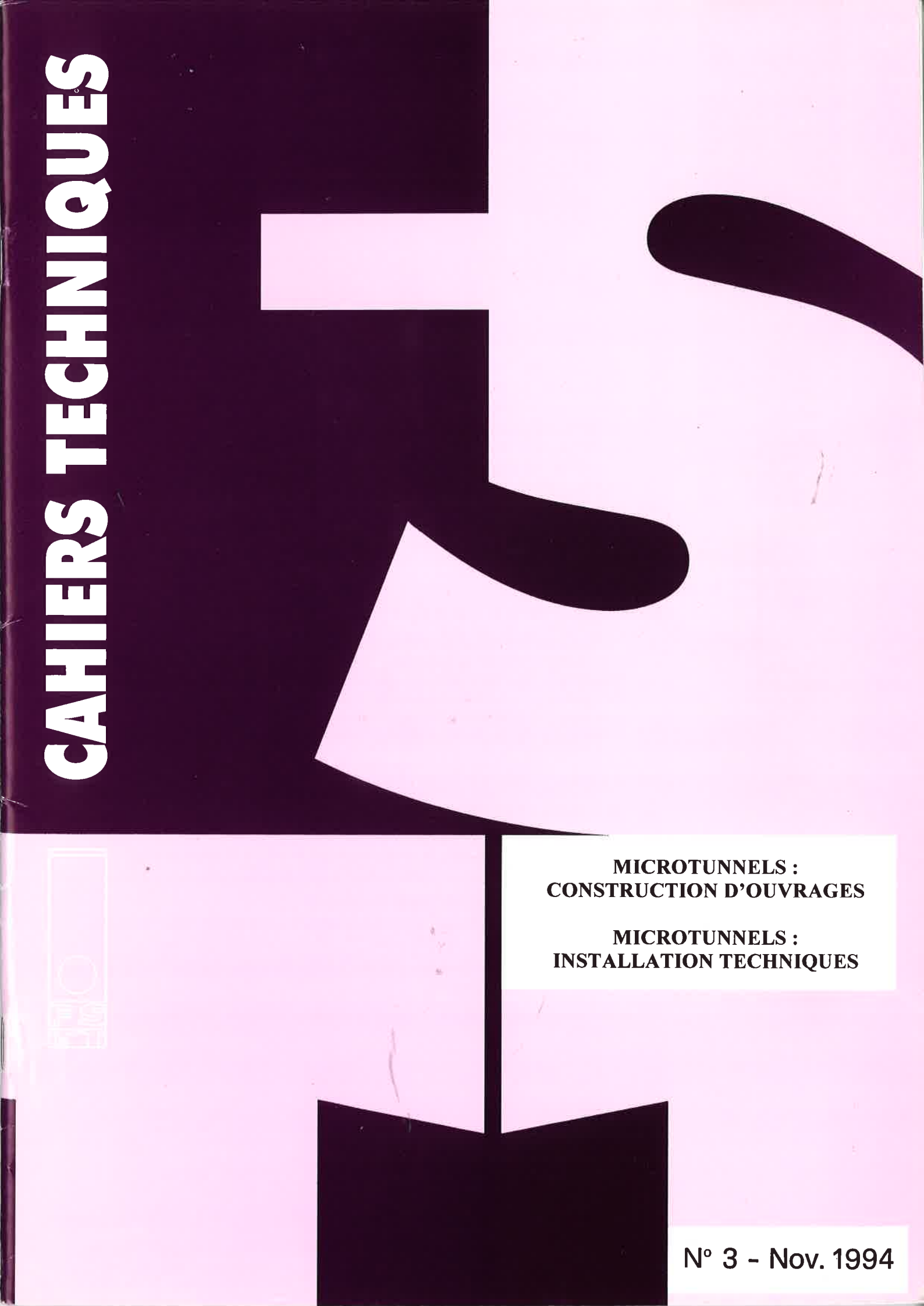


CAHIERS TECHNIQUES



**MICROTUNNELS :
CONSTRUCTION D'OUVRAGES**

**MICROTUNNELS :
INSTALLATION TECHNIQUES**

N° 3 - Nov. 1994



FSTT
*Comité Français
pour les Travaux
Sans Tranchée*

72 avenue Pasteur
93100 MONTREUIL
Tél. 48 70 92 32
Fax 48 70 99 79

L'OBJET DE L'ASSOCIATION

L'association FSTT de caractère scientifique et technique a pour objet la promotion, la connaissance, la formation et la pratique des méthodes sans tranchée pour les travaux relatifs aux canalisations des réseaux enterrés de toute nature.

Ces méthodes sans tranchée s'entendent en souterrain, sans creusement de tranchée pour l'entretien, la rénovation et le remplacement des ouvrages existants et la construction d'ouvrages neufs de réseaux publics, privés ou concessionnaires. Ce domaine d'activité couvre toutes les techniques de repérage ou de cartographie de ces réseaux.

Le champ d'application s'étend au domaine non visible soit tout ouvrage enterré de dimension inférieur ou égal à 1200 mm ou équivalent s'il s'agit d'un ouvrage non circulaire.

LES STATUTS DE LA FSTT

Créé le 4 Juillet 1990, le Comité Français pour les travaux sans tranchée - FSTT dans sa dénomination française et French Society for Trenchless Technology pour ses rapports internationaux est une association régie par la loi 1901 à but non lucratif. Il se compose de membres fondateurs, de membres actifs et de membres honoraires. Cette association est administrée par un conseil élu par assemblée générale ; ce même conseil d'administration élit un bureau exécutif.

LES OBJECTIFS DE L'ASSOCIATION

Les diverses actions doivent se développer selon plusieurs axes :

- La promotion des techniques sans tranchée (faire connaître ces techniques par de l'assistance, expertise en encouragement et même enseignement).
- La réglementation - normalisation (élaboration de normes, de cahiers techniques contractuels, réglementations diverses).
- La recherche (matériel, guidage, reconnaissance, matériaux, outils d'aide au diagnostic...).
- L'information, Communication (revues, brochures, livres, conférences, colloques, centre de documentation).
- Vie associative (Missions, Voyages d'études, séminaires, remises de prix).



MICROTUNNELS : CONSTRUCTION D'OUVRAGES

MICROTUNNELS : INSTALLATION TECHNIQUES

Document établi par

F. SCHLOSSER dans le cadre du Rapport Général
du thème *Installations sans tranchées*
du Congrès No-Dig '92
Pour une ville sans tranchées, Paris

RÉSUMÉ - ABSTRACT

Les techniques de pose sans tranchée de canalisations enterrées connaissent un essor important, de nos jours, en raison notamment de l'encombrement croissant du sous-sol en site urbain, ainsi que de préoccupations liées au respect de l'environnement.

Différentes méthodes de réalisation se sont développées pour la construction de microtunnels : celles-ci reposent sur les principes du forage guidé, du forage horizontal dirigé ou du microtunnelier.

Ce rapport aborde l'ensemble des questions liées à la mise en oeuvre de ces techniques.

Après une description des différentes méthodes de réalisation, les principaux phénomènes intervenant dans l'application de ces méthodes sont analysés en détail, notamment du point de vue de l'interaction sol-creusement et de l'interaction sol-tuyau.

Les problèmes techniques de réalisation (construction des puits, guidage, marinage) sont également abordés et des indications sont données sur le choix des techniques.

Le rapport s'achève par une présentation des travaux de recherche engagés pour améliorer les performances de ces techniques.

Trenchless pipe installation is growing nowadays, partly because of the increasing use of underground space in urban areas, as well as increasing concern for environmental issues.

Various microtunnel construction techniques have been developed : those are based upon the principles of guided boring, horizontal directional drilling or microtunneling.

This report addresses the main issues related to the implementation of trenchless technologies.

It includes a description of existing technologies, as well as a detailed analysis of the main phenomena involved in their implementation, particularly in terms of soil-machine interaction and soil-structure interaction.

It also covers specific construction considerations such as pit construction, directional control and muck removal, and provides indications for selecting adequate construction techniques.

Finally, an overview is provided of research underway to improve the capabilities of existing technologies.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	1
2	CLASSIFICATION DES TECHNIQUES	8
2.1	Principes de classification	8
2.2	Forages en ligne droite sur courtes longueurs	9
2.3	Pose par microtunnelier	11
2.4	Forages dirigés	12
2.5	Techniques de remplacement in situ	12
2.6	Résumé des principales techniques	13
3	INTERACTION SOL - CREUSEMENT	13
3.1	Techniques par refoulement du sol	15
3.2	Techniques par excavation des terrains	16
3.3	Incidence des travaux	19
4	INTERACTION SOL - TUYAU	23
5	CONSTRUCTION ET CHOIX DES TECHNIQUES	27
5.1	Puits	27
5.1.1	Les puits de départ et d'arrivée	27
5.1.2	Les différents types de puits	27
5.1.3	Justifications de la réaction d'appui	28
5.2	Guidage	30
5.3	Marinage	32
5.4	Limites d'utilisation des techniques	34
6	ÉTAT ACTUEL DES RECHERCHES	37
7	CONCLUSIONS	38
	REMERCIEMENTS	39
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

TABLE OF CONTENTS

1	INTRODUCTION	1
2	CLASSIFICATION OF CONSTRUCTION TECHNIQUES	8
2.1	Classification principle	8
2.2	Short range horizontal boring	9
2.3	Microtunneling	11
2.4	Directional drilling	12
2.5	Replacement techniques	12
2.6	Summary of current techniques	13
3	INTERACTION BETWEEN GROUND AND CONSTRUCTION	13
3.1	Displacement techniques	15
3.2	Excavation techniques	16
3.3	Impact of construction on surrounding grounds and structures	19
4	GROUND - PIPE INTERACTION	23
5	CONSTRUCTION AND TECHNIQUE SELECTION	27
5.1	Pits	27
5.1.1	Drive pits and reception pits	27
5.1.2	Pit classification	27
5.1.3	Reaction force design	28
5.2	Directional control	30
5.3	Muck removal	32
5.4	Limitations of construction techniques	34
6	RESEARCH	37
7	CONCLUSIONS	38
	REMERCIEMENTS	39
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

MICROTUNNELS : CONSTRUCTION D'OUVRAGES MICROTUNNELS : INSTALLATION TECHNIQUES

F. SCHLOSSER*, E. LECA**

* : Terrasol et Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

1 - INTRODUCTION

Dans les travaux sans tranchée, le terme "microtunnel" a selon les auteurs et les pays pris des sens un peu différents. Dans leur livre sur les microtunnels, Stein et al., (1989) définissent un microtunnel comme un tunnel pour la mise en place d'une conduite ayant un diamètre nominal intérieur (DN) ne permettant pas le passage d'un homme et construit par une méthode mécanisée. Cette définition très large couvre toute la mise en place de canalisations par des techniques sans tranchée. C'est celle que nous adopterons dans ce Rapport Général, même si elle diffère de la définition donnée par la Société Internationale des Travaux sans Tranchée (1991), dans laquelle le microtunnel doit en plus être construit par excavation du sol, avec un marinage sorti par le microtunnel lui-même et un tube mis en place par poussage.

Par suite de leur définition, les microtunnels sont limités à un diamètre maximal qui, selon les auteurs et selon que l'on considère le diamètre intérieur ou extérieur, varie de 900 mm à 1200 mm.

Dans la plupart des microtunnels, le tube ou les éléments de tube, qui en constituent le soutènement, sont mis en place par fonçage à partir d'un puits de départ en direction d'un puits d'arrivée.

1 - INTRODUCTION

The word "microtunnel" has been used by several authors from different countries to refer to various kinds of trenchless techniques. In their book on microtunnels, Stein et al. (1989) describe a microtunnel as being a tunnel for the installation of non-man size pipes, using a mechanized construction technique. Such a wide definition allows to cover the full range of trenchless pipe installation techniques. This is the definition we will use in the present report, even though it differs from that proposed by the International Society for Trenchless Technology (1991), in which the machine used for non-man size pipe installation must be equipped with ground excavation, muck removal and pipe jacking devices.

The limit for a non-man size pipe, associated with each definition, is characterized in terms of a maximum internal or outside diameter, which value varies between 900 mm and 1200 mm.

Most microtunnels are completed by jacking the pipes or pipe sections from a starting pit to an arrival pit.

Microtunnels have been in use for many years, with the first applications of the technique being found in the early parts of the century, for the installation of small size pipes in sandy soils ; in that case, pipe jacking techniques were employed. Impact moling, which is based on the

L'origine des microtunnels est ancienne et remonte au début de ce siècle avec les premières applications du fonçage de tuyaux qui, par la suite, s'est beaucoup développé dans les terrains sableux. Depuis quelques dizaines d'années la technique des fusées, utilisée dans les forages non dirigés et reposant sur le principe de la percussion appliquée en tête de l'engin de fonçage, a été largement utilisée pour exécuter par refoulement du sol des traversées sans terrassement. Mais c'est avec le développement des microtunneliers et des techniques de forages dirigés que les travaux sans tranchée ont pu franchir une étape décisive.

Le premier microtunnelier a été construit au Japon en 1972, mais les premières réalisations de microtunnels avec cette technique n'ont débuté qu'en 1977. Actuellement au Japon, 1000 microtunneliers sont en service et 200 sont construits chaque année. La figure 1 montre les évolutions de l'utilisation des microtunneliers au Japon, en Allemagne, au Royaume-Uni et en France au cours des dernières années. On constate qu'en France l'utilisation des microtunneliers n'a commencé qu'en 1989 sous l'impulsion du Département du Val de Marne (Mermet et al., 1989). La figure 2 montre la répartition des travaux réalisés au microtunnelier en 1989 dans le monde. Le Japon apparaît de loin comme le premier utilisateur, suivi en second par l'Allemagne et le Royaume-Uni.

displacement of the ground by the hammer head of the mole, has been used extensively over the past ten years, for non-guided boring. But the popularity of trenchless techniques is mainly due to the more recent developments in the areas of microtunneling machine manufacturing and guided boring techniques.

The first microtunneling machine was built in Japan in 1972, but this kind of equipment was not used for pipe installation until 1977. Nowadays, 1000 microtunneling machines are being used and 200 manufactured in Japan every year. Figure 1 shows the evolution with time, of the use of microtunneling machines in Japan, Germany, United Kingdom and France over the past years. It is apparent that microtunneling machines only started to be used in France in 1989, with this trend being initiated by the Département du Val de Marne (Mermet et al., 1989). Figure 2 gives the distribution over the world of pipes installed by microtunneling machines in 1989. Japan clearly appears as the leader, followed by Germany, and the United Kingdom.

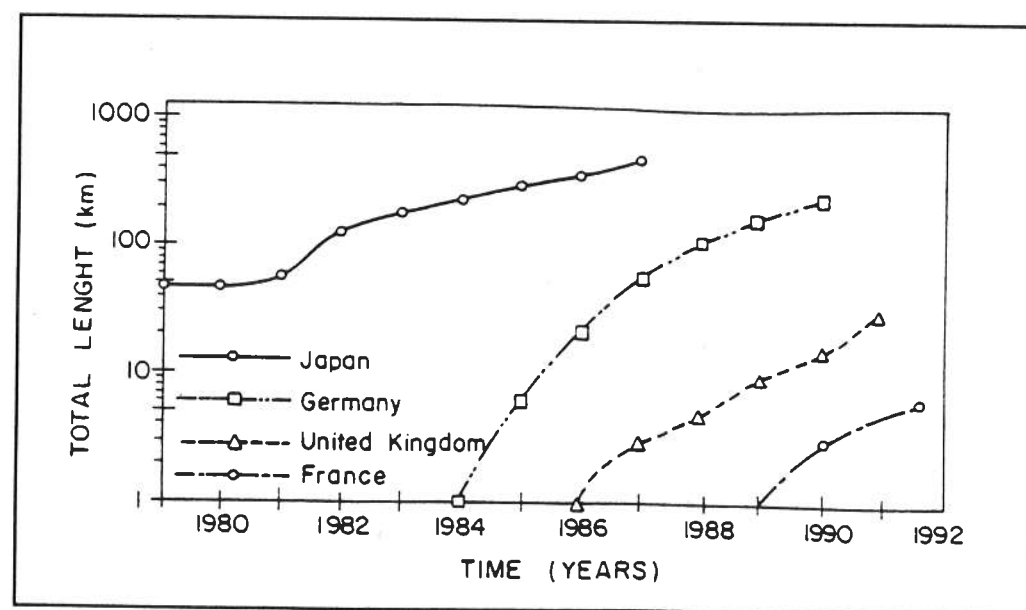


Figure 1 - Evolution of the use of microtunneling machines in different countries.
Evolution de l'utilisation des microtunneliers dans quelques pays.

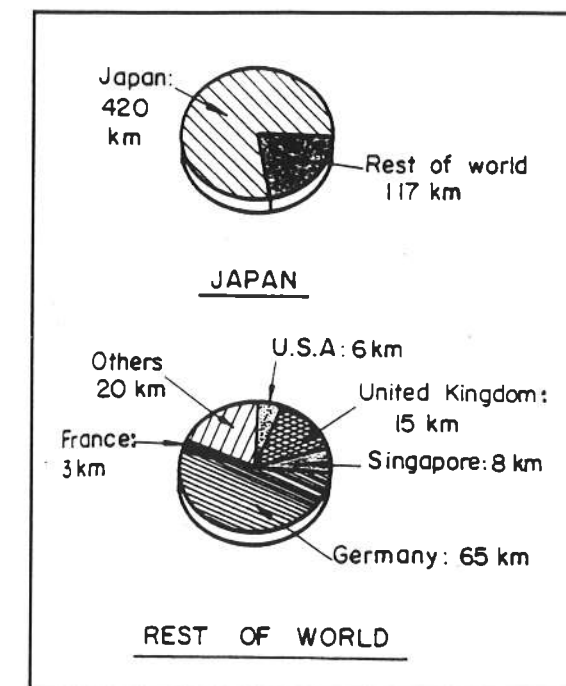


Figure 2 - Use of microtunneling machines in the world in 1989.
Utilisation des microtunneliers dans le monde en 1989.
(A. Moss, 1990)

La technique du forage dirigé consiste à réaliser d'abord un trou pilote à l'aide d'une tête de foration placée au bout d'un tube semi-flexible et capable d'être dirigée. Une fois le trou pilote réalisé, la conduite définitive semi-flexible est introduite en sens inverse après réalésage du trou. Cette technique qui a débuté aux Etats-Unis, il y a 15 ans environ, pour le franchissement d'obstacles par des tubes pétroliers, s'est implantée en Europe à la fin des années 80 pour la pose de canalisations en milieu urbain. Elle est essentiellement utilisée pour la mise en place de réseaux de gaz, de câbles électriques et de canalisations d'eau. Il existe peu de statistiques publiées sur les longueurs de conduites posées à l'aide de cette technique. Cependant, alors que la technique fut utilisée pour la première fois en France en 1988, près de 50 km de réseaux et de canalisations furent posés durant les deux premières années (Mermet et al., 1991). En ne se référant qu'à un seul procédé, Ritchie et al. (1989) ont publié des résultats sur les longueurs de conduites installées au cours de l'année 1988 aux Pays-Bas, en Allemagne et au Royaume-Uni (figure 3). Sur les 150 millions de mètres de câbles et de tuyaux souterrains posés chaque année en Europe, seuls quelques centaines de kilomètres au plus sont installés par la méthode du forage dirigé, mais le développement est très rapide au cours des dernières années.

Horizontal directional drilling is completed in two steps : a pilot bore is first excavated, using a steerable drilling head, and a semi-flexible pipe installed behind the machine ; once this pilot bore has been completed, the pilot pipe is pulled back to the starting point and a permanent semi-flexible pipe drawn in, using a reamer for enlarging the bore dimensions. This technique was developed in the United States some 15 years ago, for pulling oil pipes under obstacles ; it was introduced in Europe in the late eighties and used for pipe installation in urban areas. It is now essentially used for the installation of pipelines, electric cables and water pipes. Little has been published on pipe lengths installed using this technique. In France however, nearly 50 km of pipes have been installed with this technique in two years, even though it was only introduced in this country in 1988 (Mermet et al., 1991). Ritchie et al. (1989) published statistics on the pipe lengths installed in 1988 with a specific horizontal directional technique, in the Netherlands, Germany and the United Kingdom (Figure 3). Only a few hundred kilometers or less, out of 150 million meters of cables and pipes, are being installed each year in Europe, using this technique ; however, significant progress has been observed in the applications of this technique over the past years.

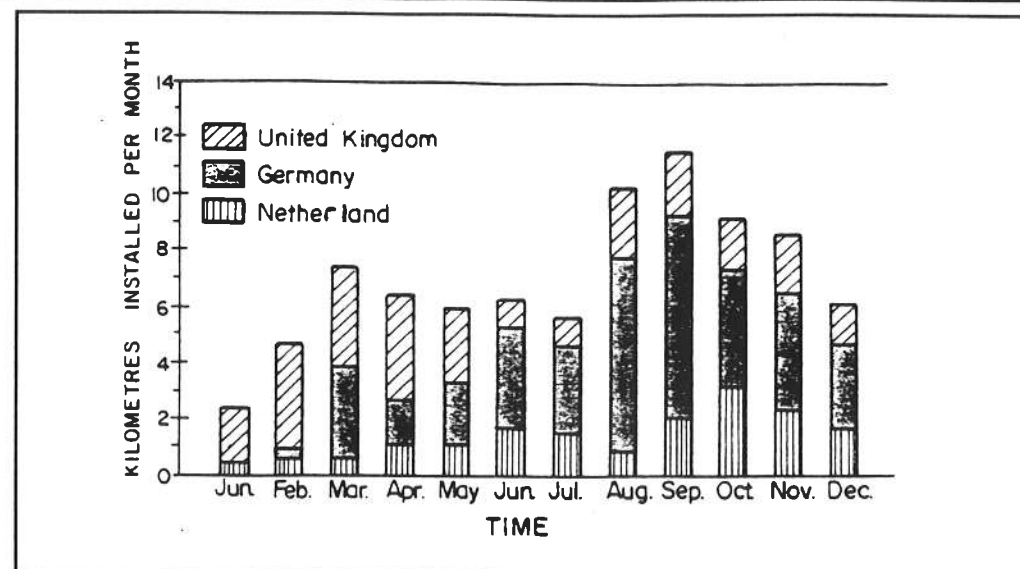


Figure 3- Lengths of pipes installed by directional drilling in Europe in 1988.
Longueurs cumulées de canalisations posées en 1988 en Europe par la technique du forage dirigé.
(Ritchie et al., 1989)

Le marché des microtunnels est essentiellement constitué par la pose et l'entretien des réseaux urbains d'assainissement, d'eau potable, des réseaux de communication et de transport d'énergie (électricité, gaz, chauffage). Dans les pays occidentaux, la majorité des habitations sont reliées au réseau d'assainissement et ont l'électricité et le téléphone. Il n'en est pas de même par exemple au Japon comme le montre la figure 4 (Takatsu et al., 1992), ce qui peut expliquer en partie le grand développement des microtunnels dans ce pays.

