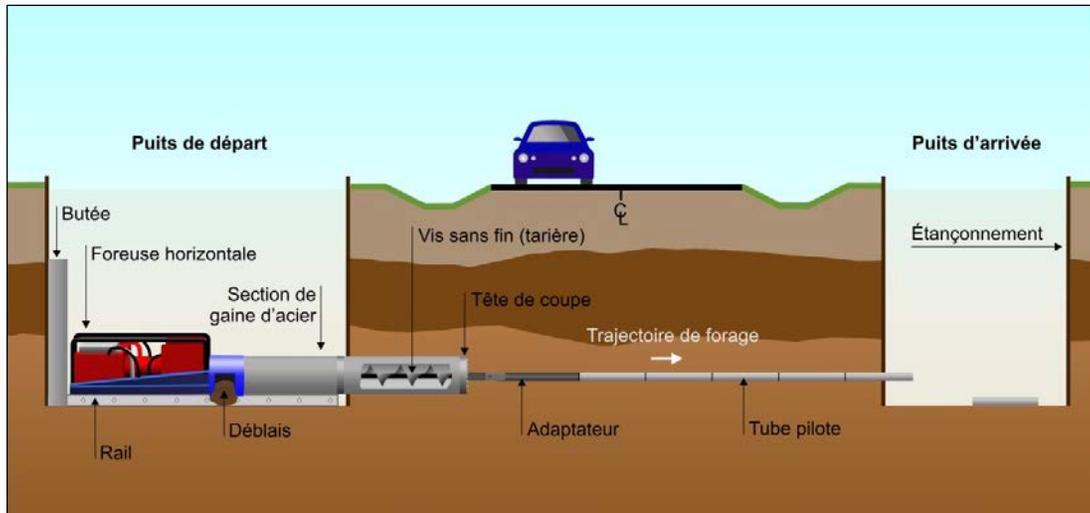


Figure 26 : Fonçage ou forage horizontal guidé – Étape 2 – Installation de la conduite par forage horizontal à la tarière



Source : Akkerman [www.akkerman.com]

Figure 27 : Exemple de forage horizontal guidé à la tarière

3.7.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Les caractéristiques générales d'application correspondent d'abord à celles du tableau 6 (voir la section 3.6.3) pour la réalisation du trou pilote.

Par la suite, les caractéristiques d'application correspondent à celles du fonçage par percussion (voir la section 3.4.2) ou du forage horizontal à la tarière (voir la section 3.5.2).

Les principaux avantages du forage ou fonçage guidé sont les suivants :

- limitation des déviations lors de l'installation de la conduite et obtention d'un degré de précision élevé;
- autres avantages associés à la technique utilisée pour l'insertion de la conduite (fonçage par percussion ou forage à la tarière).

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- augmentation du nombre d'étapes de réalisation;
- installation des tubes pilotes pouvant être très difficile, voire impossible, en présence de cailloux, de blocs ou de sols très denses;
- nécessité d'obtenir une trajectoire parfaite lors de l'installation des tubes pilotes. Les trajectoires en serpentins peuvent s'avérer problématiques lors de l'installation de la conduite par fonçage à percussion ou forage à la tarière, puisque la gaine cherchera à suivre cette trajectoire, ce qui fera forcer le système;
- autres désavantages associés à la technique utilisée pour l'insertion de la conduite (fonçage par percussion ou forage à la tarière);
- plus dispendieux, car il y a une étape de plus.

3.8. Forage horizontal par alésage dans le roc (*horizontal raise boring ou rock boring*)

3.8.1. Description

Le forage par alésage est une technique sans tranchée dérivée d'une technique utilisée dans l'industrie minière (ex. : puits de ventilation) qui permet de forer un tunnel dans le roc au moyen d'un trou pilote et d'un aléreur, en suivant une trajectoire subhorizontale et rectiligne. Le mode d'insertion est de **type « extraction mécanique »**.

3.8.2. Déroulement des opérations

Le forage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés dans le sol et le roc. Il y a essentiellement trois étapes.

1. Forage du trou pilote (figure 28)

Un trou pilote est d'abord foré à l'horizontale dans le roc, en poussant des tiges de forage reliées à un trépan (tricône) au front d'avancement. Ce trépan fracture et broie le roc, et les tiges avancent progressivement jusqu'au puits d'arrivée. De la boue de forage est injectée au front d'excavation depuis l'intérieur des tiges de forage. Cette boue a pour objectifs d'évacuer les déblais, de refroidir le trépan et de lubrifier le trou pour limiter la friction sur les tiges. La boue de forage et les déblais sont évacués au puits de départ. La figure 29 illustre un exemple de l'étape de forage du trou pilote dans le roc.

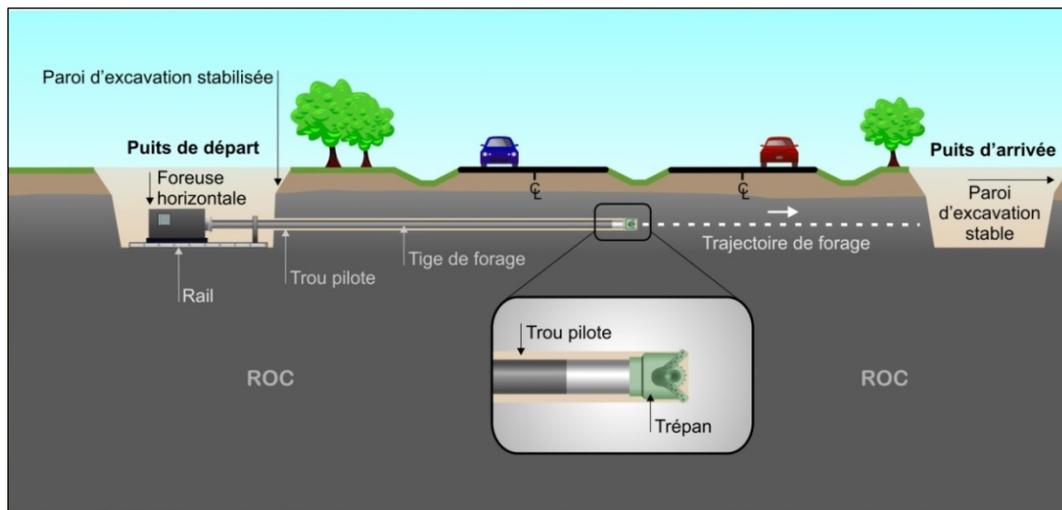


Figure 28 : Forage par alésage dans le roc – Étape 1 – Forage du trou pilote



Source : Marathon Drilling [www.marathondrilling.com]

Figure 29 : Exemple de l'étape de forage du trou pilote dans le roc

2. Alésage du trou (figure 30)

Au puits d'arrivée, le trépan est ensuite retiré et remplacé par un aléreur à molettes (*roller-cone*) d'un diamètre équivalant au diamètre final de la conduite à installer. L'aléreur est tiré vers le puits de départ et il agrandit le trou pilote en fracturant et en broyant le roc.

Les fragments de roc sont retirés pendant ou après l'opération, et ce, avec une foreuse horizontale et une tarière de plus petit diamètre à partir du puits d'arrivée. Il y a cependant injection d'eau, notamment pour refroidir les outils de coupe. La figure 31 illustre un exemple de l'étape d'alésage dans le roc.

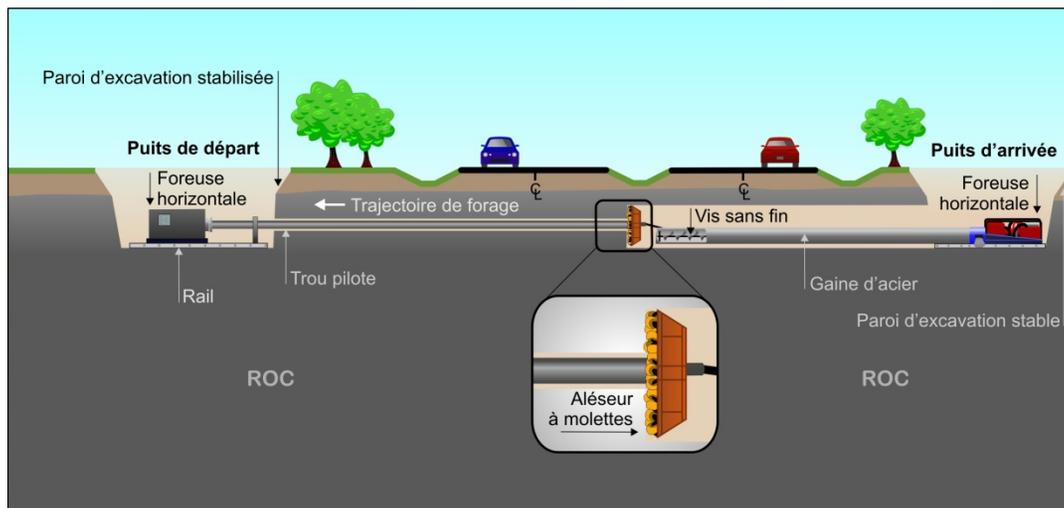


Figure 30 : Forage par alésage dans le roc – Étape 2 – Alésage



Source : Marathon Drilling [www.marathondrilling.com]

Figure 31 : Exemple de l'étape d'alésage dans le roc

3. Installation de la conduite

Finalement, une conduite ou une gaine est glissée dans le trou foré. Des cales sont placées au pourtour de la conduite et l'espace annulaire est comblé avec un coulis cimentaire.

3.8.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 7 présente quelques caractéristiques générales d'application du forage horizontal par alésage dans le roc.

Tableau 7 : Caractéristiques générales d'application du forage par alésage dans le roc

Diamètre nominal de la conduite (D_{conduite})	100 mm (4 po) à 3 000 mm (120 po)
Longueur de forage	$\leq 200\text{-}300$ m
Profondeur minimale requise	$\geq 1,5$ m dans le roc compétent
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Roc solide non altéré, peu fracturé

Les principaux avantages du forage horizontal par alésage dans le roc sont les suivants :

- précision relativement bonne dans les conditions optimales;
- excavations nécessaires pour l'aménagement des puits d'accès relativement limitées en comparaison avec les autres techniques de forage dans le roc;
- possibilité de surdimensionnement du trou foré pour y placer une conduite gravitaire avec plus de précision.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- technique uniquement utilisée dans un roc sain et solide;
- nécessité de bétonner le vide annulaire entre la conduite et le trou de forage;
- trajectoire non dirigeable;
- possibilité de déviation du trou pilote le long des fractures de la masse rocheuse;
- possibilité d'effondrement de la paroi et de coinçage des équipements;
- possibilité d'usure prématurée des trépan selon le type de roc et son abrasivité.

3.9. Forage horizontal au marteau fond-de-trou (*hammer drilling ou down-the-hole horizontal rock boring*)

3.9.1. Description

Le forage au marteau fond-de-trou est une technique sans tranchée qui permet d'enfoncer une gaine en acier dans le roc ou dans un sol avec des cailloux et des blocs, le tout au moyen d'un marteau pneumatique placé devant la gaine d'acier et en suivant une trajectoire subhorizontale et rectiligne. Le mode d'insertion est de **type « extraction mécanique »**.

3.9.2. Déroulement des opérations

Le forage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés. Un marteau pneumatique muni d'un ou plusieurs trépan est fixé à l'avant de la gaine et relié à une foreuse horizontale par l'intermédiaire d'une vis sans fin placée à l'intérieur de la gaine (figure 32). Le trépan (ou l'ensemble) a un diamètre légèrement supérieur à celui de la gaine d'acier.

