



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

L.38

(09/99)

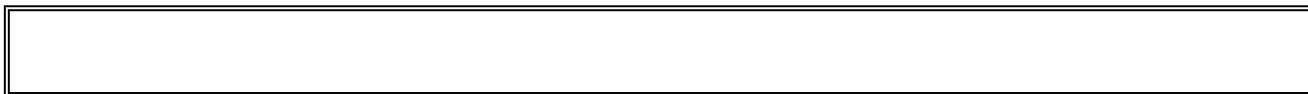
SÉRIE L: CONSTRUCTION, INSTALLATION ET
PROTECTION DES CÂBLES ET AUTRES ÉLÉMENTS
DES INSTALLATIONS EXTÉRIEURES

**Utilisation de techniques sans tranchées pour la
construction des infrastructures souterraines
destinées aux câbles de télécommunication**

Recommandation UIT-T L.38

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE L
**CONSTRUCTION, INSTALLATION ET PROTECTION DES CÂBLES ET AUTRES ÉLÉMENTS DES
INSTALLATIONS EXTÉRIEURES**



Pour plus de détails, voir la Liste des Recommandations de l'UIT-T.

RECOMMANDATION UIT-T L.38

UTILISATION DE TECHNIQUES SANS TRANCHEES POUR LA CONSTRUCTION DES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES DESTINEES AUX CABLES DE TELECOMMUNICATION

Résumé

La présente Recommandation décrit les principales techniques permettant d'installer les infrastructures souterraines des réseaux de télécommunication sans avoir recours, ou avec un recours minimum, aux travaux de terrassement. Avec ces techniques, communément appelées techniques sans tranchées, on crée sous la surface du sol un forage horizontal dans lequel il est possible de placer l'infrastructure souterraine (conduites, tuyaux ou câbles enfouis directement).

Les techniques sans tranchées permettent de réduire les dommages environnementaux ainsi que les coûts sociaux. Elles fournissent une solution de remplacement économique aux méthodes d'installation avec tranchées ouvertes.

Après une description des techniques disponibles, la présente Recommandation traite des sujets suivants: différents types de travaux exécutés, opération préliminaire à effectuer, l'opération de forage et la procédure d'installation, avec des directives relatives aux exigences générales.

Source

La Recommandation UIT-T L.38, élaborée par la Commission d'études 6 (1997-2000) de l'UIT-T, a été approuvée le 24 septembre 1999 selon la procédure définie dans la Résolution n° 1 de la CMNT.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

La Conférence mondiale de normalisation des télécommunications (CMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'études à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution n° 1 de la CMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, le terme *exploitation reconnue (ER)* désigne tout particulier, toute entreprise, toute société ou tout organisme public qui exploite un service de correspondance publique. Les termes *Administration*, *ER* et *correspondance publique* sont définis dans la *Constitution de l'UIT (Genève, 1992)*.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 1999

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Domaine d'application 1
2	Techniques disponibles..... 1
3	Types de travaux 1
3.1	Sections de grande longueur 2
3.2	Croisements 2
3.3	Environnement urbain..... 2
4	Etude du site..... 2
5	Opérations préliminaires..... 3
5.1	Utilisation de techniques sans tranchées ne nécessitant pas le creusement d'un puits de départ..... 3
5.2	Utilisation de techniques sans tranchées nécessitant le creusement d'un puits de départ 4
5.2.1	Travail à la taupe à percussion..... 4
5.2.2	Battage des tubes 4
5.2.3	Microtunnelage et fonçage des tubes..... 5
6	Opérations de forage 5
6.1	Forage guidé/forage directionnel 5
6.1.1	Création d'un forage pilote..... 6
6.1.2	Réalésage et reprise 6
6.1.3	Inspection des conduites 7
6.2	Travail avec la taupe à percussion 8
6.3	Battage des tubes..... 8
6.4	Fonçage des tubes et percement de microtunnels 9
7	Archives et documentation 10
8	Nature du sol..... 10
8.1	Forage guidé/forage directionnel 10
8.2	Percement par taupe à percussion 12
8.3	Battage des tubes..... 12
8.4	Fonçage des tubes et percement de microtunnels 12
9	Applications 13
9.1	Forage guidé/forage directionnel 13
9.2	Forage par taupe à percussion..... 14
9.3	Battage des tubes..... 14
9.4	Fonçage des tubes et percement de microtunnels 14

	Page
10	Conclusion 14
11	Glossaire 15
	Appendice I – Techniques disponibles..... 15
I.1	Forage guidé, forage directionnel 15
	I.1.1 Méthodes 16
	I.1.2 Machines de forage..... 17
	I.1.3 Tubes de forage..... 20
	I.1.4 Boues de forage 20
	I.1.5 Systèmes de localisation et de guidage..... 21
	I.1.6 Equipement auxiliaire..... 22
I.2	Forage par taube à percussion..... 22
	I.2.1 Surveillance 23
	I.2.2 Types de tête de forage 23
I.3	Battage des tubes..... 24
	I.3.1 Montage du dispositif 24
	I.3.2 Options de forage..... 24
I.4	Fonçage des tubes et percement de microtunnels 25
	I.4.1 Planification..... 26
	I.4.2 Excavation et évacuation des rejets dans l'opération de fonçage..... 27
	I.4.3 Excavation et évacuation des rejets dans le percement des microtunnels 27
	I.4.4 Classification des méthodes de travail dans le percement des microtunnels. 31
	I.4.5 Méthodes de repérage des positions 32
	I.4.6 Méthodes d'amélioration du sol..... 33
	I.4.7 Bâtis de fonçage..... 34
	I.4.8 Puits 34
	I.4.9 Tubes 35
	I.4.10 Lubrification 35
	I.4.11 Stations de poussée intermédiaires 36
	I.4.12 Charges de fonçage..... 37

Recommandation L.38

UTILISATION DE TECHNIQUES SANS TRANCHEES POUR LA CONSTRUCTION DES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES DESTINEES AUX CABLES DE TELECOMMUNICATION

(Genève, 1999)

1 Domaine d'application

La présente Recommandation:

- donne une classification des différents types de travaux effectués;
- décrit les opérations préliminaires;
- décrit l'opération de forage et indique les conditions à satisfaire pour les procédures d'installation;
- décrit des situations dans lesquelles les techniques sans tranchées sont recommandées.

2 Techniques disponibles

Le Tableau 1 donne une classification générale des techniques sans tranchées disponibles. L'appendice I contient une description détaillée de chacune de ces techniques.

Tableau 1/L.38 – Classification des techniques tranchées

Forage guidé/forage directif	<ul style="list-style-type: none">• Forage sous boue• Forage à sec	
Forage par taupe à percussion		
Battage des tubes		
Pousse-tubes, fonçage		
Microtunnels	<ul style="list-style-type: none">• Méthode avec tubes à grande résistance mécanique	<ul style="list-style-type: none">* Méthode par fonçage* Méthode d'excavation par tarières* Méthode avec boue* Méthode avec pression de boue contrôlée* Méthode de forage
	<ul style="list-style-type: none">• Méthode avec tubes à faible résistance mécanique	<ul style="list-style-type: none">* Méthode par fonçage* Méthode d'excavation par tarières* Méthode avec boue* Méthode avec pression de boue contrôlée* Méthode de forage

3 Types de travaux

On trouvera ci-après une classification des travaux, dont on pourra déduire les caractéristiques des meilleurs matériels à utiliser, en fonction des diverses exigences opérationnelles.

3.1 Sections de grande longueur

On peut avoir recours aux techniques sans tranchées pour installer des conduites souterraines le long des routes, en lieu et place des techniques d'excavation traditionnelles. Il est possible de réaliser de grandes longueurs d'installation (plusieurs kilomètres) en divisant la longueur de travail en sections courtes (100 à 200 m en moyenne). La longueur de chaque section dépend des caractéristiques des machines utilisées et des exigences de la conception.

Il est recommandé:

d'utiliser des machines de forage guide/directif (sous boue et à sec) pour cette application.

3.2 Croisements

Les sections de croisement avec les cours d'eau et les voies ferrées ont été les premières applications de la technologie sans terrassement, car les techniques traditionnelles ne convenaient pas dans ces cas. Les machines avec lancement en surface (glissières) constituent souvent la meilleure solution car elles permettent de passer les obstacles en suivant un trajet de forage incurvé, ce qui rend inutile le creusement de profonds puits de départ et d'arrivée (surtout aux croisements avec des cours d'eau). On considère deux types différents de croisements, en fonction de la longueur et de la profondeur de la conduite installée.

- croisements avec des routes et des voies ferrées: la longueur de forage n'est généralement pas très grande. Pour ces cas,

il est recommandé:

d'utiliser des machines de forage sous boue et de forage guidé à sec ou des systèmes de percement de microtunnels, selon le diamètre de la conduite.

- croisements avec des cours d'eau: en général, le forage nécessaire est très long et très profond, et il importe de ne pas creuser de grands puits de départ et d'arrivée sur les deux rives du cours d'eau. Pour ces cas,

il est recommandé:

de commencer le forage directement à partir de la surface, en utilisant un système de forage guidé sous boue.

3.3 Environnement urbain

On a ici une des applications les plus intéressantes de la technologie du forage sans tranchées car celle-ci permet d'annuler ou de réduire spectaculairement les graves inconvénients découlant du terrassement dans les zones urbaines. Compte tenu du petit diamètre des conduites et de la longueur réduite de chaque section de forage (les chambres de tirage sont généralement très proches les uns des autres),

il est recommandé:

d'utiliser une petite machine de forage guidé à sec afin de réduire la taille du chantier et d'empêcher les fuites de boue de forage le long du trajet, et d'utiliser des systèmes pour microtunnels, selon le diamètre de la conduite.

4 Etude du site

Il est essentiel de connaître parfaitement les caractéristiques de la surface du chantier et celles du sous-sol, dès le début des études de conception. Cela est indispensable pour réduire le nombre des incidents et/ou pour limiter les dégâts qui pourraient être causés à des structures et des services préexistants, également pour réduire à un minimum les coûts du forage horizontal par le recours aux diverses techniques de forage sans travaux de terrassement.

Il est recommandé de procéder comme suit:

- le plan de forage sera complété par les informations suivantes:
 - informations statutaires/administratives;
 - informations techniques (par exemple, présence d'infrastructures des services publics ou d'obstacles);
 - informations géolithologiques, hydrogéologiques et géotechniques.

Il est possible d'obtenir la plupart de ces informations en consultant la documentation préexistante relative à des travaux effectués précédemment dans la zone (par exemple, pose d'installations pour les services publics, etc.).

- Il faut prêter la plus grande attention aux services publics potentiellement dangereux (par exemple, les canalisations de gaz) ou importants pour le public (par exemple, les lignes téléphoniques des hôpitaux). Dans certains cas, d'autres informations essentielles sur des points importants ou des dangers potentiels peuvent être obtenues auprès de l'entreprise qui a exécuté les travaux.
- Il faut aussi recueillir les informations suivantes sur les services ou les structures:
 - matériaux (PVC, métaux);
 - diamètre, simple ou multiple;
 - profondeur nominale ou effective des emplacements;
 - matériaux de remblai (gravats, sable).
- Lorsqu'on utilise la documentation fournie par les autorités locales ou par d'autres entreprises, il est parfois nécessaire de faire la distinction entre les schémas "planification" et les plans "matériel installé".

Pour ces raisons, si l'on veut recueillir des informations précises sur l'emplacement des installations enterrées des services publics,

il est recommandé:

de procéder à une étude directe sur zone en utilisant les équipements appropriés.

Les détecteurs de tubes et de câbles sont capables de déceler la présence de tuyaux métalliques, de câbles électriques conducteurs de courant et de câbles de télécommunication. Les systèmes radar à pénétration dans le sol donnent des informations complémentaires: ils détectent la présence de tuyaux et de câbles non métalliques, de zones où ont lieu des fuites et de discontinuités souterraines, par exemple les couches sous-jacentes de construction des routes ou les strates géologiques.

Pour obtenir des informations complètes sur les caractéristiques du sol, on peut appliquer les techniques des forages de contrôle.

5 Opérations préliminaires

5.1 Utilisation de techniques sans tranchées ne nécessitant pas le creusement d'un puits de départ

Dans le cas des techniques sans tranchées ne nécessitant pas le creusement de puits de départ et d'arrivée,

il est recommandé de procéder comme suit:

- avant de faire démarrer les travaux, on fera une évaluation précise de l'espace disponible au voisinage du point de départ, en tenant compte des dimensions des équipements à utiliser;

- en cas d'utilisation de boues de forage, on tiendra compte des dimensions hors tout du camion transportant la pompe et les réservoirs reliés à la foreuse;
- pour la mise en place de la foreuse, on prendra en considération l'angle d'incidence de la première tige par rapport à la surface du sol. Cet angle ne doit pas dépasser 20°, d'où la nécessité de placer la foreuse à une distance appropriée, loin du point de départ;
- en cas d'utilisation de boues de forage, il faudra creuser un petit puits autour du point de départ, pour recueillir la boue produite par le forage;
- pour pouvoir contrôler la position du forage pilote par rapport à la surface pendant les travaux de forage, on équipera la tête de forage avec des détecteurs qui mesureront les paramètres suivants:
 - profondeur
 - inclinaison
 - orientation
 - température
- en cas d'utilisation du système de contrôle en surface (walk-over) (voir Appendice I), il est nécessaire d'étalonner le gain du récepteur, conformément aux instructions du constructeur, avant de procéder au forage pilote;
- il est conseillé également de repérer les tubes de forage linéairement par rapport à une position précise de la tête de forage (par exemple, avec la face angulaire tournée vers le haut). De cette façon, l'opérateur pourra déterminer l'orientation exacte de la tête pendant le forage du trou pilote.

5.2 Utilisation de techniques sans tranchées nécessitant le creusement d'un puits de départ

5.2.1 Travail à la taupe à percussion

Lorsqu'on utilise la technique de la taupe à percussion – une fois qu'on a déterminé l'itinéraire voulu et avant de commencer à forer,

il est recommandé de procéder comme suit:

- on commence par creuser un puits de départ et un puits d'arrivée aux extrémités du trajet de forage, le fond de ces puits étant situé un peu en dessous de la profondeur nominale d'installation;
- on met alors en place, le cas échéant, la nacelle de lancement; une autre technique consiste à placer la taupe directement sur le fond du puits de départ;
- à l'aide d'une mire dans le puits d'arrivée et d'un théodolite dans le puits de départ, on détermine l'orientation initiale du forage en pointant la taupe vers la mire;
- on lance la taupe et on la laisse parcourir une courte distance. On vérifie une dernière fois l'orientation avant que le corps entier de la taupe ne pénètre dans le sol. Si l'orientation est fautive, on recommence le forage.

5.2.2 Battage des tubes

En cas d'utilisation de systèmes de battage des tubes, *il est recommandé de procéder aux opérations préliminaires ci-après:*

- pour une opération typique de battage, il faut mettre en place une base très résistante, généralement un radier en béton, à l'extrémité de départ de l'installation. Cet élément est, le plus souvent, placé dans un puits de départ ou sur la pente d'une rampe;
- on installe ensuite sur le béton des rails de guidage qui suivent la ligne de forage;

- après avoir placé la première longueur de tube d'acier sur les rails de guidage, on forme une arête coupante, ou bien on en fixe une à l'extrémité avant du tube, et on monte le mouton de battage à l'extrémité arrière;
- selon le diamètre utilisé, il pourra être nécessaire d'utiliser des enclaves pour obtenir un contact complet et uniforme entre le mouton et le tube.

5.2.3 Microtunnelage et fonçage des tubes

Pour les projets mettant en œuvre le microtunnelage et le fonçage des tubes, un soin particulier doit être apporté à la préparation du puits de départ ou de fonçage.

Les conditions auxquelles doit satisfaire ce puits varient beaucoup en fonction de plusieurs paramètres: machine utilisée, état du sol, longueur et matériau du tube, longueur de fonçage et type d'installation. Les puits peuvent être de section circulaire, rectangulaire ou ovale; avec blindage par palplanche, étayés localement, de construction spéciale ou même sans soutènement si le sol est en assez bon état et si les règlements locaux de sécurité l'autorisent. Tous les puits de départ doivent posséder une caractéristique commune: la présence d'une surface de réaction sur laquelle le bâti de poussée viendra buter.

Si le terrain s'y prête, la surface de réaction peut être constituée simplement par la paroi arrière du puits. Mais cela n'est en général pas le cas, et il faut prévoir un massif d'appui. Généralement construit en béton, ce massif fait partie intégrante du soutènement du puits; il peut être conçu de manière à permettre une rotation du bâti de poussée pour réaliser un second forage en sens opposé, ou pour permettre à une machine forant à partir d'un autre point de pénétrer dans le puits, qui joue alors le rôle de point d'arrivée.

Il est par conséquent recommandé:

- que le massif d'appui soit réalisé de telle sorte qu'il permette au bâti de poussée d'exercer son effort de poussée maximale, tout en assurant l'intégrité de la structure du puits et celle du sol environnant, afin de ne pas porter atteinte à la structure définitive de la chaîne de tubes;
- de construire des puits étanches à l'eau, surtout pour les installations profondes et dans les sols difficiles, afin de réduire à un minimum les perturbations subies par le sol à l'extérieur des puits. Un autre avantage d'un puits étanche réside dans le fait que l'on peut minimaliser le ruissellement et l'assèchement non contrôlé de la zone entourant le puits;
- le fond du puits doit être réalisé avec la pente voulue et avoir une structure suffisamment robuste pour pouvoir supporter tout le matériel de microtunnelage. Cette structure doit être isolée du massif d'appui qui équipe le puits;
- le massif d'appui sera construit perpendiculairement à la direction dans laquelle le tube doit être posé. Sa capacité structurelle doit être suffisante pour transférer les charges de fonçage au sol par l'intermédiaire de la paroi du puits;
- même si le point de sortie du bouclier se trouve immédiatement en dehors du sol en un endroit fixé, on mettra en place un dispositif de réception afin de prévenir une pollution par perte de lubrifiant ou de boue, ou pour empêcher la pénétration d'eau dans la conduite.