Microtunneling is mainly used for the installation and maintenance of urban sewer networks, water pipes, telephone and energy lines (electricity, gas, heating). Most homes, in western countries, are connected to sewer, electricity and telephone networks. The same is not true of Japan, as can be seen in Figure 4 (Takatsu et al., 1992), which in part explains the growth of the microtunneling market in this country.

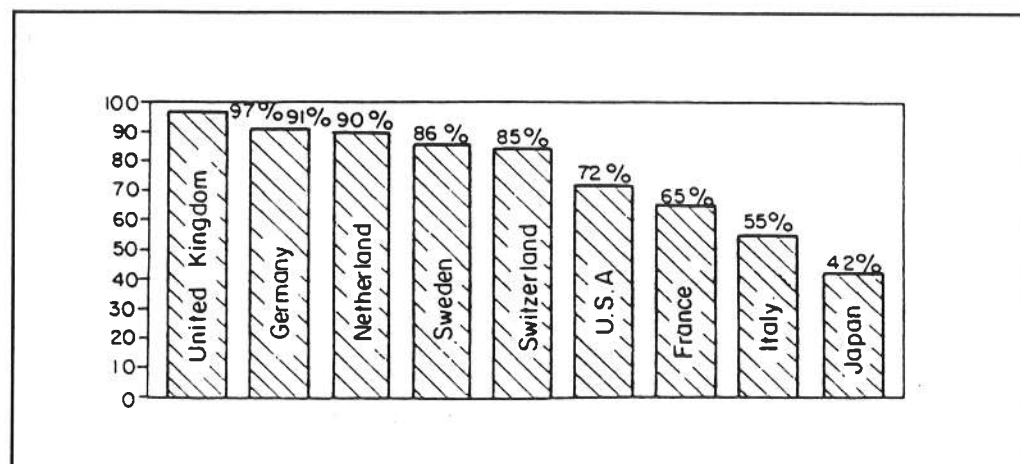


Figure 4 - Percentage of sewer connection.
Pourcentage de raccordement au réseau d'assainissement au Japon.
(Takatsu et al., 1992)

L'un des grands avantages des microtunnels pour la pose et la rénovation des réseaux urbains, par rapport à la méthode classique de pose par tranchée, est de protéger au mieux l'environnement en diminuant le bruit, la pollution et les interruptions ou difficultés de circulation. Mais pour comparer le coût d'un microtunnel à celui d'une canalisation mise en place par tranchée, il convient de considérer non seulement le coût direct lié aux travaux eux-mêmes, mais également le coût indirect lié principalement aux délais, aux interruptions ou aux difficultés de circulation piétonnière et automobile. Ce dernier coût n'est pas facile à évaluer, mais semblerait en général plus élevé que le coût direct (Molenaar et al., 1991).

Parmi les comparaisons de coûts publiées, il est intéressant de citer l'étude du Transport and Road Research Laboratory (Norgrove et O'Reilly, 1991), qui repose sur les coûts de 16 offres et de 11 réalisations effectives pour des poses de canalisations d'assainissement par tranchée et/ou par microtunnels entre 1970 et 1981. Il a été supposé que le coût de la pose par tranchée variait proportionnellement à la profondeur de la base de la canalisation, ce qui est vrai à moins de 10 % près, et d'autre part il n'a pas été pris en compte le coût des puits dans la construction des microtunneliers, ce qui est considéré par les auteurs comme marginal.

One major advantage of using microtunneling techniques for the installation and maintenance of urban networks, as compared with conventional trenching, is that it helps preserving the environment, by reducing noise, pollution, as well as traffic interruptions and difficulties. For this reason, cost comparisons, between trenchless and trenched techniques, should not be limited to direct costs, but should also account for non-direct costs, which mainly result from delays, interruptions and difficulties for both pedestrians and traffic. The latter cost is not easy to estimate, but seems to be generally greater than the direct cost (Molenaar, 1991).

One interesting cost comparison study, related to pipe installation, was published by the Transport and Road Research Laboratory (Norgrove and O'Reilly, 1991); this study is based on the costs of 16 bids and 11 completed projects, related to the installation of sewer pipes by trenching and/or microtunneling between 1970 and 1981. It was assumed in this study, on the one hand, that the cost of trenched installation increased in proportion to the depth of layed pipe, which is verified within 10%; on the other hand, the cost of pit construction was considered marginal by the authors, and disregarded in their analysis.

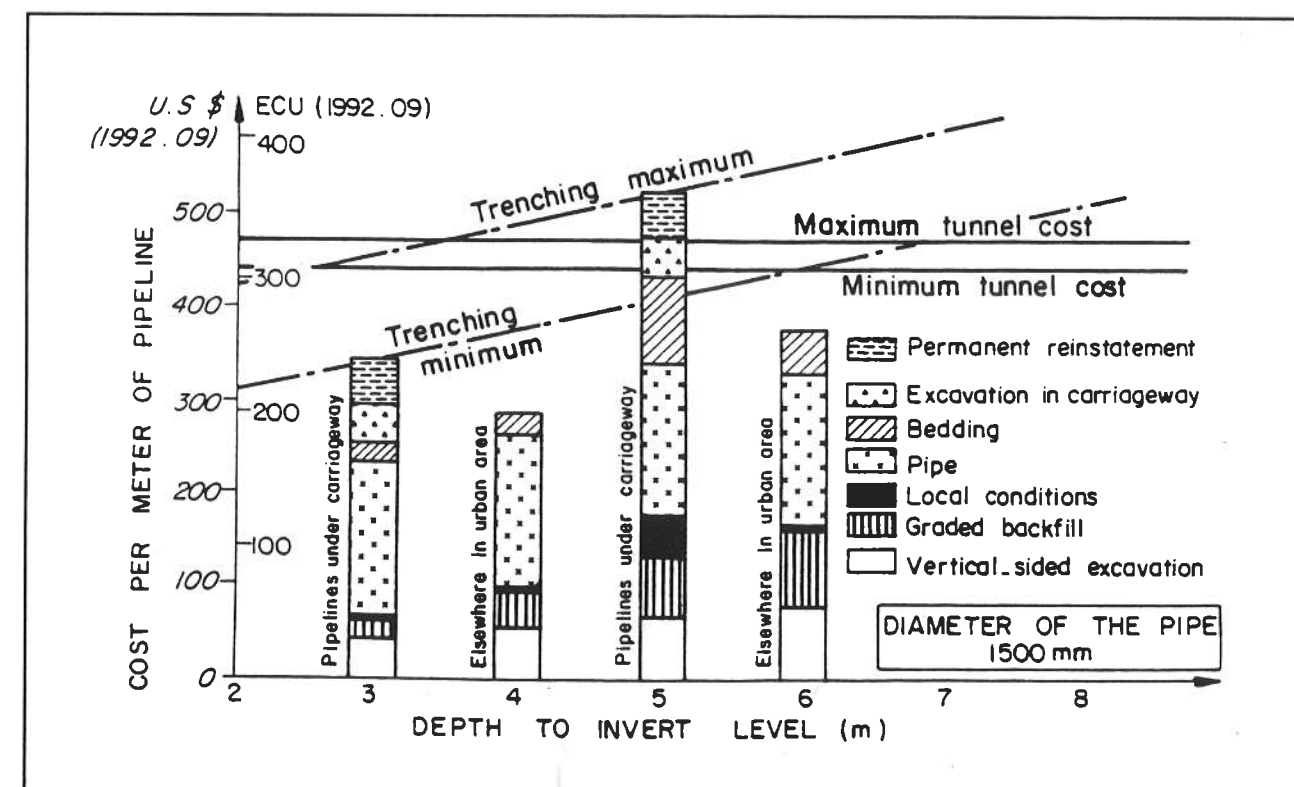


Figure 5a - Typical cost versus depth to invert relationships, for trench and tunnel construction.
Coûts de la pose par tranchée et par microtunnelier en fonction de la profondeur de la base de la conduite.
(Norgrove & O'Reilly, 1991)

La figure 5.a montre pour les deux techniques les comparaisons des coûts directs, pour un collecteur de 1500 mm de diamètre, en fonction de la profondeur de la base de la conduite. L'intersection des bandes, comprises entre le coût minimal et le coût maximal, permet de définir une profondeur critique en deçà de laquelle la canalisation posée par tranchée est moins chère que celle mise en place par microtunnel ou par minitunnel, alors qu'au-delà c'est l'inverse. La figure 5.b montre les variations de la profondeur critique moyenne, pour l'ensemble des projets étudiés, en fonction du diamètre intérieur de la conduite ou du collecteur, en séparant les offres et les décomptes finaux, une fois les ouvrages réalisés. On constate que cette profondeur critique est de 8 à 16 m pour un diamètre de 200 mm et de 8 à 9 m pour un diamètre de 1000 mm. Cette conclusion est moins favorable que ce qu'indique Mohring (1988), pour qui le coût de l'installation par microtunnel devient compétitive par rapport à la pose par tranchée à partir de 3 m de profondeur.

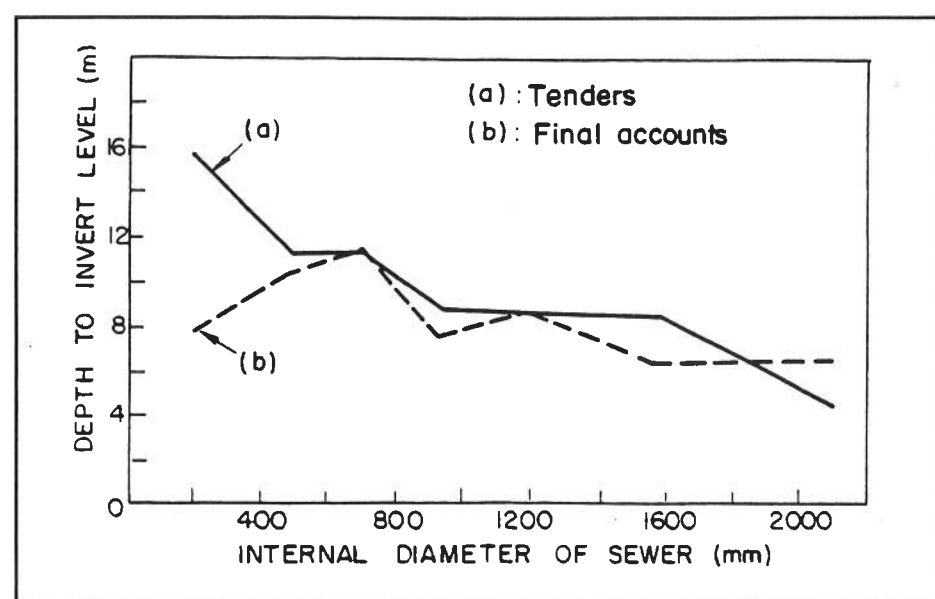


Figure 5.b - Relation between break-even cost depth and sewer diameter.
Variation de la profondeur critique en fonction du diamètre intérieur de la conduite.
(Norgrove & O'Reilly, 1991)

Sur un projet précis, ces mêmes auteurs ont essayé d'évaluer le coût indirect des pertes de temps des automobilistes par suite des difficultés induites sur la circulation, pour un collecteur de 600 mm de diamètre posé dans une rue très passante. Ce seul coût indirect représentait 34 % du coût total des travaux payé à l'entreprise.

Dans une étude très détaillée sur les coûts des travaux sans tranchée, Thomson et al. (1990) séparent les coûts proprement indirects et les coûts sociaux, dans l'installation ou le remplacement de canalisations. Les coûts proprement indirects comprennent : - la perte de jouissance et les dommages pour les propriétaires des terrains traversés et des habitations voisines, - les dommages causés aux réseaux avoisinants, - les pertes de profits commerciaux, - la réduction de la durée de vie des chaussées, - le coût d'entretien supplémentaire des chaussées endommagées.

Figure 5.a provides a comparison between the direct costs associated with each technique for different depths of installation, in the particular case of a 1500 mm diameter pipe ; in this figure, upper and lower estimates of the costs associated with each technique are plotted with respect to the depth to pipe invert. The intersection between the two cost ranges lead to the definition of a critical depth, within which trenching is less expensive than microtunneling or tunneling, whereas the reverse is true at greater depths. Figure 5.b shows, for all the projects that were considered in this study, the variations of mean critical depth with respect to internal pipe diameter ; bids and final costs are plotted separately on this figure. It is found that the critical depth ranges between 8 and 16 m for a 1500 mm pipe, and between 8 and 9 m for a 1000 mm diameter pipe. This conclusion is less favorable to microtunneling than that of Mohring (1988), in which microtunneling appears to be competitive in comparison to trenching at depths of 3 m and less.

The same authors tried to estimate the indirect cost associated with construction induced time loss for drivers, for a specific project, where a 600 mm pipe had to be installed in a densely populated street. This cost was estimated to 34 % of the final project's cost.

In a very detailed study on the cost of trenchless construction, Thomson et al. (1990) consider separately the non-direct and social costs, which are associated with pipe installation or replacement. Pure non-direct costs include : - loss of use for and damage to land owners and neighbors, - damages caused to neighboring networks, - loss of profit for businesses, - reduction in the durability of street pavement, - additional cost of maintenance for damaged pavement. Social costs include : - traffic interruption and delay, - increased chances for accidents, - loss of public or private use of the street, - environmental effects (noise, vibrations, pollution).

Les coûts sociaux comprennent : - les interruptions et les pertes de temps dans la circulation routière, - le niveau accru de risque d'accident, - la perte d'agrément public ou privé de la rue, - les effets sur l'environnement (bruit, vibration, pollution).

Dans une enquête effectuée à Paris en 1991 sur les nuisances ressenties par les habitants lors de la pose de canalisations par tranchée (Berosch et Angot, 1992), il apparaît que pour 90 % des personnes interrogées le bruit et les vibrations représentent la nuisance principale. Les auteurs indiquent en outre que le coût social du bruit, dans la pose de canalisations par tranchée, peut être estimé en France à 100 milliards FF (20 milliards US \$).

Depuis plusieurs années, de nombreux congrès, colloques et symposiums ont eu lieu sur les travaux sans tranchée, notamment à l'initiative de l'ISTT (International Society for Trenchless Technology) qui organise chaque année deux congrès NO-DIG. On doit citer :

Tunnels et Microtunnels - Colloque International - Paris, février 1989.

4ème Congrès International sur les Travaux sans Tranchée. NO-DIG 89. Londres, Avril 1989 ;

5ème Congrès International sur les Travaux sans Tranchée. NO-DIG 90. Rotterdam, Avril 1990 ;

Tunnels and Tunneling. Comett Seminar. Londres, juillet 1990 ;

6ème Congrès International sur les Travaux sans Tranchée. NO-DIG 90. Osaka, Octobre 1990 ;

7ème Congrès International sur les Travaux sans Tranchée. NO-DIG 91. Hambourg, Octobre 1991 ;

8ème Congrès International sur les Travaux sans Tranchée. NO-DIG 92. Washington, Avril 1992 ;

2ème Symposium International sur les Microtunnels. Munich, Avril 1992 ;

Journées d'études sur les Travaux sans Tranchée. CEIFICI. Paris, Mars 1992.

Les actes de ces congrès, ainsi que les communications, présentées au congrès NO-DIG 92 de Paris et relatives au thème des constructions d'ouvrages ont été utilisés pour rédiger le présent rapport général.

Ce rapport général qui constitue un état des connaissances sur les constructions d'ouvrages comprend les parties suivantes :

- Classification des techniques.
- Interaction sol-creusement.
- Interaction sol-tuyaux.
- Construction et choix des techniques.
- Projets de recherche actuels.

A survey carried out in Paris in 1991 on the nuisances caused to inhabitants by the installation of pipes using trenching techniques (Berosch and Angot, 1992), shows that noise and vibrations are seen as the main nuisances for 90 % of interviewed people. The authors also indicate that the overall social cost of noise, associated with pipe installation by trenching, can be estimated to 100 billion French Francs (20 billion US \$).

Several conferences, symposiums and workshops on trenchless construction have been organized for several years, mostly by the ISTT (International Society for Trenchless Technology) ; among these meetings are the following :

International Conference on Tunneling and Microtunneling - Paris, february 1989 ;

4th International Conference on Trenchless Construction, NO DIG 89 - London, April 1989 ;

5th International Conference on Trenchless Construction, NO DIG 90 - Rotterdam, April 1990 ;

Tunnels and Tunneling, Comett Seminar, London, July 1990 ;

6th International Conference on Trenchless Construction, NO DIG 90 - Osaka, October 1990 ;

7th International Conference on Trenchless Construction, NO DIG 91 - Hamburg, October 1991 ;

8th International Conference on Trenchless Construction, NO DIG 92 - Washington, April 1992 ;

2nd International Symposium on Microtunnels, Munich, April 1992 ;

Workshop on Trenchless Techniques, CEIFICI, Paris, March 1992.

The proceedings of these conferences, as well as the papers presented to the session on trenchless installations at the Paris NO DIG 92 conference have been used to prepare the present report.

This state-of-the-art on trenchless installations includes the following sections :

- Classification of Construction Techniques,
- Interaction Between Ground and Construction,
- Ground-Pipe Interaction,
- Construction and Technique Selection,
- Research.

2 - CLASSIFICATION DES TECHNIQUES

2.1 - Principes de classification

Les microtunnels ou techniques de travaux sans tranchée sont généralement utilisés pour la pose de canalisations enterrées. Celle-ci peut être séparée en trois catégories :

- Installation d'un nouveau tuyau sur une nouvelle ligne de réseau ;
- Remplacement : pose d'un nouveau tuyau à l'emplacement d'une canalisation déjà existante ;
- Rénovation : réparation et remise en état des canalisations d'une ligne existante.

Nous nous limiterons ici aux techniques de pose relevant des deux premières catégories, en signalant que les microtunnels peuvent également être utilisés pour d'autres ouvrages et notamment la réalisation in situ de voûtes ou de toits dans la construction des grands tunnels et autres ouvrages souterrains.

Pour les installations nouvelles, existent de nombreuses techniques de pose que l'on peut distinguer soit suivant l'existence ou non d'un système de guidage (Stein et al., 1989 ; Stein 1990), soit suivant le type de creusement du microtunnel (refoulement dynamique et statique du sol, forage mécanique ou par jet, creusement avec stabilisation du front par pression de boue ou pression de terre, réalisation d'un forage pilote suivi d'un réalésage), soit suivant la nature de la canalisation à poser (canalisation d'assainissement ; canalisation sous pression -eau potable, gaz et chauffage urbain- ; câble ou canalisation pour câbles) (Thomson et al., 1990).

Nous adopterons ici une classification intermédiaire, proposée par la Société Internationale pour les Travaux sans Tranchée (ISTT, 1991), et qui distingue les techniques suivantes :

- 1) Pose de courtes longueurs de canalisation (≤ 40 m) : il s'agit essentiellement de méthodes non dirigées et travaillant par refoulement du sol, avec puits de départ et puits d'arrivée ;
- 2) Pose par microtunnelier entre puits de départ et puits d'arrivée ;
- 3) Pose par forage dirigé horizontal ; il s'agit d'une pose dans un plan vertical d'une canalisation semi-flexible sur une grande longueur (≤ 2000 m), ne nécessitant ni puits de départ, ni puits d'arrivée ;
- 4) Pose par forage guidé : il s'agit d'une pose permettant tout changement de direction en plan et en profondeur, pour des canalisations flexibles de petit diamètre et sur une longueur moyenne (150 m au plus).

Pour le remplacement sans tranchée d'une canalisation, deux techniques sont actuellement utilisées :

- La technique par éclatement de tuyau (pipe bursting) qui repose sur le principe du refoulement latéral ;

2 - CLASSIFICATION OF CONSTRUCTION

TECHNIQUES

2.1 - Classification Principe

Microtunneling or trenchless techniques are generally used for the installation of underground pipes. These techniques fall into three main categories :

- Installation of a new pipe or service line ;
- Replacement : installation of a new pipe in place of an existing pipe ;
- Renovation : repair and maintenance of an existing pipe.

This report covers the first two categories. In addition to the above listed techniques, it should also be mentioned, that microtunnels are also used for other applications, including the construction of vaults or roofs for large tunnels and other underground openings.

As for new installations, several construction techniques have been developed ; these can be classified according to steering option (steerable / non-steerable techniques ; Stein et al., 1989 ; Stein, 1990), boring technique (dynamic or static soil displacement, mechanical or hydraulic drilling, slurry or earth pressure face support, pilot pipe and reaming), or pipe type (water main ; pressurized pipe - for water, gas, heating - ; cable or cable duct ; Thomson et al., 1990).

In this report, we will use an intermediate classification proposed by the International Society for Trenchless Technology (ISTT, 1991), which considers the following techniques :

- 1) Installation of short lengths of pipes (< 40 m) : these are mainly achieved by means of non-steerable techniques ; construction is based on soil displacement, and proceeds from a starting (drive) pit to an arrival (reception) pit ;
- 2) Microtunneling from a starting pit to an arrival pit ;
- 3) Horizontal directional drilling : this category refers to the installation, along a vertical plane, of a long (≤ 2000 m) semi-flexible pipe, with no starting or arrival pit ;
- 4) Guided drilling : this technique, which allows directional changes in both a horizontal or vertical plane, is used for the installation of small diameter flexible pipes of medium lengths (150 m and over).

Two techniques are currently used for pipe replacement :

- pipe bursting, which is based on lateral soil displacement ;
- pipe eating, in which the existing pipe is destroyed by the ground excavating tools used for the installation of the new pipe.

- La technique de la désagrégation du tuyau ancien (pipe eating) lors de l'excavation du terrain pour la pose de la nouvelle canalisation.