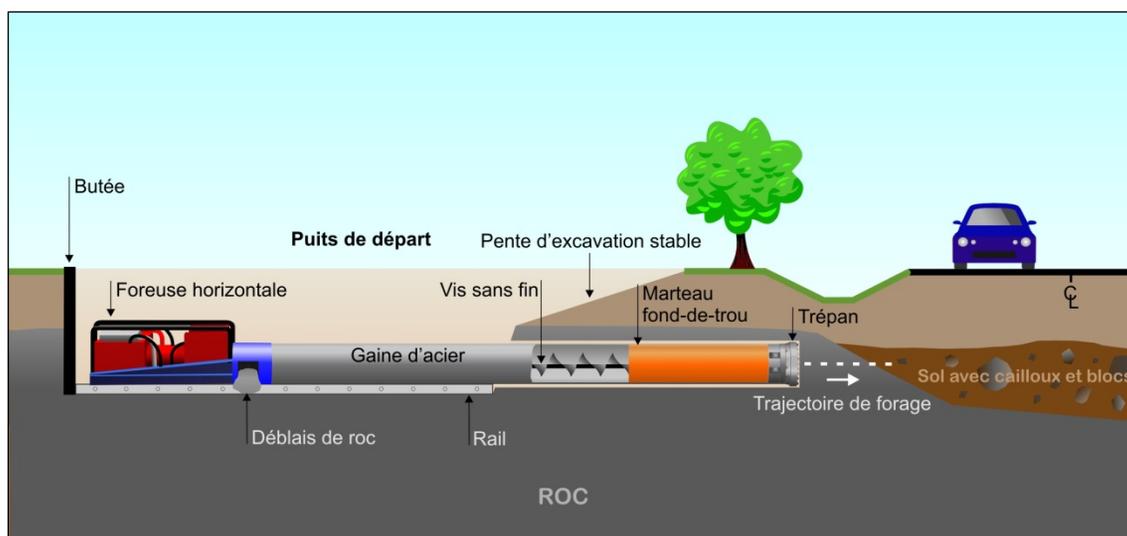


Figure 32 : Forage horizontal au marteau fond-de-trou

Pour faire avancer le forage, la foreuse pousse la gaine d'acier, la vis sans fin et le marteau afin de créer une pression constante sur la face d'excavation. Le marteau pneumatique situé devant la gaine fracture et broie la roche au fur et à mesure de l'avancement. Les matériaux broyés s'engouffrent à l'intérieur de la gaine d'acier par de petites ouvertures situées à la surface du trépan et dans le marteau pneumatique et sont ensuite retirés à l'aide de la vis sans fin.

Dans le roc parfaitement sain, il est également possible d'utiliser le marteau fond-de-trou et les vis sans fin sans gaine d'acier. La foreuse transmet alors la poussée uniquement par la vis sans fin. Un exemple de marteau fond-de-trou est présenté à la figure 33.



Source : Drill Rocker [www.drillrocker.com (droits réservés)]

Figure 33 : Exemple de marteau fond-de-trou

3.9.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 8 présente quelques caractéristiques générales d’application du forage horizontal au marteau fond-de-trou.

Tableau 8 : Caractéristiques générales d’application du forage au marteau fond-de-trou

Diamètre nominal de la conduite ($D_{conduite}$)	100 mm (4 po) à 1 050 mm (42 po)
Longueur de forage	≤ 100 m
Profondeur minimale requise	≥ 1 m (dans le roc)
Conditions géotechniques favorables à l’utilisation de cette technique	Sol avec cailloux et blocs Roc altéré à sain, de très mauvaise à excellente qualité

Les principaux avantages du forage horizontal au marteau fond-de-trou sont les suivants :

- degré de précision variant de moyen à bon dans les conditions optimales;
- possibilité de forer dans le roc, les cailloux et les blocs. Impossibilité, toutefois, de forer dans deux conditions à la fois, c'est-à-dire que le marteau ne peut pas être à la fois partiellement dans le sol et dans le roc. Il faut aussi favoriser les transitions roc-sol plutôt que sol-roc;
- possibilité de faire le forage avec ou sans gaine si le roc est parfaitement sain.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- faible degré de précision dans les sols lâches ou les roches tendres;
- possibilité de soulèvement en raison de la pression d'air nécessaire au système;
- taux d'avancement très lent dans le roc très dur (ex. : silicifié);
- diminution des taux d'avancement plus le diamètre est grand;
- possibilité de compaction au pourtour du forage en présence de cailloux et de blocs si la compacité du sol n'est pas assez élevée;
- possibilité de déviation causée par le poids du marteau pneumatique;
- possibilité de déviation lors de changements lithologiques ou stratigraphiques;
- risque de coincage des équipements à la suite d'une usure prématurée du trépan;
- possibilité d'usure prématurée des trépans selon le type de roc et son abrasivité.

3.10. Forage au tunnelier (*tunnel boring machine*)

3.10.1. Description

Le forage au tunnelier (figure 34) est une technique sans tranchée qui permet d'installer une conduite à l'horizontale dans le sol ou le roc à l'aide d'un module d'excavation (tunnelier) placé au front de la conduite, le tout poussé par des vérins hydrauliques (*pipe jacking*). Le système peut suivre une trajectoire rectiligne ou courbe. Le mode d'insertion est de type « extraction mécanique ».

Il s'agit d'une technique couramment utilisée en Europe et en Asie depuis de nombreuses années. Les États-Unis ont également intégré cette technique dans leurs pratiques courantes. Au Canada, elle tend à gagner en popularité, notamment pour des projets d'envergure. Son utilisation est encore marginale au Québec, mais certains fournisseurs en techniques sans tranchée commencent à l'utiliser plus régulièrement.

Cette technique est particulière, puisqu'il existe une multitude de modules d'excavation sur le marché, tous différents les uns des autres. Cette technique peut être utilisée dans tous les types de sols, pourvu que le module et sa tête de forage soient adaptés aux conditions de sol anticipées. **Le succès des travaux est donc directement lié au choix du bon type de module d'excavation**, ce qui requiert une bonne connaissance des conditions de sol.

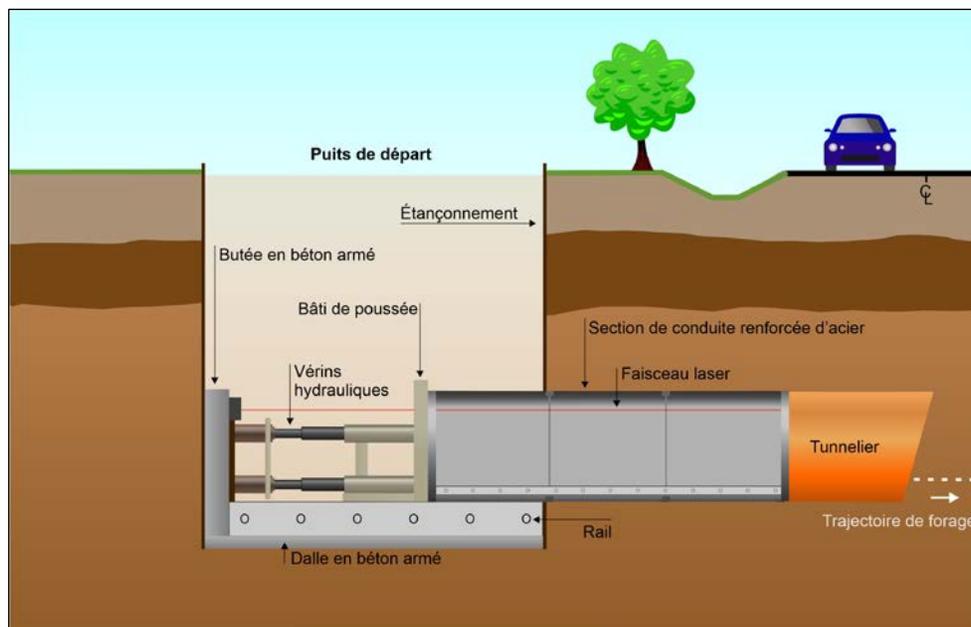


Figure 34 : Schéma général de la technique de tunnelier

Puisque les tunneliers sont équipés d'un système laser permettant de connaître en tout temps leur position par rapport à la trajectoire initiale souhaitée, leur précision est donc très grande. Plusieurs composants forment le système de tunnelier (figure 34), notamment :

- un module d'excavation placé à l'avant (tunnelier, bouclier);
- des sections de conduites placées à l'arrière du module;

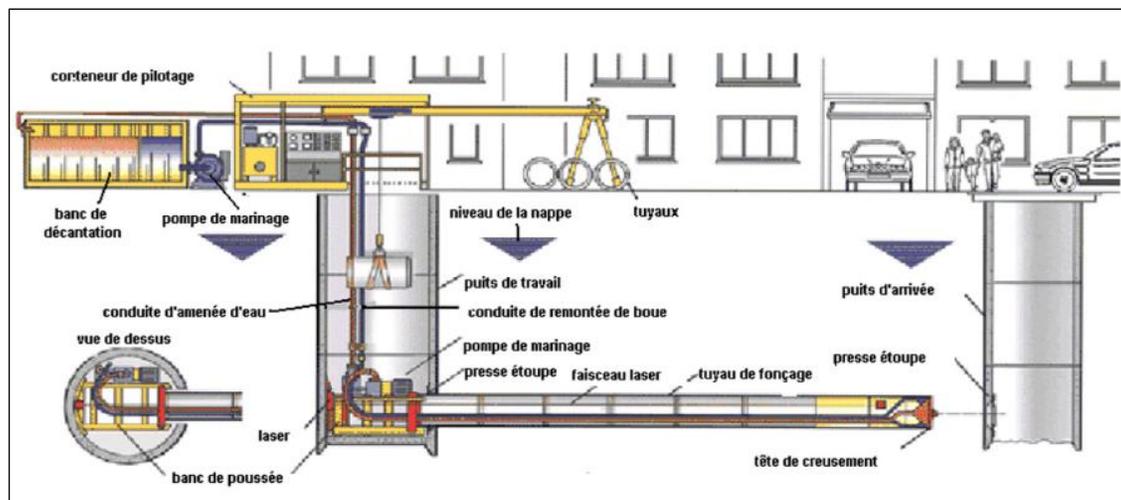
- un système de poussée (*jacking system*) composé de vérins hydrauliques, placé au puits de départ;
- un système d'évacuation des déblais (avec ou sans traitement);
- un système de pilotage dans le module d'excavation ou à distance;
- un système de guidage laser;
- un système d'injection de lubrifiant;

3.10.2. Catégories de tunneliers

Bien que ces systèmes possèdent généralement les mêmes composants, on distingue trois catégories de tunneliers. Celles-ci sont présentées aux sections suivantes.

3.10.2.1. Microtunneliers (*microtunnelling boring machine*)

Les microtunneliers (figures 35 et 36) sont les tunneliers les plus petits (généralement $\text{Ø} < 1\,500$ mm [48 po]). Il n'est pas possible pour un ouvrier de travailler à l'intérieur de la conduite. Par conséquent, les microtunneliers sont téléguidés à partir d'une chambre de contrôle située à la surface.



Source : La Revue l'Eau, l'Industrie, les Nuisances (2009)

Figure 35 : Schéma type des microtunneliers

Les modules d'excavation sont généralement des boucliers fermés de type « confinement par boue de forage » (*slurry pressure balance machine*), mais peuvent aussi être de type « confinement par pression de terre » (*earth pressure balance machine*) (voir la section 3.10.5). L'utilisation de ces derniers est cependant marginale.



Source : Akkerman [www.akkerman.com]

Figure 36 : Exemple de microtunnelier

3.10.2.2. Tunneliers standards (*tunnel boring machine* ou *pipe jacking*)

Les tunneliers standards, quant à eux, sont suffisamment grands pour que des ouvriers puissent travailler à l'intérieur du module d'excavation et des conduites ($\varnothing > 1\ 200\text{ mm}$ [48 po]). D'ailleurs, le pilotage est réalisé dans le module d'excavation (figures 37 et 38).