6 Opérations de forage

6.1 Forage guidé/forage directionnel

Ces travaux peuvent être réalisés en plusieurs étapes, dont on trouvera la description ci-après.

6.1.1 Création d'un forage pilote

Il est recommandé de procéder comme suit:

- on fixera l'emplacement des points de départ et d'arrivée en fonction des caractéristiques de la machine de forage, afin d'optimiser le nombre total de sections;
- en cas de croisements, si la nouvelle conduite doit être raccordée à une infrastructure existante, la position des points de départ et d'arrivée sera fixée en fonction de l'emplacement des trous d'homme ou des chambres de tirage existants, en tenant compte du rayon de courbure admissible des tubes de forage et de la conduite à installer;
- pour les travaux en zone urbaine, le forage sera effectué à l'arrière des trottoirs, afin de perturber le moins possible la circulation des véhicules;
- toujours en zone urbaine, on proscriera complètement l'utilisation des boues de forage, qui pourraient s'écouler dans les sous-sols des bâtiments avoisinants;
- en cas d'utilisation du système de contrôle en surface (walk-over), un opérateur suivra en surface la progression du forage pilote à l'aide d'un détecteur, une fois le forage commencé;
- lorsque la profondeur nominale est atteinte, le forage sera effectué en suivant une ligne parallèle à la surface du sol. Pendant cette opération, il est conseillé de lire les données fournies par le récepteur à intervalles d'au moins 5 mètres et de baliser la surface selon les positions détectées de la tête de forage; cela permet d'indiquer immédiatement la position finale de la conduite installée (par exemple, pour mettre à jour la carte des installations de services publics présentes dans la zone);
- si le système de contrôle en surface est utilisé en association avec des appareils équipés de moteurs à boue, il faut tenir compte du point suivant: du fait de la position de la sonde par rapport à la tête de forage, les données ne peuvent être détectées qu'à un ou deux mètres de la tête, ce qui oblige l'opérateur à anticiper sur la direction à prendre;
- si on ne dispose pas d'une télécommande pour la machine de forage, l'opérateur qui suit la progression du forage pilote (détecteur) transmet l'information de progression à l'opérateur de la machine (foreur), qui a besoin de cette information pour déterminer la direction du forage;
- lorsqu'on rencontre certains croisements particuliers (par exemple, cours d'eau et autoroutes), il n'est pas toujours possible de suivre la progression de la tête de forage au moyen d'un détecteur agissant en surface. Même si on utilise un système de localisation avec transmission par fil, il est conseillé de tenir compte de toutes les autres données disponibles, telles que la longueur des tubes de forage et les derniers paramètres mesurés par les capteurs à l'intérieur de la tête de forage (profondeur, pente et rotation) pour déterminer le trajet de forage;
- à l'approche du puits d'arrivée, on soulèvera la tête de forage progressivement jusqu'au point final, avec une pente égale à la pente de départ (max 20 degrés);
- une fois que la tête de forage fait surface au point de sortie, on effectuera une mesure pour voir si ce point se trouve dans les tolérances admissibles. Si une partie du forage dépasse la tolérance, on tire la chaîne des tubes de forage vers l'arrière et on peut recommencer le forage de cette partie de l'ouvrage.

6.1.2 Réalésage et reprise

Dans certaines installations, il est possible d'introduire directement le tube dans le trou pilote une fois celui-ci achevé. Toutefois, dans la plupart des installations il faut réalésier le trou avant d'introduire les tubes définitifs. Dans ce cas,

il est recommandé de procéder comme suit:

- une fois le forage pilote terminé, on remplace la tête de forage par un réaléreur que l'on tire en arrière dans l'ouvrage afin d'augmenter le diamètre de celui-ci. Pour obtenir une installation satisfaisante, il faut que le diamètre intérieur du forage dépasse d'au moins 20% le diamètre extérieur de la conduite (ou du paquet de conduites). Cela est nécessaire pour permettre la formation d'un espace vide de forme annulaire par lequel s'effectuera le reflux des boues et des déblais de forage, et pour tenir compte du rayon de courbure des tubes définitifs;
- on a besoin parfois de procéder à plusieurs opérations de réalésage pour obtenir un trou de diamètre suffisamment grand. Dans ce cas, on fixera une seconde chaîne de tubes de forage au réaléreur à l'aide d'un joint à rotule. Les tiges sont introduites dans le trou, de telle façon que, quand le réalésage est terminé, elles peuvent être utilisées immédiatement pour retirer un autre réaléreur;
- une fois obtenu le diamètre de forage requis, on reliera le tube de forage aux tubes définitifs à l'aide d'une tête de tirage ou d'un œilleton de tirage, avec un système à rotule. On placera aussi un réaléreur entre la tête de tirage et la chaîne de forage, afin que le trou reste ouvert et pour pouvoir pomper du lubrifiant supplémentaire dans le trou pendant la reprise;
- durant la phase de reprise, il faut veiller à ce que les extrémités de la ou des conduites soient fermées hermétiquement, afin d'empêcher la pénétration de boue et de saletés;
- si un seul forage ne suffit pas pour loger les conduites à poser, on en exécutera un deuxième. Dans ce cas, il faut ménager une certaine distance entre les deux forages afin de ne pas endommager la ou les conduites posées. Cette distance dépend principalement du diamètre des conduites mais, en tout état de cause, il est bon qu'elle soit d'un mètre au minimum;
- si les extrémités des conduites sont directement enterrées, leur position devra être signalée par des repères de surface ou enterrés;
- les extrémités de toutes les conduites posées seront fermées hermétiquement, afin d'empêcher la pénétration de boue et de saletés;
- selon leur diamètre, les tubes à poser sont livrés enroulés sur des tourets ou sous forme de tronçons rectilignes plus courts. Dans ce dernier cas, pour pouvoir tirer les tubes à l'intérieur du forage, il faut raccorder les différents tronçons les uns avec les autres avant de commencer le tirage. Cela est nécessaire pour prévenir des variations du diamètre extérieur des tubes, ce qui pourrait créer des problèmes pendant le tirage;
- si deux tronçons de tube doivent être raccordés dans un puits ou dans un trou d'homme, il y a lieu d'utiliser des accouplements mécaniques (par exemple, en matière plastique ou en laiton), lorsqu'on en dispose. Ces accouplements réalisent une fermeture hermétique, nécessaire quand on utilise de l'air ou de l'eau pour la pose ultérieure des câbles;
- s'agissant des tubes métalliques, on appliquera les recommandations de l'ISO 6761 pour les travaux de raccordement.

6.1.3 Inspection des conduites

A l'achèvement des travaux d'installation,

il est recommandé:

de contrôler le diamètre intérieur sur toute la longueur des conduites, afin de s'assurer qu'il n'y a pas eu de rétrécissement ni d'obstruction dans les conduites pendant le tirage.

On peut effectuer cette opération simplement en insufflant dans le tube une sonde circulaire de faible poids, ayant un diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du tube. Cette sonde atteindra l'autre extrémité du tube s'il n'y a pas de rétrécissements ni d'obstructions. Un procédé plus précis

consiste à utiliser un système de télévision en circuit fermé (CCTV, *close circuit television*) associé à un câble semi rigide qui permet de pousser la caméra dans le tube à partir d'un point d'accès unique.

6.2 Travail avec la taupe à percussion

Après avoir déterminé l'amorce du forage, on lance la taupe, en lui faisant parcourir une courte distance. Pour éviter d'avoir un défaut d'alignement par rapport au tracé nominal,

il est recommandé:

- de vérifier une dernière fois le tracé avant que la totalité du corps de la taupe ne pénètre dans le sol;
- de refaire le forage si la ligne est fautive;
- d'utiliser, quand cela est possible, des radiosondes pouvant être fixées à l'arrière de la taupe ou, dans certains cas, sur la face avant. Les sondes montées à l'arrière donnent une indication sur la progression de la taupe, mais elles fournissent moins d'informations utiles que les sondes montées à l'avant. Selon la taille de la taupe, notamment sa longueur, la sonde arrière peut se trouver à une certaine distance de l'extrémité de pénétration de l'outil; elle réagit par conséquent beaucoup plus tard qu'une sonde avant aux changements de direction et de pente, de sorte que l'opérateur dispose de moins de temps pour arrêter le forage et réfléchir à l'opération suivante. D'un autre côté, les sondes à montage avant doivent être beaucoup plus robustes et beaucoup mieux protégées, car elles doivent résister à l'impact des forces appliquées à l'avant du système par le martèlement.

Si une taupe à percussion est déviée ou arrêtée par un obstacle, il est souvent plus facile de forer verticalement jusqu'au système, éliminer l'obstacle, réaligner et relancer la taupe, plutôt que de recommencer à forer. Cette opération est souvent facilitée par le système de marche arrière dont sont équipées aujourd'hui la plupart des taupes à percussion; ce système permet à l'engin de reculer lorsqu'il rencontre un obstacle, jusqu'à un point où son orientation et son niveau étaient corrects. Après élimination de l'obstacle et remblaiement du trou, la taupe est relancée sur l'itinéraire prévu.

Par ailleurs, on accorde une attention particulière à la profondeur d'installation, afin de réduire à un minimum ou d'empêcher les dégâts en surface en raison des limites de compression des sols.

Il est par conséquent recommandé:

de réaliser le forage à une profondeur d'au moins un mètre pour chaque fraction de 100 mm de diamètre de l'outil.

Dans la plupart des pays, les canalisations des services publics (à l'exception des égouts) sont posées à des profondeurs inférieures à deux mètres. Cela donne une limite supérieure nominale de 200 mm pour le diamètre des taupes à percussion.

6.3 Battage des tubes

Pour une bonne utilisation des systèmes de battage des tubes,

il est recommandé de procéder comme suit:

- comme il n'est pas possible en général de contrôler la direction d'un tube pendant l'opération, il est indispensable de bien définir le trajet de forage avant de commencer les travaux;
- lorsqu'on utilise un système à extrémité ouverte (voir Appendice I), le cylindre de terre contenu à l'intérieur de la circonférence de l'arête tranchante reste dans le tube pendant le forage. Cette accumulation de déblais ne pose généralement pas de problème avec les petites distances sur lesquelles on pratique habituellement le battage des tubes. En revanche, pour les forages sur de grandes distances, il ne faut pas oublier que les déblais augmentent le poids de la chaîne de tubes soumis au battage, ce qui ralentit l'avancement. Dans certains

cas, il peut être indiqué d'éliminer les déblais de l'intérieur même des tubes pendant le rallongement de la chaîne de tubes, afin de limiter la charge supplémentaire appliquée au mouton de battage. Selon le diamètre utilisé, cette opération peut être faite manuellement ou avec un racloir;

- s'il est inutile de procéder à un nettoyage intermédiaire et si les déblais demeurent dans le tube pendant toute la durée du forage, ils devront être évacués à l'extrémité de l'installation. En cas d'utilisation d'eau sous pression ou d'air comprimé, l'extrémité ouverte du tube sera fermée hermétiquement à l'aide d'un bouchon approprié.

6.4 Fonçage des tubes et percement de microtunnels

Compte tenu des indications données dans l'Appendice I dans le cadre de la description détaillée des techniques,

il est recommandé:

de prendre en compte les points suivants avant de lancer les travaux:

- la déviation au droit des raccords des tubes ne doit pas dépasser $0,5^\circ$, mais on pourra accepter des déviations supérieures à $1,0^\circ$ sur les parcours incurvés avec utilisation de matériaux amortisseurs appropriés dans les raccords des tubes;
- l'opérateur devra veiller spécialement à maintenir un parcours de forage aussi rectiligne que possible, afin de profiter pleinement de la charge nominale du tube. Une grande déviation diminue la charge maximale que la chaîne de tubes peut supporter sans risque de rupture des tubes dans le sol;
- les raccords placés entre les tubes ne doivent pas dépasser le corps des tubes. En d'autres termes, le raccord tout entier doit se trouver à l'intérieur du diamètre hors tout normal du tube;
- il convient d'utiliser à bon escient les substances et les techniques de graissage, afin de réduire considérablement les charges de fonçage ainsi que les problèmes de stabilité du sol. Cela permet aussi le recours à des bâtis de fonçage de plus petites dimensions, d'où réduction au minimum de la taille du puits de forage et abaissement du prix de revient total du projet;
- le lubrifiant sera injecté immédiatement dans l'espace annulaire créé par le tunnelier, cela de façon ininterrompue pendant le percement du microtunnel;
- il est conseillé de consulter des techniciens spécialistes des boues avant de commencer à percer le microtunnel. Ces spécialistes pourront recommander les lubrifiants et les procédés les plus appropriés, compte tenu de l'état du sol et des nappes phréatiques;
- la nature du sol peut influencer sur le type et la quantité de lubrifiants nécessaires pour maintenir un faible frottement. Il faut par conséquent savoir comment la nature du sol varie sur le parcours des tubes;
- il est possible que le graissage d'un tube ne suffise pas pour le bon déroulement de l'opération de fonçage (par exemple, si le tube est d'une longueur telle que sa résistance au déplacement dépasse les possibilités d'un bâti de fonçage de taille courante, ou encore s'il se révèle difficile de surmonter les forces de frottement ou de s'opposer aux mouvements du terrain). Dans ce cas, il convient d'envisager la solution des "stations de poussée intermédiaires" avant de réduire la longueur programmée du chantier (voir Appendice I);
- il est essentiel de bien choisir le hors-profil (différence entre le diamètre excavé du forage et le diamètre hors tout du bouclier ou du tube pour l'exécution des poussées de percement des microtunnels sans mettre en œuvre des efforts de fonçage excessifs et sans risquer de tasser la surface. Les valeurs types du hors-profil peuvent aller de 0,7 à 3,7 cm sur le rayon, en fonction du diamètre de la machine, de la profondeur par rapport à la surface et de l'état du

sol. Même dans ce cas, il est conseillé de consulter des spécialistes des sols ainsi que les constructeurs des matériels pour choisir le bon hors-profil en fonction de l'état du sol;

- l'assèchement du sol devant être traversé par la machine de percement d'un microtunnel peut avoir une influence spectaculaire sur l'effort total exercé par le fonçage. Cette opération est souvent nécessaire pour la construction des puits et, dans certains cas, pour sortir le bouclier du sol et l'introduire dans le puits. En revanche, si on assèche au-delà de ce point, cela influe défavorablement sur le percement du microtunnel. Il peut souvent en résulter des modifications profondes de la matrice du sol; l'assèchement est, le plus souvent, une opération inutile et coûteuse dans les travaux de percement des microtunnels. Cela étant, il est conseillé d'avoir recours à l'assèchement seulement pour préparer le terrain en vue du percement, et non durant l'avancement de la machine;
- il est essentiel de guider progressivement le système de percement du microtunnel pendant le déplacement, afin d'abaisser les charges de fonçage à un niveau aussi bas que possible. L'opérateur vérifiera en permanence la position du bouclier par rapport à la pente et à l'itinéraire requis, et il fera de petites corrections de guidage pour maintenir le bouclier de percement en ligne. Il n'y a pas lieu de faire de brusques corrections si les études préalables ont été bien conduites; de telles corrections sont à proscrire;
- il y a une tendance à effectuer des mouvements de guidage brusques et de grande ampleur pour corriger la position. Il est donc essentiel que la machine soit lancée sur le bon trajet si l'on veut éviter d'avoir à faire ces corrections dans la première partie du percement.

7 Archives et documentation

Les emprises réservées aux services publics et les croisements existants sont toujours plus encombrés par de nouvelles installations. La tenue à jour d'une documentation précise aux fins de références futures revêt par conséquent une importance de plus en plus grande.

Il est donc recommandé:

d'établir des journaux chronologiques ou des rapports sur les forages, avec les renseignements suivants:

- emplacement des tubes installés;
- données spécifiques;
- données de temps et d'emplacement;
- nature des sols;
- données de forage, par exemple: profondeur, angle et vitesse de pénétration, croisements avec d'autres infrastructures.

8 Nature du sol

8.1 Forage guidé/forage directionnel

Les possibilités des machines de forage guidé peuvent varier dans de très larges limites selon le type de sol. D'une manière générale, les meilleurs résultats sont obtenus dans les argiles homogènes. Le sable peut présenter des difficultés, surtout s'il se trouve en dessous de la nappe phréatique et s'il n'est pas stable. Le forage est possible dans le gravier, au prix d'une usure accélérée de la tête de forage. Dans le cas du gravier, il est indispensable d'utiliser de la boue pour renforcer les parois du tunnel.

Pour choisir une technique appropriée au type de sol auquel on a affaire, on se conformera aux directives ci-après et on tiendra compte de la classification donnée dans le Tableau 2:

- en général, les machines courantes fonctionnant sans action de percussion et non équipées de moteurs à boue ne conviennent pas pour la pénétration dans les roches ou les enclaves dures;
- on peut utiliser, pour entraîner les têtes de forage dans les roches, des moteurs à boue commandés par la boue de forage dans des systèmes à double tube et enveloppe de tête;
- l'emploi de l'action de percussion, associée à la poussée d'avancement et à la rotation, permet d'améliorer les résultats dans les sols durs;
- la percussion améliore la pénétration et la commande du guidage dans les sols pierreux ou dans les roches tendres, mais cette technique ne convient pas pour le forage dans des roches compactes ou dans de grandes masses de matériaux très durs comme le béton;
- la pénétration dans les formations de roches dures est possible avec les foreuses à sec, qui associent percussion, poussée et rotation, avec lubrification par pulvérisation d'eau;
- le forage sous boue est une technique plus souple en ce qui concerne des sols et des diamètres maxima réalisables. Son inconvénient est de nécessiter un plus grand volume de matériel et, par ailleurs, on a des problèmes du fait de la présence d'excavations remplies de boue et de la nécessité d'évacuer ou de recycler les matériaux;
- le forage à sec est essentiellement une technique par déplacement. Son application optimale est donc le traitement des sols compressibles et stables; en revanche, il ne convient pas toujours dans le cas des sables et des graviers pour les diamètres de forage supérieurs à 75 mm. Il faut aussi tenir compte du risque de dégâts en surface, surtout dans les sols à consistance granulaire.