2.2 - Forages en ligne droite sur courtes longueurs

On utilise généralement dans ce cas des techniques de forages horizontaux non dirigés, entre un puits d'attaque et un puits d'arrivée. Stein et al. (1989) distinguent les méthodes par refoulement du sol et les méthodes par excavation du sol, comme indiqué dans le tableau 1.

MÉTHODE	PRINCIPE DE POSE
DEPLACEMENT DU SOL	
1. Fusée	Conduite tirée derrière la fusée ou mise en place par poussage
2. Battage de tubes fermés	Battage des tubes définitifs à partir du puits
3. Fonçage statique d'une barre pilote	Forage réalisé et conduite tirée lors de l'extraction du tube pilote
EXCAVATION DU SOL	
4. Battage de tubes ouverts	Marinage évacué par tarière
5. Fonçage statique à la tarière	Marinage évacué par une vis sans fin

Table 1 - Non-guided pipe installation techniques.
Méthodes de pose par forages non dirigés.
(Stein et al., 1989)

Ces techniques sont peu coûteuses et très largement utilisées, notamment les fusées, qui fonctionnent sur le principe d'une masse percutante à l'intérieur d'un piston. La conduite à mettre en place est normalement tirée par la fusée mais, lorsque le forage se tient, la pose peut être différée et le tube mis en place par éléments et poussé.

Les fusées (figure 6.a) sont utilisables dans tous les types de sols, à condition d'être au-dessus de la nappe. Elles permettent de réaliser en une seule passe des forages de 30 à 80 mm de diamètre traversant des sols hétérogènes, y compris des obstacles. Avec plusieurs passes il est possible d'atteindre 200 à 250 mm de diamètre.

La technique du fonçage statique d'éléments de tube, comportant une tarière et un système d'évacuation du marinage (figure 6.c) permet de poser des conduites de 100 à 1000 mm de diamètre, avec une précision sur la direction de l'ordre de 1 %.

La technique de fonçage statique d'une barre pilote (figure 6.b) de petit diamètre illustre toute une grande catégorie de procédés qui se sont beaucoup développés en forages dirigés. Une fois la barre pilote foncée jusqu'au puits d'arrivée, il y est fixé à cet endroit un réalésageur, qui augmente le diamètre du forage au fur et à mesure que la barre pilote est retirée. Le tube définitif est placé derrière le réalésageur et tiré par la barre pilote.

2.2 - Short Range Horizontal Boring

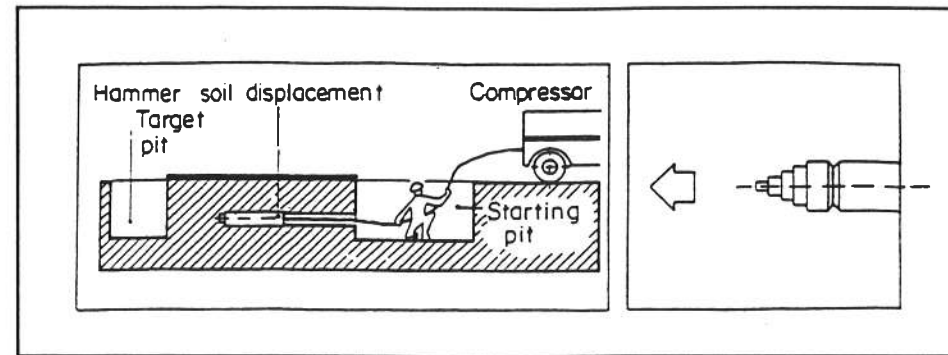
In this case, non-directional horizontal drilling techniques are generally used. Stein et al., (1989) consider two categories of methods, as indicated in Table 1 : soil displacement techniques and excavation techniques.

These techniques are unexpensive and widely used ; this is particularly true of impact moling, which is based on the impact of a hammer inside a piston. The pipe to be installed is usually drawn in behind the mole ; however, if the bore obtained by moling is stable enough, pipe installation can be delayed and completed by jacking pipe elements into the bore.

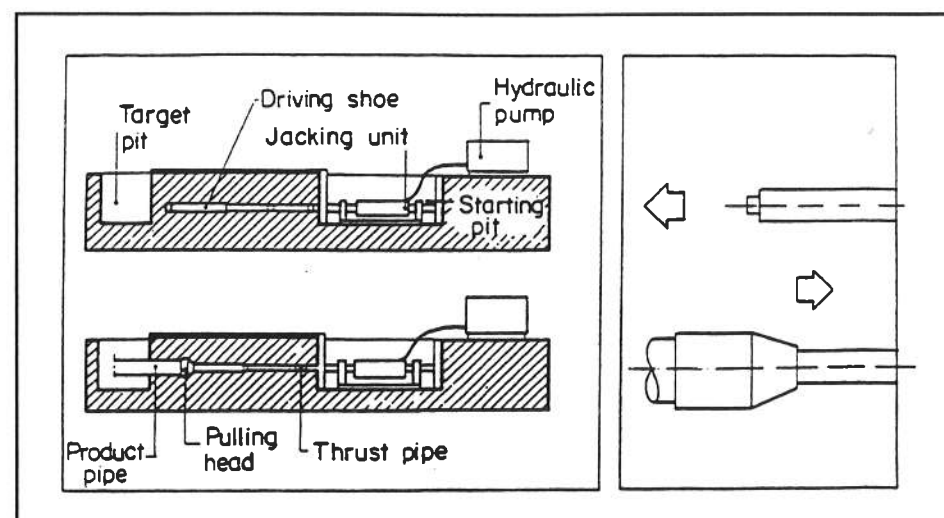
Impact moling (Figure 6.a) can be used in all kinds of soils, provided they lay above the water table. This technique allows the completion of bores of 30 to 80 mm in a single drive through heterogeneous soils, including obstructions. Diameters of 200 to 250 mm can be achieved, with multiple drives.

Auger boring, which uses static jacking of pipe elements equipped with an auger (Figure 6.c), allows the installation of 100 to 1000 mm diameter pipes, with driving accuracies in the order of 1 %.

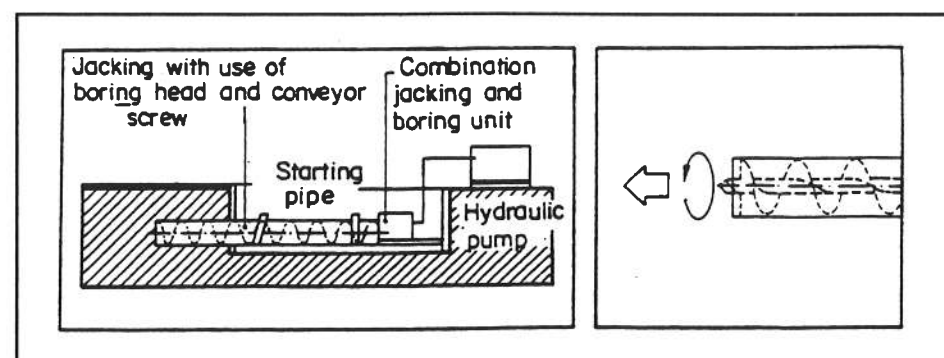
Rod pushing, in which a thin pilot bore is completed by static jacking (Figure 6.b), have given rise to a large number of techniques developed for guided boring. Once the rod has completed its run to the arrival pit, a reamer is attached to it and the pilot bore enlarged as the rod is pulled back to the starting pit. The permanent pipe is attached to the reamer and drawn in behind the rod.



a) Soil displacement method
Pose par fusée (refoulement)



b) Lightweight horizontal jacking system
Pose par fonçage d'une barre pilote (refoulement)



c) Horizontal jacking and boring unit
Pose par fonçage avec tête de forage rotative (excavation)

Figure 6 - Examples of non-steering techniques.
Exemples de techniques de forages non dirigés.
(d'après Stein et al., 1989)

2.3 - Pose par microtunneller

Les microtunneliers utilisés dans les travaux sans tranchée sont, dans leur principe, analogues aux tunneliers classiques pressurisés à front fermé. Ils comportent, comme eux, trois parties essentielles : - une roue excavatrice munie d'outils de découpe en tête, - un bouclier permettant de soutenir les parois du microtunnel, - un système de marinage permettant éventuellement d'appliquer une pression de confinement au front de taille.

La poussée exercée sur le microtunneller résulte de la poussée statique appliquée dans le puits de départ sur le dernier élément de tuyau mis en place.

La position et l'orientation du microtunneller sont mesurées en continu, par un système de contrôle généralement placé près du puits de départ.

Les distances entre puits de départ et puits d'arrivée sont couramment de 100 à 150 m. Les diamètres des microtunneliers varient de 250 mm à 900 mm et plus.

Le confinement du front de taille est réalisé soit au moyen d'une pression de boue, cette boue servant également au transport du marinage et étant recyclée, soit au moyen de la pression des terres excavées, contrôlée par un système de marinage par vis sans fin. Un microtunneller peut ainsi être utilisé sous la nappe, notamment dans le cas où est appliquée une pression de boue, car celle-ci permet de s'opposer à la pression hydrostatique de l'eau interstitielle (figure 7).

2.3 - Microtunneling

Microtunneling machines, used for trenchless construction, are based on the same principles as closed face pressurized tunneling machines, and consist of three main units : - an excavating wheel, which is equipped with cutting tools, - a shield, designed to support the microtunnel wall, - a muck removal system, allowing for the possibility of applying a confining pressure to the front.

The thrust applied to the microtunneling machine results from the static jacking force induced to the last pipe element installed in the drive pit.

The position and direction of the machine are constantly monitored, with a control unit, which is generally installed near the drive pit.

Distances of 100 to 150 m between pits can usually be achieved with this technique. Machine diameters are in the range 250 - 900 mm and over.

Face support can be obtained by either increasing the pressure of the slurry, which is used for muck transport (slurry machine), or controlling the speed of the screw conveyor to produce earth confinement in the muck chamber (earth pressure balance machine). These processes allow microtunneling to be completed under water ; this is particularly true of slurry machines, in which the slurry pressure can be used to balance the hydrostatic pore water pressure (Figure 7).

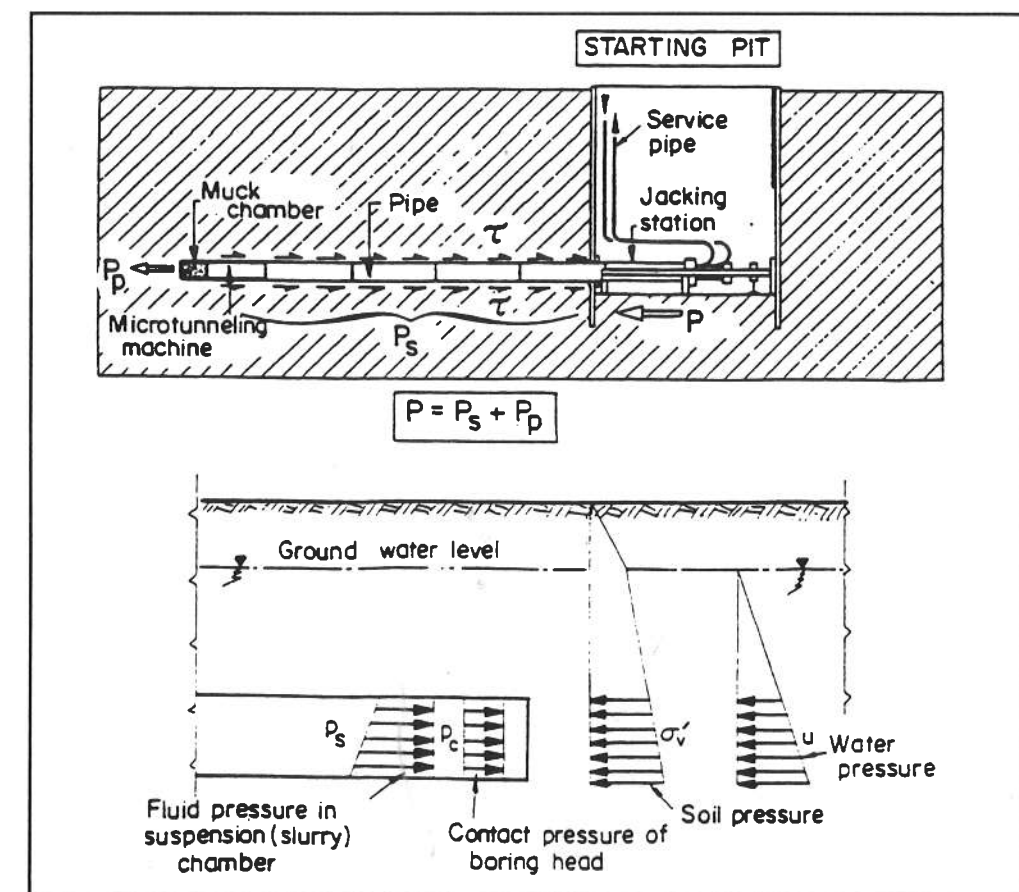


Figure 7 - Mode of operation of a slurry shield. Forces acting on the face during shield tunneling operation.
Schéma d'utilisation et de fonctionnement d'un tunnelier à pression de boue (Stein, 1990).

Les microtunneliers sont surtout utilisés pour la mise en place de conduites d'assainissement en milieu urbain. Durant les dernières années, des progrès techniques considérables ont été réalisés qui permettent par exemple d'avoir des microtunneliers adaptés même à des terrains très durs comme le rocher. Il est également possible de mettre en place, avec des microtunneliers spéciaux des tubes peu résistants à la poussée, comme les tubes en PVC.

2.4 - Forages dirigés

La technique du forage horizontal dirigé, entre deux points de la surface du sol, utilise le principe du trou pilote et du réalésage, avec un système de guidage dans un plan vertical.

Le tube pilote a généralement un diamètre de 90 mm ; il est muni d'une tête de forage consistant soit en un outil désagrégateur mis en rotation par un moteur hydraulique et fonctionnant avec de la boue sous pression, soit en un jet de boue orientable qui désagrège le terrain. On place ensuite, autour de ce tube pilote et par forage, un autre tube, dès que le tube pilote a progressé par forage et poussage de 80 à 100 m. Le rôle de ce tube est de rigidifier le tube pilote. Les deux tubes progressent ainsi alternativement jusqu'à ce qu'ils atteignent le point de sortie hors du sol. Le tube pilote est alors retiré et un réalésageur, fixé sur le tube support, agrandit le trou de forage en progressant vers le point de départ. La tenue du trou et l'évacuation des débris de forage sont assurées par une alimentation continue en boue. Lorsque le trou a atteint le diamètre voulu, le tube définitif est alors introduit par le point d'arrivée et tiré vers le point de départ.

Le forage dirigé horizontal permet de franchir des distances allant jusqu'à 1 à 2 km et de mettre en place des tubes de 100 mm jusqu'à 1200 mm de diamètre. Cette technique, qui a été initiée aux Etats-Unis pour les conduites pétrolières, est à l'heure actuelle utilisée pour la mise en place d'autres conduites de fluides sous pression.

Sur le même principe s'est développée plus récemment, vers la fin des années 80, la technique du forage guidé (figure 8), qui met en place des tubes de plus faible diamètre. Le guidage est possible à la fois en plan et en profondeur ; le tube pilote est muni d'une tête de forage par jet de boue sous haute pression. Il n'y a pas de tube support et le tube définitif est placé directement derrière le réalésageur. Cette technique permet de mettre en place des tubes jusqu'à 200 mm de diamètre et sur des distances allant jusqu'à 150 m de longueur.

2.5 - Techniques de remplacement in situ

Une première technique, de remplacement d'un tuyau par éclatement, repose sur le principe du refoulement latéral. Un appareil d'expansion latéral, qui peut être soit pneumatique, soit hydraulique, est introduit dans la conduite défectueuse et progresse en la faisant éclater. Derrière cet appareil, une nouvelle conduite est introduite et tirée. On utilise généralement des tuyaux en polyéthylène. Cette technique permet d'augmenter le diamètre de la conduite initiale et de passer d'un diamètre de 100 mm à un diamètre de 225 mm, voire de 600 mm.

Microtunneling is used for the installation of sewer pipes in an urban environment. Over the past years, considerable advances have been achieved in the microtunneling technology : for instance, machines have been developed to handle very hard grounds, such as rock; machines have also been designed for the installation of pipes of low thrust resistance, such as PVC pipes.

2.4 - Directional Drilling

Horizontal directional drilling, between two points located at ground level, is based on the combination of pilot boring and reaming, with directional control along a vertical plane.

The diameter of the pilot bore is usually 90 mm ; ground excavation is accomplished by either a rotating drill bit activated by a hydraulic motor and using pressurized slurry, or a slurry jet. Once the pilot pipe has reached a distance of 80 to 100 m, a washover pipe is drilled over it ; this pipe is intended to stiffen the pilot pipe. Alternate progress of the two pipes then continues until they both reach the exit point. The pilot pipe is then pulled out and a reamer attached to the washover pipe ; this allows to enlarge the hole diameter, as the reamer proceeds back to the starting point. Bore stability and muck transport are obtained by mud circulation within the hole. Once the design hole diameter has been achieved, a permanent pipe is drawn in from the exit point to the starting point.

Horizontal directional drilling allows to cover distances of up to 1 to 2 km, and to install pipes ranging between 100 mm and 1200 mm in diameter. This technique was first introduced in the United States for the installation of oil pipes, and is now used for installing other types of pressure pipes.

More recently, in the late eighties, another technique, known as guided drilling (Figure 8), was developed on the same basis as horizontal directional drilling, for the installation of smaller diameter pipes. With this technique, directional control is possible in both horizontal and vertical directions. The pilot pipe is equipped with a drilling head, using a high pressure water jet ; no washover pipe is used, and the permanent pipe is installed right behind the reamer. This technique allows the installation of pipes of up to 200 mm diameter over distances of up to 150 m.

2.5 - Replacement Techniques

One major replacement technique (pipe bursting) is based on lateral soil displacement. A pneumatic or hydraulic lateral expansion device is introduced into the pipe to be replaced, and progresses by splitting the defective pipe. A new pipe is introduced and drawn in behind the machine ; it is usually made of polyethylene. This technique allows to increase the initial pipe diameter from 100 mm to 225 mm, and up to 600 mm.

Une autre technique consiste à désagréger le tuyau défectueux à l'aide d'un microtunnelier, puis de placer derrière, par éléments poussés, une canalisation du diamètre correspondant.

Another replacement technique (pipe eating) consists in crushing the pipe to be replaced, using a microtunneling machine, and jacking pipe elements of the same size as the defective pipe behind the machine.

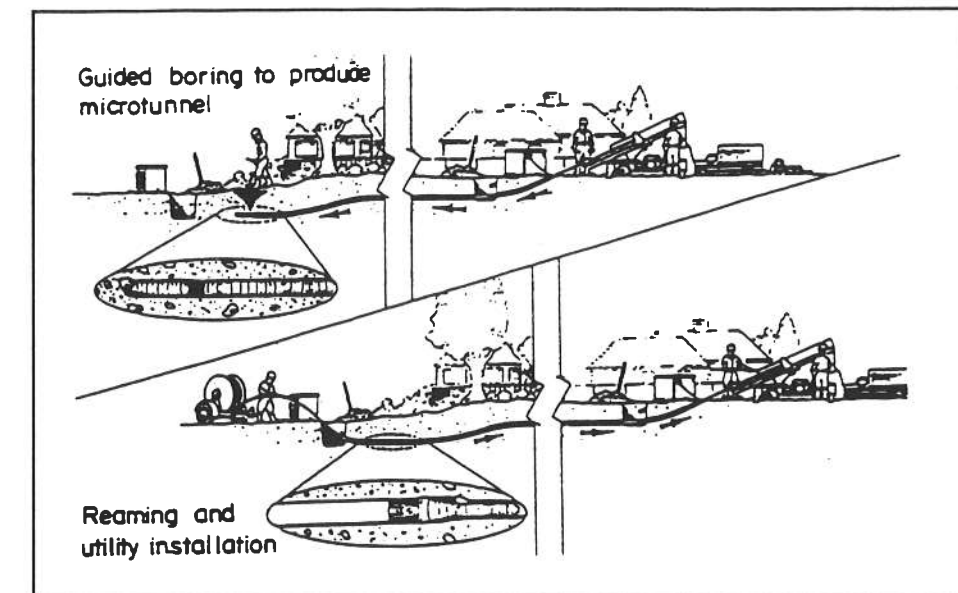


Figure 8 - Guided drilling method.
Technique du forage guidé.
(Ritchie et al., 1989)

2.6 - Résumé des principales techniques

Le tableau 2, adapté de Thomson et al. (1991), résume les principales caractéristiques des techniques précédentes : diamètres, distances, types de tuyaux, précision de la pose et applications.

La figure 9, tirée de Stein et al. (1989), montre la répartition du marché potentiel mondial, prévu sur les années 1988-1992, entre les méthodes de forage non dirigé et celles avec guidage. La longueur totale de conduites correspondant aux méthodes avec guidage était estimée à 30.000 km par an.

3 - INTERACTION SOL - CREUSEMENT

Les interactions sol-creusement qui résultent de la réalisation d'ouvrages sans tranchée peuvent se regrouper en trois catégories : (1) déplacement de terrain engendré par l'introduction de la machine, (2) creusement éventuel au niveau de la tête d'attaque, (3) frottement du terrain le long de la machine.

Le dernier aspect concerne à la fois l'outil de forage et les tuyaux provisoires ou définitifs installés à l'arrière de la machine, et sera développé au chapitre suivant. Les deux autres types d'interactions dépendent du mode de réalisation utilisé (technique par refoulement du sol ou par excavation), ainsi que des conditions géotechniques rencontrées ; ces interactions sont importantes pour la conduite des travaux et le comportement des ouvrages situés dans la zone d'influence de la canalisation installée.

2.6 - Summary of Current Techniques

Table 2 (after Thomson et al., 1991) summarizes the main characteristics of the above described techniques : diameters, distances, pipe types, installation accuracies and applications.

Figure 9, issued from Stein et al. (1989), provides some predictions of the world market for non-steerable and steerable techniques, over the period 1988-1992. The total length of pipes to be installed by means of steerable techniques was estimated to 30.000 km per year.