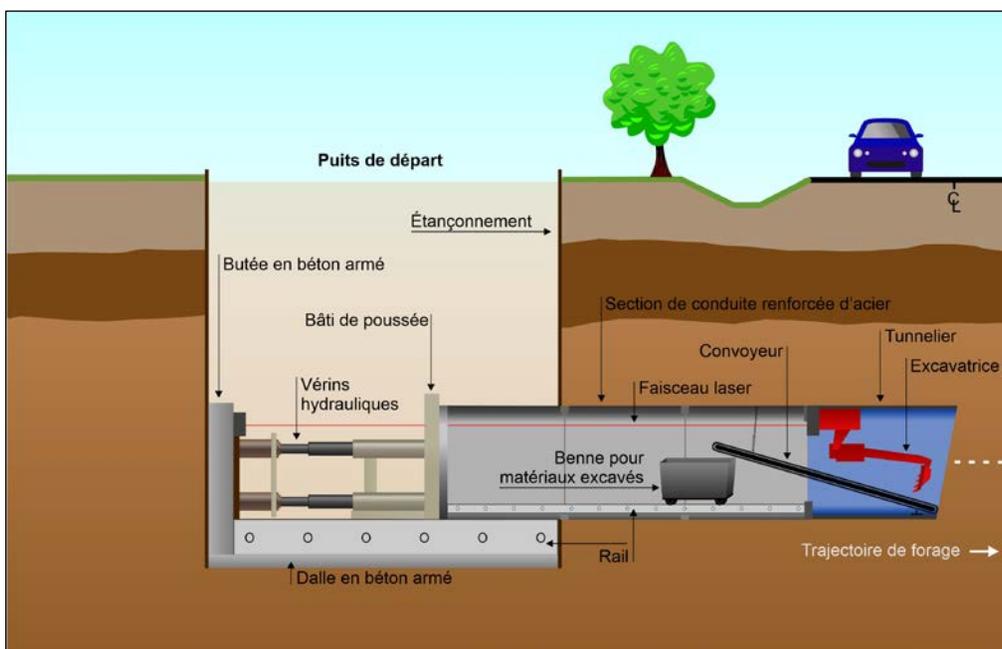


Figure 37 : Schéma de tunnelier standard à bouclier ouvert à excavation mécanisée

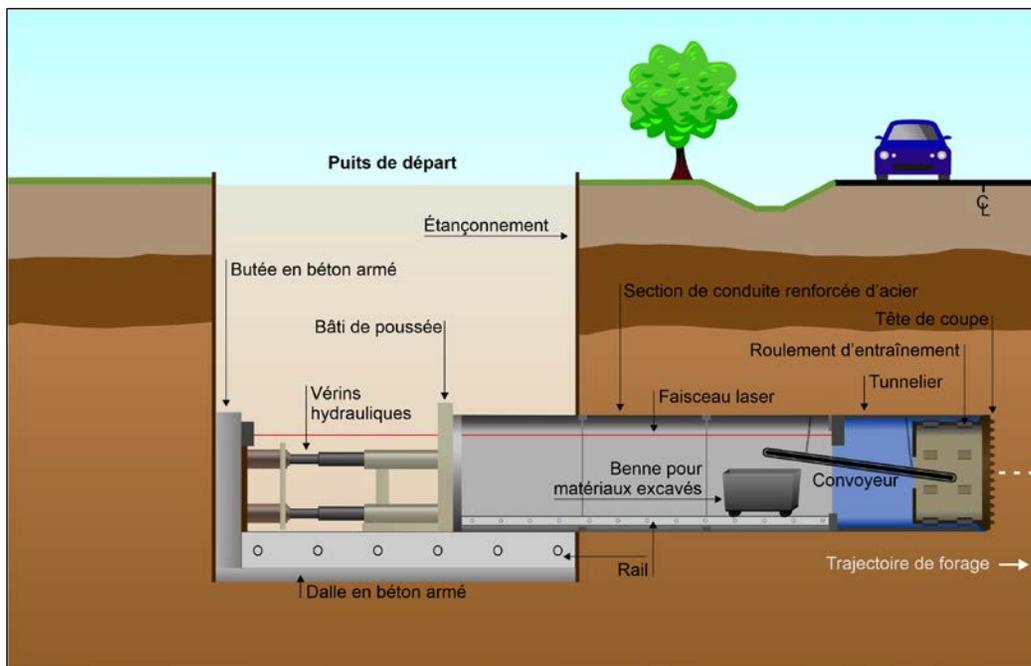
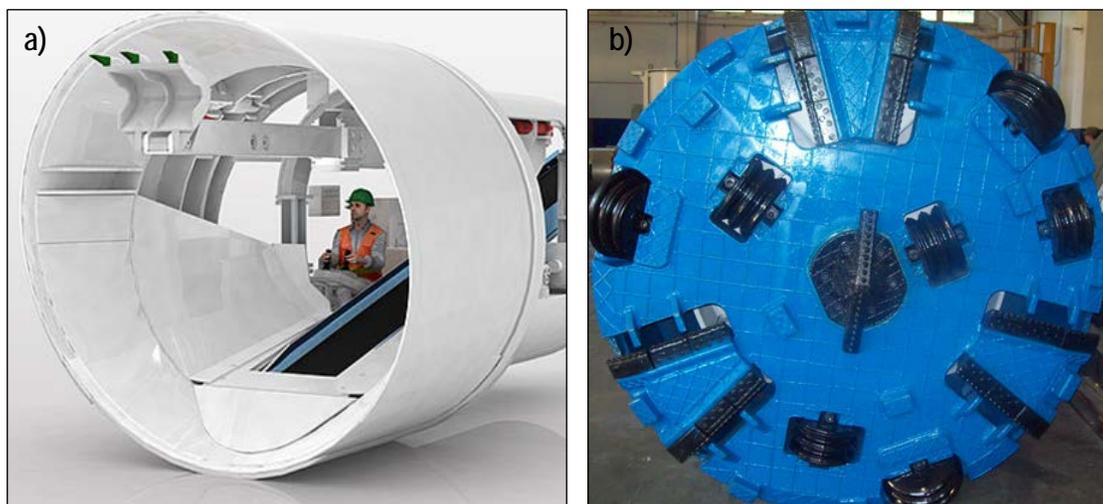


Figure 38 : Schéma de tunnelier standard à bouclier à tête rotative

Le type de module d'excavation (ouvert ou fermé) (figure 39) peut varier considérablement en fonction de la méthode employée pour excaver les sols : méthode **manuelle** ou **mécanisée** (figures 37 et 39a), ou avec une **tête rotative** (figures 38 et 39b). La section 3.10.5 présente les principaux types de modules d'excavation sur le marché. Le choix dépendra notamment de la nature des sols dans lesquels ils sont utilisés et des éléments vulnérables situés à proximité.



Source : a) Herrenknecht AG [www.herrenknecht.com], b) Marathon Drilling [www.marathondrilling.com]

Figure 39 : Exemple de tunneliers standards a) à bouclier ouvert et b) à bouclier fermé

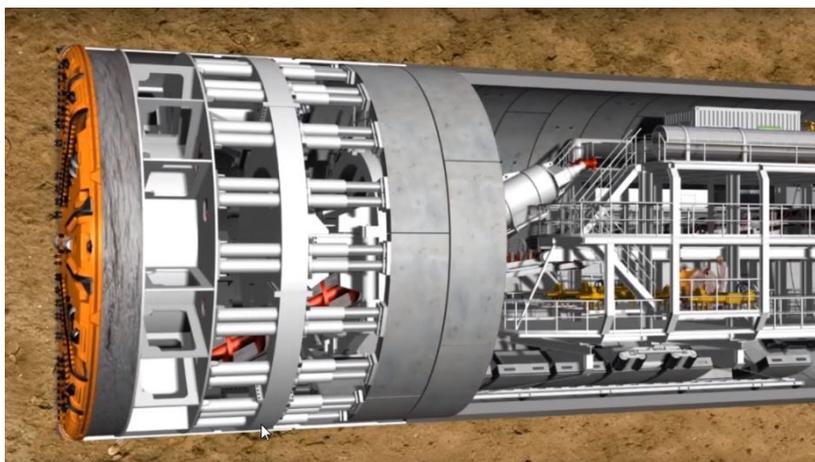
3.10.2.3. Tunneliers utilitaires

Les tunneliers utilitaires (figures 40 et 41) ont généralement un très grand diamètre (~ 2,5 m [8 pi] < \varnothing < 18 m [60 pi]). Ils sont majoritairement utilisés pour de grands projets (ex. : tunnels ferroviaires ou autoroutiers de plusieurs kilomètres de longueur) dans des roches dures ou des sols rocheux et compacts.



Source : Herrenknecht AG [www.herrenknecht.com]

Figure 40 : Exemple de tunnelier utilitaire



Source : Herrenknecht EPB [www.herrenknecht.com]

Figure 41 : Exemple de tunnelier utilitaire en fonction

Les modules d'excavation de ce type de tunnelier utilisent généralement des boucliers à face fermée stabilisée par pression de boue ou par pression de terre (voir la section 3.9.5), mais peuvent également utiliser des boucliers ouverts à excavation mécanique. L'utilisation de ce type de bouclier est cependant marginale.

3.10.3. Déroulement des opérations

3.10.3.1. Microtunneliers et tunneliers standards

Le forage se fait à partir d'un puits de départ vers un puits d'arrivée, tous deux préalablement excavés de part et d'autre de l'obstacle à franchir.

Dans le puits de départ, le tunnelier est placé sur les rails devant la face d'excavation. Le tunnelier est ensuite poussé graduellement par des vérins hydrauliques placés dans le puits de départ. Au fur et à mesure de l'excavation du sol (ou du roc) et de l'avancement du tunnelier, des sections de conduites en béton ou en acier sont placées entre le tunnelier et les vérins hydrauliques. Le tout avance section par section. L'ensemble de la conduite et du module d'excavation glisse dans le trou progressivement excavé. L'injection d'un lubrifiant au pourtour de la conduite permet de réduire la friction et de faciliter la poussée.

Une fois que le module atteint le puits de sortie, il est récupéré. Les sections installées peuvent servir de gaine protectrice dans laquelle sont insérées d'autres conduites ou peuvent agir directement comme conduite principale.

3.10.3.2. Tunneliers utilitaires

La plupart des tunneliers utilitaires sont propulsés par des vérins hydrauliques placés immédiatement derrière le module d'excavation, sur son pourtour, contrairement aux tunneliers standards et aux microtunneliers, qui sont poussés par un système de vérins placé au puits de départ.

Les vérins des tunneliers utilitaires prennent généralement appui contre la conduite préalablement construite (figures 41, 44 et 45). Ainsi, la conduite construite ne glisse pas simultanément avec le tunnelier, comme c'est le cas pour les tunneliers standards et les microtunneliers. Puisque les tunneliers utilitaires peuvent creuser sur plusieurs kilomètres, les forces de friction deviendraient beaucoup trop grandes pour un système de poussée placé au puits de départ. En fait, une fois construite, la conduite reste immobile. Seul le module d'excavation avance. Le tunnel progresse par construction successive de sections de conduites entre le module d'excavation et les sections préalablement construites. Ainsi, aucune section n'est ajoutée dans le puits de départ et poussée par la suite.

Parfois, le système peut se servir d'appuis radiaux suivant les axes horizontal et vertical. Ces deux axes travaillent indépendamment et coulissent le long de l'axe longitudinal du tunnelier, de façon à permettre l'avancement progressif du module (à la manière d'un ver) tout en conservant une pression suffisante sur la face d'excavation.

3.10.4. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 9 présente quelques caractéristiques générales d'application des différents types de tunneliers.

Tableau 9 : Caractéristiques générales d'application des différents types de tunneliers

	Microtunneliers	Tunneliers standards	Tunneliers utilitaires
Diamètre de la conduite (D_{conduite})	200 mm (8 po) à 1 600 mm (60 po)	910 mm (36 po) à 4 000 mm (160 po)	> 1 200 mm (48 po) à plus de 4 000 mm (160 po)
Longueur	150 m (500 pi) à 500 m (1 500 pi)	Quelques kilomètres	De quelques à plusieurs kilomètres
Profondeur minimale	> 1,8 m (6 pi) ou $2D_{\text{conduite}}$	$2D_{\text{conduite}}$	
Conditions géotechniques favorables à l'utilisation de cette technique	Tout type de sol et de roc, pour autant que le choix du module d'excavation soit approprié aux conditions de sol anticipées		

Les principaux avantages des tunneliers sont les suivants :

- technique qui peut être adaptée dans tous les types de sols et de rocs;
- très haut degré de précision;
- réduction du risque de perturbation en surface si les bons équipements sont utilisés;
- possibilité de réaliser de très longues trajectoires courbes ou rectilignes;
- pour les microtunneliers, possibilité de travailler dans des endroits très restreints.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- technique très spécialisée qui requiert une excellente planification et coordination;
- projet potentiellement voué à l'échec si le tunnelier n'est pas adapté aux sols :
 - possibilité de drainage des sols pulvérulents,
 - possibilité de surexcavation et de formation de cavités à l'avant,
 - possibilité de perte de contrôle de la face d'excavation,
 - possibilité de fracturation hydraulique par la pression des fluides de forage;
- nécessité d'utiliser des sections de conduites spécialement conçues pour les tunneliers afin de résister aux pressions de poussée et de permettre l'injection de fluides;

- coinçage du module pouvant nécessiter l'excavation d'un puits de secours au-dessus ou à l'avant du module;
- coûts élevés;
- système aux multiples composants, ce qui augmente la possibilité de bris;
- possibilité de déviation lors de changements lithologiques ou de densité des sols.

3.10.5. Modules d'excavation

Les modules d'excavation se regroupent en deux familles de boucliers :

1. Boucliers à face ouverte;
2. Boucliers à face fermée ou confinée.

Ils se subdivisent ensuite en différentes catégories et sous-catégories selon la méthode d'excavation et le mode de support de la face d'excavation.