Le Tableau 2 donne une classification générale des systèmes appropriés pour le forage guidé, avec indication des différents types de sol (voir aussi l'Appendice I).

Tableau 2/L.38 – Classification générale des techniques de forage guidé et directionnel (voir l'Appendice I) à employer en fonction du type de sol

Type de sol	Technique de forage
Vase, argile, sable	jet sous basse pression forage à sec
Gravier, marne, déblais, schistes argileux, argiles	jet sous haute pression forage à sec systèmes à double tube et enveloppe de tête coupante moteurs à boue
Marne, déblais, argiles, calcaire, grès	jet sous haute pression systèmes à double tube et enveloppe de tête coupante forage à sec (percussion et lubrification par pulvérisation d'eau) moteurs à boue
Calcaire, grès, certains granits, déblais, gneiss	moteurs à boue avec enclaves de carbure de tungstène ou de diamant forage à sec (percussion/rotation et lubrification par pulvérisation d'eau)

8.2 Percement par taupe à percussion

La taupe à percussion a une action de tassement. De ce fait, cette technique est recommandée uniquement dans les sols pouvant être comprimés ou déplacés.

8.3 Battage des tubes

Selon la nature du sol, l'opération de battage peut être effectuée avec un tube à extrémité ouverte ou fermée. On accorde généralement la préférence à l'extrémité ouverte. Cette technique présente plusieurs avantages, parmi lesquels une moindre réaction à l'effort de battage; la raison en est que seul le couteau est enfoncé dans le sol.

Il est donc recommandé:

- d'avoir recours au battage avec extrémité ouverte dans les sols durs car, la surface du couteau étant petite, il n'est pas nécessaire que le sol soit compressible;
- d'avoir recours au battage avec extrémité fermée dans les sols instables, car la terre est déplacée autour du tube et tassée sur les parois du forage.

8.4 Fonçage des tubes et percement de microtunnels

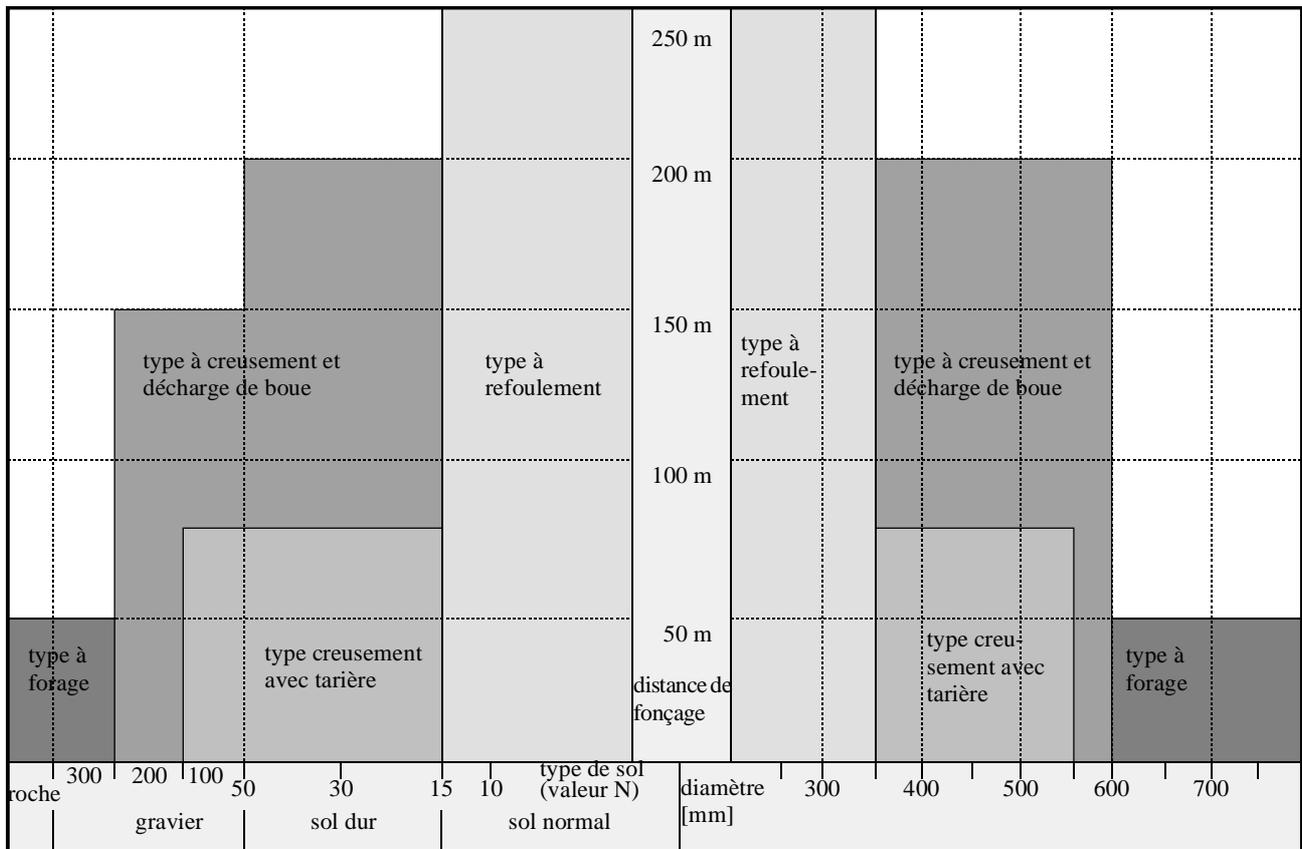
Ces dernières années, les techniques modernes ont permis d'appliquer ces deux méthodes à une grande diversité de types de sol: sables et graviers gorgés d'eau; argiles molles ou dures, sèches ou gorgées d'eau; marnes et roches compactes.

Il est possible de classer les méthodes de percement des microtunnels en fonction de la qualité des résultats qu'elles donnent dans différents types de sol (voir Tableau 3).

De plus, il est recommandé de prendre en compte les points suivants:

- la méthode de fonçage ou de refoulement sera utilisée exclusivement dans les sols pouvant être comprimés;
- on pourra appliquer la méthode de creusement par tarière dans une grande variété de qualités de sol, en choisissant la tête de creusement appropriée. Toutefois, la foreuse a un front ouvert, ce qui la rend inapte au travail dans les sols friables;
- la méthode avec boue peut être utilisée dans une grande variété de qualités de sol, depuis les sols friables et extrêmement tendres jusqu'aux graviers;
- le plus vaste domaine d'application est celui de la méthode avec compensation de la pression de la boue. On peut même utiliser cette méthode dans des sols contenant du gravier et des pierres; pour ce faire, on monte des disques de coupe ou une tête d'écrasement de forme conique;
- la méthode du forage peut être mise en œuvre dans des sols très durs, moyennant l'utilisation d'une mèche ultra dure à l'extrémité du tube intérieur.

Tableau 3/L.38 – Domaines d'application de plusieurs techniques de creusement de microtunnels en fonction de la distance de fonçage, du diamètre du tunnel et de la nature du sol



T0604310-98

9 Applications

9.1 Forage guidé/forage directionnel

Une foreuse guidée typique pour distances moyennes, à lancement en surface a une poussée et une reprise comprises entre 8000 et 15 000 kg, et un couple pouvant atteindre 5000 Nm, selon sa vitesse de rotation. En fonction de la nature du sol, une telle machine permettrait en général d'installer des tubes d'environ 250 à 500 mm de diamètre sur des distances allant de 100 à 350 mètres.

Les plus gros équipements de forage directionnel, avec une poussée pouvant dépasser 100 000 kg, sont utilisés principalement sur les aires de croisement de grande longueur ou de grand diamètre, sous les cours d'eau, les estuaires, les routes à grande circulation et pour de longs tronçons. A l'autre extrême, on a des appareils compacts avec une poussée et une reprise d'environ 4000 kg, pour poser des tubes dont le diamètre maximum peut atteindre 160 mm, sur des distances pouvant aller jusqu'à 100 mètres. Ici encore, les résultats dépendent de la nature du sol. Certaines de ces machines sont dotées d'un dispositif qui réduit l'espacement des rails pour permettre le passage par des ouvertures étroites.

Il existe des foreuses à sec guidées, équipées d'un réaléreur conique avec dents de coupe en carbure de tungstène reliées directement aux tiges de forage. Ces matériels sont capables d'installer des tubes, des conduites ou des câbles de petit diamètre (jusqu'à environ 65 mm).

Pour installer à sec des tubes dont le diamètre peut atteindre 250 mm, il faut une tête de forage équipée d'un réaléreur à commande pneumatique.

9.2 Forage par taupe à percussion

Ce type de forage n'étant généralement pas guidé, il se prête le mieux à l'exécution de tunnels courts (jusqu'à 50 mètres). Il est souvent plus facile d'obtenir un forage rectiligne pour les grands diamètres. Les diamètres vont d'environ 45 à 200 mm, selon le tube ou le câble à poser.

9.3 Battage des tubes

L'application la plus répandue du battage des tubes est la pose de nouvelles conduites ou de nouvelles enceintes destinées à l'installation de nouvelles infrastructures. Les distances de pose sont généralement très courtes, de l'ordre de 50 mètres en moyenne. On utilise des tubes d'acier pour les enceintes, car aucun autre matériau n'est assez résistant pour pouvoir supporter les chocs développés par le marteau. On a souvent recours à cette technique pour passer sous les voies ferrées, les routes et les cours d'eau. Une fois installée, la tuyauterie en acier peut être utilisée comme canalisation en tant que telle, ou comme conduite pour la plupart des types de tube ou de câble.

Il est possible d'installer, dans les sols qui s'y prêtent, des tubes dont le diamètre peut atteindre 2000 mm, au moyen de moutons de battage de diamètre maximum 600 mm développant l'équivalent d'une force de battage supérieure à 2 millions de kg.

9.4 Fonçage des tubes et percement de microtunnels

Ces deux techniques conviennent dans les cas où la conduite à poser doit répondre à des critères stricts en matière d'orientation et de niveau. Les systèmes de guidage et de commande permettent une installation précise, avec des tolérances serrées par rapport au nominal.

La plupart des fonçages pour le percement des tunnels sont rectilignes entre les puits, mais il existe aussi des systèmes spécialisés qui permettent de réaliser des fonçages incurvés. Dans certains cas, du fait de la courbure du tunnel, il n'est pas possible de réaliser la visibilité directe entre le puits de fonçage et la machine de percement. Dans ces cas, on peut remplacer les systèmes laser habituels par des systèmes d'alignement spécifiques (par exemple: dispositifs gyroscopiques, systèmes combinant l'induction électromagnétique avec la pression liquide différentielle).

Le Tableau 3 indique les domaines d'application recommandés.

10 Conclusion

Compte tenu de l'ensemble des informations données dans la présente Recommandation et dans l'Appendice I,

il est recommandé de recourir aux techniques sans travaux de tranchées dans les cas suivants:

- les pouvoirs publics limitent ou interdisent les travaux d'excavation sur la voie publique (routes nouvellement construites, entrées et sorties d'urgence pour les véhicules, etc.);
- la méthode de terrassement avec tranchées ouvertes ne permet pas d'assurer la sécurité et est une source de danger pour la circulation des véhicules et pour les piétons;
- cette méthode est génératrice de bruit, de vibrations, de poussière et autres agents de pollution;
- la méthode avec tranchées ouvertes peut interrompre la circulation des véhicules et, de ce fait, porter préjudice aux activités des commerces avoisinants;
- sur certains tronçons encombrés, cette méthode risque d'endommager les infrastructures d'autres compagnies; sur d'autres tronçons, la présence d'objets enterrés diminue fortement l'efficacité des travaux;
- les conduites doivent être posées à de grandes profondeurs et la construction avec tranchées ouvertes augmenterait considérablement le volume de terre déplacée;

- les revêtements des routes sont réalisés avec des matériaux de haute qualité, ce qui augmenterait le coût de la remise en état;
- sur les tronçons de route écoulant une circulation intense de véhicules, les travaux ne peuvent être exécutés que la nuit (moindre efficacité, gonflement des dépenses de main-d'œuvre);
- avec la construction en tranchées ouvertes, on encourt des frais supplémentaires pour le déplacement des vestiges historiques ou d'autres objets.

11 Glossaire

11.1 méthode d'excavation par tarière: système d'excavation comportant un transporteur sans fin dans la machine de fonçage pour l'évacuation des déblais.

11.2 système de localisation par câble: système de contrôle fonctionnant avec une liaison directe par câble entre la sonde et le récepteur.

11.3 station de poussée intermédiaire: dispositif de forme circulaire, formé par des vérins hydrauliques placés dans une enceinte en acier introduite dans la chaîne des tubes de forage en des points stratégiques. Il a pour fonction de réduire la force de poussée (fonçage) exercée sur les tubes.

11.4 taupe: appareil de forage sous la surface du sol.

11.5 moteur à boue: moteur hydraulique actionné par un flux de boue à haute pression; il est placé à l'intérieur de la tête de forage.

11.6 valeur N: nombre de coups nécessaires à un pénétromètre pour s'enfoncer de 30,5 cm dans le sol en laissant tomber un poids normalisé d'une hauteur de 76 cm (test de pénétration standard de l'ASTM).

11.7 méthode de terrassement avec tranchées ouvertes: méthode de construction consistant à creuser une tranchée ouverte.

11.8 joint à rotule: joint mécanique qui empêche la transmission des forces de rotation.

11.9 système de contrôle en surface (walk-over): système de contrôle dans lequel un opérateur suit l'avancement du forage en surface au moyen d'un récepteur à distance.

APPENDICE I

Techniques disponibles

I.1 Forage guidé, forage directionnel

Les techniques du forage guidé et du forage directionnel sont utilisées pour la pose de nouveaux câbles, canalisations et conduites sans travaux de tranchées. Le parcours de forage peut être rectiligne ou graduellement incurvé et il est possible de régler la tête de forage à un moment quelconque de l'opération pour contourner des obstacles ou pour passer sous des routes à grande circulation, des cours d'eau ou des voies ferrées. Le forage peut s'effectuer entre des puits de départ et d'arrivée creusés à l'avance, ou à partir de la surface en réglant la machine pour qu'elle perce le sol sous un petit angle: c'est surtout ce dernier cas qui fait l'objet de la présente Recommandation. Aux points de vue du domaine d'application et des possibilités qu'ils offrent, le forage guidé et le forage directionnel sont des techniques intermédiaires entre le percement avec taupe à percussion et le percement de microtunnels. Au sens de cette Recommandation, les termes anglais "guided boring" et "directional drilling" sont synonymes. On se sert fréquemment du second de ces termes pour désigner les plus gros travaux dans ce secteur, par exemple les croisements avec d'importants cours d'eau, canaux et autoroutes, souvent sur de grandes distances. Cependant, il existe aujourd'hui

tellement de points communs entre les matériels qu'il est probablement inutile et sans objet de faire une distinction entre les techniques couvertes respectivement par les deux termes.

Dans la plupart des cas, la pose des tubes définitifs ou des conduites se fait en deux temps. On perce tout d'abord un trou pilote sur le trajet voulu (voir Figure I.1a), après quoi on agrandit le diamètre de forage par une opération de réalésage pour loger le tube définitif (voir Figure I.1b). Au cours de cette deuxième étape, le tube définitif est fixé au réalésateur au moyen d'une articulation à rotule et il est introduit dans le forage agrandi pendant que la chaîne de tubes de forage est retirée. Dans des sols difficiles, ou si l'agrandissement du diamètre est considérable, on pourra opérer deux ou plusieurs réalésages intermédiaires pendant lesquels le diamètre du forage se trouve progressivement agrandi.

Les possibilités des matériels ont été améliorées au cours des dernières années et l'on a pris conscience de plus en plus des avantages de la technologie du forage sans tranchées pour les nouveaux travaux de construction. Certaines compagnies de services publics hésitent à présent à utiliser les techniques avec tranchées ouvertes (principalement sur les routes) lorsqu'il leur est possible de recourir à la technique sans terrassement. Hormis les avantages évidents de cette technique en ce qui concerne l'environnement, le prix de revient du forage guidé est maintenant inférieur à celui des tranchées dans de nombreuses applications, sans parler des autres inconvénients des travaux de tranchées: coûts sociaux, bouleversements et retards dans la circulation automobile.