3 - INTERACTION BETWEEN GROUND AND CONSTRUCTION

There are three main categories of microtunneling related soil-structure interactions : (1) soil displacement by the machine, (2) soil excavation, when a cutting head is used, (3) frictional soil resistance along the machine and the pipe being installed.

The last point, which relates to both the machine and the temporary or permanent pipes installed behind the machine, will be addressed in the next chapter. The two other types of interactions depend on both the construction technique, which is used (soil displacement or excavation), and the encountered geotechnical conditions ; they affect the construction performance as well as the response of existing neighboring structures.

TECHNIQUE	DIAMETRE	DISTANCE	TYPE DE TUYAU	PRECISION	APPLICATION
Fusée et fonçage par refoulement	50 à 150 mm	25 à 75 m	PE, Acier, PVC	Non dirigeable	Petits diamètres
Fonçage et excavation par tarière	50 à 1500 mm	20 à 50 m	Acier	Non dirigeable	Traversées
Battage de tubes	50 à 1200 mm	20 à 40 m	Acier	Non dirigeable	Traversées
Microtunnelier	50 à 900 mm	52 à 150 m	Béton, Plastique renforcé verre, Grès	Bon, alignement et niveau +/- 50 mm	Collecteurs et raccords
Forage dirigé	250 à 1500 mm	200 à 1500 m	PE, Acier	Dirigeable	Longues traversées
Forage guidé	50 à 200 mm	50 à 100 m	PE, Acier	Alignement correct niveau +/- 200 mm	Tubes sous pression

a) New installations.
Installations nouvelles.

TECHNIQUE	DIAMETRE	LONGUEUR	MATERIAU DU TUYAU		APPLICATION
			ANCIEN	NOUVEAU	
Eclatement	100 à 600 mm	25 à 130 m	Béton non armé, Grès, Amiante ciment, Fonte	Béton, Grès, Plastique renforcé verre, PE, PVC	Collecteur et tuyau sous pression
Désagrégation	Jusqu'à 300 mm	35 à 100 m	Béton, Grès, Amiante ciment	Béton, Grès, Plastique renforcé verre	Collecteur

b) Replacement techniques.
Remplacement.

Table 2 - Characteristics of major trenchless pipe installation techniques.
Caractéristiques des principales techniques de pose de tuyaux sans tranchée.
(Thomson et al., 1991)

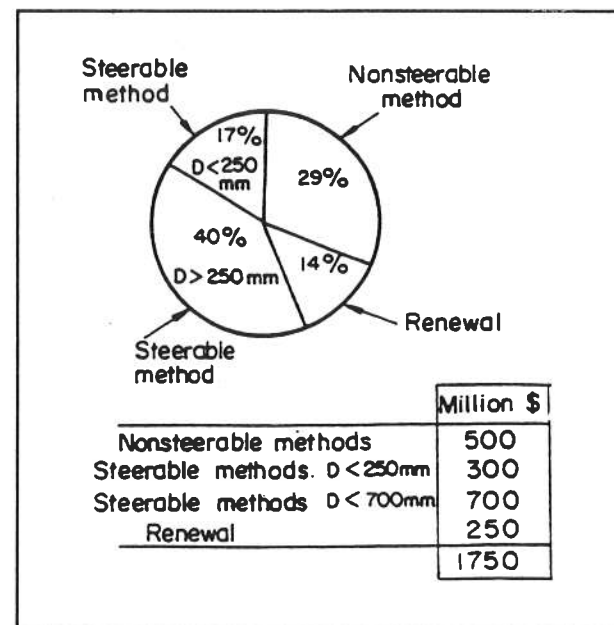


Figure 9 - Predictions for the use of trenchless techniques in the world during the period 1988-1992.
Prédictions du marché mondial 1988-1992 des travaux sans tranchée.
(Stein et al., 1989)

3.1 - Techniques par refoulement du sol

Les techniques par refoulement du sol conduisent à une densification du terrain situé autour du forage (figure 10, d'après Stein et al., 1989). Elles présentent l'avantage de ne pas produire de déblais et, par conséquent, ne nécessitent pas de système de marinage. En revanche, leurs possibilités d'utilisation restent limitées, tant du point de vue du diamètre de forage que des conditions géotechniques. Les fusées pneumatiques sont bien adaptées à la réalisation de forages de diamètres inférieurs à 200 mm, dans des terrains granulaires à faible teneur en fines, de granulométrie étalée, inférieure à 60 mm ; ces machines permettent, en théorie, de traverser des blocs rocheux, mais leur utilisation dans de telles conditions est délicate, en raison des modifications de trajectoire qui peuvent être occasionnées par la rencontre de ces hétérogénéités (Stein et al., 1989).

3.1 - Displacement techniques

Soil displacement techniques produce a densification of the ground surrounding the opening (Figure 10, after Stein et al., 1989). One major advantage of these techniques is that they don't produce any cuttings, which means that no muck removal system is required. However, they can only be used for a limited range of opening diameters and ground conditions. Pneumatic impact moles are well suited for the construction of bores of 200 mm diameter or less, in well graded granular soils of grain size under 60 mm, with little fine content ; these machines in theory allow to drive pipes through boulders, but their operation in such conditions is difficult, because of uncontrolled directional changes induced by heterogeneous materials (Stein et al., 1989).

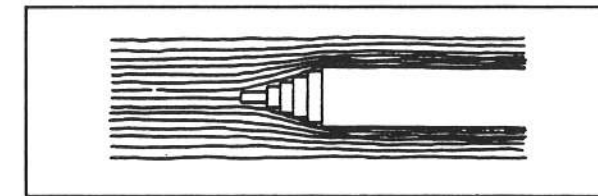


Figure 10 - Compaction induced by soil displacement techniques.
Compaction du sol dans une méthode de pose par refoulement de sol.
(Stein et al., 1989)

Le bouclier à consolidation latérale (Kusakabe, 1990) permet de réduire les efforts de fonçage, en associant un système de creusement en tête au principe de déplacement de sol. La technique est décrite sur la figure 11 (d'après Kusakabe, 1990). L'outil de forage est constitué d'un tronc de cône muni d'une roue de découpe. Le sol situé au front de taille est excavé par rotation de la roue, puis chassé latéralement après avoir traversé la zone d'abattage comprise entre le cône de forage et la trousse coupante de la machine ; le passage dans la zone d'abattage permet de densifier le terrain, ainsi que de broyer les cailloux éventuellement rencontrés au front de taille. L'axe du cône de forage est légèrement excentré par rapport à celui de la machine, ce qui permet de pousser le sol à évacuer dans une direction préférentielle (figure 11) ; celle-ci est modifiée régulièrement pendant le forage par rotation de l'axe du cône autour de celui de la machine. Un prototype de cette machine a été testé dans des sols de résistances allant jusqu'à des N (SPT) de 30 et a donné des résultats satisfaisants, les efforts de fonçage mis en oeuvre au cours des essais étant comparables à ceux employés sur des chantiers de forage par microtunneliers.

Parmi les techniques de construction utilisant le principe du déplacement de terrain, il faut également citer la méthode de l'éclatement de conduite, décrite dans la partie 2.5.

The lateral consolidation microtunneling machine (Kusakabe, 1990) allows to reduce the jacking forces applied to the pipes, by using an excavating device together with a soil displacement technique. The machine is described in Figure 11. The excavating device consists of a conical rotating tool equipped with a cutting wheel. The soil is excavated by rotating the cutting wheel, and pushed to the sides of the opening after getting through the cutting chamber, (located between the rotating cone and the cutting edge of the machine), where it is densified and boulders are crushed. The cone axis is offset with respect to the machine axis, which allows to push the soil in a preferential lateral direction (Figure 11) ; as the machine proceeds, the cone axis rotates around the machine axis, which makes it possible to uniformly distribute the excavated ground around the machine. A prototype of this machine was tested in soils of N (SPT) up to 30 and responded satisfactorily, with jacking forces being comparable to those monitored on microtunneling machines.

Soil displacement is also used in the pipe bursting technique, which is described in section 2.5.

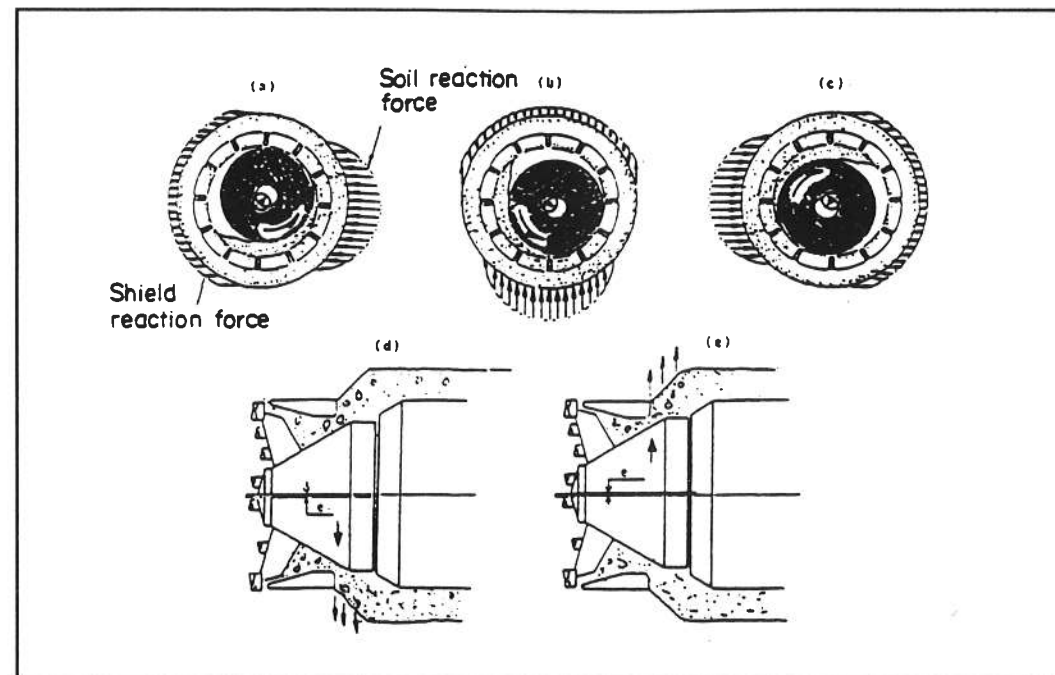


Figure 11 - Lateral consolidation machine.
Bouclier à consolidation latérale.
(Kusakabe et al., 1990)

3.2 - Techniques par excavation des terrains

Les procédés basés sur l'excavation et le marinage des terrains utilisent le plus souvent un système d'abattage mécanique au front de taille. Les caractéristiques (taille, géométrie, composition) des outils de découpe sont choisies en fonction des conditions géotechniques prévues. L'interaction terrain-machine dépend à la fois de la granulométrie, de la dureté, de l'abrasivité et de la teneur en eau des matériaux rencontrés au front de taille. Parmi les problèmes qui peuvent se poser pendant le creusement, il faut noter l'usure des outils dans les terrains granulaires, le collage de matériaux argileux sur les engins de forage, la rencontre de cailloux et blocs rocheux.

Ce dernier problème est illustré sur la figure 12 (d'après Stein et al., 1989). La machine représentée sur cette figure est un appareil de type Crunching Mole, muni d'une roue de découpe pour le creusement dans des sols. Le terrain abattu au front de taille traverse un concasseur, où les cailloux éventuellement rencontrés sont réduits à une taille suffisante pour permettre leur évacuation par le circuit de marinage. Il existe d'autres dispositifs ; en général, les microtunneliers permettent de désagréger des cailloux ou particules rocheuses de dimensions allant jusqu'à 20 ou 30 % du diamètre de la machine.

3.2 - Excavation Techniques

Techniques based on ground excavation and muck transport most often make use a mechanical cutting unit at the front. The characteristics of the cutting tools (size, geometry, components) are chosen consistently with the expected geotechnical conditions. The ground-machine interaction depends on grain size, hardness, abrasiveness, and water content of encountered soils. The following problems may be encountered during the excavation process : wear of cutting tools in granular soils, tool clogging in sticky clays, stoppages due to obstructions such as gravel and boulders.

This last situation is illustrated in Figure 12 (after Stein et al., 1989). This figure shows a machine of the crunching mole type ; it is equipped with a cutting wheel for soils. The cut ground enters a crusher where boulders can be reduced to a small enough size to allow hydraulic transport through slurry pipes. Other machines are available ; in general, microtunneling machines allow to crush rock particles, which size do not exceed 20 to 30 % of the machine diameter.

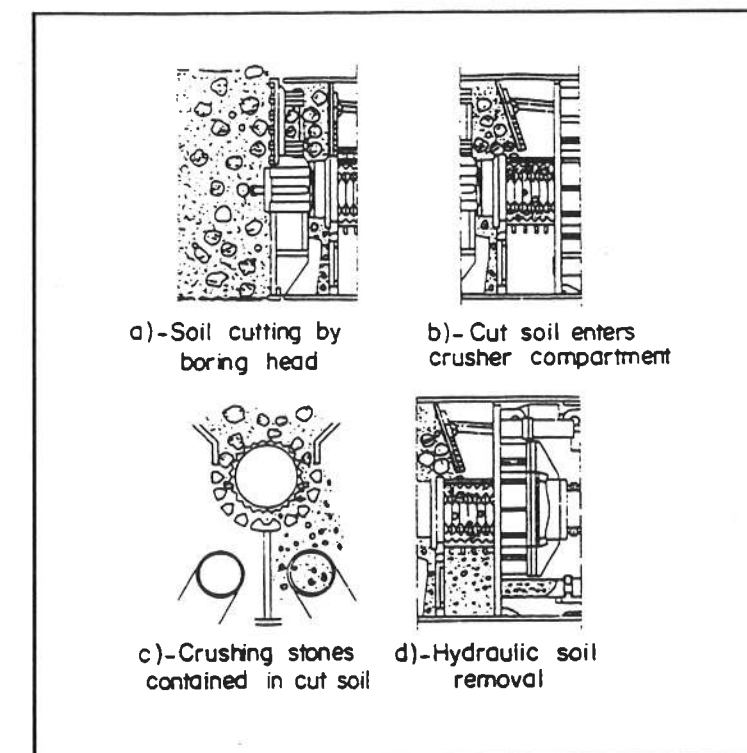


Figure 12 - Mode of operation of a crunching mole.
Système d'excavation avec concassage des gros éléments.
(Stein et al., 1989)

La progression d'un microtunnelier est assurée par l'action de vérins de poussée situés dans le puits d'attaque et l'abattage des terrains au front de taille par la rotation d'une roue de découpe. L'opérateur de la machine dispose donc de deux paramètres indépendants pour le pilotage : le couple C et la poussée. Le problème du choix de ces deux paramètres a été étudié par Piquereau (1989). La figure 13 (d'après Piquereau, 1989 ; Bejui et Guilloux, 1989) montre qu'il existe une plage d'utilisation optimale de la machine. Pour de faibles valeurs des efforts de poussée, la puissance $C.w$ exercée en tête est une fonction croissante de la pression appliquée par les vérins. Pour une certaine valeur de la pression, la rotation de la roue de découpe tend à être ralentie, ce qui conduit à une diminution de la puissance transmise en tête, voire à un calage de la roue si les efforts de poussée deviennent trop importants. La plage de fonctionnement optimal indiquée sur la figure 13 permet d'utiliser une part importante des capacités de la machine tout en conservant une réserve de puissance pour faire face à des problèmes éventuels au front de taille.

Microtunneling machines are advanced by jacking from the starting pit and excavating the ground at the face, by means of a rotating cutting wheel. This provides the machine operator with two control parameters : torque and thrust. A theory for adjusting these two parameters was proposed by Piquereau (1989). Figure 13 (after Piquereau, 1989 ; Bejui and Guilloux, 1989) shows that an optimal operating range can be determined for the machine.

At low thrust values, the cutting power increases monotonically with the applied jacking pressure. With increasing thrust values, the cutting wheel rotation tends to slow down, which produces a decrease in applied cutting power and may cause the machine to stall, if the jacking pressure keeps increasing. The optimal operating range shown in Figure 13 allows to use a large fraction of the machine capacity, while holding enough power supply to cope with unexpected difficulties at the face.

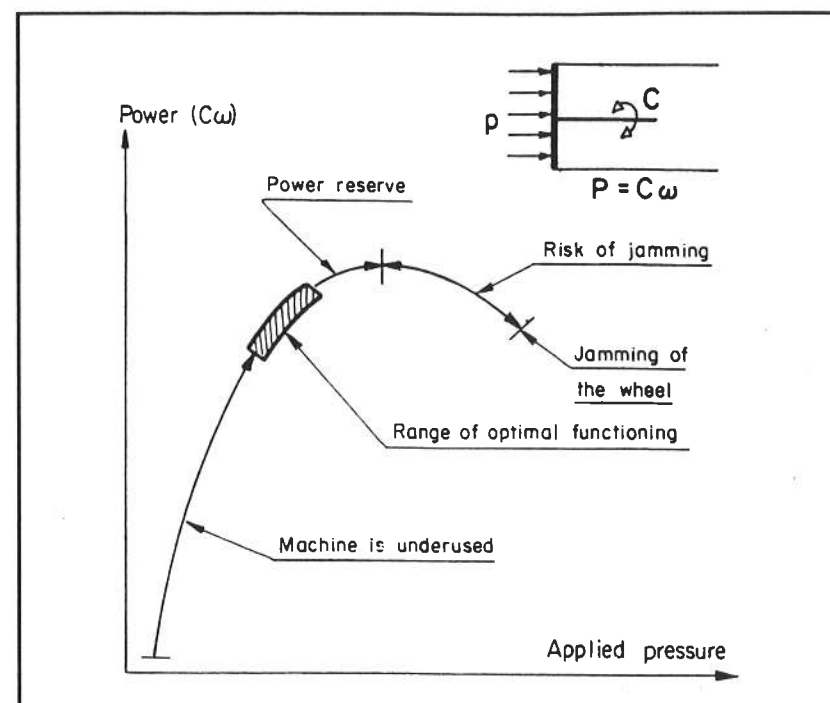


Figure 13 - Typical boring power versus thrust fonction for slurry shields.
Puissance développée par un tunnelier en fonction de la pression appliquée.
(Piquereau, 1989)

Les problèmes de stabilité du front de taille ont été abordés au paragraphe 2.3 et sont résumés sur la figure 7, où sont détaillés les différents efforts à équilibrer. La figure 14 (d'après Collier, 1989) illustre un exemple de système de stabilisation du front de taille. Cette figure représente le fonctionnement d'une machine de type MEPCB (bouclier à la boue, avec équilibrage des pressions de terre) : les pressions interstitielles et la pression des terres sont équilibrées par la pression de la boue de marinage et par la roue de découpe ; la pression de réaction au front de taille est régulée en contrôlant simultanément l'ouverture des voies d'accès à la chambre d'abattage et la position de la roue de découpe. En cas d'augmentation de pression (figure 14a), la taille des ouvertures est augmentée et la roue de découpe rétractée, de manière à réduire la pression au niveau de la roue ; le dispositif est utilisé en sens inverse dans le cas d'une diminution de pression (figure 14b).

L'excavation des terrains peut également être accomplie par voie hydraulique. Dans ce cas, le terrain est disloqué à l'aide de jets d'eau ou de boue sous pression. Certaines machines combinent des moyens de creusement mécanique et hydraulique : les machines de type Ace Mole DC 15M, utilisées pour le forage guidé dans les terrains durs et graveleux, sont munies d'une foreuse pour l'abattage des terrains ; le marinage est assuré par une circulation d'eau sous pression qui sert également à diminuer la résistance des terrains rencontrés au front de taille (Nojiri et al., 1991).

Face stability issues have been covered in section 2.3 and are summarized in Figure 7, where the different pressures to be balanced are described in detail. Figure 14 (after Collier, 1989) shows an example of face support system. This figure illustrates the operating principle of a mechanical earth-pressure counter-balance slurry shield machine : pore pressures and earth pressures are balanced by the reaction of the cutting wheel and the pressure of the slurry used in the muck chamber ; the face pressure is controlled by simultaneous operation of the entrance ports to the muck chamber and of the position of the cutting wheel. Should the face pressure increase (Figure 14a), the opening size of the entrance ports is increased and the cutting wheel moved back to reduce the pressure applied by the machine ; the device is operated conversely when the face pressure tends to decrease (Figure 14b).

Ground excavation can also be completed hydraulically, by means of pressurized water or slurry jets. Some machines use a combination of mechanical and hydraulic drilling techniques : for instance, the Ace Mole DC 15M, used for guided drilling in hard gravelly grounds is equipped with a drill bit for ground excavation ; muck transport is achieved by a circulation of pressurized water, which also serves to decrease the ground resistance at the face.

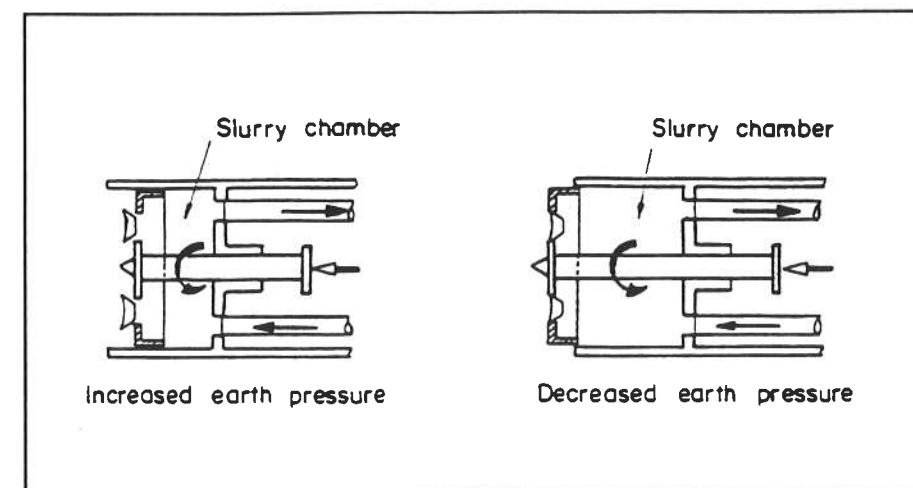


Figure 14 : Earth Pressure Counter Balance Slurry Shield.
Microtunnelier à pression de boue avec contrôle de la pression des terres au front.
(Collier, 1989)

3.3 - Incidence des travaux

La pose de canalisations, avec ou sans excavation de tranchée, provoque un remaniement des terrains et peut affecter l'état des ouvrages voisins, qu'ils soient enterrés ou en surface. Ceci est particulièrement vrai en site urbain, du fait de l'encombrement des terrains et des profondeurs relativement faibles d'installation de conduites. Ce problème a été étudié par O'Reilly et Rogers (1990).