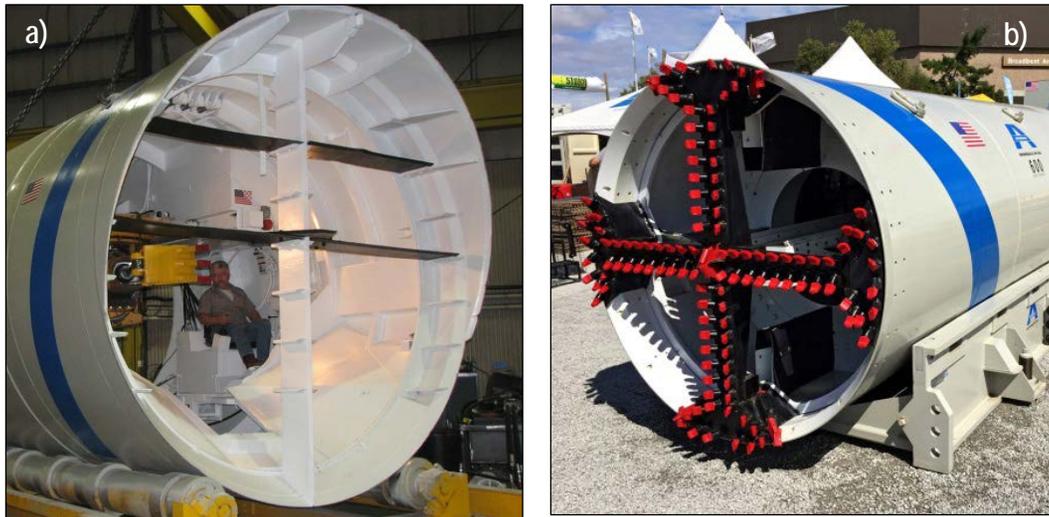
3.10.5.1. Bouclier à face ouverte

Les boucliers ouverts assurent en tout temps la stabilité des parois radiales (bouclier), mais pas celle de la face d'excavation à l'avant, laquelle est exposée (ouverte). L'opérateur du tunnelier a une vue constante sur le front d'excavation. Ces boucliers sont généralement utilisés dans des sols non saturés, dans des sols granulaires stables et bien étalés ainsi que dans des sols cohérents très raides. Ils sont généralement moins coûteux que les boucliers à face fermée parce que leur technologie est plus simple.

Par contre, s'ils sont inappropriés pour les conditions géotechniques, ils peuvent entraîner une perte de contrôle de la face d'excavation et d'importants désordres en surface, en plus de représenter un réel danger pour l'opérateur.

On distingue trois catégories de boucliers à face ouverte selon leur mode d'excavation :

- excavation manuelle (*hand shield*);
- excavation mécanique (*mechanical excavation*) (figure 42a);
- excavation par une tête rotative (*cutting wheel*) (figure 42b).



Source : a) et b) Akkerman [www.akkerman.com]

Figure 42 : Exemple de bouclier ouvert a) à excavation mécanisée et b) à tête rotative

Afin d'assurer un certain niveau de sécurité, le front d'excavation peut être soutenu de quatre manières différentes, selon le type de sol en place, lors de l'utilisation de modules à excavation manuelle et à excavation mécanique :

- **support naturel** (*natural support*) : aucun système de support particulier. La face d'excavation se stabilise selon les propriétés géotechniques du sol (ex. : angle de friction [ϕ], cohésion [c], résistance au cisaillement [S_u]);
- **avec tablettes** (*bench plates*) : tablettes espacées sur lesquelles les sols s'appuient. La face d'excavation se stabilise en s'appuyant sur les multiples tablettes et selon l'angle de friction du sol. Les tablettes scindent donc la face d'excavation en une multitude de faces non supportées (support naturel) plus petites et plus stables (figure 42a);
- **avec étaitements hydrauliques** (*breast plates*) : des plaques de métal peuvent être abaissées et appuyées contre les sols par des vérins hydrauliques pour soutenir la face d'excavation;
- **avec tablettes et étaitements** (*breast and bench plates*) : système qui combine les deux méthodes précédentes.

Les têtes rotatives à face ouverte, essentiellement composées de croisillons dentés, contrôlent sommairement la stabilité du front d'excavation par un certain effet d'entonnoir de la partie avant du module (chambre d'excavation). Les déblais pénètrent dans le module par une ouverture plus petite que le diamètre du front d'excavation (figure 42b). Le front d'excavation possède également des plaques pour contrôler la quantité de déblais qui entre dans le module.

Les principaux avantages des boucliers à face ouverte sont les suivants :

- vue constante sur le front d'excavation;
- technologie plus simple et moins coûteuse que les boucliers à face fermée;
- possibilité de procéder à l'excavation de formes non circulaires (ex. : rectangulaire, arquée);
- enlèvement facilité de blocs qui coincent ou qui bloquent l'avancement.

Les principaux inconvénients des boucliers à face ouverte sont les suivants :

- sensibilité à la perte de contrôle de la face d'excavation;
- grande sensibilité aux problèmes d'écoulement du sol;
- grande sensibilité aux problèmes d'effondrement du sol;
- possibilité de création et de propagation de cavités au front d'excavation;
- plus difficilement utilisable en présence de cailloux et de blocs. Les cailloux et les blocs se brisent et se délogent difficilement. Il faut alors les briser et les déloger manuellement ou au moyen de petites charges explosives;
- possibilité de déviation lors de changements de densité des sols;
- difficilement utilisable sous l'eau dans des matériaux perméables.

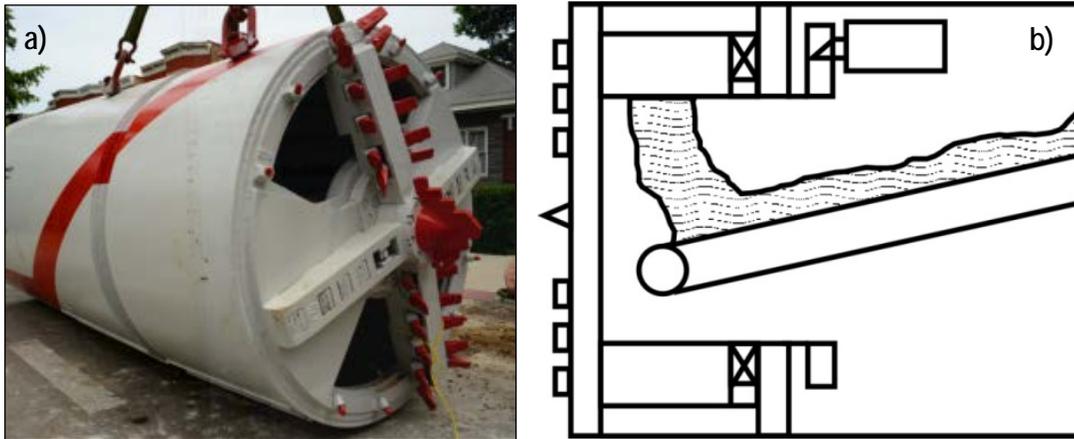
3.10.5.2. Bouclier à face fermée

Les tunneliers à bouclier à face fermée assurent en tout temps la stabilité des parois radiales (bouclier), en plus de celle du front d'excavation à l'avant du module. L'opérateur du tunnelier n'a aucune vue directe sur la face d'excavation. Ces boucliers utilisent essentiellement une tête rotative à face pleine avec quelques ouvertures pour laisser entrer les déblais. Cette tête d'excavation est munie de divers éléments de forage (dents, couteaux, trépan et molettes) disposés selon des configurations variables.

Cette technique peut être utilisée dans tous les types de sols, pour autant que le module et sa tête de forage soient adaptés aux conditions de sol anticipées. Il s'agit d'un ensemble fermé, parfois hermétique (sas). Cette dernière caractéristique dépend du type de bouclier à face fermée utilisé. On distingue trois catégories de boucliers à face fermée en fonction de la manière dont ils contrebalancent la poussée du sol qui s'applique sur la tête rotative :

- **stabilisation mécanique** (*mechanical support*);
- **stabilisation par pression de boue** (*slurry pressure balance*);
- **stabilisation par pression de terre** (*earth pressure balance*).

Les boucliers à stabilisation mécanique (figure 43) sont comparables aux boucliers ouverts à tête rotative. La différence majeure est le degré d'ouverture de la tête de forage, qui est beaucoup plus petit. Ainsi, en raison de l'aspect « fermé », la pression du sol est contrebalancée par la paroi métallique de la tête de forage. Certaines têtes de forage permettent d'ajuster le degré d'ouverture au fur et à mesure des travaux, alors que d'autres ont un pourcentage d'ouverture fixe. Contrairement aux systèmes à stabilisation par pression de boue ou de terre, il n'y a pas de double paroi dans le cas d'un bouclier à stabilisation mécanique, c'est-à-dire que l'opérateur n'est pas séparé de la chambre d'excavation. L'opérateur a donc une vue sur les matériaux qui passent par les ouvertures, mais la vue sur la face d'excavation est limitée au degré d'ouverture de la tête rotative.



Source : a) J. Crocker par l'entremise de Wikimedia Commons, b) Hung et collab. (2009)
[\[https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A2014-06-30_7356x4904_chicago_tbm.jpg\]](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A2014-06-30_7356x4904_chicago_tbm.jpg)

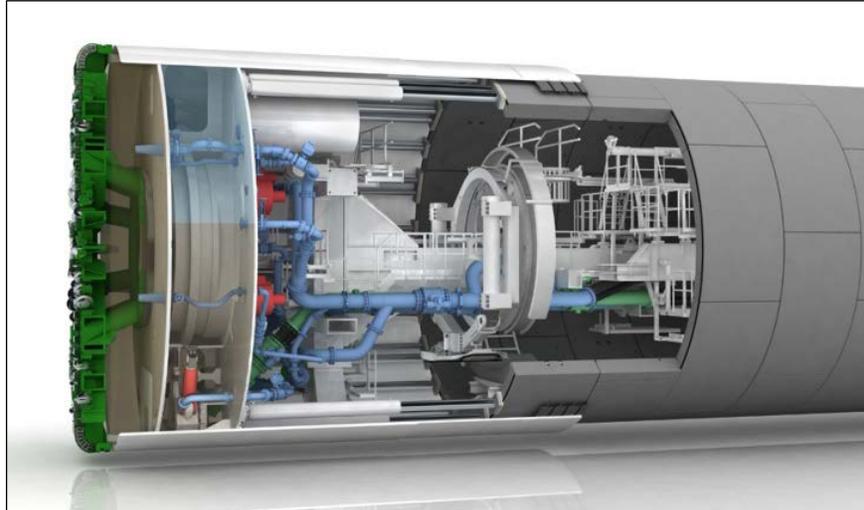
Figure 43 : Exemple de bouclier fermé stabilisé mécaniquement

Ces appareils nécessitent de puissants moments de rotation puisque la face et les coupeurs sont en contact constant avec le sol. Ils sont généralement utilisés dans des sols non saturés puisque la gestion de l'eau peut être problématique, notamment en présence de sols sujets à l'écoulement. Pour que les déformations soient minimisées, le degré d'ouverture de la tête rotative et la pression de contact doivent être optimisés selon les conditions de sol anticipées.

Ce type de module ainsi que les boucliers à stabilisation par pression de boue ou de terre sont très souvent munis d'un cône de broyage (*cone crusher*) à l'intérieur de la chambre d'excavation, derrière la plaque frontale, ce qui permet de briser les cailloux ou les plus gros fragments qui y entrent.

Les boucliers à stabilisation par pression de boue (figure 44) utilisent un mélange d'eau et d'additifs, généralement de la bentonite, pour créer une boue visqueuse permettant de contrebalancer les pressions externes exercées par les sols et l'eau. Cette boue est injectée à la face d'excavation et mélangée avec les déblais. Le tout est pompé à la base et ensuite évacué vers une station de séparation, laquelle sépare les déblais de la boue de forage, qui est par la suite réinjectée. Il s'agit d'un système hermétique dit « à double paroi » (sas) séparant la chambre d'excavation pressurisée du reste du bouclier. L'opérateur n'a aucune vue sur la face d'excavation ni sur les matériaux qui entrent dans la tête de forage et qui sont évacués vers la station de séparation. La tête rotative est généralement très peu ouverte, de sorte qu'elle peut également fournir un support mécanique en cas de changement soudain de la pression externe environnante.

Ces types de boucliers doivent être utilisés à une profondeur suffisante pour éviter les problèmes de fracturation hydraulique. Même s'il s'agit de systèmes fermés, ces modules d'excavation permettent tout de même l'accès à la face d'excavation par l'intérieur du bouclier, notamment pour déloger des blocs ou des cailloux trop gros.