I.1.1 Méthodes

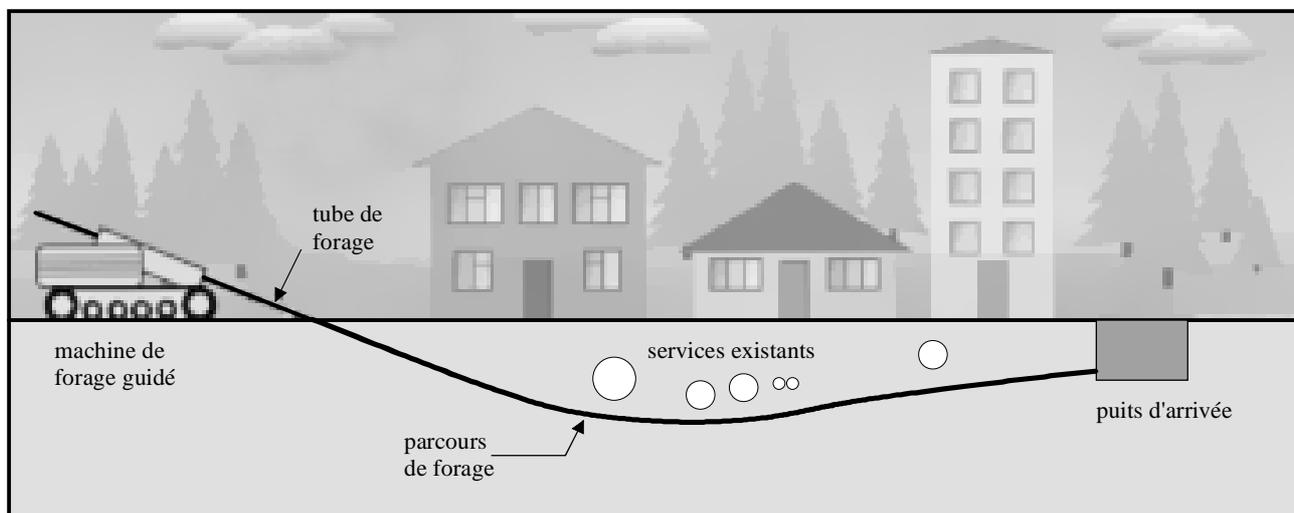
La plupart des machines de forage guidé, mais pas toutes, fonctionnent avec une tête de forage sous boue qui est poussée dans le sol à l'extrémité d'une chaîne de tubes de forage. La tête est généralement à structure angulaire, si bien que la rotation ininterrompue de la chaîne donne un forage rectiligne; à l'inverse, si la tête est maintenue en position fixe, on obtient un écart par rapport à la ligne. Une sonde ou balise est en général placée dans la tête ou à proximité de celle-ci; cet appareil émet des signaux qui sont captés et repérés par un récepteur situé en surface, ce qui permet de contrôler la direction, la profondeur et d'autres paramètres. Il existe aussi des systèmes de guidage avec transmission par un câble placé à l'intérieur de la chaîne de forage; on a recours à ce procédé en particulier lorsque le parcours de forage ne peut pas être déterminé facilement en surface (par exemple, au croisement avec des cours d'eau) ou lorsque la profondeur est trop grande pour pouvoir faire des repérages précis par voie radioélectrique. On trouve également des systèmes de localisation qui fonctionnent en magnétométrie.

Dans beaucoup de cas, la boue de forage est un mélange de bentonite et d'eau, qui a pour fonction d'évacuer les débris en suspension et qui peut être filtré par un système de recirculation. Une fois le forage pilote effectué, la boue thixotropique stabilise le trou pour le préparer au réalésage. Le tube ou la conduite de service, généralement en polyéthylène ou en acier, est introduit(e) derrière le réalésateur au fur et à mesure que le diamètre initial est agrandi.

Avec les grosses machines, le travail est effectué en grande partie par la rotation de la chaîne de forage et le couple de cette rotation est aussi important que la poussée axiale et la reprise. Comme dans les unités plus petites, la pratique courante est de percer un trou pilote plus petit, puis de pratiquer un réalésage jusqu'à obtention du diamètre requis, tout en tirant la conduite derrière le réalésateur. On utilise une boue de forage pour faciliter l'opération et pour lubrifier et refroidir la tête de forage. On peut aussi se servir de la boue pour actionner un "moteur à boue" dans le découpage des roches et d'autres formations dures, auquel cas il faut travailler avec des débits de boue plus forts.

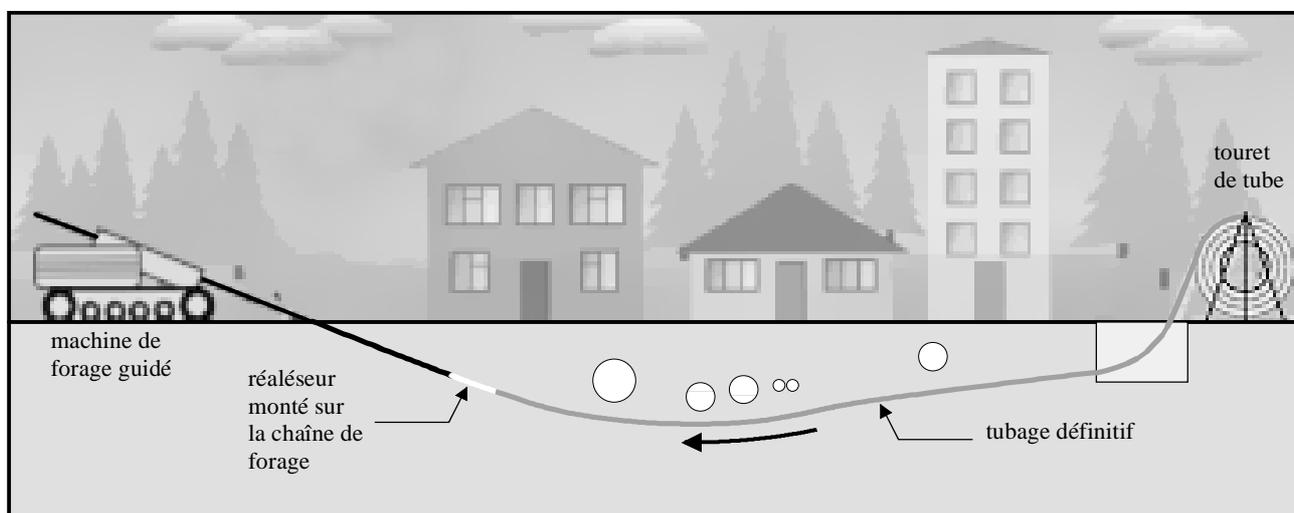
Certains systèmes sont conçus pour fonctionner à sec, c'est-à-dire sans boues de forage. Ces systèmes sont d'une utilisation plus simple, ils produisent moins de déchets et nécessitent moins de matériel sur site. En revanche, on risque d'avoir des restrictions quant aux dimensions pouvant être installées et aux types de sol dans lesquels la machine peut être utilisée.

On a de plus en plus tendance à avoir recours à la percussion comme complément à la force axiale et à la rotation. Ce procédé est mis en œuvre à l'aide d'un marteau à percussion placé sur la tête de forage, ou en générant la percussion dans la machine en surface et en la transmettant le long de la chaîne de forage. Ces deux variantes du procédé améliorent notablement la capacité des machines de forage guidé à percer des sols difficiles ou des enclaves dures.



T0604320-98

Figure I.1a/L.38 – Représentation générale de la technique du forage guidé : percement du trou pilote



T0604330-98

Figure I.1b/L.38 – Représentation générale de la technique du forage guidé : réalésage et introduction du tubage définitif

I.1.2 Machines de forage

Les constructeurs du monde entier proposent les matériels les plus divers, depuis des appareils compacts pour les petits diamètres et les petites longueurs de pose, jusqu'à de très grosses machines capables d'installer des tubes de grand diamètre sur des parcours de longueur nettement supérieure à

un kilomètre. Il y a aussi sur le marché une gamme tout aussi vaste de systèmes de guidage de forage, de têtes de forage, de réalésers et d'accessoires.

Les machines lancées en surface sont souvent installées sur chenilles et peuvent s'autopropulser en position. Elles ne nécessitent pas de puits de départ ni d'arrivée pour poser une nouvelle canalisation, mais des travaux de terrassement sont néanmoins nécessaires pour les connexions à chaque extrémité. Si l'on admet que ces tubes de connexion se trouvent à une certaine profondeur sous le niveau du sol, il se peut que les premiers mètres de nouvelle canalisation soient gaspillés pour le forage jusqu'à la profondeur requise.

Certaines des machines les plus compactes peuvent fonctionner à partir d'une excavation à peine plus grande que celles nécessaires pour effectuer le raccordement après installation ou directement à partir des trous d'homme existants. Ces machines sont généralement conçues pour effectuer des forages très sensiblement rectilignes; elles utilisent souvent des tubes de forage plus rigides que ceux des systèmes lancés en surface. De ce fait, leurs possibilités sont moindres pour ce qui est du contournement des obstacles. La longueur des divers tronçons du tube de forage est aussi limitée par la taille de l'excavation, ce qui peut avoir une influence sur la vitesse de pose et sur le prix du tube.

I.1.2.1 Forage sous boue

Toutes les foreuses guidées fonctionnant sous boue possèdent trois caractéristiques fondamentales. La première est un dispositif mécanisé qui pousse la chaîne de forage dans le sol pour percer le trou pilote, puis la tire avec le tube définitif le long du tunnel pendant l'opération de réalésage. Dans une disposition typique, l'inclinaison de ce dispositif sur une machine lancée en surface peut être réglée à des valeurs comprises entre 10° et 20° sur l'horizontale. La deuxième caractéristique est la présence d'un moteur et d'un système d'entraînement qui font tourner la chaîne de forage (ainsi que la tête de forage ou de réalésage qui en est solidaire) et qui fournissent le couple moteur. Enfin, la troisième caractéristique est la présence d'un système hydraulique effectuant l'injection de la boue sous basse ou haute pression, qui représente la principale force de forage pour certaines machines.

Les machines lancées à partir d'un puits sont maintenues en position dans le puits de lancement ou le trou d'homme et on se sert de leurs faces arrière et avant pour développer la réaction aux forces de poussée et de reprise.

Les machines lancées en surface sont dotées d'un système d'appui qui les verrouille sur le sol. Il peut s'agir d'un système à commande hydraulique dans les machines les plus perfectionnées. Certaines machines de ce type sont des unités autonomes, avec cuves et pompes de mélange incorporées pour la boue de forage, le tout étant complété par le système d'alimentation en énergie, des soupapes et les systèmes de commande. Dans une autre forme de réalisation, une boue distincte est pompée dans la chaîne de forage creuse jusqu'à la tête de forage et revient en parcourant l'espace délimité par la chaîne de forage et les parois du tunnel. La boue, mélangée aux déblais, est généralement introduite par pompage dans une unité de filtrage pour séparation et recyclage.

Les machines de forage, surtout celles du type à lancement en surface, peuvent être pourvues d'un système de chargement automatique des tubes de forage. Dans ce système, les longueurs du tube sont contenues dans un "carrousel"; elles sont automatiquement ajoutées à la chaîne de forage, ou détachées de cette chaîne, pendant les opérations de forage ou de réalésage. Ces manœuvres peuvent s'effectuer en liaison avec un système de serrage automatique qui visse les tubes de forage les uns aux autres, ou les dévisse pendant le réalésage. La manutention automatique des tubes se répand de plus en plus, même dans les petites machines, car ce procédé accélère la pose, renforce la sécurité et réduit les besoins de main-d'œuvre.

On a un très vaste choix d'outils et d'accessoires de réalésage, dont la plupart possèdent des caractéristiques censées améliorer les performances. La plupart des réalésers sont de forme fuselée, avec des dents en carbure de tungstène et des buses pour l'injection de la boue. A l'arrière du réalésers se trouve un accouplement sur lequel on peut fixer une tête de traction pour introduire le

tube définitif. Il existe des modèles spéciaux pour les sols difficiles, notamment des aléseurs pour le travail dans la roche.

On a mis au point des systèmes spéciaux fonctionnant sous boue pour le forage dans les roches: système à double tube, système dit à "tubage", moteurs à boue.

Le système à double tube fonctionne avec deux ensembles de tubes de forage coaxiaux. Les tubes intérieurs entraînent l'outil de forage (qui est en général une tête de forme triconique) et le réaléseur; les tubes extérieurs commandent la rotation d'un porte-captur préfileté qui assure le guidage du forage.

De même que pour le système à double tube, dans le cas du système avec tubage de tête, on applique le principe de l'entraînement mécanique d'une tête triconique par l'intermédiaire des tubes, mais la différence est la suivante: en lieu et place d'un second ensemble de tubes coaxiaux, le guidage de la tête est déterminé d'après la position dans le sol d'un "boîtier" asymétrique qui entoure le premier tube et qui peut être verrouillé ou déverrouillé à volonté. Ce système est capable d'orienter le déplacement dans la direction voulue.

Les moteurs à boue sont placés à l'avant de la chaîne de tubes. Ils ont une forme incurvée, d'où la possibilité de les diriger. Un moteur hydraulique (rotor et stator) actionné par un flux de boue sous haute pression fait tourner l'outil de forage (tête triconique contenant des enclaves dures: carbure ou même diamant) placé sur la tête du moteur à boue. Le guidage peut être réalisé à l'aide de câbles groupés sur les tubes, lorsque ceux-ci avancent, ou à l'aide d'un détecteur.

I.1.2.2 Forage à sec

La plupart des foreuses guidées utilisent une boue pour lubrifier la tête de forage, ramener les débris au puits de départ et pour stabiliser le tunnel, mais à côté de ces appareils il existe des systèmes qui fonctionnent à sec. On en trouve des versions pour lancement en surface et lancement à partir d'un puits. Au demeurant, les foreuses à sec ont tendance à être plus compactes et plus simples que les machines à boue.

Ces machines n'opèrent pas exclusivement par la poussée et la rotation générées localement. Elles sont pourvues d'un marteau pneumatique haute fréquence sur la tête de forage pour la pénétration et le tassement de la terre à l'intention du forage pilote. A ce point de vue, le principe est assez voisin de celui de la taupe à percussion agissant à l'extrémité des tubes de forage creux qui eux aussi agissent comme des organes d'entraînement pneumatique. Comme dans les systèmes fonctionnant avec boue, la tête coupante qui précède le marteau est de forme angulaire, ce qui permet de guider le forage en arrêtant la rotation dans une orientation donnée.

Pour la pose des tubes, conduites ou câbles de petit diamètre (jusqu'à environ 65 mm) par forage à sec, on peut relier directement aux tiges de forage un réaléseur conique pourvu d'une couronne coupante en carbure de tungstène. L'aléseur, équipé de buses à air, est alimenté par l'intermédiaire de la chaîne de forage et un courant d'air rapide nettoie le tunnel pendant le réalésage. Cet aléseur rotatif est tiré en arrière pour agrandir le diamètre; le tube fixé à l'arrière est doté d'un raccord à rotule et d'une tête de traction.

Pour la pose à sec de tubes de diamètre allant jusqu'à 250 mm, on se sert d'un mouton à commande pneumatique, la chaîne de forage étant ici encore, fixée à l'arrière du dispositif par une rotule. L'agrandissement du forage est dû principalement à l'action de percussion du mouton de réalésage plutôt qu'à la force de reprise exercée par la machine; il est inutile d'appliquer une rotation pendant le réalésage. Comme dans le cas du marteau pneumatique utilisé pour le trou pilote, l'air nécessaire pour le mouton de réalésage est amené par la chaîne des tubes de forage.

Il existe des machines qui permettent le forage guidé même dans les roches dures: elles associent l'action de percussion d'un marteau pneumatique dans la tête de forage avec les effets de poussée et de reprise, complétés par une rotation générée par un système hydraulique. Ces machines utilisent également de l'air sous haute pression pour actionner le marteau pneumatique, mélangé avec un très

petit pourcentage d'eau et d'un additif biodégradable (lubrification par pulvérisation d'eau). Cet ensemble lubrifie les outils de forage et le tunnel, tout en humectant et en désagrégeant le sol; il en résulte une augmentation du rendement dans les sols secs. Pendant l'opération de forage, l'air comprimé évacue tous les débris, donnant un tunnel propre, complètement débarrassé de la boue.

I.1.3 Tubes de forage

Les tubes de forage sont soumis à des contraintes physiques énormes. Ils doivent avoir une résistance longitudinale suffisante pour pouvoir supporter les forces de poussée et de reprise, une rigidité à la torsion suffisante pour absorber le couple mécanique de la machine, et cependant assez de souplesse pour négocier les changements de direction pendant le forage. Ils doivent également être aussi légers que possible pour faciliter le transport et la manutention, tout en résistant aux endommagements par abrasion et rayure. La longueur des tubes individuels dépend du type de la foreuse et de l'espace dont on dispose. En règle générale, les engins lancés en surface fonctionnent avec des tubes longs de 4 à 5 mètres, tandis que les machines lancées à partir d'un puits utilisent souvent des tubes de longueur comprise entre 1,0 et 1,5 mètre. Le type de raccord le plus couramment employé est le raccord fileté, mais on trouve aussi des fixations à baïonnette dans certains systèmes.

La plupart des constructeurs de machines de forage proposent leurs modèles exclusifs de tubes de forage et il existe des sociétés spécialisées qui fabriquent plusieurs types différents. Il importe, bien entendu, de veiller à ce que les tubes soient parfaitement compatibles avec la machine, surtout si celle-ci comporte un système de maniement automatique des tubes ainsi que d'autres éléments tels que les têtes de forage, les sondes et les réalisateurs.

I.1.4 Boues de forage

Selon sa formulation, la boue de forage peut avoir plusieurs fonctions:

- lubrification de la tête de forage et limitation de l'usure;
- amollissement du sol, afin de faciliter le forage;
- transport des déblais en suspension jusqu'au puits de départ;
- stabilisation du tunnel avant le réalésage;
- lubrification du tube définitif pendant le réalésage et l'insertion;
- actionnement des moteurs à boue pour le forage des sols durs.

Le liquide de forage le plus simple est l'eau. Il est souvent inutile d'en utiliser de plus perfectionnés lorsqu'il s'agit de réaliser des forages de petit diamètre dans un sol de bonne qualité.

Un mélange de bentonite et d'eau est le type le plus courant de liquide de forage ou "boue". La bentonite est une variété d'argile qui possède des propriétés thixotropique, c'est-à-dire qu'elle demeure fluide lorsqu'on la pompe ou qu'on l'agite, mais elle forme un gel au repos. Si on l'agite de nouveau, elle redevient fluide. En conséquence, ce produit se comporte comme un lubrifiant et un agent de transport pendant le forage, mais il se solidifie pour stabiliser le tunnel lorsque le forage s'arrête. Pendant le réalésage, la boue contribue à la lubrification entre le tube définitif et les parois du tunnel; elle a aussi pour effet de réduire la régression du sol et le frottement.

Outre les boues simples eau/bentonite, il existe des produits à base de polymères et un large choix d'additifs qui permettent d'adapter les propriétés du produit à l'état du sol et à la nature du projet. Par exemple, la viscosité doit être suffisamment faible pour permettre la circulation du produit dans le système sous des pressions raisonnables, mais en même temps suffisamment élevée pour empêcher des fuites importantes dans le sol.