La figure 15 (d'après O'Reilly et Rogers, 1990) compare les tassements induits en surface par la pose de canalisations en tranchée à ceux provenant du creusement d'un microtunnelier. Les lignes A et B résultent d'observations effectuées pendant la réalisation de travaux en tranchée dans différents types de sols et différentes conditions d'environnement. Elles ont été obtenues à partir d'une approche analogue à celle développée par Peck (1969) pour les tassements induits par des travaux d'excavation, qui définit des niveaux de tassements possibles par catégories de terrains rencontrés (Schlosser et al., 1985). La ligne A de la figure 15 correspond à des argiles raides et des matériaux granulaires, la ligne B à des tranchées construites dans des argiles molles ou à proximité de voies de circulation provoquant une densification des terrains.

Les lignes A et B permettent d'obtenir un encadrement des tassements induits par la pose de canalisations en tranchée. La courbe correspondant aux creusements de microtunnels est également représentée sur la figure 15. Elle a été obtenue de manière analytique par O'Reilly et Rogers (1990), en utilisant les mêmes principes que ceux établis par Sagaseta (1987) pour l'estimation des tassements induits par le creusement d'ouvrages visitables.

3.3 - Impact of Construction on Surrounding Grounds and Structures

Trenched as well as trenchless pipe installation produces ground disturbance and may affect the behavior of above ground and buried structures. This is particularly true in an urban environment, because of the presence of numerous structures and of the relatively shallow depth for pipe installation. This problem has been analyzed by O'Reilly and Rogers (1990).

Settlements due to trenching are compared to those induced by microtunneling in Figure 15 (after O'Reilly and Rogers, 1990). Lines A and B were obtained from observations made on projects where pipes were installed by trenching in various types of soils. They were derived from a similar approach to that used by Peck (1969) for settlements induced by deep excavations, with settlement estimates being correlated to encountered ground conditions (Schlosser et al., 1985).

Line A of Figure 15 relates to ground settlements induced by trenching in stiff clays and granular materials, and line B to settlements observed in soft clays, or in the vicinity of traffic loads, likely to produce a densification of the surrounding ground.

Lines A and B allow to obtain a bracketed estimate of settlements induced by trenching. Also shown in Figure 15 is the theoretical curve for settlements induced by microtunneling. This curve was obtained by O'Reilly and Rogers (1990), using a similar theory to that developed by Sagaseta (1987) for estimating tunneling induced settlements.

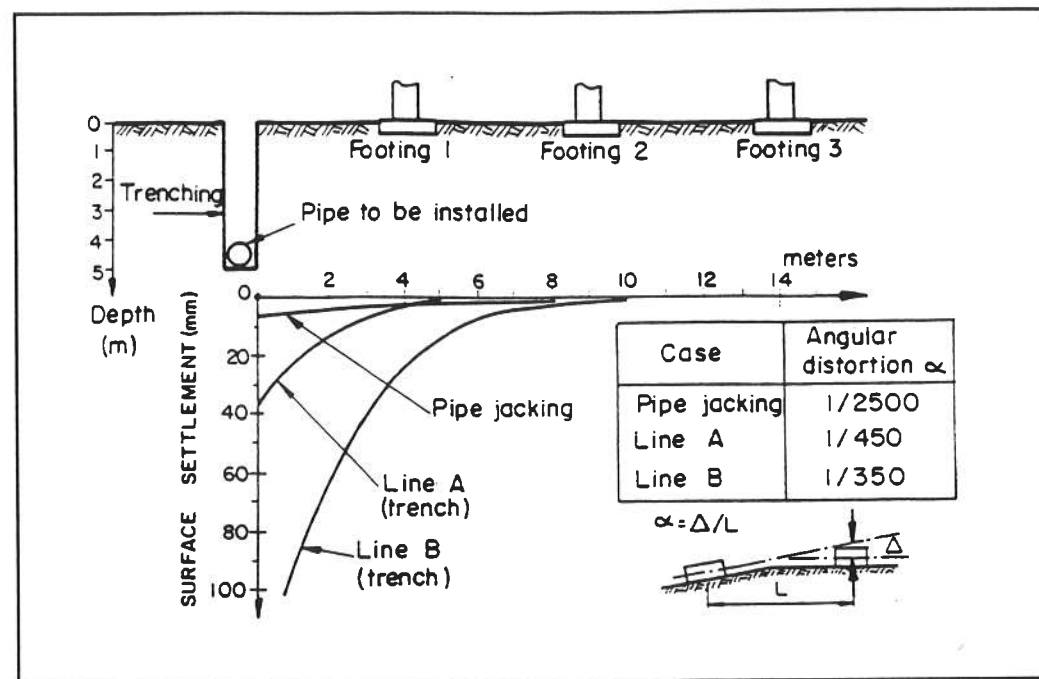


Figure 15 : Comparison between surface settlements induced by trenching and microtunneling.
Comparaison des tassements en surface pour des poses avec tranchée et par microtunnelier.
(O'Reilly et Rogers, 1990)

La méthode de O'Reilly et Rogers (1990) a été appliquée à un ouvrage réalisé à Burnham-on-Sea (Royaume-Uni) et a conduit à une estimation satisfaisante des tassements engendrés en surface par le creusement. La figure 15 montre que, quelles que soient les conditions géotechniques rencontrées, la pose de canalisations en tranchée tend à provoquer des tassements plus importants en surface que l'utilisation de microtunnels ; une comparaison des distorsions angulaires obtenues pour chacune des deux techniques indique, de plus, que les tassements différentiels sont nettement plus forts pour la pose en tranchée que dans le cas du microtunnelier. Une étude de O'Rourke (1985), basée sur les analyses consacrées aux tunnels visitables, conduit, par ailleurs, à la conclusion que les incidences de la construction, au microtunnelier, d'ouvrages de moins de 900 mm de diamètre, dans des argiles moyennes à dures restent faibles, pour des profondeurs supérieures à 1,80 m.

Ces conclusions demandent à être confirmées par des mesures sur d'autres chantiers ; toutefois, les observations visuelles effectuées pendant la construction d'ouvrages tendent à montrer que l'utilisation de microtunneliers provoque généralement peu de tassements en surface. Par exemple les tassements mesurés à Burnham-on-Sea étaient de l'ordre de 2,5 à 4,5 mm. L'utilisation du microtunnelier pour construire une voûte formée de tubes jointifs de 120 mm de diamètre intérieur, au cours de travaux d'aménagement réalisés sous la gare d'Anvers (Hemerijckx, 1990), a conduit à des tassements en surface compris entre 5 et 8 mm.

O'Reilly and Rogers's (1990) method was applied to a microtunneling project at Burnham-on-Sea (United Kingdom) and provided reasonable estimates of surface settlements. Figure 15 shows that, regardless of ground conditions, trench installation consistently tends to produce more settlement than microtunneling. The comparison of angular distortions associated with each construction technique also indicates that trench installation produces much more differential settlement than microtunneling. Another study by O'Rourke (1985), based on analyses of larger size tunnels, lead to the conclusion that microtunneling in medium to hard clays, for the installation of pipes under 900 mm in diameter, at depths over 1.8 m, would have little influence on surface settlements.

More instrumentation data would be needed to confirm these conclusions ; however, observations made during the construction of microtunnels suggest that microtunneling usually produces little surface settlement. For instance, the settlements measured at Burnham-on-Sea were in the order of 2.5 to 4.5 mm. The construction by microtunneling of a tunnel roof made of 120 mm diameter secant pipes at Antwerp's railway station (Hemerijck, 1990) produced surface settlements comprised between 5 and 8 mm.

Bien entendu, ces constatations ne tiennent pas compte de tassements de nature accidentelle : à Huntingdale (Australie), la construction d'un microtunnel de 450 mm de diamètre et 8 m de profondeur a provoqué des fontis de 1 m de diamètre et 30 cm de profondeur dans des sables et limons sous la nappe (Henneveld, 1990). L'origine de cet accident a été attribuée à des venues de sol excessives au front de taille ; le problème a été résolu en modifiant les propriétés de la boue de marinage.

These observations, of course, do not account for the potential for accidental ground movements : at Huntingdale (Australia), the construction of a 8 m deep, 450 mm diameter microtunnel produced 1 m wide, 30 cm deep sinkholes, in sands and silts below the ground water table (Henneveld, 1990). This accident was attributed to excessive face intake ; the problem was tackled by modifying the properties of the slurry used in muck transport.

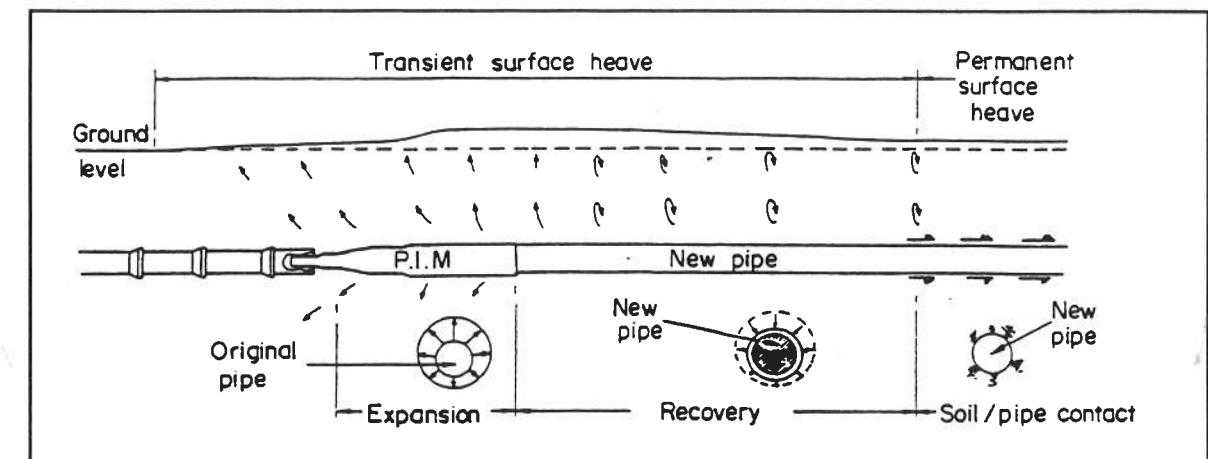


Figure 16 : Ground movements induced by pipe bursting.
Méthode de remplacement par éclatement de conduite.
(Leach & Reed, 1989)

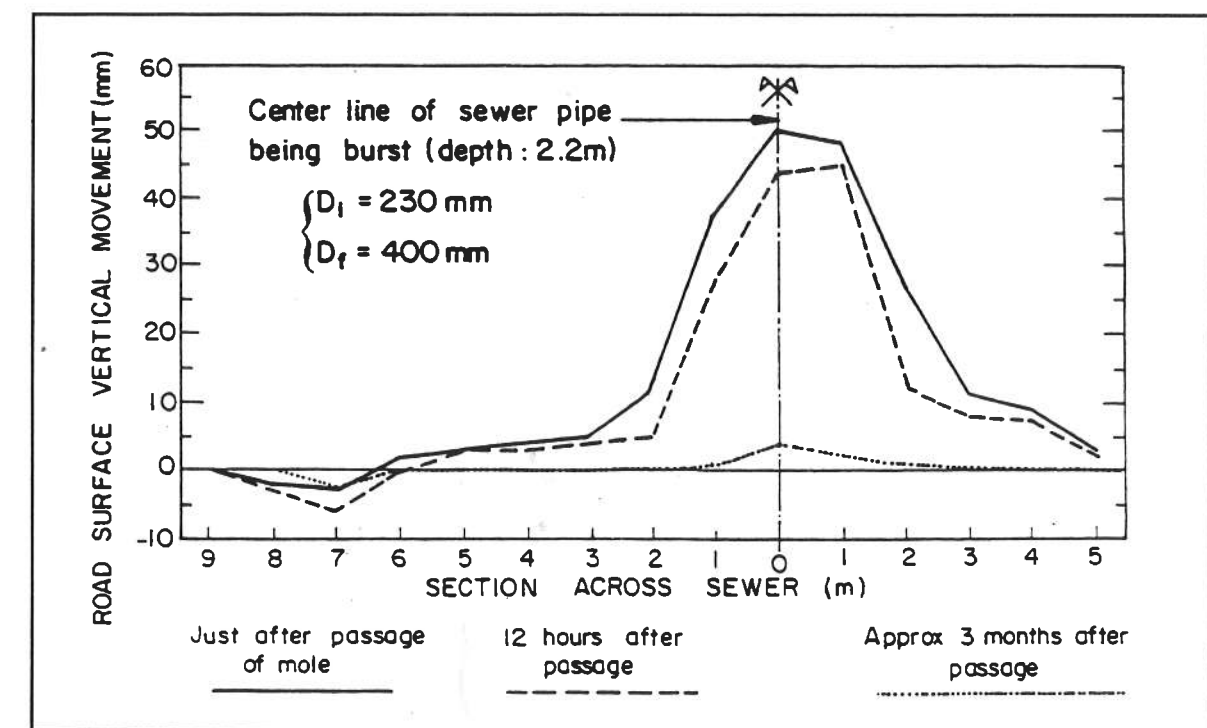


Figure 17 : Ground heave observed during pipe bursting
Soulèvement en surface provoqué par la méthode par éclatement de conduite
(Ilife & Spedding, 1990)

De toutes les techniques sans tranchée, la méthode de l'éclatement de conduite est probablement le procédé le plus susceptible de perturber le terrain encaissant. Dans ce cas, le terrain est soulevé par le passage de la machine, avant de converger vers la conduite si les dimensions de celle-ci sont plus faibles que celles du passage créé par la machine (figure 16, d'après Leach et Reed, 1989). La figure 17 (d'après Iliffe et Spedding, 1990) représente les déplacements mesurés pendant le remplacement d'une conduite par éclatement près de Newcastle, au Royaume-Uni : l'ouvrage se situe à 2,20 m de profondeur, dans des argiles ; le remplacement de la conduite de 230 mm a été accompagné d'un élargissement à 400 mm. La figure 17 montre que le passage de la machine s'accompagne d'un soulèvement des terrains en surface, atteignant 50 mm au dessus de l'axe de l'ouvrage ; ce soulèvement tend à diminuer dans le temps (45 mm après 12 heures) et n'est plus que de quelques millimètres au bout de trois mois.

Leach et Reed (1989) ont étudié les phénomènes induits par des techniques sans tranchée utilisant un procédé par refoulement du sol dans le but d'établir des abaques, permettant d'évaluer l'ordre de grandeur des distances de sécurité à respecter, pour éviter l'endommagement d'ouvrages existants par les travaux. La figure 18 (d'après Leach et Reed, 1989) représente l'état de contraintes, obtenu numériquement en simulant un éclatement de conduite dans le cas d'un ouvrage de 150 mm de diamètre, situé sous une couverture de 70 cm. On peut remarquer que le refoulement des terrains induit par l'éclatement provoque l'apparition de zones de dilatation et de fissures au dessus de la canalisation ; la distance d'influence du soulèvement en surface est comparable à la profondeur du tube remplacé. Leach et Reed (1989) ont également examiné, à partir de travaux expérimentaux, les incidences de l'éclatement sur d'autres canalisations enterrées.

L'étude de Leach et Reed (1989) montre que les déplacements induits en surface dépendent (1) de la profondeur de l'ouvrage, (2) de la nature du terrain, (3) de conditions géométriques telles que la présence d'autres ouvrages ou d'une interface avec un matériau plus raide à proximité de la conduite. C'est ainsi que le champ de déplacements dans le massif encaissant sera différent selon que la canalisation remplacée se situe dans un massif homogène, une tranchée, ou à proximité d'un substratum raide. Ceci est confirmé par les observations de Iliffe et Spedding (1990), qui précisent que les déplacements représentés sur la figure 17 ont été mesurés sur la partie de l'ouvrage située à environ 2 m de profondeur, sous une chaussée souple de 20 à 25 cm d'épaisseur ; en revanche, les soulèvements observés sont restés de l'ordre de 10 à 20 mm, pour la portion de conduite située à 3 m de profondeur et inférieurs à 3 mm, dans la partie du projet passant sous une chaussée rigide de 70 mm d'épaisseur.

Des essais sur modèles réduits effectués à l'Université d'Oxford ont permis d'évaluer l'influence des conditions rencontrées sur les soulèvements induits en surface. Ces travaux ont montré que les soulèvements les plus forts se produisent dans les sables denses, susceptibles de dilatance, et que ces soulèvements dépendent aussi de la géométrie (profondeur) et des conditions de drainage dans le massif (Swee et Milligan, 1990).

Over all trenchless techniques, pipe bursting is the most likely to produce disturbance in the surrounding ground. In this case, the ground is first heaved as the machine passes underneath, and then converges back to the pipe if the diameter of the opening created during pipe splitting is larger than that of the installed pipe (Figure 16, after Leach and Reed, 1989). Figure 17 (after Iliffe and Spedding, 1990) represents the ground movements measured during pipe bursting near Newcastle, United Kingdom : the pipe to be replaced was located at a depth of 2.2 m in clays, and the project included resizing from 230 mm to 400 mm diameter. It can be seen, that the machine produced up to 50 mm of heave over the pipe axis ; the surface heave tended to decrease with time (45 mm after 12 hours) and dropped to a few millimeters after 3 months.

Leach and Reed (1989) analyzed ground movements induced by, trenchless soil displacement techniques, in view of producing charts for estimating safe distances to existing structures. Figure 18 (after Leach and Reed, 1989) represents the stress state computed by simulating pipe bursting of a 150 mm diameter pipe at 70 cm depth. It is apparent that soil displacement induced by pipe bursting produces dilation and cracks in the ground overlying the pipe ; the lateral extent of heave is comparable to the pipe depth. Leach and Reed (1989) also analyzed the consequences of pipe bursting on surrounding buried pipes.

The study of Leach and Reed (1989) shows that surface settlements are affected by (1) pipe depth, (2) ground conditions, (3) geometric conditions, such as the presence of other structures or a stiffer material in the pipe vicinity. For instance, the displacement field in the surrounding ground will differ from that of a homogeneous soil layer, if the pipe lays in a buried trench or in the vicinity of a stiffer layer.

This is confirmed by observations made by Iliffe and Spedding (1990) : the displacements displayed in Figure 17 were measured on a section of the pipe alignment located at a depth of about 2m underneath a soft pavement, 20 to 25 cm thick ; on the section located at 3 m depth, however, the observed heave was in the order of 10 to 20 mm, and it was as low as 3 mm, where the pipe underwent a stiff 70 mm thick pavement.

Model tests completed at Oxford University allowed to estimate the influence of ground conditions on induced surface heave. This study showed that the largest heaves occurred in dense dilating sands, and that ground heave was also affected by geometry (pipe depth) as well as drainage conditions (Swee and Milligan, 1990).

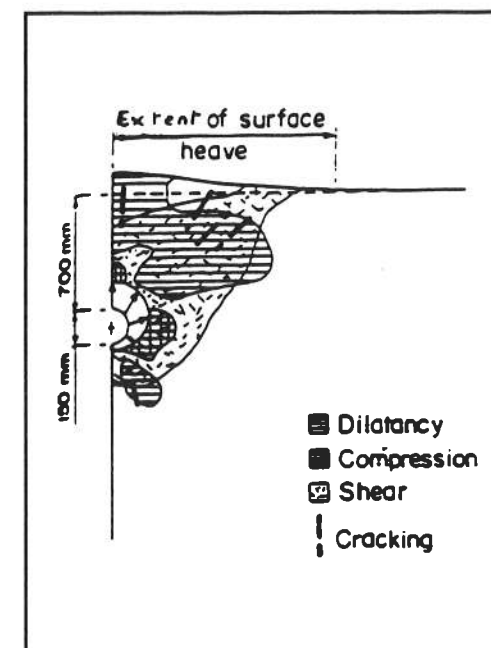


Figure 18 : Stress state induced in ground by pipe bursting.
Etat de contraintes dans le sol dans le procédé par éclatement de conduite.
(Leach et Reed, 1989)

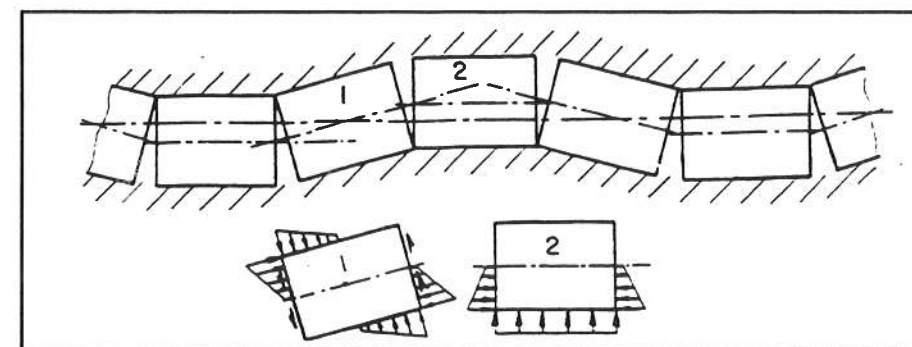


Figure 19 : Forces resulting from pipe misalignment.
Schématisation des efforts résultant d'un désalignement.
(Stevens, 1989)

4 - INTERACTION SOL-TUYAU

La figure 19 (d'après Stevens, 1989) représente le diagramme des efforts appliqués à un tuyau au cours du fonçage : on distingue les efforts inter-tubes et les efforts de frottement entre le tube et le terrain. L'effort inter-tubes comprend une composante axiale et une composante tangentielle ; il résulte de la poussée des vérins et n'est pas nécessairement centré sur l'axe du tube, du fait de désalignements.

4 - GROUND-PIPE INTERACTION

Figure 19 (after Stevens, 1989) provides a diagram of the forces applied to a pipe during jacking : they consist of interaction forces with adjacent pipes and frictional resistance between the pipe and the ground. The interaction force with an adjacent pipe has two components : one along and the other perpendicular to the pipe axis ; it results from jacking forces and is not necessarily centered on the pipe axis, because of misalignments.