Source : Herrenknecht AG [www.herrenknecht.com]

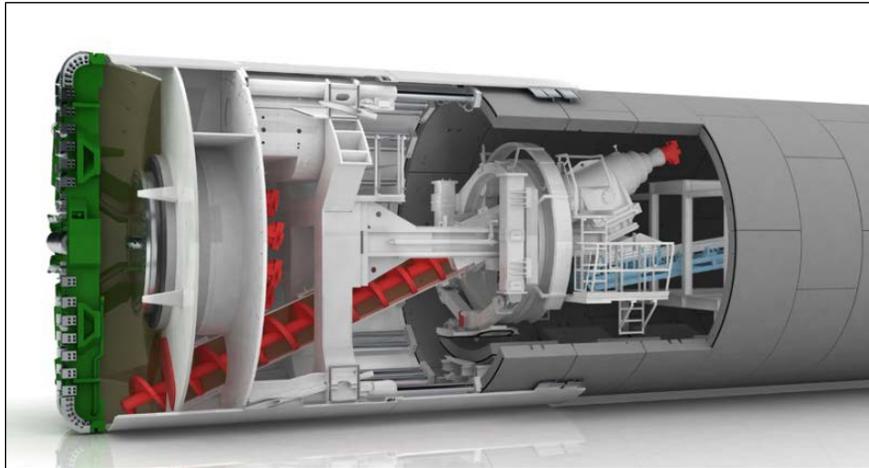
Figure 44 : Exemple de bouclier fermé stabilisé par pression de boue

Ces boucliers peuvent généralement être utilisés dans tous les types de sols et de rocs. Ils sont cependant idéaux dans les sols granulaires saturés puisque ces sols absorbent aisément la boue de forage, ce qui favorise grandement la stabilité au front d'excavation. De plus, ces matériaux sont facilement séparables lors des opérations de recyclage de la boue de forage.

Bien que les sols argileux se tiennent très bien à la face d'excavation, ils sont très difficiles à séparer de la boue de forage et collent sur les composants de la tête de forage, ce qui peut mener à la congestion complète de la chambre d'excavation. L'ajout de certains additifs (ex. : défloculants) peut aider à réaliser les manœuvres.

Dans les sols très grossiers, tels que les mélanges de graviers et de cailloux très perméables, des difficultés peuvent survenir, car ces matériaux s'effondrent facilement et peuvent également lessiver la boue en suspension injectée par le tunnelier. Des mesures particulières, comme l'ajout d'additifs à la boue ou la préinjection dans les sols pour en diminuer la perméabilité, peuvent s'avérer nécessaires.

Les boucliers à stabilisation par pression de terre (figure 45) utilisent les déblais qui entrent dans la chambre d'excavation pour contrebalancer les pressions externes. Des additifs sont ajoutés, et des composants de la chambre d'excavation malaxent les additifs et les sols de manière à ce que le tout forme une pâte de consistance molle à très molle à l'intérieur de la cloison étanche. Cette pâte est graduellement retirée au moyen d'une vis sans fin placée à la base de la chambre d'excavation pressurisée. La vis sans fin achemine la pâte depuis la chambre d'excavation pressurisée vers l'arrière du tunnelier, où elle décharge la pâte sur un convoyeur. Ce dernier évacue ensuite la pâte vers la sortie du tunnel.



Source : Herrenknecht AG [www.herrenknecht.com]

Figure 45 : Exemple de bouclier fermé stabilisé par pression de terre

Tout comme le bouclier à stabilisation par pression de boue, le bouclier à stabilisation par pression de terre est un système hermétique à double paroi (sas) séparant la chambre d'excavation du reste du bouclier. L'opérateur n'a aucune vue sur la face d'excavation ni sur les matériaux qui entrent dans la tête de forage. Cependant, contrairement à l'opérateur d'un bouclier à stabilisation par pression de boue, l'opérateur d'un bouclier à stabilisation par pression de terre a au moins une vue sur la pâte qui est éjectée de la vis sans fin et déchargée sur le convoyeur.

La pression dans la chambre d'excavation est contrôlée selon les fluctuations du taux d'évacuation de la pâte par la vis sans fin. La tête rotative est généralement très peu ouverte, de sorte qu'elle peut également fournir un support mécanique en cas de changement soudain de la pression externe environnante.

Les boucliers à stabilisation par pression de terre sont idéalement employés dans les sols fins très peu perméables, voire imperméables, comme les silts et les argiles. Les sols ne doivent pas contenir de blocs ou de cailloux. Ces boucliers peuvent cependant être utilisés dans les sables contenant plus de 30 % de particules fines. Tout repose sur la possibilité de créer une pâte avec les déblais. Pour que la création de cette pâte soit assurée, ces tunneliers doivent être utilisés sous l'eau.

L'accès à la face d'excavation est plus difficile que dans le cas des boucliers à stabilisation par pression de boue, puisque le nettoyage de la chambre d'excavation est un processus plus complexe et plus lent pour les boucliers à stabilisation par pression de terre. Il n'y a cependant pas de danger de surpression ou de fracturation hydraulique.

Les principaux avantages des boucliers fermés sont les suivants :

- obtention d'un contrôle précis de la face d'excavation;
- adaptation à pratiquement toutes les conditions de forage si le bon système de stabilisation est utilisé;
- multiplicité et adaptabilité des têtes de forage.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- aucune vue ou vue partielle sur la face d'excavation;
- technologie nécessitant plusieurs systèmes complexes;
- coûts élevés;
- possibilité de fracturation hydraulique avec les boucliers qui nécessitent l'injection de boue de forage;
- difficultés de réparation.

3.11. Forage au microtunnelier dirigé (*directional microtunneling* ou *Direct Pipe*[®])

3.11.1. Description

Le forage au microtunnelier dirigé est une technique sans tranchée qui permet d'installer une nouvelle conduite en partant de la surface et en ressortant à la surface de l'autre côté de l'obstacle. Cette technique est une combinaison du forage dirigé et du forage par microtunnelier. Il s'agit d'une technique utilisée notamment par l'industrie pétrolière pour les pipelines. Cette technique permet également de sortir dans un cours d'eau (émissaire) ou un puits d'arrivée. Le mode d'insertion est de type « extraction mécanique ».

3.11.2. Déroulement des opérations

D'immenses cylindres hydrauliques (*pipe thruster*) poussent la conduite en acier préassemblée dans le sol. À la conduite est rattachée une tête de forage dirigée comparable à un microtunnelier (figure 46). Le bouclier en est fréquemment un à stabilisation par pression de boue, qui injecte de la boue de forage au front d'avancement. Les résidus de forage excavés sont éjectés sous forme de boue par l'intérieur de la conduite à l'aide d'un circuit de conduits. Le module d'excavation, placé à l'avant, est commandé à distance au moyen d'un système de pilotage situé à l'extérieur de l'excavation.



Source : Herrenknecht AG [www.herrenknecht.com]

Figure 46 : Forage au microtunnelier dirigé

Cette technique demande une logistique particulière pour que les longues sections de conduite préassemblées qui suivent à l'arrière des vérins soient soutenues et enlignées avec la trajectoire d'entrée. En raison de l'angle d'entrée

dans le sol et du rayon de courbure des sections, des supports doivent être installés pour éviter que la conduite cède (figure 47).



Source : Herrenknecht AG [www.herrenknecht.com]

Figure 47 : Forage au microtunnelier dirigé – Supports pour la conduite

3.11.3. Applicabilité, avantages et inconvénients

Le tableau 10 présente quelques caractéristiques générales d’application du microtunnelier dirigé.

Tableau 10 : Caractéristiques générales d’application du microtunnelier dirigé

Diamètre nominal de la conduite (D_{conduite})	500 mm (20 po) à 1 600 mm (60 po)
Longueur de forage	$\leq 2\,000$ m
Profondeur minimale requise	$\sim 3D_{\text{conduite}}$
Conditions géotechniques favorables à l’utilisation de cette technique	Tout type de sol et de roc, pour autant que le choix du module d’excavation soit approprié aux conditions de sol anticipées

Les principaux avantages du microtunnelier dirigé sont les suivants :

- degré de précision élevé;
- installation en une étape des conduites de pipeline préfabriquées et testées;
- délai d'installation court et procédé économique pour les très longues distances de forage;
- peu de coûts ou de temps associés à la construction d'un puits d'accès;
- bon fonctionnement en présence de cailloux et de blocs;
- technique ne nécessitant pas une profondeur aussi importante que le forage dirigé, car la conduite maintient les parois du trou de forage (moins de pression d'injection);
- possibilité d'adapter les outils de coupe selon les conditions géotechniques anticipées.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- beaucoup d'espace nécessaire du côté des équipements de poussée;
- technique très spécialisée requérant une excellente planification et de la coordination;
- possibilité que le projet soit voué à l'échec si le tunnelier n'est pas choisi judicieusement;
- contrôle partiel de la face d'excavation si la technique n'est pas adaptée;
- possibilité de déviation lors de changement de densité des sols;
- possibilité de fracturation hydraulique avec l'utilisation d'un module d'excavation dont le bouclier est à stabilisation par pression de boue si la pression exercée au front de coupe est trop importante;
- coûts très élevés.

4. DANGERS POTENTIELS POUR LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

Maintenant que les principes généraux du fonctionnement des différentes techniques sans tranchée ont été abordés, les prochaines sections traiteront de divers dangers liés aux techniques et pouvant éventuellement avoir des répercussions sur les ouvrages du Ministère.

Les dangers seront d'abord énumérés et expliqués. Par la suite, ils seront mis en relation avec les techniques présentées. Finalement, ils seront mis en relation avec les différents types de sols et de conditions géotechniques. Certains de ces dangers ont déjà été mentionnés aux sections précédentes, dans les sections abordant les inconvénients liés aux techniques.

4.1. Dangers pouvant affecter les ouvrages

Les différents dangers énumérés et présentés ci-après concernent essentiellement ceux qui peuvent affecter les infrastructures du Ministère. L'évaluation des dangers ne vise pas ceux liés à la logistique, à la faisabilité, à l'intégrité du service public à installer, à l'intégrité des autres services publics souterrains ou à la sécurité du travailleur. Ces aspects ne font pas partie de la présente section ni de l'objectif de ce rapport. Cependant, certains des dangers énumérés peuvent également avoir des répercussions sur ces aspects.

De plus, certains dangers présentés dans les prochaines sections ne représentent pas forcément une menace directe pour les ouvrages du Ministère, mais peuvent être à l'origine d'un autre danger potentiellement dommageable. Il est donc pertinent de les présenter.

Les dangers pouvant menacer directement ou indirectement les ouvrages du Ministère sont :

- l'affaissement en surface;
- la fracturation hydraulique;
- la formation de cavités ou de vides sous la chaussée;
- la décompaction du sol;
- le soulèvement ou le poinçonnement du sol;
- la contamination de l'infrastructure par des particules fines;
- le lessivage et le remplacement du sol;
- la déviation de la trajectoire;
- l'abandon d'un trou de forage;

- le coinçage ou le refus d'avancement du forage;
- la perte de contrôle de la face d'excavation;
- un glissement de terrain.

4.1.1. Affaissement en surface

La réalisation d'un forage horizontal peut conduire à des affaissements du terrain en surface, lesquels se produisent au-dessus de la conduite installée. Les causes de ces affaissements peuvent être multiples. Il existe deux types d'affaissements en surface :

1. Les affaissements ponctuels : ces affaissements (figure 48) se répercutent en surface par l'effondrement de cavités formées lors du forage ou par le soutirage de matériaux pendant les travaux. L'ampleur de la déformation est imprévisible et dépendra de l'ampleur des cavités formées ou du soutirage. Ce type d'affaissement est essentiellement lié à une surexcavation non contrôlée au front d'avancement de la conduite, soit par l'utilisation d'une technique inappropriée pour les conditions géotechniques rencontrées, soit par le recours à de mauvaises procédures opérationnelles.



Figure 48 : Problème d'affaissement ponctuel

2. Les affaissements systématiques : ces affaissements se manifestent sous la forme d'un creux dont l'ampleur est relativement faible tout le long de la conduite installée. L'affaissement maximal se trouve directement au-dessus de la conduite et s'atténue rapidement sur les côtés (figure 49).