La formulation des boues de forage est une science en soi qui est complexe et dont dépend dans une large mesure la réussite des projets. La plupart des constructeurs de machines de forage sont en mesure de recommander les produits les plus appropriés aux diverses applications, de même que les

fabricants des produits. En cette matière, il convient de recueillir les avis des spécialistes, surtout si on a affaire à un sol difficile. Autre point important: les caractéristiques des systèmes de mélange, de pompage, de filtrage et recyclage, notamment pour les grands projets. Là encore, on s'entourera des avis des entrepreneurs et des constructeurs expérimentés.

I.1.5 Systèmes de localisation et de guidage

La plupart des techniques du forage guidé, sauf pour certaines applications sur courtes distances avec lancement à partir de puits, mettent en œuvre des systèmes précis de localisation et de guidage des engins. Les progrès de l'électronique ont permis d'améliorer considérablement les possibilités des dispositifs de localisation. On obtient actuellement une précision élevée.

Il existe plusieurs types de système de localisation. Le système le plus répandu, appelé "walk-over" comporte une sonde ou balise contenue dans une enceinte placée derrière la tête de forage. Cette unité émet un signal radioélectrique qui est capté par un récepteur fonctionnant en surface. Les données émises n'indiquent pas seulement la position et la profondeur de la tête de forage sous la surface: elles renseignent aussi souvent sur l'inclinaison de la couronne de forage, l'orientation de la tête, l'état de la batterie de la balise et la température de la balise. Dans de nombreux cas, ces informations sont transmises à un récepteur monté sur la machine de forage; de cette façon, l'opérateur a un accès direct aux données et il peut effectuer, le cas échéant, les réglages de guidage nécessaires.

A de nombreux égards, les systèmes "walk-over" sont semblables aux détecteurs de tubes et de câbles: le récepteur est déplacé jusqu'à une position qui donne le signal de plus forte intensité, c'est-à-dire le point qui se trouve à la verticale de la balise. Le principal facteur de limitation de ces systèmes est le fait que l'on doit atteindre un point de la surface se trouvant à la verticale de la tête de forage, ce qui peut se révéler difficile ou impossible si le trajet court sous un bâtiment ou sous un plan d'eau. Il est possible de surmonter cette difficulté en utilisant un système de guidage avec transmission par fil ("hard wire") ou une balise contenant une boussole électronique embarquée.

Dans les systèmes "hard wire" un câble placé dans la chaîne de forage transmet les données de la balise jusqu'à la console de commande. Ce câble est une cause de complication, mais il permet de localiser l'engin de forage dans n'importe quel terrain sans être tributaire de la transmission de signaux radioélectriques. Il peut aussi être utilisé en des lieux où s'exercent des interférences électromagnétiques.

Après initialisation sur un azimuth prédéterminé, une balise à boussole indique à l'opérateur si la tête de forage s'est écartée du parcours de forage nominal. L'information d'écart vers la gauche ou la droite est envoyée à un récepteur de localisation et affichée dans un format similaire à une information de roulis et de tangage. Il n'est pas nécessaire que l'opérateur se trouve à la verticale de la balise, ni sur le parcours de forage nominal. Dans certains cas, les données peuvent être reçues après transmission sur des distances supérieures à 300 mètres à partir de la balise.

En raison de l'environnement de travail, les balises doivent avoir une très longue durée de vie et être résistantes aux effets des chocs et des vibrations. Il en est ainsi particulièrement pour les engins de forage à percussion, dans lesquels il faudra sans doute installer un mécanisme d'amortissement des chocs.

Pour éviter d'exposer l'électronique à de fortes charges dynamiques, les machines de forage guidé fonctionnant à sec avec action de martèlement sont équipées d'un système de localisation et de guidage à action magnétométrique. Des aimants permanents sont placés dans une partie du marteau pilote et un champ magnétique est détecté par des magnétomètres en surface. Une unité de traitement informatisée traduit ces données et fournit la position, la profondeur et l'angle de roulis de la tête de forage. Comme dans le cas des balises radioélectriques, l'information de localisation peut être acheminée jusqu'à la console de l'opérateur chargé du forage.

I.1.6 Équipement auxiliaire

Ce sont les grandes unités du matériel auxquelles on s'intéresse le plus, mais il y a aussi de nombreux accessoires dont dépend en grande partie la bonne exécution d'un projet de forage guidé.

Il existe plusieurs types de tête de traction pour les tubes en polyéthylène, parmi lesquels des têtes résistantes à la pression et des modèles spécialement conçus pour le forage guidé. Une des fonctions des têtes de traction pour ce type de forage est d'empêcher l'entrée de la boue de forage ou des débris dans le tube définitif. Les raccords à rotule jouent un rôle essentiel pendant l'opération de réalésage et de tirage des tubes; ils doivent être réalisés de manière à empêcher l'entrée de la boue et des débris dans les paliers. On trouve des modèles dans la gamme de capacités allant de moins de 5 tonnes jusqu'à plus de 200 tonnes.

Certains opérateurs utilisent des raccords aut destructibles pour protéger le tube définitif. Ces connecteurs comportent une série de goupilles qui se brisent sous une charge prédéterminée et qui sont réglées en fonction de la charge de traction admissible pour le tube définitif. Ces dispositifs n'ont pas seulement pour effet de réduire le risque d'endommagement accidentel; ils ont aussi un effet psychologique sur les opérateurs, qui savent ainsi que la force de tirage admissible ne peut pas être dépassée et qui sont dissuadés d'accroître la charge pour améliorer le rendement de leur travail.

Parmi les autres dispositifs auxiliaires importants, on citera les appareils de fusion d'extrémité pour raccorder les tubes en polyéthylène, les enrouleurs de tubes et les dispositifs de tirage de câbles.

I.2 Forage par taupe à percussion

Ce mode de forage, appelé "earth piercing" en Amérique du Nord, consiste à créer un tunnel au moyen d'un outil comportant un marteau placé dans un carter cylindrique approprié, ayant généralement la forme d'une torpille (voir Figure I.2). Le marteau peut être de type hydraulique ou pneumatique. Le terme s'applique en général à des dispositifs non pilotés ou partiellement pilotés, sans liaison rigide avec le puits de départ, dont la progression est fournie par l'action d'un marteau interne pour surmonter la résistance de frottement du sol. Pendant le déroulement de l'opération, le sol est déplacé, et non évacué. Un forage sans soutènement peut être formé dans un sol approprié, ou bien on peut tirer ou pousser un tube immédiatement derrière la taupe à percussion. Il est possible également de tirer des câbles.

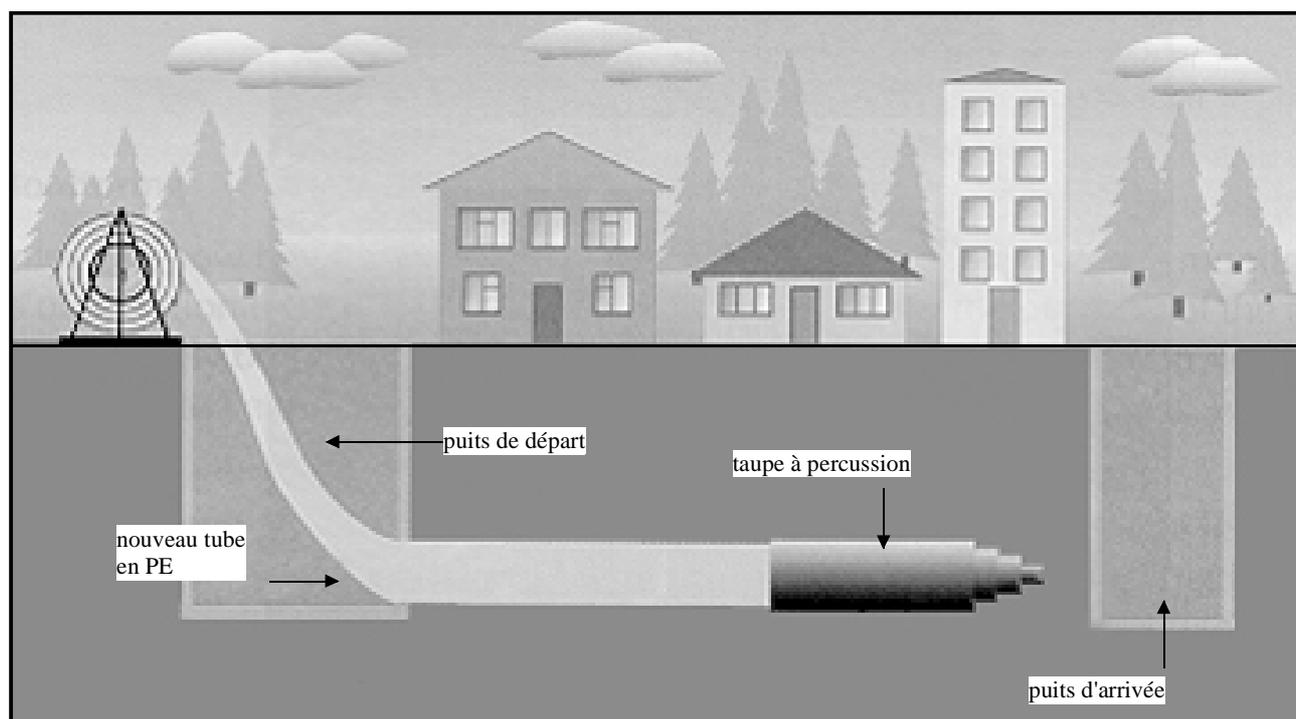
Il existe des taupes à percussion à commande hydraulique, mais la plupart de ces appareils sont actionnés par de l'air comprimé. Un inconvénient éventuel de ces derniers est le risque de contamination du tube définitif par l'huile de graissage présente dans les produits d'échappement, mais il est possible d'y remédier en appliquant certaines méthodes. Les taupes hydrauliques nécessitent deux tuyaux (flux et reflux), elles ont tendance à être plus complexes sur le plan mécanique.

Le mécanisme de base du travail à la taupe à percussion est le mouvement alternatif du marteau à commande pneumatique ou hydraulique dans le cylindre en acier. Le piston est lancé vers l'avant et, lorsqu'il frappe l'extrémité avant de l'appareil, il transmet son énergie cinétique à l'ensemble, qui se trouve propulsé vers l'avant. Pour la course de retour, l'énergie du piston est réglée à une valeur qui permet le repositionnement pour la frappe suivante vers l'avant, plutôt que de rétrograder l'ensemble pour le faire sortir du forage (à moins que cela ne soit nécessaire).

Les chocs successifs exercés par le piston du marteau font avancer l'ensemble du dispositif dans le sol. Tandis que ce mouvement s'effectue, le sol en avant de la taupe est repoussé latéralement, et tassé par le nez de forme conique ou crénelée, pour former les parois du forage. On se sert aussi souvent de la puissance développée par l'appareil pour tirer le tube définitif, le câble ou la conduite de câble dans le forage, à mesure que la taupe progresse.

Les taupes à percussion sont aussi désignées par d'autres vocables, selon la terminologie employée par le constructeur et la région du monde où le matériel est utilisé: outils de forage du sol (*earth*

piercing tools), marteaux à déplacement de sol (*soil displacement hammers*), marteaux à percussion, taupes à percussion ou taupes pneumatiques.



T0604340-98

Figure I.2/L.38 – Pose d'un tube à l'aide d'une taupe à percussion

I.2.1 Surveillance

La plupart des taupes peuvent être équipées de sondes radioélectriques, semblables à celles utilisées pour surveiller la progression des appareils de forage guidé. Ces sondes permettent de suivre de près le déplacement des taupes, aussi bien en profondeur que dans la direction par rapport au parcours nominal. Elles peuvent être montées à l'arrière de la taupe ou, dans certains cas, à l'avant.

Les sondes à montage arrière donne une indication sur la progression, mais elles fournissent moins d'informations utiles que les sondes avant. Selon la taille de la taupe, notamment sa longueur, une sonde arrière peut se trouver à une certaine distance de l'extrémité de pénétration de l'outil; de ce fait, elle réagira beaucoup plus tard qu'une sonde avant aux changements de direction et de pente, de sorte que l'opérateur dispose de moins de temps pour arrêter le forage et réfléchir à l'opération suivante. D'un autre côté, les sondes à montage avant doivent être beaucoup plus robustes et beaucoup mieux protégées, car elles doivent résister à l'impact des forces appliquées à l'avant du système par le martèlement.

Si un forage est dévié ou arrêté par un obstacle, il est souvent plus facile de creuser verticalement jusqu'au système, éliminer l'obstacle, réaligner et relancer la taupe, plutôt que de recommencer à forer. Cette opération est souvent facilitée par le système de marche arrière dont sont équipées aujourd'hui la plupart des taupes; ce système permet à la taupe de reculer lorsqu'elle rencontre un obstacle, jusqu'à un point où son orientation et son niveau étaient corrects. Après élimination de l'obstacle est remblayage du trou, la taupe repart sur l'itinéraire prévu.

I.2.2 Types de tête de forage

On utilise couramment deux types généraux de tête pour les taupes à percussion. Il s'agit, d'une part, du cône simple qui perce le sol et rejette la terre sur les côtés; d'autre part, de la tête crénelée ou tête

coupante, qui est en fait un cône à gradins. En fonctionnement normal, les espaces entre les gradins se remplissent de terre et la tête se comporte comme un cône simple. En revanche, lorsque la tête bute sur un obstacle, les arêtes des gradins concentrent l'énergie du choc contre cet obstacle. Un cône lisse aurait tendance à être dévié par un obstacle, alors que la tête à gradins peut exercer une force longitudinale suffisante pour écarter ou désintégrer l'obstacle, ce qui réduit le risque de déviation par rapport au trajet nominal.

La plupart des taupes sont équipées d'une tête fixe, c'est-à-dire que la tête fait partie intégrante du corps de la taupe, une fois que l'appareil est assemblé. Lorsque le piston fonctionne, il agit sur l'ensemble du corps de la taupe et propulse celle-ci en avant.

Il existe une autre forme de réalisation, la taupe à tête mobile, dans laquelle la tête n'est pas solidaire du corps mais flotte sur un axe qui traverse la partie avant de la taupe. La partie postérieure de cet axe est l'enclume sur laquelle vient frapper le marteau animé d'un mouvement alternatif. Dans cette configuration, la force d'impact initiale maximale du marteau est appliquée exclusivement à la tête de forage, qui progresse dans le sol. Plusieurs avantages sont revendiqués pour ce système, notamment l'existence d'une plus grande énergie de percussion, qui permet de pénétrer les sols les plus durs et de déplacer ou détruire les obstacles. Le corps de la taupe agit comme un élément d'ancrage directionnel initial pour la tête, dans la progression de celle-ci. On obtient ainsi une meilleure régulation de direction.

I.3 Battage des tubes

L'opération de battage des tubes est effectuée par un système non piloté pour former un forage en poussant un caisson d'acier, généralement ouvert à son extrémité; l'opération est déclenchée par un marteau à percussion à partir d'un puits de départ. Pour évacuer la terre du caisson ouvert, on peut utiliser des tarières, des tuyères (à eau) ou de l'air comprimé. Si la nature du sol s'y prête, il est possible de mettre en œuvre un caisson fermé.

I.3.1 Montage du dispositif

Pour une opération typique de battage, il faut mettre en place une base très résistante, généralement un radier en béton, à l'extrémité de départ de l'installation. Cet élément est, le plus souvent, placé contre le bord latéral d'une rampe ou dans un puits de départ. On installe ensuite sur le béton des rails de guidage qui suivent la ligne de forage. Après avoir posé la première longueur de tube d'acier sur les rails de guidage, on forme une arête coupante, ou bien on en fixe une à l'extrémité avant du tube, et on monte le mouton de battage à l'extrémité arrière. Selon le diamètre considéré, il pourra être nécessaire d'utiliser les enclaves pour obtenir un contact intime et uniforme entre le mouton et le tube.

Après avoir branché le système d'alimentation en énergie, on met le marteau en action. Celui-ci pousse le tube d'acier dans le sol en suivant la ligne figurée par les rails de guidage. Une fois qu'une longueur de tube a été posée, on arrête le marteau et on soude *in situ* la longueur suivante. Le cycle de travail se répète jusqu'à ce que l'extrémité avant du premier tube atteigne le point ou le puits d'arrivée.

Comme dans le travail avec la taupe à percussion, il est indispensable de faire une étude approfondie du sol dans les projets de battage de tubes. Les obstacles de grande taille peuvent dévier un tube ou endommager l'outil, ce qui cause un écart de guidage. Comme il est généralement impossible de contrôler la direction du tube pendant le forage, il est essentiel d'établir un parcours bien défini avant de commencer l'opération.

I.3.2 Options de forage

Selon la nature du sol, le battage peut être exécuté avec un tube à extrémité ouverte ou fermée. On accorde généralement la préférence à l'extrémité ouverte, qui présente un certain nombre d'avantages, notamment une réaction plus faible à la force de battage puisque seule l'arête tranchante

est poussée dans le sol. Le battage avec extrémité ouverte permet la pénétration des sols durs, car le sol n'a pas besoin d'être compressible. La surface de tube présentée à un obstacle est beaucoup plus petite dans le cas de l'extrémité ouverte, ce qui diminue la probabilité de déviation du tube.

Toutefois, le sol doit être relativement stable lorsqu'on pratique le battage avec extrémité ouverte, faute de quoi on risque d'avoir une perte de matériau devant l'arête tranchante; celui-ci pénètre alors dans le tube ouvert, qu'il parcourt jusqu'au puits de départ. Dans les cas les plus critiques, il pourrait en résulter un affaiblissement de la surface ou une stabilité moindre pour les tubes voisins. Le battage avec extrémité fermée peut se révéler efficace dans les situations de ce genre, car la terre est déplacée autour du tube et tassée sur les parois du forage.