La détermination des efforts repris par les tuyaux est importante, dans la mesure où elle conditionne à la fois le dimensionnement des tubes (qui doivent être suffisamment résistants pour reprendre les contraintes qui leur sont imposées) et la distance d'installation, les forces de frottement étant d'autant plus importantes que la longueur de contact entre le sol et les tuyaux est grande.

Le problème de l'estimation du frottement a été examiné par Ripley et Norris (1990), qui donnent des valeurs usuelles du frottement sol-tuyau, correspondant à différents types de sol. Ces valeurs sont reproduites ci-dessous :

• roche	2-3 kPa ;
• argile avec éléments rocheux	5-18 kPa ;
• argile raide	5-20 kPa ;
• sable humide	10-15 kPa ;
• limon	5-20 kPa ;
• sable lâche sec	25-45 kPa ;
• remblai	≤ 45 kPa.

Ripley et Norris (1990) précisent que des méthodes de calcul tenant compte d'un désalignement modéré des tubes ont permis, à l'aide de corrélations de ce type, d'obtenir des estimations satisfaisantes des efforts de fonçage enregistrés sur des ouvrages instrumentés, à l'exception de microtunnels creusés dans des argiles, pour lesquels la vitesse de chargement influence l'intensité des efforts de contact mobilisés.

Ce problème est abordé dans la communication de Norris et Milligan (1992). Cette communication décrit les résultats obtenus de l'instrumentation de tubes installés par fonçage dans différentes catégories de terrains. Le dispositif expérimental a permis de mesurer les contraintes normales et tangentielles et les pressions interstitielles à l'interface terrain-tuyau, ainsi que les déviations du tube par rapport à l'axe de l'ouvrage. Il ressort de ces expérimentations que : (1) des contraintes radiales et tangentielles importantes peuvent être imposées localement au tuyau au cours du fonçage ; (2) les désalignements se traduisent par des augmentations considérables des efforts de contact entre terrain et tuyau ; (3) le terrain situé au contact avec le tuyau se comporte, quelle que soit sa nature, comme un matériau partiellement drainé ; (4) les angles de frottement obtenus, au pic, sur des essais drainés à la boîte de cisaillement devraient fournir une estimation du côté de la sécurité des coefficients de frottement à prendre en compte dans le calcul des efforts de fonçage ; (5) un arrêt prolongé du fonçage dans un terrain cohérent se traduit par une augmentation importante des efforts à la reprise des travaux.

D'une manière générale, les efforts de poussée nécessaires au fonçage de la conduite dépendent des paramètres suivants (Ripley et Norris, 1990) :

It is important to be able to obtain a reasonable estimate of the forces induced to the pipe for both pipe design (pipes must have sufficient resistance to withstand the applied forces) and achievable distances between pits (since frictional forces tend to increase with the contact length between the pipe and the soil).

Ripley and Norris (1990) studied soil-pipe friction estimates, and reported the following current values for soil-pipe friction in various soil types :

• rock	2 - 3 kPa ;
• boulder clay	5 - 18 kPa ;
• stiff clay	5 - 20 kPa ;
• wet sand	10 - 15 kPa ;
• silt	5 - 20 kPa ;
• dry loose sand	25 - 45 kPa ;
• fill	≤ 45 kPa.

Ripley and Norris (1990) commented that correlations of this type, when used with computational techniques allowing for a moderate amount of pipe misalignment, lead to reasonable estimates of jacking forces monitored on instrumented projects, with the exception of microtunneling in clay ; in this latter case, loading velocity appeared to have a significant impact on the amount of mobilized contact forces.

This question is addressed in the paper by Norris and Milligan (1992). This paper describes experimental results obtained from the instrumentation of jacked pipes in various types of soils. The instrumentation used in these experiments allowed to measure normal and shear stresses, and pore pressures at the soil pipe interface, together with angular deviations of the pipes. The following conclusions were derived from their observations : (1) high radial and shear stresses can be imposed locally to the pipes being jacked ; (2) pipe misalignment results in a significant increase in contact forces between the ground and the pipe ; (3) the soil next to the pipe behaves as a partially drained material ; (4) peak friction angles, derived from drained laboratory shear box tests, should provide a conservative estimate of friction coefficients to be used in jacking force computations ; (5) in cohesive grounds, construction stoppages result in a considerable increase in jacking forces, when construction resumes.

Jacking forces are basically affected by the following parameters (Ripley and Norris, 1990) :

- résistance en tête ;
- niveau de surcoupe ;
- variation dans les catégories de terrains rencontrés ;
- reprise du fonçage, consécutif à un arrêt prolongé ;
- géométrie des joints ;
- déformation des joints ;
- désalignement des tuyaux ;
- courbure du tracé ;
- lubrification du contact sol-tuyau ;
- utilisation de stations de fonçage intermédiaires.

Le désalignement souvent inévitable des tuyaux provoque à la fois une augmentation des efforts nécessaires au fonçage de la conduite et des concentrations de contraintes aux contacts entre tuyaux, susceptibles de provoquer des ruptures. En général, le désalignement se produit près du puits d'attaque (où le contrôle en direction est le plus difficile) et tend à s'estomper sur les forages suivants ; ce phénomène peut être critique pour les derniers tuyaux installés, pour lesquels les efforts de fonçage sont les plus importants (Norris et Milligan, 1992).

Ce problème nécessite un traitement soigné des joints entre tuyaux. Les risques de désalignement peuvent être réduits par un équerrage précis des abouts de tuyaux (Eternit, 1990) ; de plus, l'installation de joints, faits de matériaux plus compressibles que les tubes, permet d'arriver à une répartition plus uniforme des contraintes, lorsque le désalignement ne peut être évité. De par la nature du procédé de fonçage, ces joints sont soumis à des cycles de chargement et déchargement. Des essais sur des joints de natures différentes, sous chargements cycliques, ont montré que cela entraîne une rigidification des joints ; par ailleurs, la saturation du joint augmente sa capacité de répartition des contraintes (Milligan et Ripley, 1989).

La lubrification du contact sol-tuyaux permet de diminuer considérablement les efforts de frottement repris par la conduite et donc la poussée des vérins utilisés pour le fonçage des microtunneliers ; la lubrification par la boue de forage est également utilisée pour réduire le frottement dans le cas d'ouvrages construits par forage dirigé.

Par ailleurs, des techniques de creusement, telles que le procédé Enviliner (Akiba et Yamada, 1989) permettent de réduire la transmission des efforts de fonçage par les tuyaux ; cela permet notamment l'installation de conduites en PVC, dont l'utilisation est intéressante pour les ouvrages hydrauliques, mais qui ne peuvent être installés par des méthodes de fonçage classiques, du fait de propriétés mécaniques insuffisantes.

- face reaction ;
- degree of over-cutting ;
- variations in ground conditions ;
- construction stoppages ;
- joint geometry ;
- joint deformation ;
- pipe misalignment ;
- alignment curvature ;
- lubrication at the soil-pipe interface ;
- use of intermediate jacking stations.

Pipe misalignments are hardly avoidable and result in both increased jacking forces and stress concentrations at the interface between subsequent pipes, which in turn may lead to pipe failure. Misalignments are more likely to occur near the starting pit (where directional control is the most difficult to achieve) and tend to decrease during the following shoves ; critical conditions occur when the last pipes are installed, with jacking forces being at their maximum (Norris and Milligan, 1992).

This requires a careful treatment of the joints between pipes. The chances for misalignment can be reduced by an accurate adjustment of the pipe ends (Eternit, 1990) ; moreover, joints, when made of a more compressible material than the pipes, allow to achieve a more uniform distribution of contact stresses between pipes, when misalignment does occur. Because of the cyclic nature of the jacking process, the joints are subject to unloading-reloading cycles. Tests performed on joints made of different materials showed that cyclic loading tends to stiffen the joints ; saturation also affects the joint response, in that it tends to make contact stresses between pipes more uniform (Milligan and Ripley, 1989).

Lubrication at the soil-pipe interface allows a considerable decrease in frictional resistance, and therefore in the jacking forces involved in the microtunneling process ; lubrication with drilling mud is also used in horizontal drilling to reduce frictional resistance.

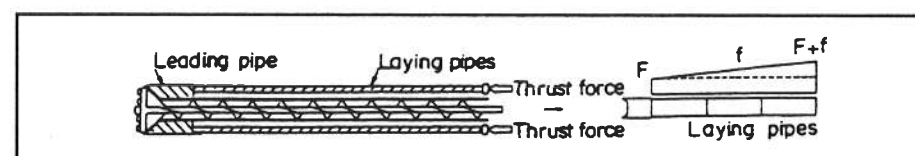
The concern for reducing the frictional resistance along the pipe has also given rise to innovative techniques such as the Enviliner method (Akiba and Yamada, 1989) : this technique presents the advantage of allowing the installation of PVC pipes, which are of interest for sewer applications, but cannot usually be installed by conventional pipe jacking techniques, because of their limited thrust resistance.

La figure 20 (d'après Nishida et al, 1990) compare le procédé Enviliner (figure 20b) à un creusement au microtunnelier classique (figure 20a). Les deux procédés utilisent un système de marinage à vis. En conditions habituelles (figure 20a), le tuyau doit transmettre la totalité des efforts de poussée induits par les vérins ; dans le cas du système Enviliner (figure 20b), la plus grosse partie de ces efforts est reprise par le tube de guidage de la vis, ce qui permet de ne transmettre qu'une part modérée des efforts sur la conduite, comme le montrent les distributions d'efforts le long de la conduite représentées sur les figures 20a et 20b. Toutefois, les efforts repris par la conduite, qui proviennent du frottement avec le terrain encaissant, sont d'autant plus élevés que la distance creusée est importante, ce qui limite les longueurs d'installation possibles pour ce type de conduite. Le système SSK (figure 20c) permet de pallier cette difficulté par l'introduction, à intervalles réguliers le long de la conduite, de bagues d'accrochage gonflables, permettant de solidariser localement le tuyau du tube de marinage. De ce fait, les efforts dans le tube définitif restent limités au frottement développé entre deux bagues d'accrochage successives (figure 20c).

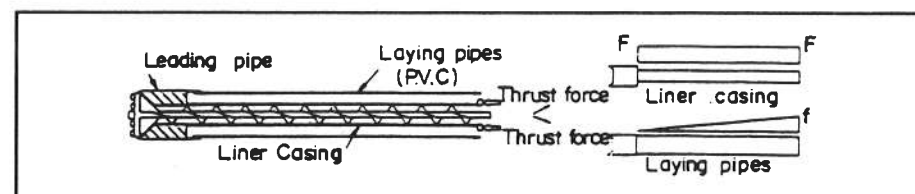
In Figure 20 (after Nishida et al., 1990), the Enviliner method (Figure 20b) is compared to conventional microtunneling (Figure 20a). Both techniques make use of an auger for muck transport. Conventionally (Figure 20a), the pipe has to bear the full jacking load ; with the Enviliner technique instead (Figure 20b), most of the jacking force is carried through the muck pipe, which allows to reduce to a moderate amount the fraction of jacking force applied to the pipe, as is demonstrated by the load distribution diagrams displayed in Figures 20a and 20b.

However, the pipe still has to withstand the frictional reaction of the ground, which increases with the length of installation. The SSK method (Figure 20c) allows to handle this difficulty, by means of inflatable grippers ; these are installed at regular intervals along the pipe, so that the product pipe and the muck pipe will be bound together. This allows to limit thrust forces in the product pipes to the frictional soil resistance developed between two subsequent grippers (Figure 20c).

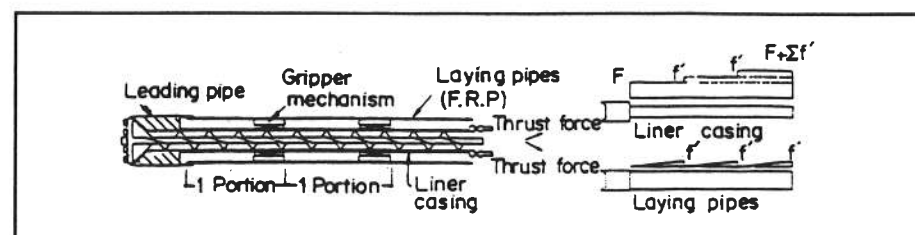
F : initial thrust force of leading pipe
F : force exercée sur le tube de marinage
f : circumferential frictional resistance of laying pipes
f : force de frottement le long des tubes



a) Conventional pipe jacking method.
Méthode classique.



b) Enviliner method.
Méthode de l'enviliner.



c) S.S.K. method.
Méthode S.S.K.

Figure 20 : Installation techniques for reduced construction loads on pipes.
Procédés de mise en place de tuyaux peu résistants aux efforts de poussée.
(Nishida et al., 1990)

5 - CONSTRUCTION ET CHOIX DES TECHNIQUES

5.1 - Puits

5.1.1 - Les puits de départ et d'arrivée

En général et sauf pour les forages dirigés et guidés, l'installation sans tranchée d'une conduite dans le sol se fait entre deux puits : un puits de départ et un puits d'arrivée.

Le puits de départ, d'où est réalisé le microtunnel, sert aux points suivants (Stein et al., 1989) :

- l'installation de la station de poussage au fond du puits, avec son massif de réaction ;
- le positionnement de la machine réalisant le microtunnel ;
- l'installation de la centrale de mesures et des systèmes de contrôle (guidage, position) ;
- la mise en place des éléments de tuyaux par poussage ;
- l'évacuation éventuelle des terrains excavés lors de l'exécution du microtunnel.

La machine qui réalise le microtunnel est récupérée dans le puits d'arrivée. C'est également dans ce puits que parvient le marinage dû au réalésage lorsque l'on utilise la technique du trou pilote. Puits de départ et puits d'arrivée sont implantés aux extrémités de sections rectilignes, le puits d'arrivée pour une section pouvant servir de puits de départ pour la section suivante.

Dans le cas de conduite d'assainissement, ces puits sont généralement transformés en puits de visite.

5.1.2 - Les différents types de puits

D'après la norme allemande (DIN 4124), les puits ou tranchées non blindées ne doivent pas dépasser 1,25 m de profondeur en parois verticales (Stein et al., 1989). Jusqu'à la profondeur de 1,75 m, on doit taluter ou bétonner en tête.

Pour des profondeurs supérieures, les puits d'arrivée et de départ sont blindés et soutenus. Plusieurs techniques sont classiquement utilisées ou peuvent être employées :

- la méthode traditionnelle par blindage métallique ou en bois ;
- les rideaux de palplanches ;
- le havage de caissons préfabriqués ;
- la paroi moulée ;
- le béton projeté avec ou sans clouage du terrain ;
- le jet grouting.

5 - CONSTRUCTION AND TECHNIQUE SELECTION

5.1 - Pits

5.1.1 - Drive pits and reception pits

With the exception of directional drilling and guided drilling, trenchless pipe installation always requires the construction of two pits : a drive (or starting) pit and a reception (or arrival) pit.

The drive pit serves the following purposes (Stein et al., 1989) :

- installation of the jacking station and reaction wall inside the pit ;
- introduction of the machine into the pit ;
- installation of the monitoring unit and control system used for directional control of the machine ;
- pipe installation by jacking ;
- optional muck removal.

The machine, used in the pipe installation process, is recovered from the reception pit. This pit can also be used for muck removal, when a reamer is attached to a pilot pipe and the product pipe installed by drawing the pilot pipe back to the drive pit. The drive and reception pits are constructed at both ends of a straight pipelining section ; the reception pit can also serve as starting pit, when a subsequent pipelining section is to be constructed.

In the particular case of sewer projects, pits can be used as manholes after construction.

5.1.2 - Pit classification

According to German standards (DIN 4124), unreinforced pits or trenches, with vertical walls, should be no more than 1.25 m deep (Stein et al., 1989). For pit depths up to 1.75m, it is necessary that the top of the pit be battered or concreted.

For greater depths, drive and reception pits must be reinforced. Several techniques are currently used or can be used to this purpose :

- conventional steel or wood reinforcement ;
- sheet wall ;
- installation of precast caissons ;
- slurry wall ;
- shotcrete, with or without soil nailing ;
- jet grouting.

Le choix de l'une ou l'autre de ces techniques doit être fait en fonction : - de la nature du terrain rencontré, - de la présence ou non d'eau, - des conséquences sur l'environnement (bruit, encombrement, propreté), - de l'utilisation temporaire ou définitive du puits, - du coût.

La méthode traditionnelle, par blindage en bois ou métallique, est utilisable dans les puits provisoires et dans les terrains sans eau. La justification mécanique de la stabilité n'est pas très rigoureuse, mais le coût est en général compétitif. Le blindage se fait au fur et à mesure de l'excavation.

La mise en place d'un rideau de palplanches, avec bétonnage à chaque phase de terrassement est une méthode assez couramment utilisée pour les puits provisoires. Elle a l'avantage de la rapidité et de la fiabilité. Le soutènement ainsi constitué peut être facilement rendu étanche, ce qui permet de construire un puits dans la nappe. Par contre cette méthode n'est pas applicable à tous les terrains, à cause du refus des palplanches dans les sols trop raides ou comportant de gros éléments. Sur le plan de l'environnement, la méthode est bruyante et provoque des vibrations dans le sol.

La mise en place, par havage, d'éléments de buse préfabriqués en béton armé, circulaires ou rectangulaires, est une solution technique très intéressante pour la réalisation de puits définitifs. L'élément inférieur est généralement muni d'une partie démontable correspondant au niveau et à l'emplacement du futur microtunnel. La technique permet de réaliser des puits sous l'eau (figure 21) par coulage d'un fond en béton immergé s'opposant aux sous-pressions. Ces puits définitifs peuvent également servir pour les branchements secondaires sur le réseau.

La paroi moulée n'est envisageable que pour des puits de grand diamètre et de forte profondeur, compte tenu de l'investissement initial que représente l'amenée du matériel. Par ailleurs cette technique n'est pas très favorable à l'environnement (boue en surface, bruits, vibrations).

Parmi les techniques plus nouvelles on peut citer le béton projeté avec ou sans clouage du terrain (Recommandations Clouterre 1991) et le "jet grouting" qui permet de réaliser des colonnes jointives ou sécantes par jet rotatif de coulis sous très haute pression (Schlosser et al., 1985). La première technique n'est réalisable qu'au-dessus de la nappe et nécessite la mise en place de tirants passifs mis en place radialement au fur et à mesure de l'excavation. Le soutènement en "jet grouting" peut être réalisé sous la nappe. Il n'est pas facilement justifiable sur le plan du calcul et conduit à des résurgences de coulis en surface, ce qui n'est pas favorable à l'environnement.

5.1.3 - Justification de la réaction d'appui

Les efforts de poussage sur les éléments de tuyau d'un microtunnel conduisent à des réactions d'appui maximales de l'ordre de 100 kN à 2500 kN environ, pour un microtunnel de 100 m de longueur et de 350 mm de diamètre dans un sol sans cohésion, en fonction de la teneur en eau et du type de sol.

The choice among these solutions is dictated by : - ground conditions, - hydraulic conditions, - environmental considerations (noise, space, cleanliness), - temporary or permanent use of the pit, - cost.

The conventional wood or steel reinforcement technique can be used for temporary pits in dry soils. The method used in the mechanical stability analysis of this type of structure is not very rigorous, but the technique is usually cost effective. Reinforcement is installed gradually as pit excavation proceeds.

Sheet piling, with concreting being completed at the end of each excavation stage, is currently used for the construction of temporary pits. This technique presents the advantage of being fast and reliable. Watertightness of the retaining structure can easily be achieved, which makes under water construction possible. However, there are limitations to the application of this technique to certain ground conditions, with refusal being eventually reached with sheet piling in stiff soils containing boulders. From an environmental point of view, the method is noisy and produces ground vibration.

The installation of precast reinforced concrete caissons, of circular or rectangular shapes, is technically efficient for the construction of permanent shafts. The lower caisson is usually equipped with a removable section in place of the future microtunnel. This method allows to build pits under water (Figure 21), with an immersed concrete slab, capable of withstanding uplift pressures, being installed at the bottom of the pit. This type of permanent pit can also serve for secondary pipe connection.

The slurry trench method can only be considered for the construction of large diameter deep shafts, because of the considerable costs associated with equipment transport. It also presents the disadvantage of causing environmental disturbance (slurry pollution, noise, vibrations).

More recent techniques include shotcreting, with or without soil nailing ("Clouterre" 1991 recommendations) and jet grouting, which allows the construction of secant piles by means of a rotating pressurized cement jet (Schlosser et al., 1985). The former technique can only be operated above the ground water table and requires tie backs ; those are installed along radial planes, as excavation proceeds. Jet grouting can be used under water. The main disadvantages of this technique are that design can hardly be backed by computational methods and that it tends to generate cement outflows at the ground surface, which may cause environmental problems.

5.1.3 - Reaction force design

Jacking forces, acting on pipe segments, generate reaction loads on the pit walls. The magnitude of maximum reaction forces induced on the pit wall depends on both ground conditions and water content, and could range between 100 kN and 2500 kN, for a 100m long, 350 mm diameter microtunnel, built in a cohesionless soil.

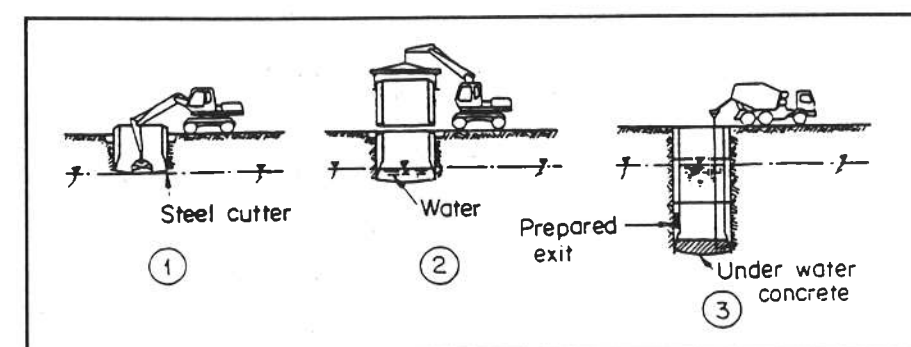


Figure 21 : Pit construction using prefabricated caissons.
Puits en éléments de buse préfabriqués, mis en place par havage.
(Stein et al., 1989)

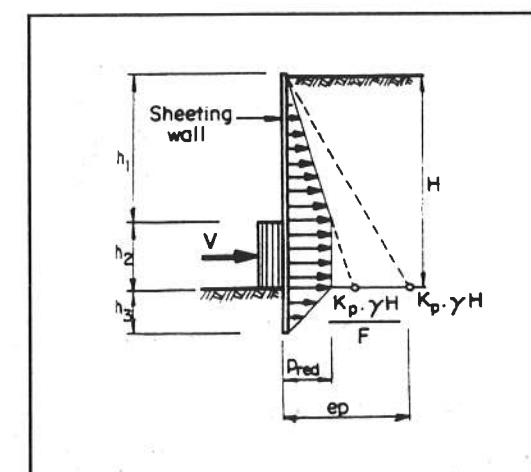


Figure 22 : Simplified load distribution diagram behind reaction wall.
Schéma de répartition de la force de butée V sur l'appui.
(Stein et al., 1989)

La justification de la réaction d'appui dans le puits doit être faite dans tous les cas. Cet appui est généralement constitué de plaques d'acier fixées au soutènement du puits.