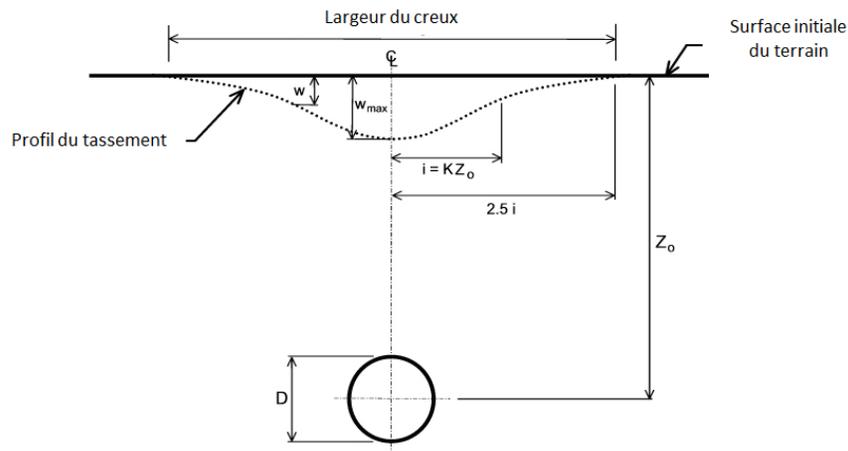


Figure 49 : Problème d'affaissement systématique

Cet affaissement est dit « systématique » puisqu’il est lié à la manière dont le système (la technique) fonctionne. Ce genre d'affaissement se produit généralement avec les techniques qui emploient une certaine forme d'alésage du trou. Après l'installation de la conduite, l'espace annulaire entre la conduite et le trou alésé s'effondre, ce qui se traduit par une déformation en surface sur toute la longueur de la conduite (figure 50).

La déformation peut se produire en cours de forage ou avec le temps. L'injection d'un coulis cimentaire ou bentonitique dans l'espace annulaire permet de minimiser, voire d'éviter le développement de ce problème, sauf dans le cas du forage dirigé. Dans ce dernier cas, une telle injection est très difficile, voire impossible à faire.



Source : NOEX Ingénierie sans tranchée

Figure 50 : Problème d'affaissement systématique

4.1.2. Fracturation hydraulique et fissuration

La fracturation hydraulique et la fissuration (figure 51) sont susceptibles de se produire uniquement avec les techniques qui injectent des fluides de forage, surtout lors de l'utilisation du forage dirigé. Cela survient lorsque la pression d'injection devient supérieure à la pression des terres.



Figure 51 : Problème de fissuration hydraulique

Le fluide sous pression fissure alors le sol à l'endroit où la résistance est la moindre, soit généralement au-dessus de la conduite puisque c'est à cet endroit que le poids des terres est le plus faible. La fissure et le liquide finissent par atteindre la surface où la pression se dissipe. Dans le domaine, ce phénomène est couramment appelé *claquage* (*frac-out*).

Ce problème survient généralement lorsque la profondeur d'enfouissement de la conduite est insuffisante pour la pression d'injection, lorsque la pression d'injection n'est pas contrôlée ou lors d'une mauvaise utilisation de la technique (ex. : alésage trop petit pour l'évacuation des débris).

4.1.3. Formation de cavités sous la chaussée

La formation de cavités sous la chaussée peut être dangereuse pour l'utilisateur de la route. Ces cavités se traduisent par un affaissement en surface ou une décompaction du sol et de la fondation (figure 52). L'effondrement d'une cavité peut être soudain.

Il s'agit d'un problème qui survient lorsqu'il y a une surexcavation (excavation non contrôlée) au front d'avancement du forage. Cette surexcavation peut être détectée par des comportements évidents du sol et du forage en cours de travaux, alors qu'elle peut également passer inaperçue si aucune attention particulière n'est portée tout au long du forage. Par exemple, lors de l'utilisation du forage à la tarière, si l'opérateur laisse tourner la vis sans faire avancer la gaine assez rapidement, une trop grande quantité de sols peut être excavée sans qu'il y ait automatiquement des répercussions en surface. Dans un tel cas, il faut porter attention à la quantité de déblais extraite en fonction du taux d'avancement.



Source : MTQ (2018)

Figure 52 : Problème d'apparition d'une cavité en surface

4.1.4. Décompaction

La décompaction du sol se produit lorsque le sol cherche à combler une cavité ou l'espace annulaire entre le trou de forage et la gaine. Dans les sols granulaires ayant un certain degré de compaction, les effondrements pour combler le vide auront pour effet de décompacter le sol (figure 53), de sorte que le volume de sol nécessaire pour combler le vide sera inférieur au volume initial du vide (phénomène de foisonnement).



Figure 53 : Problème de décompaction

La décompaction aura cependant pour effet d'atténuer, voire d'éviter l'affaissement en surface. Le degré de décompaction dépendra de l'ampleur du vide à combler et de la compacité initiale du sol. Un sol très dense permet un degré de décompaction plus élevé qu'un sol très lâche qui a déjà un très faible degré de compacité.

Si la décompaction du sol se produit uniquement près de la conduite, il y aura peu de répercussions en surface. Par contre, si elle remonte jusqu'à la structure de la chaussée, cette dernière peut perdre significativement sa capacité portante. Cela se traduira à moyen terme par des désordres (affaissement, décohesionnement, fissuration, nid-de-poule, etc.) dans la chaussée.

4.1.5. Soulèvement ou poinçonnement du sol

Le soulèvement ou le poinçonnement du sol peut créer une bosse ponctuelle (figure 54) ou un dos-d'âne en surface du terrain en certaines circonstances lors de la réalisation d'un forage ou d'un fonçage horizontal. Cela se produit notamment lorsque le sol à l'avant du forage est poussé au lieu d'être excavé.

De telles situations peuvent se produire lorsque la poussée est excessive par rapport au taux d'excavation et que le poids du sol ne suffit pas pour contrer cette poussée, lorsqu'un bloc se trouve sur la trajectoire de la gaine et est repoussé vers l'extérieur, lors d'une déviation ascendante de la gaine ou lors d'un mauvais contrôle de la pression d'injection des fluides de forage. D'ailleurs, le soulèvement accompagne souvent un problème de fracturation hydraulique.



Figure 54 : Problème de soulèvement

4.1.6. Contamination de l'infrastructure par des particules fines

La contamination par des particules fines peut uniquement se produire avec les techniques qui injectent une boue de forage au front d'avancement ou le long de la gaine. Ces fluides de forage sont essentiellement composés de particules fines et s'infiltrent dans les pores du sol.

Une contamination localisée au pourtour de la gaine est souhaitable puisqu'elle aide à soutenir le trou de forage et contribue à réduire le frottement. Par contre, lorsque les pressions d'injection sont trop grandes ou que la profondeur d'enfouissement est insuffisante, l'infiltration devient plus importante.

Elle est néfaste lorsqu'elle atteint l'infrastructure routière (sous-fondation et fondation). La figure 55 illustre un exemple de ce problème mis en évidence dans la paroi d'un puits d'excavation.



Figure 55 : Problème de contamination par des particules fines

Les particules fines peuvent augmenter la gélivité du sol, créer des problèmes de soulèvement au gel et réduire la capacité de support de la route. Ce problème se produit notamment en cas de fracturation hydraulique. On peut également voir sur la figure 55 que la contamination est accompagnée de soulèvement.

4.1.7. Lessivage et remplacement de sol

Le lessivage et le remplacement de sol peuvent, eux aussi, se produire uniquement avec les techniques qui utilisent des fluides de forage. En fait, lorsque la pression est telle qu'il se produit une fracturation hydraulique, l'infiltration de boue de forage engendre un écoulement qui peut entraîner avec lui le sol de fondation et le remplacer.

Le remplacement dépendra de l'ampleur de l'écoulement, du type de sol et de sa facilité à être transporté. Pour qu'il y ait écoulement et remplacement, il faut qu'un point de décharge existe, c'est-à-dire une résurgence à un endroit, généralement en surface du terrain, pour évacuer les matériaux remplacés. C'est pour cette raison que le remplacement se produit essentiellement lorsqu'il y a de la fracturation hydraulique.

L'intensité du phénomène de remplacement est cependant difficile à diagnostiquer, car on ne peut pas l'observer directement. Par exemple, sur la figure 55, on peut voir un problème de soulèvement et de contamination par des particules fines en raison d'un problème de fissuration hydraulique. On voit également le point de décharge dans le haut du puits. On peut donc supposer qu'il y a eu un certain degré de remplacement le long de ce chemin d'écoulement, mais il est difficile d'en quantifier l'ampleur.

Finalement, le remplacement de sol survient également lorsqu'on alèse le trou de forage plus que ce qui est nécessaire, le tout au moyen de techniques qui se servent de boue de forage pour évacuer les déblais.

4.1.8. Déviation de la trajectoire

Lors de la réalisation d'un forage horizontal ou d'un forage dirigé, la trajectoire du forage peut dévier de celle qui est souhaitée initialement pour la conduite. Les changements de trajectoire peuvent être occasionnés par plusieurs facteurs, notamment la présence de blocs, le contraste de compacité ou de densité entre deux types de sols ou de rocs, une poussée trop forte sur le système et la longueur du forage.

Certaines techniques présentent moins de risque de déviation que d'autres puisqu'il est possible de contrôler ou de guider la direction du forage, notamment les techniques de forage dirigé, de forage au tunnelier (tunnelier standard, microtunnelier) et de forage au microtunnelier dirigé. Certaines techniques peuvent inclure un tube pilote ou des ailettes le long de la gaine pour tenter de minimiser les déviations (tarière, percussion).

Les déviations de trajectoire peuvent représenter une menace pour les infrastructures du Ministère. Pour les routes, une déviation ascendante peut causer d'importants problèmes de soulèvement. Aussi, si la trajectoire dévie de manière incontrôlée, les équipements pourraient heurter les structures ou les services souterrains (figure 56) situés à proximité.

Finalement, une déviation excessive de la gaine peut mener à l'abandon complet du forage s'il ne répond plus aux besoins du service à installer ou si la poursuite des travaux est impossible.



Source : NOEX Ingénierie sans tranchée

Figure 56 : Service souterrain endommagé lors d'un forage

4.1.9. Abandon du trou de forage

En raison d'un problème majeur forçant l'abandon du trou de forage, ce dernier doit être géré adéquatement. Sans représenter un danger direct pour la route, un forage abandonné sans mesures particulières conduirait vraisemblablement à d'importants désordres en surface, tels que des affaissements, des cavités ou de la décompaction, selon la profondeur et le type de sol.

En fonction du trou de forage abandonné et des conditions géotechniques sur place, ces désordres pourraient survenir rapidement ou graduellement sur la chaussée. Il devient donc important de ne pas laisser ouverts les trous de forage abandonnés. Ceux-ci doivent être comblés le plus adéquatement possible. Les normes du Ministère en vigueur contiennent des exigences à cet effet.

4.1.10. Coinçage ou refus d'avancement du forage

Le coinçage ou le refus d'avancement se produit lorsqu'un obstacle, comme un gros bloc (figures 57 et 58), se trouve sur la trajectoire du forage. Le refus d'avancement peut également résulter du bris d'un composant de l'équipement utilisé, qui ne peut alors plus accomplir sa fonction. Il peut aussi être le résultat d'une trop grande friction entre la gaine et le sol si le sol la serre trop.

Il devient alors impossible de poursuivre l'excavation ou l'insertion de la gaine sans une intervention majeure au front d'avancement, soit par l'intérieur de la gaine, soit à partir de la surface au-dessus du front d'avancement (*rescue shaft*). En certaines circonstances, cela peut forcer l'abandon du trou de forage.



Source : Marathon Drilling [www.marathondrilling.com]

Figure 57 : Refus d'avancement du forage en raison d'un bloc sur la trajectoire



Source : NOEX Ingénierie sans tranchée

Figure 58 : Coinçage de la tarière à cause un bloc

4.1.11. Perte de contrôle de la face d'excavation

La perte de contrôle de la face d'excavation se traduit par des entrées d'eau et de sols considérables et incontrôlées dans le trou de forage dirigé, la gaine (fonçages ou forages horizontaux) ou le module d'excavation d'un tunnelier. Cette perte de contrôle représente un danger significatif pour les ouvrages du Ministère puisqu'elle conduit inévitablement à certains des problèmes mentionnés précédemment, comme des problèmes d'affaissement, de formation de cavités et de décompaction. Elle peut également conduire à l'abandon d'un trou de forage. Dans le cas des tunneliers à bouclier ouvert, cela représente également un danger non négligeable pour le travailleur qui se trouve dans le module d'excavation.