Lorsqu'on utilise un système à extrémité ouverte, le cylindre de terre circonscrit par la circonférence de l'arête tranchante demeure à l'intérieur du tube pendant le forage. Cette accumulation de terre ne pose généralement aucun problème s'agissant des courtes distances sur lesquelles on pratique le plus souvent le battage des tubes. En revanche, si l'on travaille sur des forages de grande longueur, on ne doit pas perdre de vue que les déblais alourdissent la chaîne de tubes soumise à l'opération, ce qui a une influence sur la vitesse d'avancement. Dans certains cas, il peut être judicieux d'éliminer ces déblais pendant l'opération d'allongement de la chaîne de tubes afin de limiter la charge supplémentaire imposée au mouton de battage. Selon le diamètre, ce nettoyage peut se faire manuellement ou à l'aide d'un racloir.

Dans les cas où il n'est pas nécessaire d'effectuer ces nettoyages intermédiaires, les déblais restent alors dans le tube pendant toute la durée du forage, il existe des méthodes autres que celles de la pelle ou du racloir pour se débarrasser des déblais. A l'arrivée dans le puits de réception, l'extrémité ouverte du tube peut être obturée hermétiquement avec un bouchon approprié. On introduit ensuite de l'eau sous pression ou de l'air comprimé entre les déblais et ce bouchon, ce qui expulse les déblais du tube dans le puits de départ, d'où on peut l'évacuer. On enlève alors le bouchon et on peut procéder au lavage et à la remise en service du tube ou du caisson.

Les principes de la taupe à percussion et du battage des tubes sont relativement simples; ces techniques peuvent constituer des solutions économiques pour des projets d'installation sur des longueurs relativement courtes.

I.4 Fonçage des tubes et percement de microtunnels

Le fonçage des tubes et le percement de microtunnels appartiennent, pour l'essentiel, à la même famille de techniques d'installation des canalisations pour des diamètres d'au moins 150 mm (voir Figure I.3). Un système de fonçage, ou pousse-tubes, est un système pour la pose directe des tubes derrière un dispositif à bouclier, avec utilisation d'une énergie hydraulique fournie à partir d'un arbre moteur – le résultat étant que les tubes forment une chaîne ininterrompue dans le sol. Les tubes sont spécialement conçus pour résister aux forces de fonçage susceptibles de s'exercer pendant la pose; ils forment la canalisation définitive une fois l'opération d'excavation terminée.

Dans ce contexte, le percement d'un microtunnel se définit comme une technique mettant en œuvre un bouclier télécommandé et susceptible de guidage, pour l'installation d'un pousse-tubes dont le diamètre interne est inférieur à la valeur admissible pour laisser passer un opérateur humain. Les microtunneliers sont souvent équipés d'un système de guidage par laser pour maintenir l'orientation et la profondeur de l'installation. Cependant, comme c'est le cas dans les grands systèmes de fonçage, on peut aussi associer le guidage laser avec les techniques de surveillance classiques.

Il existe des systèmes qui permettent d'installer aussi bien des canalisations principales que des bifurcations.

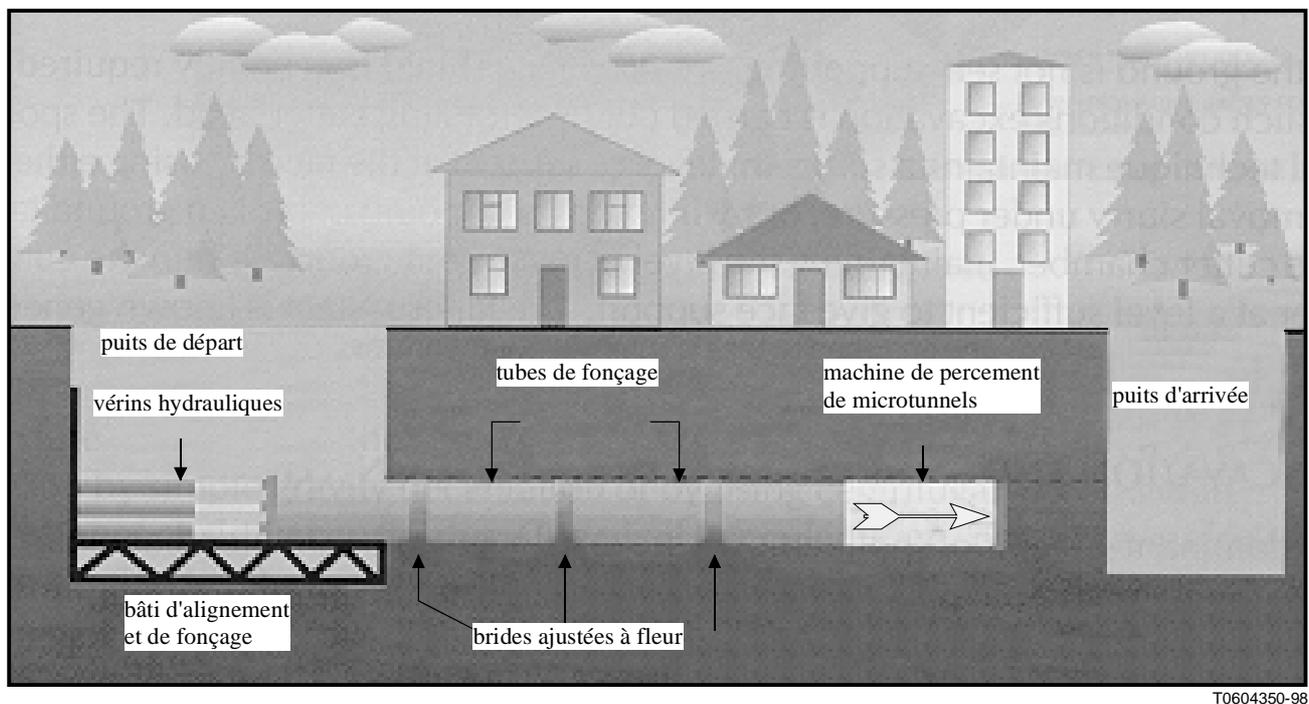


Figure I.3/L.38 – Pose de tubes par la technique du microtunnel

I.4.1 Planification

Dans les premières années du développement de la technique du microtunnel, certains projets étaient conçus sur la base d'un plan existant pour la pose d'une canalisation avec travaux de terrassement. Dans de nombreux cas, cela s'expliquait par le fait que l'ingénieur de conception ne connaissait pas la technique de pose sans terrassement. Il était alors demandé aux entrepreneurs de proposer une variante d'installation par fonçage des tubes. Malheureusement, cette technique était inefficace car elle ne prenait pas en compte l'option consistant à "court-circuiter" les parcours de canalisation soumis à des restrictions en raison des critères d'accès pour le travail avec terrassement, par exemple: obligation de suivre le tracé de routes, éviter de traverser des terrains à statut privé et opérer dans des zones suffisamment vastes pour pouvoir mettre en œuvre des matériels d'excavation.

La plupart des pousse-tubes et des microtunnels sont étudiés aujourd'hui pour effacer presque complètement ces restrictions. Connaissant les contraintes hydrauliques imposées par le tube, ses points de raccordement, les types de sol qui seront rencontrés, enfin les restrictions d'accès le long du parcours requis, il est possible de prévoir le positionnement, la profondeur et la taille du puits de manière à réduire le nombre d'excavations nécessaires à un minimum et, de ce fait, réduire le nombre de poussée à appliquer à une canalisation quelle qu'elle soit.

Une telle planification n'a pas seulement pour effet de réduire à un minimum l'impact physique d'un projet de construction en limitant la durée des travaux; elle réduit également l'influence exercée sur l'environnement (perturbation de la circulation automobile et volume de terre déplacée). Par ailleurs, en optimisant la longueur de la canalisation, on réalise des économies sur les quantités de matériaux nécessaires pour le projet. Autre avantage de la limitation des travaux d'excavation: prise en compte du fait que beaucoup de clients et gestionnaires d'autoroutes insistent aujourd'hui pour que la terre excavée soit remplacée par des remblais de meilleure qualité. Cela oblige à transporter et à décharger le matériau excavé puis à extraire dans une carrière le matériau de remblayage. La mise en œuvre des techniques sans terrassement ou avec excavation minimale permet de réduire les perturbations et les dépenses de transport, d'extraction en carrière et d'accumulation en décharge, à quoi s'ajoute la protection de matériaux naturels.

I.4.2 Excavation et évacuation des rejets dans l'opération de fonçage

Plusieurs techniques d'excavation différentes sont mises en œuvre dans le fonçage. La première condition à remplir pour un pousse-tubes ou un microtunnel est de créer un puits de fonçage. Les caractéristiques de ce puits dépendent de l'installation requise; en particulier, les dimensions sont déterminées par la longueur des tubes à poser. Dans les deux cas, il faut installer un massif d'appui contre lequel le bâti de fonçage pourra buter sans endommager ni déformer le puits.

En ce qui concerne l'excavation de la terre à l'intérieur du pousse-tubes, la première technique envisageable est la technique manuelle de base avec utilisation d'un bouclier de type ouvert; dans cette technique, un mineur se sert d'outils manuels, électriques ou non, pour déblayer la terre devant le bouclier. Dans les sols, plus difficiles, on peut utiliser un système équipé d'un outil avec appui arrière, d'une pince coupante ou d'une tête coupante rotative. Dans la plupart des cas, ces systèmes sont associés à des boucliers à front ouvert et leurs conditions de fonctionnement dépendent dans une grande mesure du degré de stabilité du sol au voisinage du front. Les déblais sont évacués du front du bouclier à l'aide de wagonnets chargeurs qui sont montés sur rails et que l'on rapproche et éloigne du front à l'aide d'un système à cordages. Une autre solution consiste dans l'utilisation d'un tapis roulant qui se déverse sur un monte-charge en bas du puits.

Dans un certain nombre de cas, on a mis en œuvre un système à vide pour évacuer les déblais, lesquels sont extraits du tunnel par aspiration. On a aussi mis au point un "système à boues molles" dans lequel l'évacuation des boues se fait sous vide.

Si on a affaire à un sol instable, il faut généralement recourir à un bouclier à front fermé. En pareil cas, l'excavation est confiée à une tête coupante rotative. La technique d'évacuation des déblais permet de maintenir une stabilité suffisante au voisinage du front, soit par utilisation d'une boue d'évacuation sous pression, soit en limitant la quantité de terre désintégrée dans la chambre de taille à un niveau suffisant pour assurer la stabilité. Ce dernier système est communément appelé bouclier compensateur de pression de terre.

I.4.3 Excavation et évacuation des rejets dans le percement des microtunnels

On utilise principalement deux systèmes d'évacuation dans le cas des petits diamètres rencontrés dans le percement des microtunnels. Dans les sols stables où la hauteur de la nappe phréatique ne dépasse pas trois à quatre mètres, on peut avoir recours à une batterie de tarières pour évacuer la terre désintégrée. La chaîne de tarières est logée dans un carter à l'intérieur du tube de fonçage. La tarière déverse les déblais sur un wagonnet chargeur placé sous le bâti de fonçage dans le puits de départ. Une fois rempli, le wagonnet est hissé jusqu'à la surface, vidé et renvoyé avant la poursuite du mouvement (voir Figure I.4).

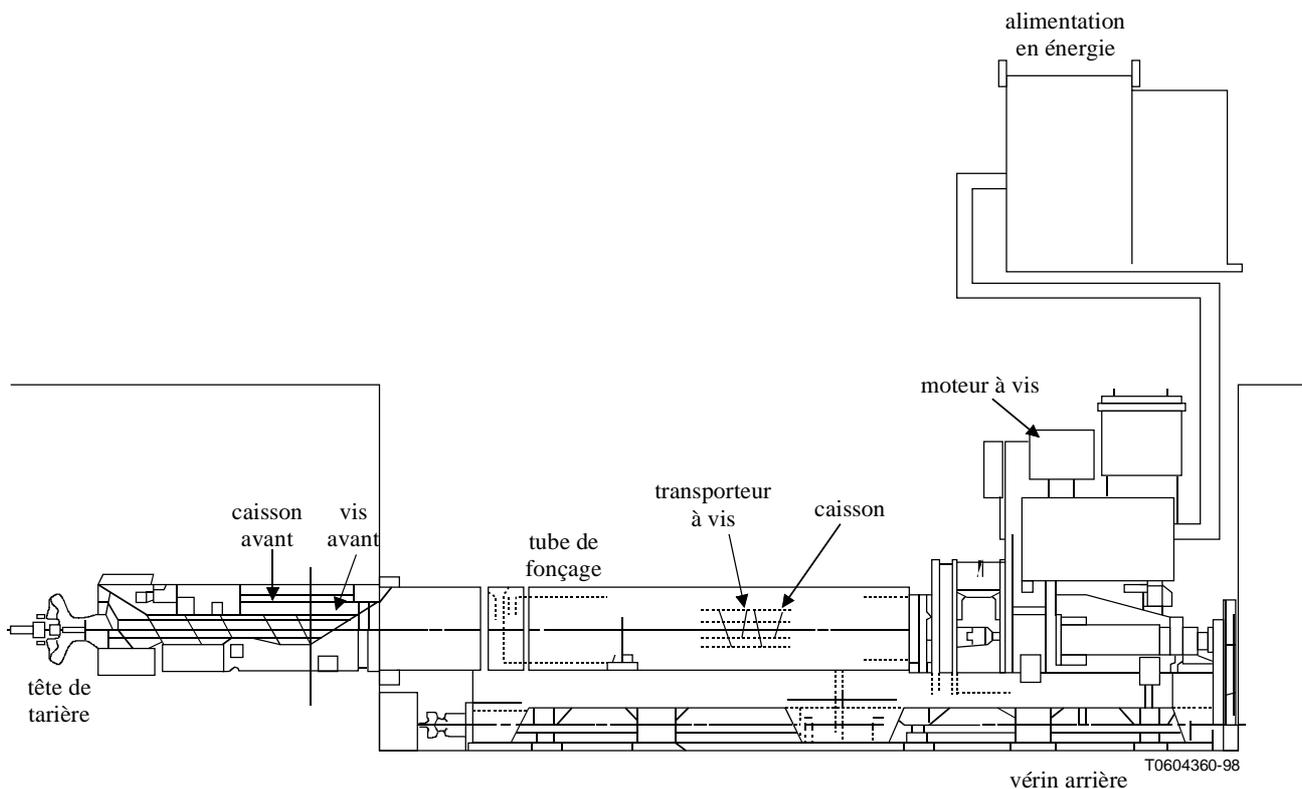


Figure I.4/L.38 – Exemple illustrant la méthode d'excavation avec tarière

Dans les sols plus difficiles et pour les nappes phréatiques plus élevées, on utilise souvent un système à recirculation des boues (voir Figure I.5). Pour faire fonctionner ce système, il faut préparer, à la surface, une suspension de bentonite ou d'un polymère artificiel spécialement conçu à cet effet (ou une combinaison des deux). Cette suspension est introduite par pompage dans la chambre de coupe avec intervention d'un système de tubes logé dans le tube de fonçage. Si nécessaire, on pressurise la boue à une valeur requise pour assurer la stabilité près du front du bouclier. Dans la chambre de coupe, la boue se mélange avec la terre extraite et ce mélange est traité généralement par un broyeur incorporé qui est animé d'un mouvement radial excentré, pour faire en sorte qu'aucune particule de terre trop grande pour être traitée par le système à boue ne pénètre dans la partie retour du système.

Le mélange est transféré par pompage à la surface, où les particules de terre sont séparées de la suspension par simple décantation par gravité, ou par utilisation de forces centrifuges dans des hydrocyclones ou des appareils du même type. On ajoute parfois des flocculants chimiques pour améliorer le rendement de l'opération. La boue ainsi nettoyée est contrôlée et reconditionnée par addition d'autres substances chimiques – pour satisfaire aux spécifications requises au front du bouclier, puis recyclée dans le système.

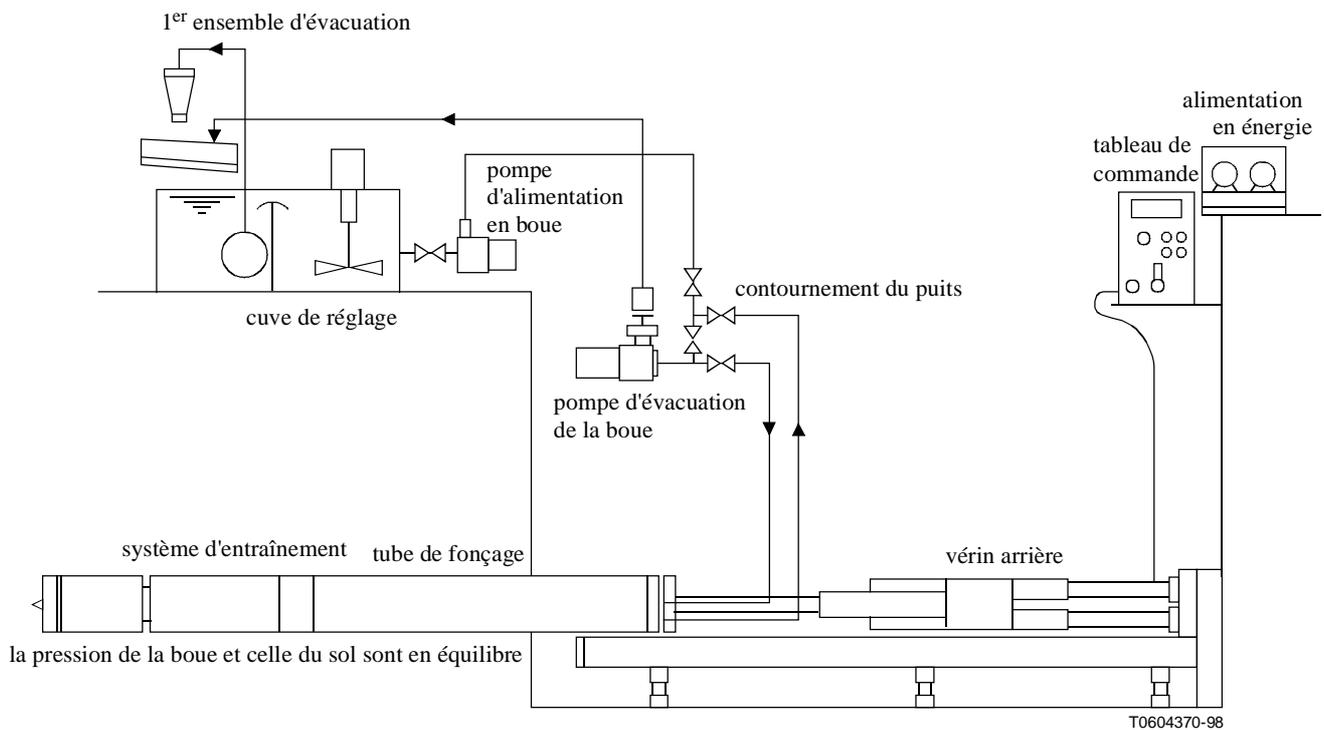


Figure I.5/L.38 – Exemple illustrant la méthode avec boue

Le système avec boue présente l'avantage d'un fonctionnement continu. A l'inverse, les méthodes mettant en œuvre des tarières, avec obligation de soulever les rejets, ont un caractère plus cyclique et obligent à interrompre le fonctionnement de la tête de coupe.