Un schéma simplifié de la répartition de l'effort de butée admissible V_a sur la hauteur du soutènement est présenté à la figure 22 en fonction du coefficient de sécurité F et pour un puits dans un sol sans cohésion et sans eau (Stein et al., 1989). En supposant que le puits se comporte au droit de l'appui comme un élément de soutènement plan, il vient :

$$V_a = \frac{K_p \gamma b}{F} [h_1^2 + h_1 (2 h_2 + h_3)]$$

Pit design should include estimates of the reaction forces, acting on the ground located behind the pit wall. The reaction unit usually consists of steel plates, assembled together with the pit retaining structure.

Figure 22 shows, for a pit constructed in a cohesionless dry soil, a schematic diagram of the allowable passive pressures developed along the retaining pit wall, with provisions being made for a factor of safety, F (Stein et al., 1985). With the assumption that the section of shaft located over the reaction unit behaves as a two-dimensional retaining element, the following expression can be derived for the passive load V_a acting on the pit wall :

$$V_a = \frac{K_p \gamma b}{F} [h_1^2 + h_1 (2 h_2 + h_3)]$$

Ce calcul à l'équilibre limite doit en fait être complété par un calcul en déformation qui, par simplification, est souvent un calcul au module de réaction. Cela a conduit la Société Suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA) à proposer, dans la norme Suisse 195 sur le poussage, l'abaque de la figure 23. Les courbes de forme hyperbolique représentent la butée admissible calculée à l'équilibre limite ; les droites représentent la butée calculée à partir du module E du sol en compression et pour un déplacement de l'appui, considéré comme un minimum admissible. Si l'on impose que ce déplacement ne soit pas dépassé, il est souvent nécessaire de réduire la force de poussage admissible.

This expression results from limit equilibrium computations and must be accompanied with displacement estimates, which are usually obtained from subgrade reaction models. This led the Swiss Society for Engineers and Architects (SIA) to introduce the design charts shown in Figure 23, as part of the Swiss standard 195 on jacking. In this figure, hyperbolas represent the allowable passive resistance derived from limit equilibrium principles ; straight lines represent passive reactions derived from deformation analyses using the soil's compression modulus, E, and assuming that the displacement of the reaction unit is equal to some allowable value. The condition, that this displacement cannot be exceeded, often makes it necessary to reduce the allowable jacking force.

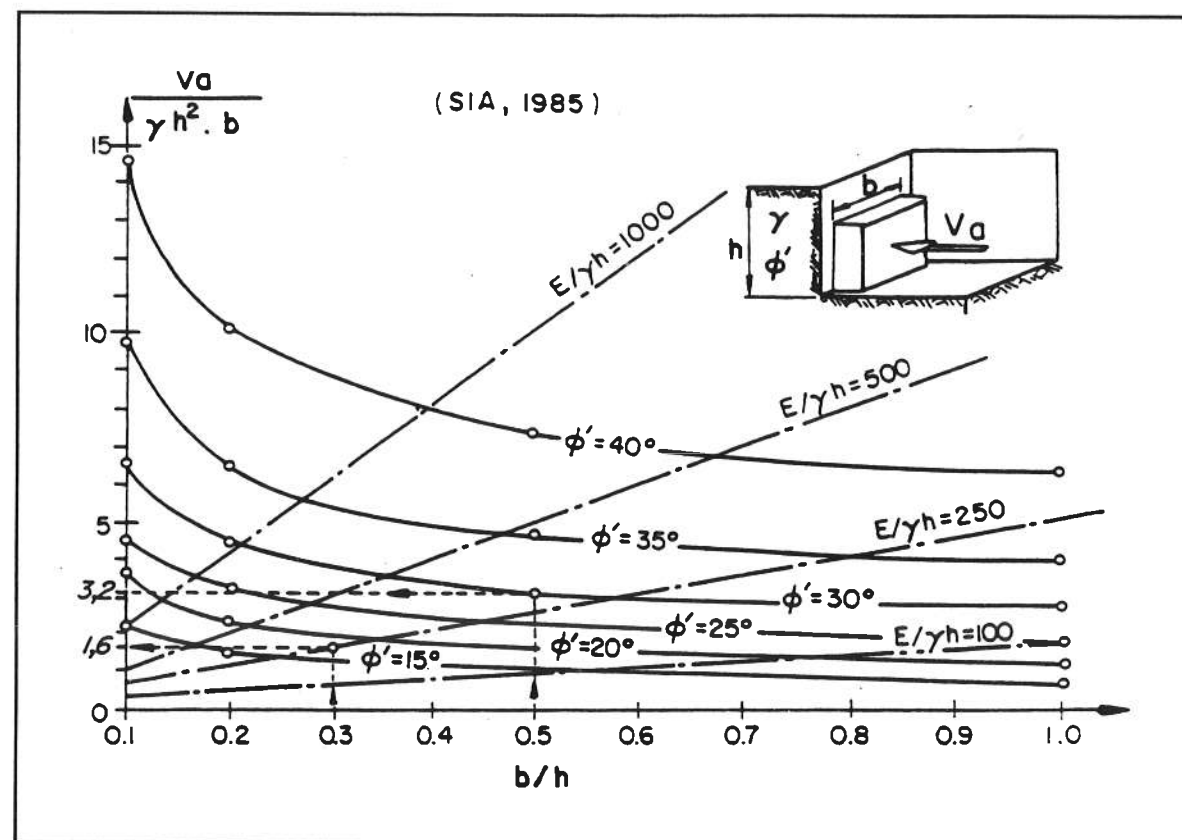


Figure 23 : Bearing capacity of reaction wall, derived from limit equilibrium and deformation analysis.
Capacité portante admissible de l'appui calculée à l'équilibre limite et en déformation.
(SIA)

5.2 - Guidage

Le guidage de la machine s'effectue en deux étapes : (1) détermination des coordonnées de la tête de la machine et des écarts par rapport à la trajectoire souhaitée ; (2) choix des paramètres de contrôle du pilotage, permettant de corriger le cap de la machine.

5.2 - Directional control

Directional control is completed in two steps : (1) the coordinates of the machine head are determined and deviations with respect to design coordinates are computed ; (2) directional control parameters are adjusted to correct for recorded deviations.

Nom du procédé	Données recueillies	Portée (m)	Précision	Coût	Principales applications	Commentaires
Détecteur de tuyau	Profondeur et coordonnées planes	10	+/- 3 %	Très faible	Machines foreuses de petit diamètre	Accessibilité en surface nécessaire
Émetteur-récepteur électromagnétique	Déviation par rapport au niveau et à l'orientation de référence	50	1° en roulis, très sensible aux décalages de trajectoire	Faible	Perceuses	Permet le guidage en temps réel
Cible Laser	Coordonnées, azimut et inclinaison	> 1000	Fonction du type de cible	Moyen	Machines foreuses	Guidage en temps réel
Systèmes de levé	Coordonnées, azimut et inclinaison	> 5000	0,1° en inclinaison +/- 0,5° en azimut, pour les gyroscopes	Moyen	Exploration minière, traversées sous-fluviales	Ne permet pas le guidage en temps réel, conduite gérée par les câbles électriques
Systèmes de conduite	Coordonnées, azimut et inclinaison	> 5000	+/- 0,25° en inclinaison +/- 1,5° en azimut +/- 3° en roulis	Fort	Exploration minière, traversées sous-fluviales	Coût plus important que pour les systèmes de levé, permet la conduite en temps réel, nécessite des câbles électriques
Systèmes de mesure en cours de forage (MWD) à impulsion de boue	Coordonnées, azimut et inclinaison	> 5000	+/- 0,25° en inclinaison +/- 1,5° en azimut +/- 3° en roulis	Fort	Exploration de gisements pétroliers	Faible vitesse d'acquisition des données
Systèmes de mesure en cours de forage (MWD) de type électromagnétique	Coordonnées, azimut et inclinaison	3000	+/- 0,25° en inclinaison +/- 1,5° en azimut +/- 3° en roulis	Fort	Exploration de gisements pétroliers, traversées sous-fluviales	Vitesse d'acquisition des données plus importante que pour les systèmes à impulsion de boue
Systèmes de mesure en cours de forage (MWD) de type acoustique	Coordonnées, azimut et inclinaison	1000	0,1° en inclinaison 1,0° en azimut 1,0° en roulis	Fort	Déméthanisation du charbon	Les moins chers des systèmes MWD

Table 3 - Main directional control systems.
Principaux systèmes de guidage.
(Pittard et al. 1989)

La détermination des coordonnées concerne à la fois le positionnement spatial de la tête de la machine (coordonnées x, y, z), et sa direction (inclinaison, azimut, roulis). Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour obtenir ces informations ; les caractéristiques des méthodes les plus courantes sont décrites sur le tableau 3 (d'après Pittard et al, 1989). Le choix entre ces différentes techniques dépendra à la fois des paramètres recherchés (positionnement, direction), du procédé de construction utilisé (microtunnelier, forage dirigé) et d'un compromis entre précision souhaitée et budget de l'ouvrage.

Le choix des paramètres de contrôle de la machine s'effectue sur la base des informations enregistrées, concernant les coordonnées de la tête de la machine, et de la connaissance du comportement de la machine, compte tenu des conditions géotechniques rencontrées. L'expérience du pilote est donc essentielle au niveau de cette phase.

Ces deux opérations (repérage et pilotage) tendent à être automatisées. L'automatisation de la phase d'enregistrement des coordonnées de la tête de la machine est pratiquement nécessaire dans le cas des microtunnels, dans la mesure où il n'est pas possible d'accéder à la tête de la machine. Par exemple, le repérage de la position de la machine à l'aide du Laser s'effectue à l'aide d'une caméra installée devant la cible ou à partir d'une plaque photosensible, transmettant directement à l'ordinateur les coordonnées du point d'impact du rayon Laser sur la cible.

L'automatisation de la phase de pilotage nécessite une bonne connaissance de la réponse de la machine. Des recherches sont en cours pour la mise au point de systèmes de pilotage automatique permettant de tenir compte, à chaque étape d'avancement, de la réponse de la machine sur les étapes précédentes. En particulier, des systèmes basés sur la théorie de la logique floue ont été développés pour le guidage automatique des microtunneliers (Takatsuka et al., 1991).

5.3 - Marinage

Le marinage est généralement effectué à l'aide d'une vis sans fin ou par circulation de boue. Le premier procédé est mieux adapté aux argiles, alors que le marinage à la boue est plutôt utilisé dans les terrains sableux. Un exemple de microtunnelier utilisant le système de vis sans fin est représenté sur la figure 24a (d'après Holtmann et Laurent, 1992) : le terrain abattu au front de taille est extrait puis transporté par rotation de la vis sans fin, jusqu'au puits d'attaque. En général, ce procédé limite à environ 60 m les distances de forage, en raison de frottements internes importants (Anheuser, 1992).

La figure 24b (d'après Holtmann et Laurent, 1992) représente un système de marinage à boue. Dans ce cas, les déblais sont mélangés à la boue provenant de la conduite d'amenée dans la chambre d'abattage, puis transportés par la conduite d'évacuation jusqu'au puits d'attaque, où la boue polluée est pompée et recyclée. Des distances de forage de l'ordre de 100 m sont possibles à l'aide de ce procédé, mais à condition d'installer une pompe supplémentaire à déblais derrière le microtunnelier (la perte de charge sur le circuit de marinage étant à peu près équivalente aux capacités de la pompe du puits d'entrée, soit 5 à 7 m d'eau pour 100 m de canalisation).

Machine head coordinates (x, y, z) and angles (inclination, azimuth, roll) can be estimated during the first phase. Several techniques are available for determining these parameters ; their main characteristics are summarized in Table 3 (after Pittard et al., 1989). The selection of a positioning technique depends on required parameters (location, direction), construction procedure (microtunneling, directional drilling), and a compromise between accuracy and cost.

The choice of directional control parameters (phase 2) is based on previous positioning records and machine response to encountered ground conditions, and is best accomplished by an experienced operator.

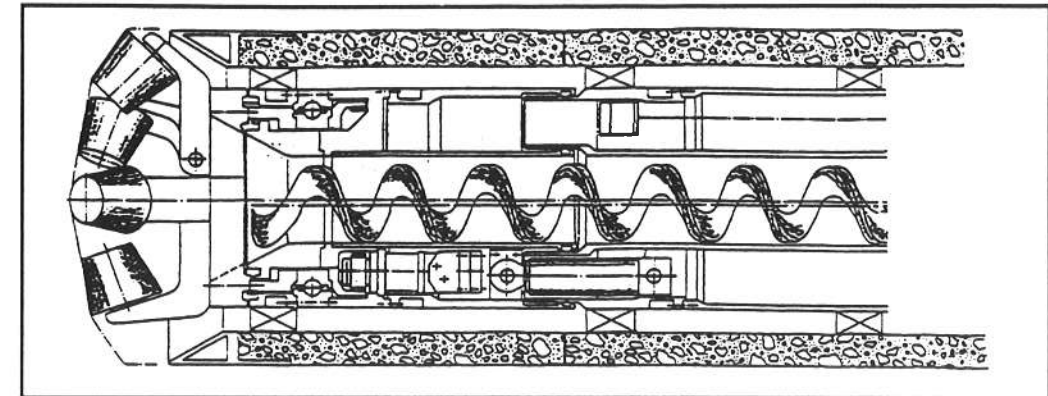
Both operations (positioning and control) tend to be automated. It is almost necessary to determine the machine head's coordinates automatically, since access to the front is prohibited for non-man size pipes. For instance, Laser positioning systems make use of a camera, that reads and records the impact of the Laser on the target, or a photosensitive plate, with automatic transmission of the records to a computer.

Automatic directional control requires a good understanding of the machine's response. Research is underway for the completion of automatic directional control systems, that would allow, at each stage of operation, to account for the machine response over the preceding stages. In particular, systems based on fuzzy logics have been developed for automatic directional control of microtunnels (Takatsuka et al., 1991).

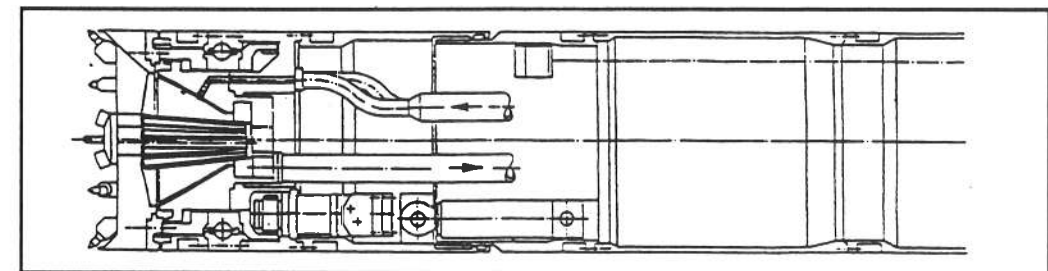
5.3 - Muck Removal

Muck transport is usually accomplished by means of a screw conveyor or slurry. The former technique is better suited for microtunneling in clay, whereas the latter finds more application in sandy materials. A typical machine equipped with a screw conveyor system is shown in Figure 24a (after Holtmann and Laurent, 1992) : the cuttings are extracted from the front and conveyed to the drive pit as the screw is rotated. Driving distances are usually limited to values in the order of 60 m when this system is used, because high frictional forces develop within the conveyor (Anheuser, 1992).

Figure 24b (after Holtmann and Laurent, 1992) represents a slurry machine. In this case, the cuttings are mixed with clean slurry entering the muck chamber through the inflow pipe, and transported through the outflow pipe to the drive pit, where the polluted slurry is pumped out and recycled. Driving distances in the order of 100 m can be achieved with this technique, provided an auxiliary pump is installed behind the machine (since the head loss along the pipe would, in this case, be somehow equivalent to the capacity of the main pump, i.e. 5-7 m for a 100 m long pipe).



a) Screw conveyor system.
Marinage par vis sans fin.



b) Slurry system.
Marinage à la boue.

Figure 24 - Muck removal systems used for microtunneling.
Marinage des microtunneliers.
(Holtmann & Laurent, 1992)

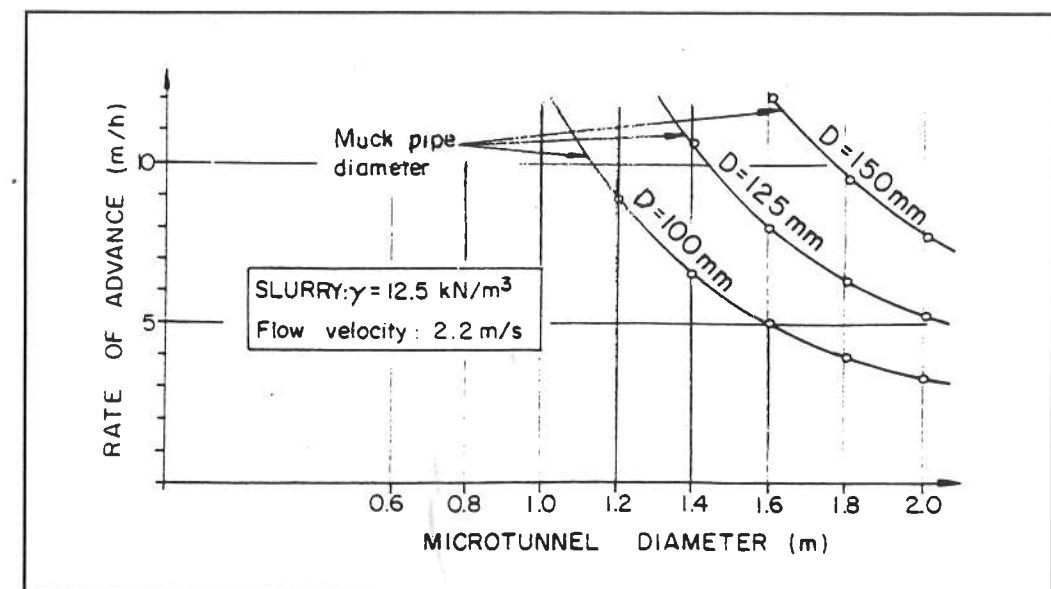


Figure 25 - Muck pipe capacity.
Capacité de marinage hydraulique.
(Anheuser, 1992)

La figure 25 (d'après Anheuser, 1992) permet d'estimer les capacités de marinage de tubes de diamètres différents (DN 100, 125 et 150), en faisant l'hypothèse d'une densité de fluide de 1,25 et d'une vitesse d'écoulement de 2,2 m/s. Le diagramme donne, pour chaque catégorie de tube, la vitesse de pénétration autorisée en fonction du diamètre foré. Il apparaît que le diamètre des tubes d'évacuation n'est pas un facteur de limitation des capacités de marinage ; par exemple, pour l'installation de tubes de 1200 mm de diamètre et de 2 m de long, le temps de forage autorisé par des conduites de 100 mm de diamètre (taille considérée comme minimale pour permettre le transport de particules allant jusqu'à 40 mm), serait de l'ordre de 13,5 minutes (figure 25).

5.4 - Limites d'utilisation des techniques

Le choix d'une technique de pose sans tranchée d'une canalisation dépend de nombreux facteurs dont notamment :

- le type de canalisation (conduite continue ou par éléments) et notamment son diamètre ;
- la profondeur à laquelle doit être posée la canalisation ;
- la nature du sol et la présence ou non d'eau ;
- la distance entre puits ou entre point de départ et point d'arrivée ;
- la précision exigée sur le niveau de pose de la conduite.

En dépit de l'utilisation d'éléments de buse préfabriqués pour la construction des puits en vue d'en réduire les coûts, les puits d'arrivée et de départ restent un facteur non négligeable dans le coût direct total (Stein et al., 1989). Pour cette raison il convient de réduire le nombre de puits et donc d'utiliser la longueur de tronçon maximale permise par la machine et notamment par la station de vérinage. Un ordre de grandeur des longueurs poussées maximales est donné dans le tableau 4 ci-après :

Diamètre interne du tuyau (mm)	Longueur poussée maximale (m)	
	Marinage par vis	Marinage hydraulique
250	60	120
500 à 600	80 - 100	150/160
800		250

Table 4 - Maximum lengths of installed pipes.
Longueurs poussées maximales des tuyaux.

Figure 25 (after Anheuser, 1992) allows to estimate the muck removal capacity of service pipes of different diameters (ID = 100, 125 and 150 mm), with fluid characteristics assumed as : density 1.25 ; flow velocity 2.2 m/s. The results are given in terms of achievable driving velocities versus bored diameters for each pipe category. It is apparent from this figure, that muck pipe diameter is not a limiting parameter to muck transport capacity ; as an example, boring for the installation of 1200 mm diameter 2 m long pipes, using 100 mm muck pipes (minimum size to allow passing elements up to 40 mm) could be accomplished in 13.5 minutes, if the lone muck transport capacity of the pipe were to be considered (Figure 25).

5.4 - Limitations of Construction

Techniques

The choice among trenchless installation techniques depends on several parameters including :

- pipe type (continuous or segmented, diameter) ;
- depth of installation ;
- distance between drive and reception pits ;
- required accuracy for pipe installation.

