

---

PROJET NATIONAL MICROTUNNELS



# Microtunneliers

*recommandations*

**FSTT**

*French society for trenchless technology*

**hermes**

*Lavoisier*

---

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	11
<b>Présentation</b> . . . . .	13
<b>Chapitre 1. Présentation des recommandations : objet et domaines d'application</b> . . . . .	17
1.1. Présentation générale des « travaux sans tranchée » . . . . .	17
1.2. Historique et spécificités des méthodes de microtunnelage . . . . .	19
1.3. Objet des recommandations. . . . .	20
<b>Chapitre 2. Techniques et principes de fonctionnement pour la pose de canalisations par microtunnelage</b> . . . . .	23
2.1. Généralités . . . . .	23
2.2. Les différentes fonctions d'un microtunnelier . . . . .	24
2.2.1. Excavation mécanisée du terrain . . . . .	25
2.2.1.1. L'abattage du terrain . . . . .	25
2.2.1.2. Confinement du front . . . . .	26
2.2.2. Evacuation des déblais excavés (ou marinage) . . . . .	26
2.2.2.1. Marinage hydraulique . . . . .	26
2.2.2.2. Marinage à vis . . . . .	27
2.2.2.3. Marinage pneumatique . . . . .	28
2.2.3. Guidage et corrections de trajectoire . . . . .	28
2.2.4. Mise en place des canalisations par fonçage . . . . .	29
2.3. Les différents types de tuyaux . . . . .	29
2.3.1. Les matériaux utilisés . . . . .	30
2.3.2. Les assemblages entre tuyaux . . . . .	31
2.3.3. La capacité de résistance des tuyaux . . . . .	31

<b>Chapitre 3. Synthèse des paramètres affectant le déroulement d'un chantier</b> . . . . .	33
3.1. Synthèse des paramètres conditionnant la réalisation d'un microtunnel . . . . .	33
3.1.1. Les cadences d'avancement . . . . .	35
3.1.1.1. Durée de fonçage seule . . . . .	35
3.1.1.2. Durée totale de mise en place d'un tuyau dans le terrain . . . . .	38
3.1.2. Les écarts de trajectoire . . . . .	38
3.1.2.1. Facteurs humains . . . . .	38
3.1.2.2. Facteurs technologiques . . . . .	40
3.1.2.3. Facteurs liés au terrain . . . . .	42
3.1.3. Les efforts de frottement . . . . .	44
3.1.3.1. Principe d'analyse des données expérimentales . . . . .	44
3.1.3.2. Influence de la surcoupe . . . . .	46
3.1.3.3. Incidence des temps d'arrêt . . . . .	46
3.1.3.4. Incidence de la lubrification . . . . .	49
3.1.3.5. Incidence des écarts de trajectoire . . . . .	56
3.1.3.6. Incidence de la granulométrie . . . . .	57
3.1.4. Les efforts en tête . . . . .	57
3.1.4.1. Présentation des résultats généraux . . . . .	57
3.1.4.2. Influence de l'abattage et du marinage . . . . .	59
3.1.4.3. Influence des écarts de trajectoire . . . . .	60
3.2. Description des principaux incidents pouvant survenir lors d'un chantier de microtunnelage . . . . .	61
3.2.1. Blocage de la machine . . . . .	61
3.2.1.1. Blocs et obstacles divers . . . . .	61
3.2.1.2. Frottements excessifs . . . . .	63
3.2.1.3. Abrasivité du terrain . . . . .	63
3.2.1.4. Collage des argiles . . . . .	64
3.2.2. Tuyaux endommagés . . . . .	64
3.2.3. Désordres en surface . . . . .	65
3.2.3.1. Tassements engendrés par le vide annulaire . . . . .	66
3.2.3.2. Instabilité du front de taille, mauvais équilibrage de la pression au front . . . . .	66
3.2.4. Roulis excessif . . . . .	67
<b>Chapitre 4. Recommandations pour les reconnaissances</b> . . . . .	69
4.1. Conception générale des reconnaissances . . . . .	69
4.1.1. Objectifs généraux . . . . .	69
4.1.2. Déroulement des reconnaissances . . . . .	70
4.1.3. Coût des reconnaissances . . . . .	71
4.2. Données à acquérir . . . . .	72