On mentionnera également un système qui comporte une porte hermétique à commande hydraulique. Ce dispositif limite la quantité de terre déplacée par l'excavation, l'évacuation des déblais étant achevée par utilisation d'un système de raclage placé dans le tube de fonçage. En général, ce système n'utilise pas une tête de coupe mais une arête tranchante, située à l'extrémité avant du bouclier, pour désagréger la terre et la détacher du front du bouclier. Cette technique a donné de bons résultats mais son domaine d'application est limité comparé aux deux systèmes principaux, principalement en raison des restrictions imposées aux types de sol qu'elle peut traiter.

Certains systèmes appliquent la méthode dite de compensation de la pression de boue (voir Figure I.6). Dans ces systèmes, on monte à l'extrémité d'un tube de fonçage un pousse-tubes du type à évacuation avec compensation de la pression de boue. L'excavation est effectuée par des couteaux rotatifs et, simultanément, on assure la stabilité du sol en mettant en œuvre une soupape qui arrête l'eau et en injectant des additifs qui provoquent la liquéfaction plastique de la terre excavée. Cette terre est mélangée avec de l'eau chargée, pour produire une boue qui est ensuite évacuée sous forme liquide par l'intermédiaire d'un tube qui traverse le tube de fonçage ou le tube de guidage. Comme le système à eau chargée, le fonçage s'effectue en même temps que l'on règle la quantité d'additifs à injecter ainsi que la vitesse d'avancement, pour stabiliser le sol. Le choix se porte sur la bentonite ou sur des additifs à base de polymères, selon la qualité du sol.

Dans la méthode avec compensation de la pression d'eau, la stabilité du sol se fait par pression d'eau au lieu d'eau chargée. Cette méthode est appliquée dans des sols à faible pression d'eau, par exemple les couches sablonneuses gorgées d'eau.

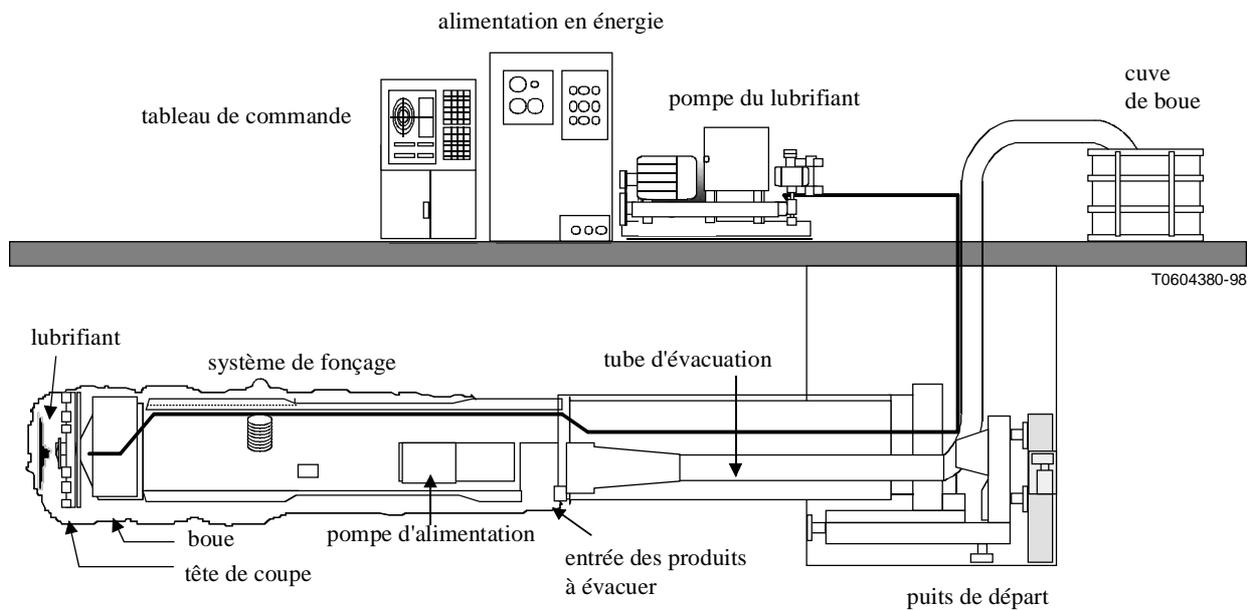


Figure I.6/L.38 – Exemple illustrant la méthode avec compensation de la pression de boue

Il existe deux autres techniques spécialisées de percement de microtunnels pour les forages de diamètre inférieur à environ 300 mm. La première est une simple méthode de tassement (méthode avec fonçage ou refoulement, voir la Figure I.7), dans laquelle la tête de coupe rotative, au lieu de détacher la terre du front du bouclier, la pousse sur le côté et la tasse sur le périmètre du forage.

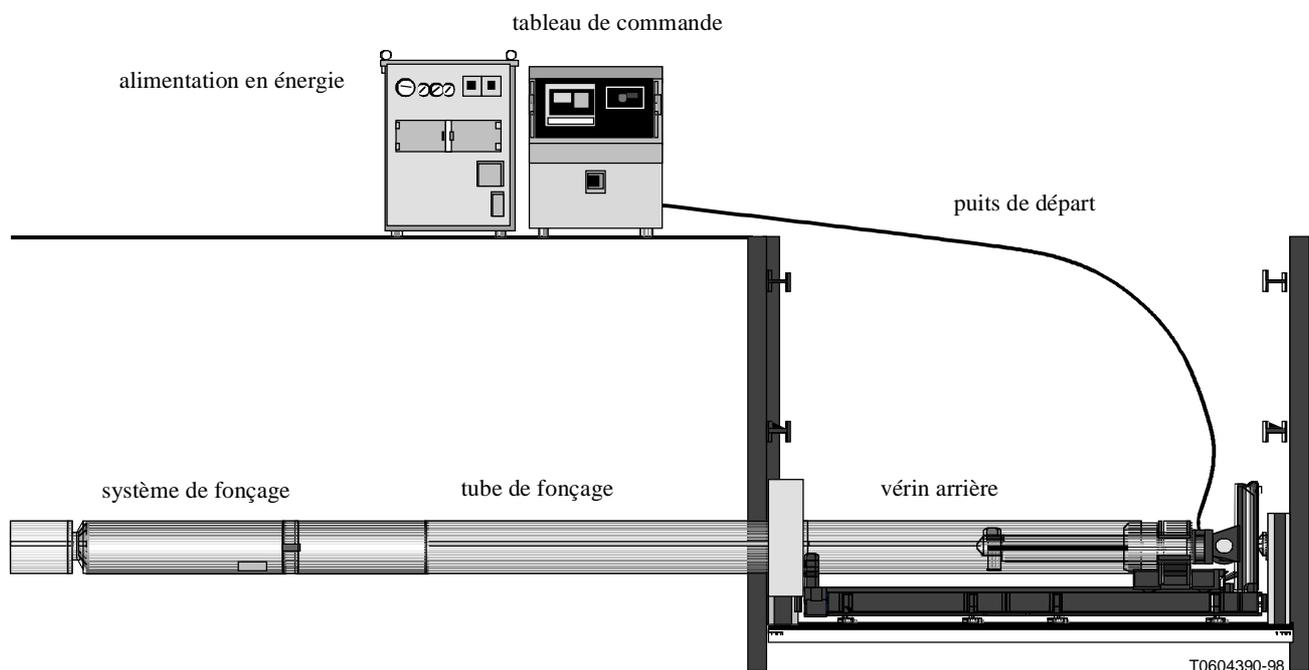


Figure I.7/L.38 – Exemple illustrant la méthode avec fonçage

L'utilisation de ce système est limitée à des sols pouvant être tassés. La seconde méthode de forage repose sur une technique d'excavation qui peut être comparée à la technique appliquée par la majorité des machines de forage guidé. Le couteau est une tête angulaire rotative qui fore en ligne droite lorsqu'elle tourne. Quand la tête est orientée selon un certain angle, son décentrage permet le

guidage. Ce système applique généralement une technique d'évacuation des déblais par tarière; il nécessite soit une opération de réalésage avant la pose des tubes, soit le montage d'un élargisseur à l'avant du tube de tête pendant le fonçage. Le système est souvent utilisé comme système à deux passages, le tube étant posé seulement après l'achèvement du forage pilote initial.

En fonçage comme percement de microtunnels, le passage de travail prend fin dans un puits d'arrivée dont les dimensions doivent être telles qu'elles permettent de récupérer le bouclier sans difficulté. Comme ces puits ne sont généralement pas utilisés pour les opérations de fonçage, il est inutile de prévoir des résistances mécaniques ou des massifs d'appui exceptionnels.

I.4.4 Classification des méthodes de travail dans le percement des microtunnels

On distingue deux grandes catégories de méthodes: avec systèmes à grande résistance mécanique et avec systèmes à faible résistance, selon la nature du tube de fonçage, avec d'autres subdivisions selon les caractéristiques des systèmes d'excavation et d'évacuation des rejets. Les systèmes à grande résistance transmettent la force d'entraînement directement à des tubes à grande résistance. Par contre, dans les systèmes à faible résistance, on a une tige de transmission de la force et une tige de traction qui sont placées dans des tubes à faible résistance; ces tiges sont actionnées de telle manière que la force d'entraînement ne soit pas transmise directement aux tubes à faible résistance mécanique. De cette façon, la résistance de la pointe agit seulement sur les tiges de transmission et de traction, et les tubes à faible résistance supportent uniquement la force de frottement qui s'exerce entre le sol et la surface extérieure des tubes (Figure I.8).

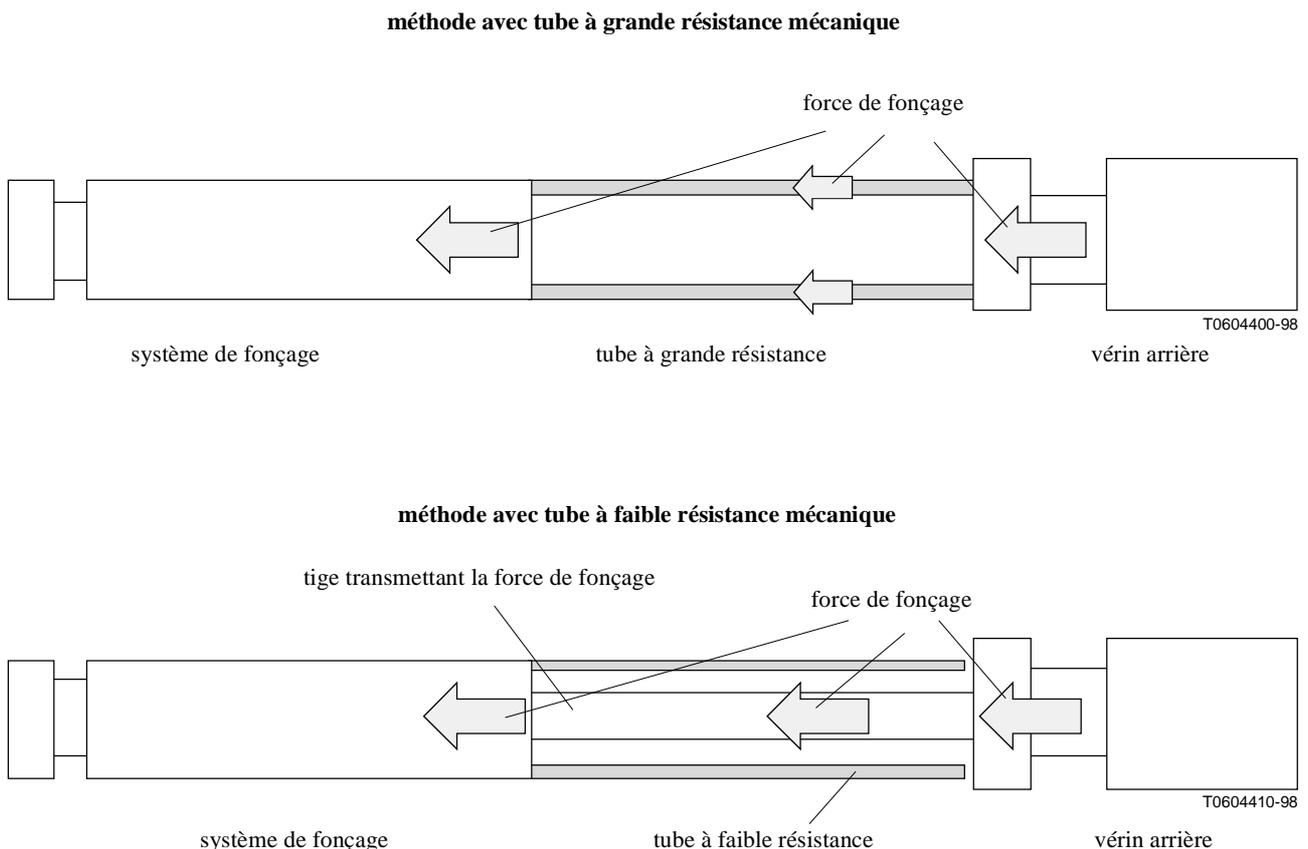


Figure I.8/L.38 – Méthode avec tube à grande résistance mécanique et avec tube à faible résistance mécanique

Il existe également des systèmes à fonctionnement en un seul temps, dans lesquels le dispositif et les tubes de fonçage sont commandés directement, et des systèmes à deux temps où il y a tout d'abord actionnement du dispositif de fonçage et d'un tube de guidage, puis actionnement des tubes des conduites le long du tube de guidage. En général, les systèmes à deux temps fonctionnent avec des tubes de plus grand diamètre et des distances de travail plus longues que les systèmes à un seul temps (Figure I.9).

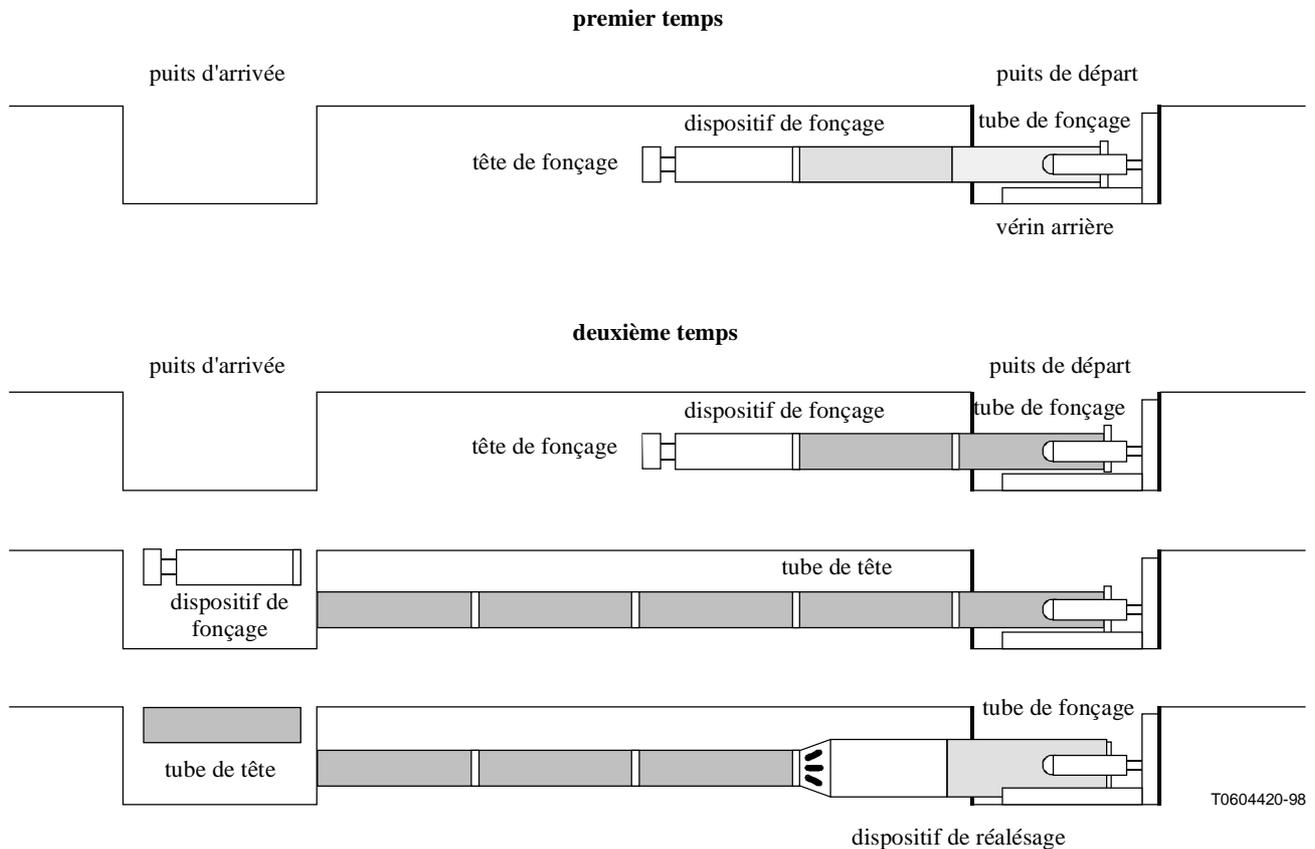


Figure I.9/L.38 – Représentation du premier temps et du second temps de fonctionnement

On peut établir une autre classification en considérant les principales méthodes de fonçage:

- méthode avec excavation par tarière;
- méthode avec boue;
- méthode avec pénétration ou refoulement;
- méthode avec compensation de la pression de boue;
- méthode avec compensation de la pression d'eau;
- méthode du forage.