La perte de contrôle de la face d'excavation se produit généralement lors de l'utilisation d'une technique inappropriée aux conditions géotechniques rencontrées ou lors du recours à de mauvaises procédures opérationnelles. Dans le cas des tunneliers, ce problème peut survenir lorsque le type de module d'excavation utilisé est inapproprié. Dans un tel cas, ce n'est donc pas la technique qui est en cause, mais l'équipement choisi.

La perte de contrôle se traduit essentiellement par des phénomènes d'effondrement de paroi, d'écoulement du sol et d'infiltration d'eau majeure. L'effondrement du sol survient essentiellement dans les sols granulaires de lâches à compacts non saturés ou dans les sols à granulométrie grossière ou uniforme, lesquels soutiennent plus difficilement une paroi d'excavation subverticale.

L'écoulement du sol survient dans les mêmes types de sols, mais lorsque ceux-ci sont saturés. Il y a alors envahissement de la gaine par un mélange d'eau et de sols, à la manière d'une coulée de boue. L'écoulement de sol peut aussi se produire en présence d'argile molle sensible, qui tend à se comporter comme un liquide lorsqu'elle est remaniée.

Quant aux infiltrations d'eau incontrôlées, elles peuvent se produire dans des sols saturés grossiers très perméables, notamment les sables et les graviers propres. Des veines d'eau peuvent également être rencontrées ponctuellement dans des sols plus perméables à un endroit où un chemin préférentiel d'écoulement s'est créé.

4.1.12. Glissement de terrain

À ce jour, seulement quelques cas de glissement de terrain ont été répertoriés à proximité desquels des travaux en technique sans tranchée se déroulaient. Toutefois, le rôle qu'a pu jouer la technique sans tranchée n'est pas bien établi. Il est cependant raisonnable de croire que de tels travaux pourraient avoir une incidence sur la stabilité des talus adjacents aux travaux, surtout si l'état de stabilité de ceux-ci est déjà précaire.

L'apport supplémentaire d'eau dans les sols est un facteur aggravant, lequel tend à faire diminuer la réserve de stabilité du talus. Ainsi, ce danger est surtout susceptible de se produire lors de l'utilisation de techniques qui injectent des fluides sous pression. Les pressions exercées peuvent ainsi devenir suffisantes pour avoir une influence sur l'état de stabilité du talus.

De plus, en présence de sols cohérents (argile), le développement d'une fissure en crête de talus associée à un problème de fracturation hydraulique pourrait aussi diminuer la réserve de stabilité d'un talus si la fissure se produit en crête du talus.

Les vibrations induites par certaines méthodes pourraient également représenter un facteur aggravant.

Le danger de glissement de terrain sera d'autant plus présent que le diamètre de la conduite à installer sera grand.

4.2. Dangers liés aux différentes techniques sans tranchée

Les dangers présentés précédemment ne sont pas attribuables à toutes les techniques sans tranchée et en toutes circonstances. Certains sols sont plus vulnérables et certaines techniques sont plus propices au développement de ces problèmes.

Le tableau 11 présente un résumé des dangers les plus courants liés à chacune des techniques sans tranchée de même que des moyens de contrôle pour les éviter.

4.3. Dangers liés aux types de sols

Certains dangers énumérés précédemment peuvent être directement attribuables à un type de sol en particulier. Ainsi, des dangers peuvent se produire dans certains types de sols, alors qu'ils ne surviendront pas dans d'autres.

Le tableau 12 présente les dangers potentiels en fonction des types de sols, ainsi que le niveau de risque général qui leur est associé.

Tableau 111 : Dangers liés aux différentes techniques sans tranchée

Technique	Danger	Explication	Moyen de contrôle
Fonçage de tiges	Soulèvement en surface Déviation Refus d'enfoncement	Cette technique diminue les dangers liés aux sols puisque les tiges et les conduites sont insérées sans excavation du sol. Des problèmes de soulèvement peuvent se produire en cas de déplacement du sol par l'aléreur. Les déviations ne peuvent pas être corrigées.	Veiller à ce que la profondeur d'enfoncement soit suffisante Utiliser un aléreur qui convient aux sols à excaver et au diamètre de la conduite à installer Utiliser la technique dans des sols sans cailloux ni blocs
Fonçage par poinçonnement (torpille)	Soulèvement en surface Déviation Refus d'enfoncement	Le forage à la torpille est l'une des techniques les moins prévisibles puisqu'une fois la torpille lancée, l'opérateur n'a plus le contrôle de celle-ci et peut difficilement connaître la trajectoire exacte qu'elle empruntera ou savoir si elle a dévié de sa trajectoire initiale.	Utiliser la technique dans des sols contenant de faibles proportions de gravier Utiliser la technique dans des sols sans cailloux ni blocs
Forage dirigé	Fracturation hydraulique Affaissement en surface Contamination par des particules fines Soulèvement Remplacement Glissement de terrain	Cette technique ne permet pas de contrôler ce qui se passe à la face d'excavation. L'évacuation des déblais et la stabilisation du trou se font au moyen de l'injection de boue de forage. Le contrôle de l'angle d'entrée par rapport à la surface du sol permet d'assurer que le trou de forage est comblé de boue de forage en permanence.	Utiliser un dispositif de centrage Contrôler et surveiller les pressions d'injection (par l'opérateur) Forer avec de la boue de forage, jamais qu'avec de l'eau Veiller à ce que la profondeur d'enfoncement soit suffisante Utiliser un angle d'entrée adéquat Entre les travaux et la crête d'un talus, conserver une distance de séparation égale ou supérieure à une fois la hauteur du talus
Fonçage horizontal par percussion	Soulèvement en surface Déviation Coinçage Formation de cavités Ovalisation de la gaine	Cette technique diminue les dangers d'affaissement en surface puisque la gaine est insérée complètement avant l'excavation du sol. Des problèmes de soulèvement peuvent se produire par formation d'un bouchon dans la gaine ou au front de celle-ci. Les déviations ne peuvent pas être corrigées. La présence de blocs peut rendre cette technique inutilisable.	Surveiller les taux d'enfoncement Éviter l'évidage complet de la gaine en cours d'exécution Veiller à ce que la profondeur d'enfoncement soit suffisante Utiliser un renforcement de paroi à l'extrémité de la gaine

Technique	Danger	Explication	Moyen de contrôle
Forage horizontal à la tarière	Affaissement Formation de cavités Déviation Coinçage	Cette technique excave les sols par l'intérieur de la gaine au fur et à mesure de l'avancement. Elle ne permet généralement pas de contrôler les quantités de sols excavées au front d'avancement (effondrement, écoulement). Les déviations ne peuvent pas être corrigées.	Surveiller la quantité de matériaux excavée en fonction de la vitesse de progression du forage Contrôler la rotation de la tarière en fonction de la vitesse de progression du forage Utiliser des équipements permettant de contrôler la stabilité de la face d'excavation et la quantité de matériaux excavée
Tube pilote	Affaissement Soulèvement en surface Déviation Coinçage Formation de cavités	Les dangers liés à la technique du tube pilote dépendront de la technique employée pour le fonçage ou le forage de la gaine. Cette technique diminue les dangers de déviation.	Utiliser les moyens de contrôle associés à la technique utilisée pour l'installation de la gaine (fonçage à percussion ou forage horizontal à la tarière)
Forage horizontal par alésage (roc)	Coinçage Formation de cavités Décompaction Affaissement en surface Déviation	Cette technique, bien qu'elle soit réalisée essentiellement dans un roc sain et solide, n'utilise pas de gaine protectrice. Des effondrements peuvent se produire dans des zones un peu plus fracturées. La formation de cavités peut survenir lors de la rencontre d'un coin de sol ou de fractures ouvertes communiquant avec le sol sus-jacent.	Éviter de trop aléser le trou de forage Injecter un coulis cimentaire pour combler l'espace annulaire Veiller à ce que la profondeur d'enfouissement soit suffisante
Forage horizontal au marteau fond-de-trou	Soulèvement Déviation Coinçage	En l'absence d'une gaine, les mêmes dangers que ceux liés à la technique par alésage dans le roc peuvent survenir, en plus des dangers propres à cette technique, surtout si une combinaison de roc et de sol se trouve sur la trajectoire du forage	Utiliser une gaine d'acier Utiliser une profondeur d'enfouissement suffisante Contrôler la poussée appliquée
Tunnelier standard Microtunnelier Tunnelier utilitaire Microtunnelier dirigé	Affaissement en surface Formation de cavités Soulèvement Fracturation hydraulique (si fluides de forage)	Cette technique a l'avantage de permettre d'adapter le module d'excavation à tous les types de sols et de pouvoir ainsi contrôler la face d'excavation. L'utilisation d'un module inapproprié pour les sols peut mener à des problèmes considérables. L'équipement ne peut être récupéré qu'à la sortie ou par l'entremise d'un puits d'accès au-dessus du module d'excavation. Les tunneliers peuvent être dirigés et offrent un bon contrôle de la trajectoire.	Surveiller la quantité de matériaux excavée en fonction de la vitesse de progression du forage Contrôler la poussée des vérins hydrauliques Contrôler la trajectoire Utiliser un module d'excavation adapté aux sols Injecter du coulis autour de la gaine au fur et à mesure de la progression du forage Veiller à ce que la profondeur d'enfouissement soit suffisante

Note : Dans tous les cas, une bonne caractérisation des conditions géotechniques du site peut grandement aider au choix de la technique et des équipements à utiliser.

Tableau 122 : Dangers liés aux types de sols

Type de sol	État	Dangers potentiels										Niveau du danger ⁽¹⁾
		Infiltration d' eau	Bourrage de l' équipement	Refus d' avancement	Soulèvement d' un bloc	Coinçage de l' équipement	Création de cavités	Déviatio	Effondrement	Écoulement de sols	Fluage	
Blocs (Ø > 300 mm), cailloux (Ø = 80 à 300 mm) et graviers	s. o.	√	√	√	√	√	-	√	√	√	-	Élevé
Graviers et sables	Lâche											Élevé
	Dense	√	-	-	-	-	√	-	√	√	-	Moyen
Sables propres (80 µm < 10 %)	Lâche											Élevé
	Dense	√	-	-	-	-	√	-	√	√	-	Moyen
Sables et silts	Lâche											Faible
	Dense	√	-	-	-	-	√	-	√	√	-	Très faible
Silts et argiles	Sensible	-	√	√	-	-	-	-	-	√	√	Élevé
	Mou											Moyen
	Raide	-	√	√	-	-	-	-	-	-	√	Faible
Tills ⁽²⁾	Lâche											Faible à élevé ⁽³⁾
	Dense	√	-	√	√	√	√	√	√	√	-	

(1) Le niveau du danger réellement encouru dépend beaucoup de l'équipement utilisé.

(2) Les tills présentent souvent des cailloux et des blocs en proportions variables.

(3) Le niveau du danger dans les tills dépendra de la variabilité granulométrique du dépôt, des proportions de blocs et de la capacité de support des blocs pour leur fragmentation.

BIBLIOGRAPHIE

- BURDEN, Lindsay Ivey et HOPPE, Edward J. *Synthesis of Trenchless Technologies*, Charlottesville, Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2015, 45 p.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Méthode de grand tunnelier*, [Montréal, CERIU], 2005a, NI-05.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Forage à la torpille*, [Montréal, CERIU], 2005b, NI-06.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Forage par vis sans fin*, [Montréal, CERIU], 2005c, NI-07.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Poinçonnement*, [Montréal, CERIU], 2005d, NI-08.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Tuyau poussé en tunnel*, [Montréal, CERIU], 2005e, NI-09.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Forage dirigé*, [Montréal, CERIU], 2002a, NI-02.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Microtunnelier*, [Montréal, CERIU], 2002b, NI-03.
- CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES. *Techniques sans tranchée – Nouvelle installation – Tuyau installé par percussion*, [Montréal, CERIU], 2002c, NI-04.
- FRANCE SANS TRANCHÉE TECHNOLOGIES. *Forages dirigés – Recommandations*, Paris, Hermes science publications, 2015, 208 p.
- FRANCE SANS TRANCHÉE TECHNOLOGIES. *Microtunnels : De la conception au DGE*, Paris, FSTT, 2012, 92 p.
- HUNG, Jeremy C., MONSEES, James, MUNFAH, Nashi, et WISNIEWSKI, John. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements FHWA-NHI-10-034*, Washington, par American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2009, 702 p.
- ISELEY, Tom, et GOKHALE, Sanjiv B. *Synthesis of Highway Practice 242 – Trenchless Installation of Conduits Beneath Roadways*, Washington, Transportation Research Board, National Academy Press, 1997, 82 p.
- KRAMER, Steven R., MCDONALD, William J. et THOMSON, James C. *An Introduction to Trenchless Technology*, Boston, Springer, 2013, 224 p.