4.2.1. Configuration géologique du site . . . . .	72
4.2.2. Conditions hydrogéologiques . . . . .	73
4.2.3. Caractéristiques géotechniques des terrains . . . . .	73
4.2.4. Cavités et obstacles artificiels . . . . .	74
4.2.5. Paramètres d'environnement . . . . .	74
4.3. Méthodologie et moyens de reconnaissance . . . . .	74
4.3.1. Enquête documentaire . . . . .	75
4.3.2. Reconnaissances géophysiques . . . . .	75
4.3.2.1. Objectifs . . . . .	75
4.3.2.2. Intérêt des différentes méthodes . . . . .	75
4.3.2.3. Préconisations générales . . . . .	79
4.3.3. Sondages et essais géotechniques <i>in situ</i> . . . . .	79
4.3.3.1. Objectifs des sondages . . . . .	79
4.3.3.2. Implantation des sondages . . . . .	80
4.3.3.3. Types d'essais <i>in situ</i> . . . . .	80
4.3.3.4. Préconisations pour le choix des sondages et essais . . . . .	80
4.3.4. Essais géotechniques au laboratoire . . . . .	82
4.4. Contenu du dossier géologique . . . . .	82
<b>Chapitre 5. Recommandations pour le choix des machines et équipements . . . . .</b>	<b>85</b>
5.1. Généralités . . . . .	85
5.2. Le choix des machines selon leur mode de marinage . . . . .	86
5.3. Le choix des équipements . . . . .	87
5.3.1. Les têtes : ouverture, outils de coupe . . . . .	88
5.3.2. La surcoupe . . . . .	91
5.3.3. Le broyeur . . . . .	91
5.3.4. Les fluides de forage . . . . .	92
<b>Chapitre 6. Recommandations pour la conception du projet, le dimensionnement des tuyaux et le système de fonçage . . . . .</b>	<b>93</b>
6.1. Conception des puits . . . . .	93
6.2. Calcul des efforts de fonçage . . . . .	97
6.2.1. Définitions du frottement entre le sol et la canalisation . . . . .	97
6.2.1.1. Définition générale . . . . .	97
6.2.1.2. Valeurs particulières du frottement . . . . .	98
6.2.2. Résultats expérimentaux concernant le frottement unitaire . . . . .	98
6.2.2.1. Résultats du Projet national Microtunnels . . . . .	98
6.2.2.2. Résultats d'autres études . . . . .	102
6.2.3. Méthodologie de calcul des efforts de frottement . . . . .	104
6.2.3.1. Vérification de la stabilité de l'excavation . . . . .	104
6.2.3.2. Effet de la convergence du sol . . . . .	106

6.2.3.3. Calcul des efforts de frottement pour une excavation instable en sol granulaire . . . . .	107
6.2.3.4. Calcul des efforts de frottement pour une excavation instable en sol cohérent . . . . .	111
6.2.3.5. Calcul des efforts de frottement pour une excavation stable . . . . .	112
6.2.4. Confrontations des diverses approches avec les valeurs expérimentales . . . . .	113
6.2.4.1. Confrontation calculs-mesures : sols granulaires sans lubrification . . . . .	113
6.2.4.2. Confrontation calculs-mesures : sols granulaires avec lubrification . . . . .	114
6.2.4.3. Confrontation calcul-mesures : sols cohérents sans lubrification . . . . .	116
6.2.4.4. Confrontation calculs-mesures : sols cohérents avec lubrification . . . . .	117
6.2.5. Recommandations pour le calcul des efforts de fonçage . . . . .	118
6.2.5.1. Frottement dynamique – Sols non cohérents . . . . .	118
6.2.5.2. Frottement dynamique – Sols cohérents . . . . .	120
6.2.5.3. Frottement supplémentaire dû aux arrêts de fonçage . . . . .	122
6.2.5.4. Effort de poussée en tête . . . . .	123
6.2.5.5. Estimation de l'effort maximal de fonçage . . . . .	123
6.3. Calcul de la poussée maximale admissible par les tuyaux lors du fonçage . . . . .	124
6.3.1. Principe du calcul . . . . .	124
6.3.2. Contraintes admissibles dans les tuyaux . . . . .	127
6.4. Calcul des tuyaux en section transversale . . . . .	127
6.4.1. Les diverses vérifications de dimensionnement des tuyaux . . . . .	127
6.4.2. Les principes généraux de calcul : le modèle de base de Terzaghi . . . . .	128
6.4.3. Les charges verticales dues au terrain seul . . . . .	130
6.4.3.1. Le modèle expérimental de Terzaghi . . . . .	130
6.4.3.2. La méthode ATV A161 . . . . .	131
6.4.3.3. Le modèle de Léonards . . . . .	132
6.4.3.4. Recommandations pour le calcul des charges verticales . . . . .	133
6.4.4. Les charges horizontales de sol . . . . .	135
6.4.5. Les surcharges . . . . .	136
6.4.5.1. Les surcharges permanentes . . . . .	136
6.4.5.2. Les surcharges de circulation . . . . .	137
6.4.6. Les pressions hydrauliques : présence d'une nappe phréatique . . . . .	141
6.4.7. Contraintes admissibles dans les tuyaux . . . . .	143
6.5. Les fluides de forage . . . . .	143
6.5.1. Généralités . . . . .	143