I.4.5 Méthodes de repérage des positions

La méthode de percement de microtunnels entraîne le matériel sur de grandes distances, tout en régulant la direction. Il est donc important de confirmer la position du dispositif de fonçage qui fonctionne sous la surface du sol.

I.4.5.1 Méthode laser avec cibles

Un émetteur de faisceau laser est placé dans le puits de départ, tandis qu'une cible constituée par du verre ou des photorécepteurs est montée à l'intérieur du dispositif de fonçage. La position dans laquelle le faisceau laser frappe la cible est repérée par un théodolite installé dans le puits de départ ou par caméra CCD montée dans le dispositif de fonçage. Il est possible aussi de détecter l'inclinaison de ce dispositif, en utilisant deux plaques cibles. Cette méthode permet un repérage précis en ligne droite, la précision de détection étant de quelques millimètres sur des distances allant jusqu'à environ 100 mètres.

Toutefois, pour les distances de fonçage supérieures à 150 mètres, le faisceau laser prend de la dispersion et on observe une augmentation du diamètre de ce faisceau lumineux lorsqu'il frappe la cible, ce qui donne des indications de position erronées. A cela s'ajoutent d'autres problèmes, par exemple une réfraction du faisceau laser sous l'effet des variations de température à l'intérieur du tube de fonçage.

I.4.5.2 Méthode par induction électromagnétique

Cette méthode permet d'estimer la position du dispositif de fonçage au moyen d'une bobine électromagnétique placée dans le dispositif d'entraînement. Le procédé consiste à détecter l'intensité du champ électromagnétique émis par cette bobine au-dessus du sol. On peut ainsi mesurer la position absolue, quels que soient la distance ou l'alignement, de sorte que la méthode pourrait être considérée, pour l'avenir, comme un important progrès technologique pour le fonçage sur de longues distances et sur des parcours courbes. La précision de la détection va de quelques centimètres jusqu'à vingt centimètres.

On peut signaler deux difficultés dans la mise en œuvre de cette méthode. D'une part, il est impossible de réaliser une détection précise en présence d'autres champs électromagnétiques ou d'objets qui perturbent ou bloquent les champs près de la position du système de fonçage. D'autre part, le champ électromagnétique est incapable d'atteindre la surface du sol si la position de fonçage est enfouie trop profondément.

I.4.5.3 Méthode de la différence des pressions liquides

Cette méthode permet de mesurer avec précision la profondeur de la position occupée par le dispositif de fonçage. Pour cela, on relie entre eux des détecteurs de pression, situés à l'intérieur du dispositif de fonçage et au-dessus de la surface du sol, par un tuyau rempli d'un liquide qui a un petit module de dilatation par rapport aux variations de température, et on convertit la différence de pression en une différence de profondeur. Ces détecteurs de pression sont extrêmement précis, ils permettent une détection avec une précision de quelques millimètres.

La difficulté, avec cette méthode, est la suivante: on risque facilement d'avoir des erreurs en raison de l'air qui pénètre dans le tuyau et en raison des différences de température entre l'intérieur du dispositif de fonçage et l'atmosphère au-dessus du sol. Il est possible, cependant, de réduire cette erreur en faisant circuler le liquide constamment dans le tuyau et en utilisant des détecteurs correcteurs de température.

I.4.6 Méthodes d'amélioration du sol

Il est parfois difficile d'exécuter la construction en toute sécurité, ou bien cette construction peut influencer le sol ou les structures environnantes en fonction de l'état du sol. En pareils cas, il faut appliquer une méthode appropriée d'amélioration du sol en tenant compte de la nature du sol, des conditions dans lesquelles se déroulent les travaux, et d'autres facteurs, afin de stabiliser le sol.

I.4.6.1 Méthode par abaissement du niveau de la nappe phréatique

Si les puits se trouvent en des lieux où le niveau de la nappe phréatique est élevé, de l'eau peut se déverser dans ces puits ou bien il peut se produire des phénomènes d'ébullition et de soulèvement du sol. Dans ce cas, on creuse des puisards près des puits pour collecter et évacuer l'eau. Les méthodes d'assèchement utilisées sont le drainage par gravité pour les sols très perméables et le drainage sous vide pour les autres sols.

Le drainage sur de longues périodes peut poser des problèmes tels que l'affaissement du sol ou l'assèchement des puits avoisinants. Il faut donc effectuer à l'avance des études de terrain suffisamment poussées.

I.4.6.2 Méthode par injection de substances chimiques

Il s'agit d'une méthode générale pour renforcer la résistance mécanique du sol et améliorer ses propriétés hydrofuges. Des substances chimiques liquides ayant des propriétés de coagulation sont injectées dans les sols tendres, les sols où le niveau de la nappe phréatique est élevé, ou d'autres sols ayant besoin d'être améliorés. Cette injection, qui se fait à l'aide de tubes, stabilise le sol et fournit des propriétés hydrofuges une fois que les substances chimiques sont coagulées.

La nature de ces substances et la méthode d'injection varient selon la qualité et la perméabilité du sol considéré.

I.4.7 Bâtis de fonçage

Les systèmes de fonçage de tubes et de creusement de microtunnels sont souvent fournis avec des bâtis de fonçage (ou de poussé). Ceux-ci ont pour fonction de développer la pression de fonçage dont aura probablement besoin le bouclier. Dans tout projet donné, les caractéristiques du bâti de fonçage sont déterminées par la nature du sol et le type de bouclier.

I.4.8 Puits

Comme indiqué précédemment, presque tous les pousse-tubes et microtunnels sont installés entre un puits de fonçage et un puits d'arrivée. Les exceptions les plus notables sont celles où le point de sortie se trouve immédiatement en dehors du sol en un endroit fixé. Même dans ce cas, on mettra en place un dispositif de réception afin de prévenir une pollution par perte de lubrifiant ou de boue, ou pour empêcher la pénétration d'eau dans le tube.

Les conditions auxquelles doivent satisfaire les puits de fonçage varient beaucoup en fonction de plusieurs paramètres: machine utilisée, longueur et matériau du tube, longueur de fonçage et type d'installation. Les tunnels peuvent être de section circulaire, rectangulaire ou ovale; blindage par palplanche, blindage étayé localement, en caisson ou même sans soutènement si le sol est en assez bon état et si les règlements locaux de sécurité l'autorisent.

La gamme normale des méthodes appliquées pour le creusement et la construction des puits intervient également dans le fonçage des tubes et le creusement des microtunnels, mais tous les puits de fonçage ont une caractéristique commune: il doit y avoir une surface de réaction sur laquelle le bâti de fonçage exercera sa poussée. Si le terrain s'y prête, cette surface de réaction peut être constituée simplement par la paroi arrière du puits. Mais cela n'est en général pas le cas et il faut prévoir un massif d'appui. Généralement construit en béton, ce massif fait partie intégrante de la structure du puits; il peut être conçu avec une réservation centrale, de manière à permettre une rotation du bâti de fonçage pour réaliser un second forage en sous opposé, ou pour permettre à une machine qui fore à partir d'un autre point de pénétrer dans le puits, qui joue alors le rôle de point de réception. Le massif d'appui doit être réalisé de telle sorte qu'il permette au bâti de fonçage d'exercer sa force de poussée maximale, tout en assurant l'intégrité de la structure du puits et celle du sol environnant, afin de ne pas porter atteinte à la structure définitive du tube. Les conditions relatives aux puits utilisés seulement pour l'arrivée ont été exposées précédemment dans ce texte.

Certains systèmes de percement de microtunnels sont conçus pour fonctionner avec de petits puits de fonçage; il existe des techniques qui permettent de poser des tubes de 1 mètre de long à partir d'un puits dont le diamètre ne dépasse pas 2 mètres. Un de ces systèmes est équipé d'une tête de coupe et d'un broyeur conique animé d'un mouvement radial excentrique; ce système peut être utilisé dans des sols de nature extrêmement différente, y compris en présence de blocs dont la taille peut aller jusqu'à 30% du diamètre hors tout de la machine.

I.4.9 Tubes

Les tubes de fonçage se répartissent en deux grandes catégories: tubes à grande résistance mécanique et tubes à faible résistance. Les tubes de la première catégorie peuvent être réalisés en acier, en béton armé et d'autres matériaux qui permettent la transmission directe de la force de fonçage au tube. Les tubes à faible résistance mécanique sont des tubes rigides en PVC et d'autres tubes qui ne sont pas capables de transmettre directement la force de fonçage.

Cependant, il existe une grande variété de matériaux de tubes pour les travaux d'installation par les techniques de fonçage de tubes et de percement de microtunnels. Le choix dépend des besoins du client, de la nature du sol, des frais de transport et de la longueur de la canalisation. Ces matériaux sont le béton armé ou non armé, le béton de polymère (bloc de béton dans une matrice de résine), les fibres de verre sur base de résine, l'argile vitrifiée (émaillée ou non), l'acier, le fer ductile et les matières plastiques.

Les aspects sans doute les plus importants de la conception des tubes pour un projet de fonçage sont le degré admissible de déviation des raccords et la géométrie de la surface des raccords. En règle générale, la déviation à la surface d'un raccord ne doit pas dépasser $0,5^\circ$, mais on peut admettre des valeurs supérieures à 1° , pour les parcours incurvés avec utilisation de matériaux amortisseurs appropriés au droit des raccords. La surface du raccord doit être réalisée avec la perpendicularité voulue et elle doit être dotée d'une garniture efficace pour assurer une répartition uniforme de la force de fonçage dans le raccord. Il faut bien comprendre que, du fait des augmentations des charges ponctuelles, la valeur maximale admissible de la charge de fonçage sur un tube donné diminue nettement et rapidement lorsque augmente la déviation aux droits des raccords. En maintenant un fonçage aussi rectiligne que possible, l'opérateur pourra tirer pleinement parti de la charge nominale du tube, si cela se révèle nécessaire. Une déviation importante réduit la charge maximale que la chaîne de tubes peut supporter sans risque de rupture des tubes dans le sol.

Une caractéristique fondamentale des tubes destinés aux opérations de pousse-tubes et de percement de microtunnels est le fait que les raccords ne sortent pas latéralement du corps du tube. En d'autres termes, le raccord est entièrement contenu à l'intérieur de la paroi du tube, contrairement aux tubes classiques utilisés pour les installations dans des tranchées ouvertes; ces tubes comportent généralement des raccords à emboîtement et à manchon, avec des manchons dont le diamètre hors tout est supérieur à celui du corps du tube. Pour le percement de microtunnels et les opérations de pousse-tubes, il est évident qu'il y a intérêt à travailler avec des tubes dont la surface externe est à faible frottement, sans parties en saillie.

La longueur des tubes varie avec le système utilisé pour le percement du microtunnel, ainsi qu'avec le diamètre et l'encombrement des tubes. Les longueurs couramment rencontrées vont de 1,0 à 2,0 mètres, mais on trouve aussi des longueurs de 0,75 mètre pour les petits diamètres. Ce sont les raccords qui représentent la plus grande partie du prix des tubes pour les microtunnels, d'où la possibilité d'abaisser les coûts correspondants en utilisant des tubes de grande longueur; la contrepartie est qu'il faut alors avoir recours à des puits de plus grande taille.

I.4.10 Lubrification

Les deux plus grandes forces qui doivent être vaincues quand on pousse un tube sont le poids de la chaîne de tubes et le frottement entre la surface du tube et le sol lors de la progression du tube dans le forage. Le frottement augmente en même temps que le diamètre du tube, car alors une plus grande surface de tube est présentée à la surface interne du forage.

Les procédés les plus courants pour résoudre le problème du frottement sont la lubrification et l'utilisation de tubes ayant le plus petit diamètre acceptable. Dans les premiers temps de la technique du pousse-tubes, on adoptait parfois le principe du "passage en force" pour surmonter la résistance totale, simplement en installant un bâti de fonçage de plus grande capacité. Il pouvait en résulter des ruptures prématurées des tubes, car leur capacité de charge maximale était dépassée dans des conditions difficiles. La plupart des problèmes posés par les charges peuvent être résolus par le recours à une lubrification à base de boue de bentonite ou d'un mélange bentonite/polymères. Le mélange à base de boue est conçu pour donner des résultats satisfaisants pour la nature de sol prévue. On peut avoir recours à une formulation simple dans les cas où le lubrifiant ne sera pas absorbé par le sol environnant et où il ne ruissellera pas dans le sol. Il existe des cas plus difficiles, où des pertes de lubrifiant sont prévisibles, ou encore lorsque les pressions exercées par le sol sont susceptibles d'être fortes. Dans ces cas, on peut modifier le lubrifiant pour réduire les pertes et pour assurer la stabilité du sol pendant toute la durée de l'opération de pousse-tubes.

Le lubrifiant est amené dans des tubes placés à l'intérieur de la chaîne de tubes principale; il est injecté par des perforations pratiquées dans la paroi des tubes. Un tube de lubrification aboutit à chaque perforation. L'injection est commandée soit manuellement à partir du poste de l'opérateur, soit par un système informatisé par l'intermédiaire d'un collecteur de distribution central. Ce dernier système est de plus en plus répandu; il permet d'ajouter des quantités mesurées de lubrifiant aux points voulus, avec une pression optimale le long de la chaîne de tubes, compte tenu des variations dans le sol et de la progression de la chaîne. L'informatisation a souvent pour effet de rendre la lubrification plus efficace, en réduisant à un minimum l'excès de lubrification en tel ou tel point, car les lubrifiants peuvent être coûteux. Ce procédé peut être très avantageux pour les pousse-tubes ou les microtunnels de petit diamètre, que l'on enfouit souvent à de faibles profondeurs; en effet, il réduit à un minimum les soulèvements de surface ou les pertes de lubrifiant par les fissures jusqu'à la surface.

Dans de nombreux projets, l'utilisation des substances et des techniques adéquates de lubrification permet de réduire considérablement les charges de fonçage et de faciliter les problèmes de stabilité du sol. Elle peut permettre également le recours à des bâtis de fonçage plus petits, ce qui réduit à un minimum les dimensions du puits de fonçage et contribue à abaisser le coût total d'un projet. Avec les lubrifiants et les techniques de pose modernes, il devient possible de poser 1000 mètres de tubes en une seule opération de fonçage.

1.4.11 Stations de poussée intermédiaires

Il est possible que le graissage d'un tube ne suffise pas pour le bon déroulement de l'opération de pousse-tubes (par exemple, si le tube est d'une longueur telle que sa résistance au déplacement dépasse les possibilités d'un bâti de fonçage de taille courante, ou encore s'il se révèle difficile de surmonter les forces de frottement ou de s'opposer aux mouvements du terrain). Dans ce cas, il convient d'envisager la solution de la station de poussée intermédiaire avant de réduire la longueur du pousse-tubes.

La station de poussée intermédiaire est un dispositif de forme circulaire, formé par des vérins hydrauliques placés dans une enceinte en acier. Cette enceinte est introduite dans la chaîne de tubes en des points stratégiques. Le dispositif divise la chaîne de tubes en plusieurs tronçons plus faciles à manier. Chacun de ces tronçons – pouvant aller d'un bâti de fonçage à une station intermédiaire, d'une station intermédiaire à une autre, ou d'une station intermédiaire au bouclier – peut être poussé individuellement et indépendamment du reste de la chaîne. Cela revient à avoir plusieurs pousse-tubes plus petits fonctionnant simultanément dans un même forage, chaque station intermédiaire utilisant le tronçon de tubes en amont comme paroi d'appui. Le système des stations de poussée intermédiaires a pour effet de réduire la probabilité de rupture des tubes, car la force maximale s'exerçant sur telle ou telle "sous-chaîne" dépend du nombre des tronçons de tubes ainsi que du frottement sur la longueur de tubes considérée. Chaque station intermédiaire est commandée indépendamment à partir du poste de l'opérateur.

I.4.12 Charges de fonçage

La bonne exécution d'un projet de microtunnel dépend de plusieurs facteurs: un choix judicieux de la méthode, la qualité d'exécution du travail par une équipe possédant les compétences requises et des dispositions permettant de limiter les imprévus grâce à une évaluation et à une programmation des opérations. On diminuera considérablement les difficultés en essayant de prévoir la valeur des charges de fonçage avec une précision acceptable.

Ces charges résultent des forces dues au frottement entre la surface extérieure des tubes et le sol (frottement latéral), et à la pression à laquelle est soumise la surface de la tête coupante.

Les charges de fonçage influent sur plusieurs paramètres de base du percement des microtunnels: la résistance mécanique du tube poussé, la capacité du système de fonçage utilisé, l'aptitude du massif d'appui (mur de réaction) du puits à supporter l'effort de fonçage, enfin la longueur de tube pouvant être posée en une seule poussée.

SERIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, de télégraphie, de télécopie, circuits téléphoniques et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux pour données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information et protocole Internet
Série Z	Langages et aspects informatiques généraux des systèmes de télécommunication