MORRISON, Robert, MATTHEWS, John, SINHA, Sunil, et collab. *State of Technology for Rehabilitation of Water Distribution Systems*, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, EPA/600/R-13/036, 2013, 212 p.

NAJAFI, Mohammad. *Trenchless Technology: Planning, Equipment, and Methods*, Maidenhead, McGraw-Hill, 2013, 582 p.

PINTER, Lawrence, et EL-BAROUDY, Ibrahim. *Trenchless technologies and work practices review for Saskatchewan municipalities*, Saskatoon, Pinter & Associates, Communities of Tomorrow, 2013, 102 p.

SCHEUBLE, Leopold. *Trenchless technologies in pipeline construction*, dans *3R International, Journal for Piping, Engineering, Practice, Special Steel Pipelines Technology*, 2004, 17 p.

STEIN, Dietrich. *Trenchless Technology for Installation of Cables and Pipelines, 2nd Volume: Horizontal Directional Drilling (HDD)*, Bochum, Stein and Partner, 2012, 261 p.

STEIN, Dietrich. *Practical Guideline for the Application of Microtunnelling Methods for the Ecological, Cost-Minimised Installation of Drains and Sewers*, Bochum, Stein and Partner, 2005a, 114 p.

STEIN, Dietrich. *Trenchless Technology for Installation of Cables and Pipelines*, Bochum, Stein and Partner, 2005b, 866 p.

FONÇAGE HORIZONTAL PAR PERCUSSION

ARIARATNAM, Samuel T., LUEKE, Jason S., et ALLOUCHE, E.N. *Utilization of Trenchless Construction Methods by Canadian Municipalities*, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 125, 1999, p. 76-86.

CAMP, Craig, BOYCE, Glenn, et TENBUSCH, Al. *Culvert Replacement Using Pipe Ramming, Tunneling, or Pipe Jacking*, *North American Society for Trenchless Technology*, article A-5-05, 2010, 11 p.

GOODMAN, Alan. *Trenchless Culvert Replacement Under Railways with the Pipe Ramming Method*, *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*, 2013, p. 989-1003.

GOODMAN, Alan., et POLLOCK, Jason. *Pipe Ramming and the U.S. Rail System*, *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA)*, 2014, 15 p.

MESKELE, Tadesse, et STUEDLEIN, Arwin W. *Analysis of a 610-mm-Diameter Pipe Installed Using Pipe Ramming*, dans *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *American Society of Civil Engineers*, 2014a, vol. 28, 7 p.

MESKELE, Tadesse, et STUEDLEIN, Arwin W. *Field Measurements of Pipe Ramming-Induced Ground Vibrations*, dans *Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability. Proceedings*, *American Society of Civil Engineers*, 2014b, p. 466-475.

MESKELE, Tadesse, et STUEDLEIN, Armin W. *Static Soil Resistance to Pipe Ramming in Granular Soils*, dans *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 141, 2015, 11 p.

OREGON DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Trenchless technology (Chapter 16)*, dans *Hydraulics Design Manual*, Salem [Oregon], Oregon Department of Transportation, Highway Division, 2005, p. 16-1-16-36.

PIEHL, Rob, et al. *Trenchless Culvert Replacement Using a Horizontal Pipe-Driving System: Agness Road, Rogue-Siskiyou National Forest*, dans *Engineering Field Notes*, vol. 37, n° 1, 2005, p. 3-11.

SIMICEVIC, Jadranka, et STERLING, Raymond L. *Guidelines for Pipe Ramming*, TTC Technical Report #2001.04, U.S. Army Corps of Engineers, 2001, 23 p.

STUEDLEIN, Armin W., et MESKELE, Tadesse. *Analysis and Design of Pipe Ramming Installations, Report SPR 710*, Salem [Oregon], Oregon Department of Transportation, Research Section, 2013, 218 p.

STUEDLEIN, Armin W., et MESKELE, Tadesse. *Preliminary Design and Engineering of Pipe Ramming Installations*, dans *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, American Society of Civil Engineers, vol. 3, 2012, p. 125-134.

FORAGE DIRIGÉ

CANADIAN ASSOCIATION OF PETROLEUM PRODUCERS (CAPP). *Guideline. Planning Horizontal Directional Drilling for Pipeline Construction*, juin 2009, 82 p. [Rapport de CAPP Publication 2004-0022].

GIERCZAK, Maria. *The qualitative risk assessment of MINI, MIDI and MAXI horizontal directional drilling projects*, dans *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 44, 2014, p. 148-156.

LUEKE, Jason S., et ARIARATHAM, Samuel T. *Surface Heave Mechanisms in Horizontal Directional Drilling*, dans *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 131, 2005, p. 540-547.

ZHOU, Pei, JIAO, Ruyi, MA, Boasong, LIU, Houping, et HAN, Yi. *Analysis of Borehole Wall Stability in Horizontal Directional Drilling*, dans *Proceedings: International Conference on Pipelines and Trenchless Technology*, American Society of Civil Engineers, 2012, p. 1816-1825.

TUNNELIER

AUSTRALASIAN SOCIETY FOR TRENCHLESS TECHNOLOGY. *Standard for Microtunnelling & Pipe Jacking*, 8 septembre 2009, 11 p. [Rapport de la Australasian Society for Trenchless Technology n° CPJP8029-STD-C-003].

DEMAY, B. *Module Ouvrages souterrains – Les tunneliers*, 2014. [Présentation de l'École nationale des ponts et chaussées, Centre des hautes études de la construction, France].

DEMAY, B. *Module Ouvrages souterrains – Les tunneliers*, 12 octobre 2011. [Notes de cours de l'École nationale des ponts et chaussées, Centre des hautes études de la construction, France].

DIPONIO, Michael, CHAPMAN, David, et CRAIG, Bournes. *EPB Tunnel Boring Machine Design for Boulder Conditions*, dans *Proceedings: Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, 2007, p. 215-228.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR TRENCHLESS TECHNOLOGY. *Pipejacking and Microtunnelling, Trenchless Technology Guidelines*, 2^e édition, Trenchless Technology Resource Centre, 2005, 11 p.

MAIDL, Bernhard, HERRENKNECHT, Martin, MAIDL, Ulrich, WEHRMEYER, Gerhard, et STURGE, David S. *Mechanised Shield Tunnelling*, 2^e édition, Ernst & Sohn, 2012, 490 p.

NAJAFI, Mohammad, et GOKHALE, Sanjiv. *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*, Texas, McGraw Hill, 2004, 490 p.

PIPE JACKING ASSOCIATION. *An Introduction to Pipe Jacking and Microtunnelling Design*, Londres, Pipe Jacking Association, 1995, 27 p.

TARKOY, Peter J. *The boulder facts of life*, dans *World Tunnelling*, décembre, 2008, p. 25-28.

MICROTUNNELIER DIRIGÉ

HERRENKNECHT, *Direct Pipe – One-Pass Trenchless Installation of Pipelines in all Geologies*, brochure, 2022.

ROBISON, Jonathan L., et ELMORE, Jim. *Innovative Directional Microtunnel Garners Success for Crucial Trenchless Crossing*, dans *Pipelines 2014: Proceedings*, American Society of Civil Engineers, 2014, p. 758-768.

ROBISON, Jonathan L., HOTZ, Rob D., et CHEN, C. C. *Emerging Technologies: A Suggested Design Method for Curved, Jacked Steel Pipe*, dans *Pipelines 2013: Proceedings*, American Society of Civil Engineers, 2013, p. 864-874.

SHELL. « Appendix S – Information on Micro-Tunnelling », *Typical Method Statement – Direct Pipe Technique*, 28 août 2008, 54 p. [Méthode de travail de Shell E&P Ireland Ltd].

REMPLACEMENT DE PONCEAU PAR ENGOUFFREMENT

HAMMERHEAD TRENCHLESS EQUIPMENT. *Culvert Replacement Project Beneath Famed Pacific Coast Highway*, dans *Underground Construction*, vol. 71, n° 2, 2016, 5 p.

SITES WEB CONSULTÉS

AKKERMAN. *Page d'accueil*, [En ligne], 2021, [www.akkerman.com].

ALLEN WATSON LTD. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.allenwatson.com].

AMERICAN AUGERS AND TRENOR INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.americanaugers.com].

ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN. *Page d'accueil*, [En ligne], 2020, [www.aftes.asso.fr].

AUSTRALASIAN SOCIETY FOR TRENCHLESS TECHNOLOGY. *Page d'accueil*, [En ligne], 2021, [www.astt.com.au].

BARBCO INC., *Page d'accueil*, [En ligne], 2021, [www.barbco.com].

CANADIAN ASSOCIATION OF PETROLEUM PRODUCERS. *Page d'accueil*, [En ligne], 2021, [www.capp.ca].

CANADIAN UNDERGROUND INFRASTRUCTURE. *Page d'accueil*, [En ligne], 2020, [www.canadianundergroundinfrastructure.com].

CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES (CERIU). *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.ceriu.qc.ca].

CHENGDU DRILLROCKER INC., *Products*, [En ligne], 2015, [www.drillrocker.com] (Consulté le 9 juillet 2015).

CHERRINGTON GROUP, W.D. Cherrington, [En ligne], 2016, [www.youtube.com/channel/UChmiAbdM2d7vodPlqxV4t3w].

DIGITAL CONTROL INCORPORATED. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017 [www.digital-control.com].

DITCH WITCH. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017, [www.ditchwitch.com].

FORACTION INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.foraction.ca].

FORAGES DIRECTIONNELS 3D INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2019, [www.forage3d.com].

FRANCE SANS TRANCHÉE TECHNOLOGIES (FSST). *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.fsst.org].

HAMMERHEAD TRENCHLESS EQUIPMENT. *Page d'accueil*, [En ligne], 2016, [www.hammerheadtrenchless.com].

HERRENKNECHT AG. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.herrenknecht.com].

HORIZONTAL TECHNOLOGY INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017, [www.horizontaltech.com].

INFO-EXCAVATION. *Directives pour les travaux à proximité de nos infrastructures souterraines*, [En ligne], 2022 [<https://www.info-ex.com/prevention-des-dommages/guides-et-outils/directives-pour-les-travaux-a-proximite-dinfrastructures-souterraines/>].

THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR TRENCHLESS TECHNOLOGY (ISST). *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.istt.com].

LA REVUE L'EAU, L'INDUSTRIE, LES NUISANCES. *Réseau : Le PRV s'impose en microtunnelage au Chesnay*, [En ligne], 2017, [www.revue-ein.com] (Consulté le 19 avril 2017).

LANEY DIRECTIONAL DRILLING CO. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017, [www.laneydrilling.com].

LES FORAGES NELLA INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.nella-drilling.com]

MARATHON DRILLING. *Album photo Flickr de Dave McPhedran*, [En ligne], 2021, [www.flickr.com/photos/marathon_drilling/albums].

MARATHON UNDERGROUND CONSTRUCTORS CORPORATION. *Page d'accueil*, [En ligne], 2021, [www.marathondrilling.com].

MCLAUGHLIN BORING SYSTEMS. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017, [www.mclaughlinunderground.com].

NOEX INGÉNIERIE SANS TRANCHÉE. *Page d'accueil*, [En ligne], 2021, [www.noexservices.com].

NORTH AMERICAN SOCIETY FOR TRENCHLESS TECHNOLOGY (NASTT). *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.nastt.org].

NUMA TOOL COMPANY. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017, [www.numahammers.com].

POWERAM CORPORATION. *Page d'accueil*, [En ligne], 2017, [www.poweram.com]

RADIUS HDD DIRECT LLC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2020, [www.radiushdd.com]

SANDVIK AB. *Page d'accueil*, [En ligne], 2015, [www.mining.sandvik.com] (Consulté le 15 juin 2015).

TENBUSCH INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2015, [www.tenbusch.com].

TRACEY CONCRETE LIMITED. *Jacking Pipes – Introduction*, [En ligne], 2017, [www.traceyconcrete.com] (Consulté le 24 avril 2017).

TRENCHLESS TECHNOLOGY. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [www.trenchlesstechnology.com].

TT TECHNOLOGIES INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2019, [www.tttechnologies.com].

UNDERGROUND CONSTRUCTION. *Page d'accueil*, [En ligne], 2018, [www.ucononline.com].

VERMEER CANADA INC. *Page d'accueil*, [En ligne], 2022, [<http://www.vermeerCanada.com/>].