6.5.2. Critères de sélection . . . . .	145
6.5.3. Produits utilisés. . . . .	146
6.5.4. Recyclage et traitement . . . . .	147
6.5.5. Mise en œuvre sur chantier. . . . .	148
6.5.6. Traitement des boues : aspects techniques et réglementaires . . . . .	148
6.5.6.1. Considérations générales. . . . .	148
6.5.6.2. Réglementation en vigueur . . . . .	150
6.5.6.3. Filières d'élimination des résidus de forage . . . . .	151
6.5.6.4. Perspectives de valorisation . . . . .	153
<b>Chapitre 7. Recommandations pour la conduite du chantier. . . . .</b>	<b>155</b>
7.1. Recommandations concernant le guidage. . . . .	155
7.1.1. Nécessité de maîtriser les écarts de trajectoire . . . . .	155
7.1.2. Recommandations pour la mesure des déviations . . . . .	156
7.1.3. Recommandations pour le contrôle des déviations. . . . .	157
7.1.3.1. Réglages initiaux et début du fonçage . . . . .	157
7.1.3.2. Corrections en cours de fonçage . . . . .	157
7.1.3.3. Réglage de la surcoupe . . . . .	158
7.2. Recommandations sur les paramètres de foration . . . . .	159
7.2.1. Eviter l'instabilité du front de taille. . . . .	159
7.2.2. Eviter les surpoussées en tête et le blocage de la roue de coupe . . . . .	160
7.2.3. Contrôler le roulis . . . . .	161
7.3. Recommandations sur la lubrification. . . . .	161
7.4. Recommandations concernant les interruptions de fonçage. . . . .	162
7.4.1. Prévoir l'augmentation de la poussée au redémarrage. . . . .	162
7.4.2. Limiter l'augmentation de la poussée au redémarrage. . . . .	163
7.5. Acquisition de données en cours de réalisation . . . . .	164
<b>Chapitre 8. Aspects socio-économiques et contractuels . . . . .</b>	<b>165</b>
8.1. Aspects socio-économiques : notion de coût social. . . . .	165
8.1.1. Valeur des chantiers urbains modernes. . . . .	166
8.1.1.1. Coût global des travaux . . . . .	166
8.1.1.2. Coût direct . . . . .	166
8.1.1.3. Coût indirect . . . . .	166
8.1.1.4. Coût social . . . . .	167
8.1.2. Chantiers traditionnels urbains : facteurs de nuisance . . . . .	167
8.1.2.1. Gêne de circulation . . . . .	167
8.1.2.2. Dégradation de l'environnement . . . . .	168
8.1.2.3. Risques d'accident . . . . .	169
8.1.2.4. Conséquences économiques . . . . .	169
8.1.3. Réduction des nuisances par les techniques sans tranchée . . . . .	170
8.1.4. Méthodes d'évaluation du coût social . . . . .	173

8.1.4.1. Méthodes dans un contexte autre que celui des chantiers urbains . . . . .	173
8.1.4.2. Approches dans le cadre des chantiers souterrains urbains . . . . .	175
8.1.4.3. Méthodologie de comparaison des coûts des techniques avec et sans tranchée . . . . .	177
8.1.5. Autres propositions pour réduire le coût social . . . . .	184
8.1.5.1. Cartes de sensibilité. . . . .	184
8.1.5.2. Incitations financières . . . . .	185
8.1.6. Conclusions . . . . .	185
8.2. Aspects contractuels : objectifs et facteurs de réussite . . . . .	187
8.2.1. Contractualisation correcte d'un projet de microtunnelage . . . . .	187
8.2.1.1. Des rôles respectifs bien définis . . . . .	187
8.2.1.2. Une gestion des risques appropriée . . . . .	189
8.2.1.3. Connaissance de la structure et de l'occupation du sous-sol . . . . .	192
8.2.1.4. Un allotissement et un mode de passation adaptés. . . . .	192
8.2.2. Etablissement d'un DCE et d'un règlement de consultation appropriés . . . . .	193
8.2.2.1. Un DCE rédigé à partir d'une stratégie définie. . . . .	193
8.2.2.2. Spécifications adaptées à chaque pièce du DCE . . . . .	194
8.2.2.3. Un projet correctement décrit . . . . .	194
8.2.2.4. Des produits bien dimensionnés et adaptés . . . . .	198
8.2.2.5. Des procédés de microtunnelage bien définis et maîtrisés . . . . .	198
8.2.3. Remise par l'entrepreneur d'offres conformes et pertinentes. . . . .	199
8.2.3.1. Des qualifications appropriées . . . . .	199
8.2.3.2. Des références suffisantes et adaptées . . . . .	201
8.2.3.3. Un mémoire technique complet et explicite . . . . .	201

<b>Annexe 1. Lexique des symboles utilisés . . . . .</b>	<b>203</b>
--	------------

<b>Annexe 2. Réglementations sur les déchets . . . . .</b>	<b>207</b>
--	------------

<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>215</b>
--------------------------------	------------