Drive and reception pit construction accounts for a considerable fraction of the total direct cost of installation, even when cost effective systems, such as precast segmented caissons, are used for pit construction (Stein et al., 1989). For this reason, it is preferable to reduce the number of intermediate pits along the project and take advantage of the maximum driving distances allowed by the machine, and in particular by the jacking station. Orders of magnitude of maximum jacking distances associated with different installation techniques are provided in Table 4 (after Stein, 1990).

Les tuyaux poussés doivent pouvoir résister à des efforts axiaux importants et surtout à des concentrations de contraintes, notamment au voisinage des joints par suite du désalignement consécutif au guidage. Les matériaux utilisés pour les tuyaux poussés sont les suivants :

1. Béton non armé.
2. Béton armé.
3. Argile vitrifiée.
4. Plastique armé de fibres de verre.
5. Amiante ciment.
6. Acier et fonte ductile.
7. Matériaux composites (béton et résine, béton et fonte, etc...).

Les joints et matériaux d'interposition entre tuyaux doivent satisfaire certains critères. Ils doivent être suffisamment résistants, mais en même temps permettre des mouvements angulaires et axiaux sans que leur étanchéité puisse en être affectée. Leur durabilité notamment vis-à-vis des fluides agressifs doit être aussi bonne que celle des tuyaux. Leur mise en place doit être simple et ils doivent résister aux vibrations.

La nature du sol est également un aspect qui limite l'utilisation des techniques, en particulier lorsqu'il s'agit de sables sous la nappe et de sols rocheux. La figure 26 montre, pour quelques grands types de techniques, l'adaptabilité en fonction de la nature du sol (Ingold et Thomson, 1989).

D'après Anheuser (1992), un développement des techniques de travaux sans tranchée nécessiterait en premier lieu :

- de pouvoir doubler ou tripler la longueur poussée habituelle, qui se situe autour de 80 m ;
- de développer les techniques guidées avec bouclier jusqu'à un diamètre intérieur de 1500 mm, c'est-à-dire de couvrir une partie de la gamme des minitunnels ;
- d'assurer une avance régulière de la machine dans les terrains hétérogènes ou rocheux.

La longueur poussée peut être augmentée par un bon alignement des éléments de tuyau (le guidage automatique n'étant pas forcément la meilleure solution), par la lubrification des parois, par l'installation de stations intermédiaires de poussée, par l'adjonction d'un niveau à eau pour pallier la limitation du système de guidage par laser et enfin par l'amélioration du système de marinage pour atteindre de plus grandes longueurs de transport.

Pipes have to withstand high axial loads induced by jacking, during construction, as well as stress concentrations ; these particularly occur in the vicinity of joints, because of misalignments. Several material types can be used for jacking pipes :

1. unreinforced concrete ;
2. reinforced concrete ;
3. clay ;
4. fiber reinforced plastics ;
5. abestos cement ;
6. composite materials (concrete and resins, concrete and ductile iron, etc.).

A number of properties are required for the joints and packing materials used between pipes. They have to be sufficiently resistant, as well as able to cope with angular and axial deviations, without affecting their watertightness. Their durability, especially that under exposure to aggressive fluids, must be as high as that of the pipes. They must be easy to install and able to withstand vibrations.

Soil characteristics is another limiting parameter with respect to the use of a particular pipe installation techniques ; this is especially true of sands under water and rocky soils. Figure 26 provides insights into the suitability of major construction techniques to ground conditions (Ingold and Thomson, 1989).

Anheuser (1992) suggests that further development of trenchless construction techniques would require the following :

- be able to double or triple current driving distances, which now average 80 m ;
- develop guided microtunneling techniques for up to 1500 mm internal diameter pipes, i.e. up to minitunnel sizes ;
- be able to ensure a regular advance rate of the machine in heterogeneous or rocky grounds.

Jacking lengths can be increased by careful alignment of the pipe segments (automatic directional control may not be the most efficient solution), pipe lubrication, installation of intermediate jacking stations, adjunction of a water gauge to cope with shortcomings of laser guidance systems, and improvement of muck removal operation to allow higher transport lengths.

GROUND CONDITIONS	MICROTUNNELING	AUGER BORING	IMPACT RAMMING	DIRECTIONAL DRILLING	IMPACT MOLING	THRUST BORING
Soft to very soft clays, silts and organic deposits	●	●	○	●	●	●
Medium to very stiff clays and silts	○	○	○	○	○	○
Hard clays and highly weathered shales	○	○	●	○	●	●
Very loose to loose sands above and below the water table	●	●	●	●	●	○
Medium to dense sands above the water table	○	○	●	○	●	○
Medium to dense sands below the water table	○	●	●	○	●	○
Gravels and cobbles. (diameter < 50-100 mm)	○	○	○	○	●	●
Soils with big elements (< 100-150 mm)	●	●	○	●	●	●
Weathered rocks, marls, chalks and firmly cemented soils	○	○	●	●	●	●
Slightly weathered to unweathered rocks	●	●	●	●	●	●

○ SUITABLE ● ADAPTABLE ● NON USABLE

Figure 26 - Ground conditions and suitability of various trenchless techniques.
Utilisation des différentes techniques de microtunnels en fonction des sols rencontrés.
(Ingold, et Thomson, 1989)

6 - ETAT ACTUEL DES RECHERCHES

Parmi les premiers programmes de recherches sur les travaux sans tranchée, il convient de citer celui réalisé en Allemagne de 1979 à 1983 et qui a conduit à la production des premiers microtunneliers européens au milieu des années 1980.

Le programme de recherches d'Oxford (Royaume-Uni).

Plus récemment, l'Université d'Oxford au Royaume-Uni a réalisé tout un programme, financé et coordonné par l'Association sur le poussage des tuyaux (Pipejacking Association), qui comprenait deux parties (Ripley et Norris, 1990) :

- (1986-1989) : Comportement des tuyaux poussés.
- (1989-1992) : Expérimentations en vraie grandeur sur des tuyaux poussés en béton.

La première partie a consisté en des essais sur modèles réduits en laboratoire, dont le but était d'étudier la répartition des efforts et des contraintes dans les éléments de tuyaux poussés. Une attention particulière a été portée sur les conséquences d'un désalignement entre deux éléments jointifs et sur le type de matériau d'interposition susceptible de minimiser les concentrations de contraintes dans les tuyaux. Les résultats ont montré des répartitions de contraintes très différentes entre les faces interne et externe du tuyau, ainsi que des changements de diamètre et de forme résultant du désalignement. Le meilleur matériau d'interposition s'est avéré être un matériau fibreux en plaque, légèrement humide.

La deuxième partie a consisté à instrumenter 5 tuyaux en vraie grandeur, poussés dans des sols cohérents et non cohérents, afin d'étudier la répartition des contraintes, l'influence des désalignements et le comportement des joints.

Le Projet National Microtunnel en France.

Le Comité Français pour les Travaux Sans Tranchée (FSTT) prépare actuellement le montage d'un Projet National de recherche, intitulé projet "Microtunnel" et portant sur la réalisation d'ouvrages neufs sans tranchée. Les travaux envisagés doivent principalement s'appuyer sur des expérimentations sur chantiers et, dans une moindre mesure, des recherches sur sites expérimentaux et en laboratoire.

Les thèmes de recherche suivants sont prévus (Henry, 1992) :

- interaction sol-créusement ;
- interaction sol-tuyau ;
- reconnaissance géotechnique ;
- reconnaissance géophysique ;
- développement et mise au point de matériels dans le domaine du forage horizontal dirigé.

6 - RESEARCH

One of the first research programs on trenchless technology was completed in Germany, during the period 1979 through 1983, and led to the first European manufactured microtunneling machines in the mid-eighties.

Oxford's (United Kingdom) research program

More recently, the University of Oxford (United Kingdom) carried out a comprehensive research program on trenchless technology ; this program was supported and coordinated by the Pipejacking Association, and consisted of two parts (Ripley and Norris, 1990) :

- 1986-1989 : behavior of jacked pipes ;
- 1989-1992 : full scale experiments on jacked concrete pipes.

The first part consisted in laboratory model tests, which were aimed at analyzing the distribution of loads and stresses along jacked pipe segments. Particular attention was paid to the consequences of pipe misalignment and to the characteristics of packing materials used to minimize stress concentrations on joints. These results showed that stress distributions along the inner side of jacked pipes were significantly different from those developed along the outer side, and that changes in pipe shape and diameter could be observed as a result of misalignment. The best packing material was found to be made of plastic fibers and slightly wet.

The second part of the project included full scale instrumentation of 5 pipes, which were jacked in both cohesive and cohesionless soils, in view of analyzing stress distributions, misalignment effects and joint behavior.

The French national research project on microtunneling

The French Society for Trenchless Technology (FSTT) is presently setting up a national research project, named "Microtunnel", on new trenchless pipe installations. The program emphasizes real site instrumentation, with a minor part of the project being related to experimental sites and laboratory testing.

The following topics are being considered (Henry, 1992) :

- interaction between ground and construction ;
- ground-pipe interaction
- geotechnical site investigations ;
- geophysical site investigations ;
- development of horizontal directional drilling equipment.

En ce qui concerne les deux premiers thèmes (interaction sol-créusement et interaction sol-tuyau), un important programme d'instrumentation sur ouvrages construits à l'aide de microtunneliers a été établi, dans le but de mieux appréhender la réponse de la machine aux conditions géotechniques rencontrées, ainsi que les efforts repris par les canalisations installées par ce procédé. Ceci suppose l'enregistrement en continu d'un certain nombre de paramètres de contrôle et de guidage de la machine, ainsi que la mesure des déformations des tuyaux au cours du fonçage.

Les aspects suivants doivent être étudiés plus particulièrement :

- relation entre les conditions de sol et les paramètres de creusement, de marinage, de guidage ;
- adaptation globale terrain-machine ;
- mouvements de terrain engendrés par le creusement ;
- frottement sol-tuyau ;
- lubrification ;
- sollicitation sur les tuyaux et les joints entre tuyaux.

D'autres travaux expérimentaux sont également envisagés pour étudier notamment les problèmes de collage rencontrés en terrain argileux, ainsi que l'aptitude des machines à concasser des obstacles qui n'auraient pas été détectés au cours de la campagne de reconnaissance.

7 - CONCLUSIONS

La construction de microtunnels connaît actuellement un essor important, avec le développement de plusieurs techniques, reposant sur les principes du forage guidé, du forage horizontal dirigé ou du microtunnelier. C'est au Japon que ces techniques se sont développées le plus tôt et sont, de nos jours encore, les plus utilisées, avec, en particulier, chaque année, la mise en oeuvre d'environ 1000 microtunneliers et la construction de 200 machines. En Europe, le recours à des microtunneliers n'est apparu qu'il y a une dizaine d'années, d'abord en Allemagne, puis au Royaume-Uni et, plus récemment, en France.

L'emploi de méthodes sans tranchée, pour la pose de canalisations non visitables, tend à se développer dans ces pays, pour des raisons techniques (profondeur de l'ouvrage) et d'environnement (diminution des perturbations induites par les travaux). En effet, bien que ces techniques soient a priori plus onéreuses que la réalisation en tranchée, elles s'avèrent avantageuses si l'ensemble des coûts indirects (pertes de jouissance des terrains traversés par les travaux, dommages causés aux réseaux avoisinants, pertes de profits commerciaux, réduction de la durée de vie des chaussées et augmentation des besoins en entretien) et sociaux (interruptions et ralentissements de la circulation routière, niveau accru des risques d'accidents, incidences sur l'environnement) sont effectivement pris en compte dans l'estimation du coût des projets.

As for the first two topics (interaction between ground and construction and ground-pipe interaction), a comprehensive instrumentation program was prepared for pipes installed by means of microtunneling machines ; it is aimed at getting a better understanding of the response of the machine to various ground conditions, and improving our knowledge of the loads induced to jacked pipes. This will require continuous monitoring, during jacking, of a number of directional control parameters, as well as pipe deformations.

The following points will be analyzed with particular care :

- relationship between ground conditions and boring, muck removal and directional control parameters ;
- overall ground-machine adjustment ;
- ground movements induced by microtunneling ;
- soil-pipe friction ;
- lubrication ;
- loads induced on pipes and joints.

Other experimental works are under consideration, in the areas of pipe installation in sticky clays and boulder crushing capabilities of microtunneling machines.

7 - CONCLUSIONS

Microtunneling construction is growing, with the development of several techniques, using the principles of guided boring, horizontal drilling and microtunneling machines. These technologies were first introduced in Japan ; this country is still leading the microtunneling industry nowadays, with some 1000 microtunneling machines being used and 200 manufactured every year. Microtunneling machines were introduced during the last decade in Europe, first in Germany, and then in the United Kingdom, and more recently in France.

Trenchless installation of non-man-size pipes tends to be growing in these countries, for both technical reasons (required depth of installation) and environmental reasons (decreased disturbance induced by construction). Even though these techniques tend to be basically more expensive than trenching, they appear to be cost effective on an overall basis, as long as non-direct costs (loss of use for neighboring landowners, damages caused to neighboring networks, loss of profit for businesses, reduction in the durability and additional cost for maintenance of street pavement) and social costs (traffic interruptions and delays, increased chances for accidents, environmental effects) are accounted for in the project cost estimates.

Bien entendu, ces techniques connaissent également des limites d'utilisation, liées à la nature et à l'hétérogénéité des terrains rencontrés, aux caractéristiques des canalisations mises en places et aux conditions du projet. D'une manière générale, le choix de la technique se fera en fonction du type de canalisation (notamment son diamètre), de la profondeur de pose, de la nature du sol (et de la présence ou non d'eau), de la distance entre puits (ou points) de départ et d'arrivée, de la précision exigée sur le niveau de pose de la conduite.

Les performances de ces techniques devraient être considérablement améliorées, au cours des prochaines années, en raison des efforts de recherche entrepris pour faire progresser la connaissance des différents éléments du processus de construction, au niveau notamment de l'interaction entre la machine et le terrain, de l'interaction terrain-tuyau, des méthodes de reconnaissance et des systèmes de pilotage et de guidage. Les progrès recherchés portent en particulier sur l'augmentation des longueurs de pose et des tailles des canalisations installées, ainsi que sur la traversée de conditions géotechniques délicates.

These technologies are of course subject to some limitations, which relate to ground properties and heterogeneities, pipe characteristics and project conditions. The construction technique to be used will generally be chosen based on the following criteria : pipe type (in particular pipe diameter), depth of installation, ground conditions (and depth to the water table), distance between starting and arrival shafts (or points), required accuracy for pipe installation.

The capabilities of these technologies should be considerably enhanced during the coming years, partly because of the research efforts made to improve our understanding of the different components of the construction process, particularly in the fields of ground machine interaction, ground pipe interaction, site investigation and directional control. These efforts are aimed at increasing the lengths of installation and sizes of installed pipes, as well as improving the capabilities for microtunneling through difficult grounds.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier ici ceux qui les ont aidés dans la préparation de ce rapport et notamment Najwa Karout, Viviane Soro et Marc Anic Antic.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANHEUSER L., (1992). Elargissement du champ d'application des fonçages téléguidés en Allemagne. Journées d'Etudes sur les Travaux sans Tranchée. CEIFICI, 18-19 mars 1992, Paris.

AKIBA T., YAMADA Y., (1989). The Enviliner Microtunnelling System. Proc. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 8.4.1-8.4.9.

BAGUELIN F., JEZEQUEL J.F., SHIELDS D., (1978). The pressure meter and foundation engineering.

BEROSCH M., ANGOT C., (1992). Social Cost and Pipelaying : a View of the Situation in France. Proc. 8th Int. Proc. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 92, Washington, April 1992, pp. D3.1-D3.19.

BURNS J.C., RICHARD R.M., (1964). Attenuation of stresses for buried cylinders. Proc. Symp. Soil-structure interaction, Tucson, Arizona, pp. 503-536.

COLLER P.J., (1989). Construction of Small Diameter Tunnels by Use of Automated Slurry Tunnelling Machines. C.R. Colloque Int. Tunnels et Microtunnels en Terrain Meuble, ENPC, Paris, vol. 1 pp. 152-159.

CLOUTERRE, (1991). Recommandations Clouterre 1991. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris.

ETERNIT, (1992). Les microtunneliers : solutions Eternit, tuyaux Fibres Ciments. Journées d'Etudes sur les Travaux sans Tranchée. CEIFICI, 18-19 mars 1992, Paris.

HEMERIJCKX E., (1990). Recent Development of the Underground Pipejacking Techniques in Antwerp-Belgium. Proc. 5th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, April 1990, Rotterdam, pp. D4.1-D4.8.

HENNEVELD M., (1990). Microtunneling in Perth, Western Australia. Proc. 6th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, October 90, Osaka, pp. D2.-D2.5.

HENRY J.P., (1992). Programme de Recherche Développement Innovation de la FSTT. Journées d'Etudes sur les Travaux sans Tranchée. CEIFICI, 18-19 mars 1992, Paris.

HOLTMANN A., LAURENT CH., (1992). Nouveau Développement de Microtunneliers. Journées d'Etudes sur les Travaux sans Tranchée. CEIFICI, 18-19 mars 1992, Paris.

INGOLD T., THOMSON J., (1989). Site Investigation Related to Trenchless Techniques. Proc. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 3.1.1-3.1.7.

ILIFFE A., SPEDDING A., (1990). Bursting Update - Case Study of UK's Largest Moling Contract. Proc. 5th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, 23-25 April 1990, Rotterdam, pp. D2.1-D2.9.

KUSAKABE T., (1990). Muckless Shield Machine. Proc. 6th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, Oct 1990, Osaka, pp. D3.1-D3.7.

LEACH G., REED K., (1989). Observation and Assessment of the Disturbance Caused by Displacement Methods of Trenchless Construction. Proc. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 2.4.1-2.4.12.

MERMET M., CROSNIER D., MERCENNE B., (1991). Techniques sans Tranchée en France (FSTT). Proc. 7th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 91, October 1991, Hambourg, pp. 211-219.

MILLIGAN G., RIPLEY K., (1989). Packing Material in Jacked Pipe Joints. Proc. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 2.1.1-2.1.10.

MOLENAAR V., THOMSON J., FEDOTOFF R., (1990). Trenchless Technology - Changing Markets and Methods. Proc. 5th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, 23-25 April 1990, Rotterdam, pp. A1.1-A1.8.

MOSS A., (1990). Microtunneling Comett Seminar on Soft ground Tunneling, ICE/BTS, 10-12 July 1990, London.

NISHIDA H., SHIGEKI F., JUNSUKE S., (1990). New Thrust System "SSK Method". Proc. 6th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, October 1990, Osaka, pp. C1.1-C1.9.

NOJIRI Y., MIYAZAKI Y., SUGINO F., (1991). Small and Mechanized Microtunneling System Applicable to Hard and Gravel - Rich Soils. Proc. 7th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 91, October 1991, Hambourg, pp. 611-628.

NORGROVE W., O'REILLY M., (1990). Comparisons of the Costs of Constructing Sewers by Tunnelling or Trenching in Urban Areas. Proc. 5th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, 23-25 April 1990, Rotterdam, pp. A6.1-A6.10.

NORRIS P., MILLIGAN G., (1992). Frictional Resistance of Jacked Concrete Pipes at Full Scale. Proc. 9th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 92, October 1992, Paris.

NORRIS P., MILLIGAN G., (1992). Pipe End Load Transfer Mechanisms During Pipejacking. Proc. 8th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 92, April 1992, Washington, pp. H3.1-H3.15.

O'REILLY M., ROGERS C., (1990). Ground Movements Associated with Pipejacking and Trenching. Proc. 5th International Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, 23-24 April 1990, Rotterdam, pp. B1.1-B1.8.

O'ROURKE T., (1985). Ground Movements Caused by Trenchless Construction. Proc. 1st Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 85, pp. 51-63.

PECK R.B., (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. State of the art report. Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. pp. 225-290, Mexico city.

PIQUEREAU G., (1989). Automates de Pilotage de Tunneliers : Expériences Récentes et Perspectives. C.R. Colloque Int. Tunnels et Microtunnels en Terrain Meuble, ENPC, Paris, Vol. 1 p. 122-127.

PITTARD G., McDONALD W., KRAMER S., (1989). Instrumentation Systems for Guided Boring. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 7.1.1-7.1.9.

RIPLEY K., NORRIS P., (1990). Pipejacking. Comett Seminar on Soft Ground Tunneling, ICE/BTS, 10-12 July 1990, London.

RITCHIE J., ENENBACH J., KLEISER K., STEUTEL M., (1989). Use of the Flow Mole Guide Drill System in Europe. Proc. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 9.4.1-9.4.7.

SAGASETA C., (1987). Analysis of Undrained Soil Deformation due to Ground Loss. Géotechnique. Vol 37, n°3.

SCHLOSSER F., MAGNAN J.P., HOLTZ R., (1985). Construction Géotechnique. Rapport Général. C.R. du 11ème Congrès Int. de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation. San-Francisco. Vol. 1 pp. 211-254.

SCHWEIZERISCHER INGENIEUR - Und Architekten-Verein : SIA - Norm 195 "Preß vortrieb".

STEVENS W., (1989). Ductile Iron Jacking Pipes. Proc. 4th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 89, 11-13 April 1989, London, pp. 2.2.1-2.2.10.

STEIN D., MOLLERS K., BIELECKI R., (1989). Microtunnelling : Installation and Renewal of Nonman-Size Supply and Sewage Lines by the Trenchless Construction Method. Ernst & Sohn Press. Berlin.

STEIN D., (1990). Microtunnelling : Installations and Renewal of Nonman-Size Supply Lines. Comett Seminar on Soft Ground Tunnelling. ICE/BTS, 10-12 July, London.

SWEE J., MILLIGAN G., (1990). Pipebursting : Model Tests. Proc. 6th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 90, October 90, Osaka, pp. H3.1-H3.7.

TAKATSUKA T., KUROSAWA T., HARADA Y., (1991). Directional Control Employing Fuzzy Reasoning of a Microtunnelling System. Proc. 8th Int. Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 893-900.

THOMSON J., INGOLD T., NEW B., (1991). The Potential for Reduced Highway Disruption Using Trenchless Technology. Proc. 7th Int. Conference on Trenchless Construction for Utilities, NO-DIG 91, Octobre 1991, Hambourg, pp. 95-110.



FSTT

Comité Français pour les Travaux Sans Tranchée

72 avenue Pasteur - 93100 MONTREUIL
Tél. 48.70.92.32 - Fax 48.70.99.79